

# NETZERO DE ALTA DENSIDAD

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y ENERGÍAS RENOVABLES APLICADO A VIVIENDA  
COLECTIVA EN COLOMBIA

Doctorando:

**SERGIO ALFONSO BALLÉN ZAMORA**

Directora:

**MONTSERRAT BOSCH GONZÁLEZ**



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE LA ARQUITECTURA  
DOCTORADO EN TECNOLOGÍA DE LA ARQUITECTURA, EDIFICACIÓN Y URBANISMO

BARCELONA, ESPAÑA, 24 DE SEPTIEMBRE DE 2021

## TABLA DE CONTENIDO

### 1. INTRODUCCIÓN

<b>1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION</b> .....	12
1.1.1. <i>Panel Intergubernamental de Cambio Climático</i> .....	19
1.1.2. <i>Problemática</i> .....	20
1.1.3. <i>Objetivo general y específicos</i> .....	22
1.1.4. <i>Hipótesis</i> .....	23
<b>1.2 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO</b> .....	24
1.2.1. <i>Bibliografía del capítulo</i> .....	25

### 2. MARCO REFERENCIAL

<b>2.1 MARCO METODOLOGICO</b> .....	28
<b>2.2 MARCO TEÓRICO</b> .....	33
2.2.1. <i>Energía embebida</i> .....	33
2.2.2. <i>Análisis de ciclo de vida</i> .....	36
2.2.3. <i>Energías renovables</i> .....	38
2.2.4. <i>Edificios neto cero o de consumo de energía casi nulo (EECN o NetZero EB)</i> .....	40
<b>2.3 MARCO NORMATIVO</b> .....	43
2.3.1. <i>Análisis de ciclo de vida</i> .....	43
2.3.2. <i>Renovables en Colombia</i> .....	45
<b>2.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO</b> .....	48
2.4.1. <i>Bibliografía del capítulo</i> .....	51

### 3. ENERGIAS RENOVABLES

<b>3.1 FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGIA RENOVABLE</b> .....	56
3.1.1. <i>Aplicación en edificios de vivienda</i> .....	59
3.1.2. <i>Paneles fotovoltaicos</i> .....	64
3.1.3. <i>Turbinas de baja potencia (aerogeneradores minieólicos)</i> .....	68
3.1.4. <i>Biomasa</i> .....	72
3.1.5. <i>Colectores solares</i> .....	75
<b>3.2 ENERGIAS RENOVABLES EN COLOMBIA</b> .....	77
<b>3.3 NETZERO EB Y VIVIENDAS</b> .....	80
<b>3.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO</b> .....	84
3.4.1. <i>Bibliografía del capítulo</i> .....	87

### 4. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE CICLO DE VIDA

<b>4.1 ANALISIS DE CICLO DE VIDA</b> .....	92
4.1.1. <i>Categorías de impacto</i> .....	94
4.1.2. <i>Metodología de ACV</i> .....	96
4.1.3. <i>Declaraciones ambientales de producto DAPs</i> .....	104

<b>4.2 CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS DE RENOVABLES Y TIPOS DE ENERGÍA</b>	106
<b>4.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO</b>	110
4.3.1. <i>Bibliografía del capítulo</i>	111

## **5. APLICACIÓN DEL PROTOTIPO**

<b>5.1 OPERACIONES Y PROCEDIMIENTOS DESARROLLADOS</b>	114
<b>5.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ</b>	116
5.2.1. <i>Aspectos generales</i>	116
5.2.2. <i>Parámetros según Res. 549 de 2015</i>	118
<b>5.3 PROYECTOS DE VIVIENDA EN COLOMBIA</b>	121
5.3.1. <i>Materiales y su consumo de energía</i>	123
5.3.2. <i>Prototipo experimental de vivienda como caso de estudio</i>	130
5.3.3. <i>Estimación de la demanda de energía</i>	135
5.3.4. <i>Cantidades de materiales e inventario</i>	143
<b>5.4 INCORPORACION DE SISTEMAS DE ENERGIA RENOVABLE</b>	150
5.4.1. <i>Paneles fotovoltaicos</i>	152
5.4.2. <i>Mini eólica</i>	154
5.4.3. <i>Colectores solares</i>	155
5.4.4. <i>Biomasa</i>	156
5.4.5. <i>Configuración final del prototipo</i>	158
<b>5.5 RESULTADOS</b>	164
5.5.1. <i>Edificio sin energías renovables</i>	173
5.5.2. <i>Edificio con energía renovable mini eólica</i>	176
5.5.3. <i>Edificio con energía renovable fotovoltaica</i>	180
5.5.4. <i>Etapa B6</i>	183
5.5.5. <i>Etapa D</i>	186
5.5.6. <i>Paneles fotovoltaicos y turbina minieólica</i>	191
5.5.7. <i>Energía y carbono embebido y operativo</i>	193
<b>5.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO</b>	198
5.6.1. <i>Bibliografía del capítulo</i>	202

## **6. CONCLUSIONES Y ANEXOS**

<b>6.1 CONCLUSIONES</b>	207
6.1.1. <i>Aportes al cálculo de energía embebida</i>	210
6.1.2. <i>Energía y carbono en el prototipo</i>	212
6.1.3. <i>Hacia los NetZero EB del futuro</i>	215
6.1.4. <i>Futuros campos de estudio</i>	217
<b>6.2 ANEXOS</b>	219
Anexo 1. <i>Bogotá D.C. y su clima</i>	219
Anexo 2. <i>Oferta de vivienda en Bogotá</i>	225
Anexo 3. <i>Tipologías de vivienda colectiva</i>	229
Anexo 4. <i>Características de desempeño energético de la vivienda estrato 3</i>	232
Anexo 5. <i>Planimetría del prototipo de vivienda como caso de estudio</i>	237
Anexo 6. <i>Cálculos de demanda de energía y ACS de vivienda y áreas comunes</i>	240
Anexo 7. <i>Cantidades y especificaciones de materiales</i>	243
Anexo 8. <i>Declaración ambiental de producto</i>	252
Anexo 9. <i>Gráficos y tablas de resultados</i>	283
Anexo 10. <i>Bibliografía completa</i>	317

## LISTA DE SIGLAS Y ABREVIACIONES

ACS	Agua caliente sanitaria
ACV	Análisis de ciclo de vida
AECV	Análisis energético de ciclo de vida
C	Carbono
CC	Cambio climático
CH4	Metano
CIER	Comisión de Integración Energética Regional
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CO <sub>2</sub> eq	Dióxido de Carbono equivalente
CED	Cumulative Energy Demand
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
COP	Pesos Colombianos
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DAP	Declaración ambiental de producto
DNP	Departamento Nacional de Planeación
EE	Energía embebida
EO	Energía operativa
ER	Energía renovable
EECN o NetZero EB	Edificios de consumo de energía casi nulo (NetZero Energy Buildings)
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
FNCER	Fuentes no Convencionales de Energía Renovable
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GWP	Global warming potential o Potencial de cambio climático
ICV	Inventario de ciclo de vida
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
IPSE	Instituto de planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas
IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables
MME	Ministerio de Minas y Energía
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PROURE	Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía
RCP	Regla de categoría de producto
RCD	Residuos de construcción y demolición
RSOU	Residuos sólidos orgánicos urbanos
SMMLV	Salario mínimo mensual legal vigente
SIN	Sistema interconectado nacional
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
VIS	Vivienda de interés social (vivienda protegida)
ZC	Zonas comunes internas



## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. La casa solar del futuro, por Popular Science en marzo de 1949. Fuente: <a href="https://www.popsoci.com/how-to-stash-sunlight/">https://www.popsoci.com/how-to-stash-sunlight/</a> .....	12
Ilustración 2. Promedios climáticos y de precipitaciones anuales para Bogotá y Medellín. Recuperado de: <a href="http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc">http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc</a> .....	31
Ilustración 3. Diagrama de flujo energético de edificios LC-ZEB. Fuente: Hernández and Kenny, 2009; citado por Muñoz, 2013. ....	38
Ilustración 4. Diagrama de requisitos para edificios NetZero. Fuente: González, 2018.....	41
Ilustración 5. Resumen normativo colombiano en energías renovables. Fuente: <a href="http://www.sercolombia.org/index.php/energias-renovables/normatividad">http://www.sercolombia.org/index.php/energias-renovables/normatividad</a> .....	47
Ilustración 6. Conceptos y tipos relacionados con energía operativa y embebida. Fuente: Elaboración propia. ....	49
Ilustración 7. Fuentes de energía. Fuente: Elaboración propia con base en <a href="http://ticsenlaiedr.blogspot.com/2014/08/las-fuentes-de-energia.html">http://ticsenlaiedr.blogspot.com/2014/08/las-fuentes-de-energia.html</a> .....	56
Ilustración 8. Energía renovable global a 2100 y Capacidad global por región en 2015. Fuente: solarwirtschaft.de WBGU 2003 - <a href="https://public.tableau.com/profile/irena.resource#!/">https://public.tableau.com/profile/irena.resource#!/</a> ....	57
Ilustración 9. Incorporación de renovables en la edificación. Fuente: Irena, 2016 .....	60
Ilustración 10. Capacidad instalada de SF en el mundo 2000-2015. Fuente: <a href="https://public.tableau.com/profile/irena.resource#!/">https://public.tableau.com/profile/irena.resource#!/</a> .....	65
Ilustración 11. Composición de un sistema de paneles fotovoltaicos autónomo y ejemplo instalado. Fuente: App Construye 2020, <a href="https://www.straitstimes.com/singapore/environment/solar-energy-to-meet-4-of-singapores-energy-demand-by-2030-up-from-less-than-1">https://www.straitstimes.com/singapore/environment/solar-energy-to-meet-4-of-singapores-energy-demand-by-2030-up-from-less-than-1</a> .....	67
Ilustración 12. Mini turbinas eólicas instaladas en edificios. Fuente: <a href="https://www.solaripedia.com/13/297/3330/twelve_west_wind_turbines.html">https://www.solaripedia.com/13/297/3330/twelve_west_wind_turbines.html</a> , <a href="https://www.bgp.ch/en/news/elbarkaden-receive-eco-label-hafencity-gold">https://www.bgp.ch/en/news/elbarkaden-receive-eco-label-hafencity-gold</a> .....	70
Ilustración 13. Biomasa de baja potencia instalada en edificios. Fuente: <a href="https://www.ecointeligencia.com/2015/01/guia-biomasa-para-tu-casa-5/">https://www.ecointeligencia.com/2015/01/guia-biomasa-para-tu-casa-5/</a> , <a href="http://ukrfuel.com/news-wood-pellet-boilers-66.html">http://ukrfuel.com/news-wood-pellet-boilers-66.html</a> .....	73
Ilustración 14. Composición de un sistema de colectores solares y ejemplo instalado. Fuente: App Construye 2020, <a href="https://solsumenergy.in/commercial-solar-water-heater.php">https://solsumenergy.in/commercial-solar-water-heater.php</a> .....	76
Ilustración 15. Proyectos de generación de energía renovable a gran escala en Colombia. Fuente: Portafolio, 2018.....	77
Ilustración 16. Casa Solar MIT I y la Dover Sun House. Fuente: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pioneering_solar_buildings">https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pioneering_solar_buildings</a> , <a href="https://www.elmundo.es/baleares/2016/04/29/57238bc3e2704eeb408b464c.html">https://www.elmundo.es/baleares/2016/04/29/57238bc3e2704eeb408b464c.html</a> .....	80
Ilustración 17. Porcentaje de edificios residenciales NETZERO EB en Europa. Fuente: <a href="http://www.zebra-monitoring.enerdata.eu/">http://www.zebra-monitoring.enerdata.eu/</a> .....	81
Ilustración 18. Opciones de energía renovable de acuerdo al potencial y tipo de ciudad. Fuente: Irena, 2016 .....	83
Ilustración 19. Definición y alcance del Análisis de Ciclo de vida. Fuente: Ballén et al, 2016 .....	93
Ilustración 20. Aspectos metodológicos del Análisis del ciclo de vida. Fuente: Ballén et al, 2016, e ISO 14040.....	97
Ilustración 21. Límites del sistema de ciclo de vida para edificios según el estándar EN 15804. Fuente: PCR UN CPC531 2014:02 .....	98
Ilustración 22. Tipos de energía, transformación y usos. Fuente: Ballén et al, 2016.....	106
Ilustración 23. Diagrama u hoja de ruta de procedimientos desarrollados. Fuente: Elaboración propia ..	114
Ilustración 24. Estratificación socio económica de Bogotá. Fuente: <a href="https://elpais.com/internacional/2018/04/20/colombia/1524176587_818282.html">https://elpais.com/internacional/2018/04/20/colombia/1524176587_818282.html</a> .....	121
Ilustración 25. M <sup>2</sup> aprobados para vivienda por tipo y Distribución del área aprobada según estrato. Fuente: DANE, 2019.....	122
Ilustración 26. Tipologías morfológicas y de implantación en la vivienda colectiva. Fuente: Elaboración propia con base en Ballén, 2010.....	131
Ilustración 27. Planta arquitectónica hipotética. Fuente: Elaboración propia con base en proyectos registrados en la oferta actual.....	132
Ilustración 28. Volumetría 3D y planta de la tipología en Design Builder. Fuente: Elaboración propia, usando el software Design Builder.....	134

Ilustración 29. Velocidad viento máxima energía. Fuente: Elaboración propia con base en <a href="http://atlas.ideam.gov.co/">http://atlas.ideam.gov.co/</a> .....	135
Ilustración 30. Radiación global horizontal. Fuente: Elaboración propia con base en <a href="http://atlas.ideam.gov.co/">http://atlas.ideam.gov.co/</a> .....	135
Ilustración 31. Esquemas de instalación para abastecimiento por ER. Fuente: Elaboración propia.....	152
Ilustración 32. Promedio mensual de radiación en Bogotá y distancia entre paneles. Fuente: <a href="http://www.ideam.gov.co">www.ideam.gov.co</a> - C- Zeggaf, Itimad. 2015. Estudio de la autosuficiencia energética de una vivienda unifamiliar .....	153
Ilustración 33. Cubierta del edificio explorando las posibilidades con fotovoltaica, mini eólica, y colectores. Fuente: Elaboración propia .....	156
Ilustración 34. Cubierta del edificio aplicando los escenarios con ER escogidos. Fuente: Elaboración propia .....	159
Ilustración 35. Clasificación propuesta de conceptos relacionados con energía embebida. Fuente: Elaboración propia .....	211
Ilustración 36. Clasificación propuesta de conceptos relacionados con energía operativa y excedente. Fuente: Elaboración propia .....	211

## LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1. Capacidad de generación eléctrica del sistema interconectado colombiano. Fuente: UPME, 2015 .....	79
Gráfico 2. Resumen de valores meteorológicos de Bogotá. Fuente: Weather Tool de Autodesk.....	117
Gráfico 3. Sistemas constructivos en Colombia para VIS y No VIS. Fuente: Construdata, 2013.....	123
Gráfico 4. Consumo de materiales para vivienda por sistema constructivo. Fuente: Ecoingeniería, 2012 .....	124
Gráfico 5. Proyección nacional de consumo de materiales, consumo energía y emisiones de CO <sub>2</sub> para el sistema industrializado. Fuente: Ecoingeniería, 2012.....	124
Gráfico 6. Consumo de energía y consumo de energía eléctrica en el sector residencial urbano en Colombia. Fuente: UPME, 2016 .....	126
Gráfico 7. Consumo de energía final en edificios residenciales a nivel global. Fuente: Cambio de colores sobre la base de Lucon et al, 2014 .....	126
Gráfico 8. Consumo y costo de energía viviendas estrato 3 y 4 según parámetros de la Resolución 549 de 2015. Fuente: SDP, 2018 .....	127
Gráfico 9. Tipo de vivienda y promedio de consumo de energía residencial por estrato en ciudades colombianas > a 2000 msnm. Fuente: Corpoema, 2012 .....	127
Gráfico 10. Consumo de electricidad residencial en el mundo 2010 (kWh/año). Fuente: <a href="http://shrinkthatfootprint.com/average-household-electricity-consumption">http://shrinkthatfootprint.com/average-household-electricity-consumption</a> .....	129
Gráfico 11. Horas de uso al día de electrodomésticos en una vivienda. Fuente: Elaboración propia.....	136
Gráfico 12. Horas de uso al día de equipos en zonas comunes interiores. Fuente: Elaboración propia ...	138
Gráfico 13. Consumo de energía eléctrica y emisiones de CO <sub>2</sub> mensuales para un piso completo. Fuente: Elaboración propia en el software Design Builder .....	139
Gráfico 14. Temperatura de confort y ganancias internas mensuales en piso completo. Fuente: Elaboración propia en el software Design Builder.....	140
Gráfico 15. Consumo de energía eléctrica y emisiones de CO <sub>2</sub> mensuales en un apartamento. Fuente: Elaboración propia en el software Design Builder .....	141
Gráfico 16. Temperatura de confort y ganancias internas mensuales en un apartamento. Fuente: Elaboración propia en el software Design Builder.....	142
Gráfico 17. Descripción del uso de materiales en el edificio en peso (%), por categoría de componentes. Fuente: Elaboración propia.....	144
Gráfico 18. Tres tipos de generación / consumo para el balance de la energía por renovables. Fuente: Elaboración propia.....	150
Gráfico 19. Frecuencia y velocidad de vientos en Bogotá. Fuente: Elaboración propia .....	154
Gráfico 20. Demanda y aporte de ER por las tecnologías seleccionadas. Fuente: Elaboración propia. ...	159
Gráfico 21. Aporte y balance de generación de energía renovable para los paneles fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia.....	159
Gráfico 22. Aporte y balance de generación de energía renovable para la turbina minieólica. Fuente: Elaboración propia.....	160

Gráfico 23. Generación de energía respecto demanda de ZC con paneles fotovoltaicos (arriba) y la turbina mini eólica (abajo) en kw día. Fuente: Elaboración propia .....	161
Gráfico 24. Comparación de caracterización en % con metodología ReCiPe de ACV del edificio sin renovables y con renovable minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro .....	164
Gráfico 25. Comparación de caracterización en % con metodología CML de ACV del edificio sin renovables y con renovable minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro .....	165
Gráfico 26. Comparación de caracterización en % con metodología CED de ACV del edificio sin renovables y con renovable minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro .....	166
Gráfico 27. Ponderación con metodología CED de ACV del edificio sin renovables y con renovable minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro .....	167
Gráfico 28. Comparación de emisiones de CO <sub>2</sub> eq entre las metodologías ReCiPe y CML en las etapas de ciclo de vida del edificio y en los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	168
Gráfico 29. Comparación entre tipo de energía de origen fósil y renovables en las etapas de ciclo de vida del edificio y en los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia .....	169
Gráfico 30. Proporción de origen de la energía total consumida por el edificio con minieólica (izquierda) y con fotovoltaica (derecha) en todas sus etapas de ciclo de vida. Fuente: Elaboración propia .....	169
Gráfico 31. Emisiones de CO <sub>2</sub> eq por Kwh requerido en las etapas de ciclo de vida del edificio y en los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia .....	169
Gráfico 32. Contribución e inventario de caracterización representativos de energías renovables no convencionales según metodología CED para los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia .....	170
Gráfico 33. Contribución e inventario de caracterización representativos de la categoría “cambio climático” según metodología ReCiPe para los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	171
Gráfico 34. Caracterización en % con metodología ReCiPe de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	174
Gráfico 35. Caracterización en % con metodología CML de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	175
Gráfico 36. Ponderación con metodología CED de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	175
Gráfico 37. Puntuación única con metodología CED de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	176
Gráfico 38. Caracterización en % con metodología ReCiPe de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	177
Gráfico 39. Caracterización en % con metodología CML de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	178
Gráfico 40. Ponderación con metodología CED de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	178
Gráfico 41. Puntuación única con metodología CED de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	179
Gráfico 42. Caracterización en % con metodología ReCiPe de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	180
Gráfico 43. Caracterización en % con metodología CML de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	181
Gráfico 44. Ponderación con metodología CED de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	181
Gráfico 45. Puntuación única con metodología CED de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	182
Gráfico 46. Caracterización en % con metodología ReCiPe de etapa B6 del edificio con energía minieólica (arriba) y fotovoltaica (abajo). Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	184
Gráfico 47. Caracterización en % con metodología CML de etapa B6 del edificio con energía minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.....	184
Gráfico 48. Ponderación con metodología CED de etapa B6 del edificio con energía minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.....	185
Gráfico 49. Contribución e inventario de caracterización representativos de energías renovables no convencionales según metodología CED para la etapa B6. Fuente: Elaboración propia.....	185

Gráfico 50. Contribución e inventario de caracterización representativos de la categoría “cambio climático” según metodología ReCiPe para la etapa B6. Fuente: Elaboración propia .....	186
Gráfico 51. Caracterización en % con metodología ReCiPe de etapa D del edificio con energía minieólica (arriba) y fotovoltaica (abajo). Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	188
Gráfico 52. Caracterización en % con metodología CML de etapa D del edificio con energía minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia .....	188
Gráfico 53. Ponderación con metodología CED de etapa D del edificio con energía minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia .....	189
Gráfico 54. Contribución e inventario de caracterización representativos de energías renovables no convencionales según metodología CED para la etapa D. Fuente: Elaboración propia .....	189
Gráfico 55. Contribución e inventario de caracterización representativos de la categoría “cambio climático” según metodología ReCiPe para la etapa D. Fuente: Elaboración propia.....	190
Gráfico 56. Comparación de caracterización en % con metodología ReCiPe de los equipos de minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	192
Gráfico 57. Comparación de caracterización en % con metodología CML de los equipos de minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	192
Gráfico 58. Comparación de ponderación con metodología CED de los equipos de minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro.....	193
Gráfico 59. Proporción de energía (izquierda) y carbono (derecha) embebidos en el prototipo en cada etapa de ciclo de vida. Fuente: Elaboración propia.....	194
Gráfico 60. Energía y carbono embebidos en el prototipo en los 3 escenarios, no incluye B6. Fuente: Elaboración propia.....	195
Gráfico 61. Variaciones de energía y carbono operativos en los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	196
Gráfico 62. Variaciones de energía y carbono exportados en los escenarios con ER. Fuente: Elaboración propia.....	197
Gráfico 59. Valores a reportar frente a los tipos de generación / consumo para el balance. Fuente: Elaboración propia.....	212
Gráfico 64. Diferencia de energía y emisiones de CO <sub>2</sub> eq embebidos y operativos en el prototipo respecto el escenario sin renovables. Fuente: Elaboración propia .....	213
Gráfico 65. Aportes totales de energía y carbono embebidos en los escenarios con ER. Fuente: Elaboración propia.....	214

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Número de paneles necesarios. Fuente: Aguilera & Hontoria (s.f.) .....	67
Ecuación 2. Potencia requerida de los paneles. Fuente: Rodríguez, Cadena, & Aristizábal, 2015 .....	68
Ecuación 3. Potencial energético aprovechable del viento. Fuente: Torres, 2015.....	71

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de paneles fotovoltaicos y de inversores de distintos fabricantes. Fuente: Aristizábal, Botero & Gordillo, 2010 .....	68
Tabla 2. Entradas que componen la matriz energética colombiana según Ecoinvent. Fuente: Elaboración propia con base en Ecoinvent 3.5 .....	79
Tabla 3. Clasificación de sistemas de ER según su capacidad de generación. Fuente: Osma et al, 2015 ..	82
Tabla 4. Categorías de impacto requeridas por la RCP para edificios. Fuente: PCR UN CPC531 2014:02 .....	95
Tabla 5. Áreas urbanas construidas más grandes del mundo. Fuente: Wendell Cox Consultancy, 2019.	116
Tabla 6. Objetivos de diseño por clima en Colombia. Fuente: Guía de ahorro de agua y energía. Resolución 549 de 2015 .....	118
Tabla 7. Línea base de consumo y % de ahorro de energía para clima frío en Colombia. Fuente: Guía de ahorro de agua y energía. Resolución 549 de 2015 .....	119

Tabla 8. Área construida (m <sup>2</sup> ) Bogotá para VIS y No VIS en 2011 según sistema constructivo. Fuente: Ecoingeniería, 2012.....	124
Tabla 9. Materiales más usados en vivienda social según el clima. Fuente: Osma et al, 2015. Traducción del autor.....	125
Tabla 10. Consumo promedio e indicador por área de viviendas por estrato > 2000 msnm. Fuente: Elaboración propia con datos de Corpoema (2012). .....	128
Tabla 11. Consumo promedio e indicador por área de viviendas por estrato < 1000 msnm. Fuente: Elaboración propia con datos de Corpoema (2012). .....	128
Tabla 12. Promedio de consumo anual residencial en Bogotá según el SUI. Fuente: Elaboración propia con datos del SUI .....	129
Tabla 13. Parámetros y consumos de energía según línea base para viviendas de estratos 3 y 4. Fuente: SDP, 2019 .....	134
Tabla 14. Total de consumo de energía y costos de una vivienda. Fuente: Elaboración propia.....	137
Tabla 15. Total de consumo de energía y costos de las zonas comunes interiores. Fuente: Elaboración propia.....	138
Tabla 16. Promedios de consumo eléctrico anuales de una vivienda por diferentes fuentes. Fuente: Elaboración propia. ....	143
Tabla 17. Cantidad de materiales por m2 según categoría principal de clasificación. Fuente: Elaboración propia.....	145
Tabla 18. Cantidad de materiales según categoría secundaria de clasificación. Fuente: Elaboración propia .....	145
Tabla 19. Inventario de ciclo de vida del prototipo de edificio residencial. Fuente: Elaboración propia. ....	147
Tabla 20. Datasets aplicados por etapa según el caso, Mini eólica o Fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.....	147
Tabla 21. Emisiones en Kg según unidad por cada categoría de impacto. Fuente: Elaboración propia... ..	149
Tabla 22. Parámetros iniciales para el cálculo de paneles fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia .....	153
Tabla 23. Parámetros iniciales para el cálculo de mini eólica. Fuente: Elaboración propia.....	155
Tabla 24. Parámetros iniciales para el cálculo de colectores solares. Fuente: Elaboración propia.....	155
Tabla 25. Parámetros iniciales y cálculo de biomasa. Fuente: Elaboración propia .....	157
Tabla 26. Matriz de resumen de características entre las alternativas de ER. Fuente: Elaboración propia .....	158
Tabla 27. Prestaciones energéticas de los paneles fotovoltaicos y la turbina mini eólica. Fuente: Elaboración propia .....	160
Tabla 28. Características técnicas de los paneles fotovoltaicos y la turbina mini eólica. Fuente: Elaboración propia .....	162
Tabla 29. Comparación de características entre una mini turbina y una turbina de gran escala. Fuente: Elaboración propia .....	162
Tabla 30. Entradas y salidas en la modelación de dataset asociado a mini turbina eólica. Fuente: Elaboración propia con base en datos de Ecoinvent.....	163
Tabla 31. Comparación de resultados de caracterización entre las categorías de impacto seleccionadas para los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	167
Tabla 32. Totales de energía (izquierda) y emisiones de CO <sub>2</sub> eq (derecha) embebidos en el prototipo. Fuente: Elaboración propia.....	194
Tabla 33. Totales de energía (izquierda) y emisiones de CO <sub>2</sub> eq (derecha) operativos en el prototipo. Fuente: Elaboración propia.....	195
Tabla 34. Totales de energía (izquierda) y emisiones de CO <sub>2</sub> eq (derecha) exportados en el prototipo. Fuente: Elaboración propia.....	197
Tabla 35. Diferencia de energía y emisiones de CO <sub>2</sub> eq embebidos y operativos en el prototipo respecto el escenario sin renovables. Fuente: Elaboración propia.....	213

# 1. INTRODUCCIÓN

Debido a que el uso de combustibles de origen fósil es uno de los mayores responsables de las emisiones de carbono y el cambio climático a nivel mundial, una de las premisas de los objetivos de desarrollo sostenible declarados por la ONU y diferentes agendas internacionales es reducir su consumo y fomentar el desarrollo de fuentes no convencionales de energía ya que reducirían en buena medida las emisiones de carbono. La implementación de estas tecnologías en el sector de la construcción aún está en proceso de asimilación, pero ya se cuenta con una buena cantidad de ejemplos, políticas y productos que alientan el potencial económico que generan, además de reducir los impactos ambientales.

Los NetZero EB o edificios de consumo de energía casi nulo, son edificios de altas prestaciones energéticas que se imponen como tendencia mundial de la construcción en la búsqueda de reducir la energía operativa y consecuentemente las emisiones de CO<sub>2</sub>, que es un impacto ambiental de alta preocupación porque es uno de los gases de efecto invernadero, y, por tanto, existen agendas que abogan por su reducción, incluyendo los ya mencionados objetivos de desarrollo sostenible. Sin embargo, la energía y emisiones no solo se dan en la etapa operativa, sino en todo el ciclo de vida del edificio, que es lo que se denomina como energía embebida o carbono embebido.

Una de las características de estos edificios es la incorporación de tecnologías de energía renovable de pequeña escala para generar parte o toda la energía demandada por el mismo, lo cual produce menos emisiones que usar la energía de la red pública, además de lo que supone la construcción y mantenimiento de la infraestructura energética nacional y local. Actualmente las tecnologías de mayor aplicación en esta escala son los paneles fotovoltaicos, las turbinas mini eólicas, la biomasa, la geotermia, y los colectores solares; cada una de estas tecnologías cuenta con sus propias características, requerimientos del entorno, y también, impactos ambientales producidos en su fabricación, mantenimiento y fin de vida.

La vivienda es el uso edificatorio más común y que prospera en las ciudades de todo el mundo porque es pieza fundamental de nuestro sistema urbano y social. Esto nos lleva a suponer que la aplicación de características NetZero en estos edificios tiene mucho potencial tanto ambiental como económico, más aún cuando se da en grandes densidades a través de la vivienda colectiva o bloques de pisos, en provecho del suelo y de las áreas ya urbanizadas.

Bajo este contexto, el análisis de ciclo de vida es una metodología estandarizada pero relativamente nueva en la escala de la edificación que permite cuantificar diferentes impactos ambientales y otras métricas relacionadas con la energía de un edificio en todo su ciclo de vida, es decir, desde la extracción de materias primas para fabricar los materiales que lo componen, pasando por la instalación en la construcción, la operación, mantenimiento, y fin de vida a través de la gestión de los residuos de la demolición. Gracias a esta metodología, es posible calcular y desarrollar un balance energético y de emisiones en todas estas etapas para evaluar cuantitativamente sus beneficios, especialmente los embebidos, con el fin de consolidar a futuro consensos y estudios soportados por las herramientas disponibles.

La reducción de la huella de carbono, reducción y renovabilidad de la energía, son aspectos que deben tomarse en cuenta para alcanzar las metas de desarrollo urbano, y reducir impactos económicos futuros y vulnerabilidad ante las consecuencias del cambio climático.

Si bien los parámetros para considerar un edificio como NetZero están siendo consensuados en diferentes partes del mundo, estos llegarán en un futuro cercano al panorama de la construcción en la ciudad de Bogotá, Colombia, país donde se cuenta con una reglamentación para edificaciones sostenibles y otras relacionadas que incluyen aspectos de ahorro de energía, reducción de emisiones y mitigación del cambio climático; además, la actividad constructora muestra un crecimiento constante que se ve reflejado en múltiples proyectos que están siendo desarrollados.

La evaluación energética y de impactos ambientales a través de análisis de ciclo de vida en proyectos de vivienda proveerían un insumo valioso para el fortalecimiento de las políticas nacionales en construcción sostenible y de eficiencia energética, con el fin de que estos sean reducidos y mitigados, tanto en los edificios como en los entornos urbanos, reduciendo la demanda de combustible tradicional de origen fósil, y al mismo tiempo, aportar al conocimiento con la implementación de criterios metodológicos que sean de utilidad para proyectos de edificación en cualquier parte del mundo que comparta estos intereses.

En ese sentido, a continuación, se explorará un marco referencial que determina los lineamientos metodológicos y teóricos, se verá el panorama de las energías renovables en Colombia, su aplicación en la edificación como componente esencial de los NetZero EB, el análisis de ciclo de vida como herramienta de evaluación ambiental y energética, y todo ello aplicado en un “prototipo experimental” de vivienda colectiva, lo cual requiere la propuesta de ciertos procedimientos técnicos dadas sus características.

Con esta investigación, se busca responder al interrogante sobre la proporción o balance de energía embebida de los equipos de energía renovable de pequeña escala en su ciclo de vida respecto al consumo total del edificio, ya que esta podría no ser compensada por la energía operativa que aportan. Todo a través de un marco estratégico de evaluación que busca proponer alternativas que cumplan los estándares de una edificación NetZero EB y la reducción de su huella de carbono. No obstante, los procedimientos y resultados nos ofrecen un conocimiento exhaustivo sobre características de la energía, de los componentes de la edificación, y de la constitución de los impactos ambientales en el contexto Colombia.



## 1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION

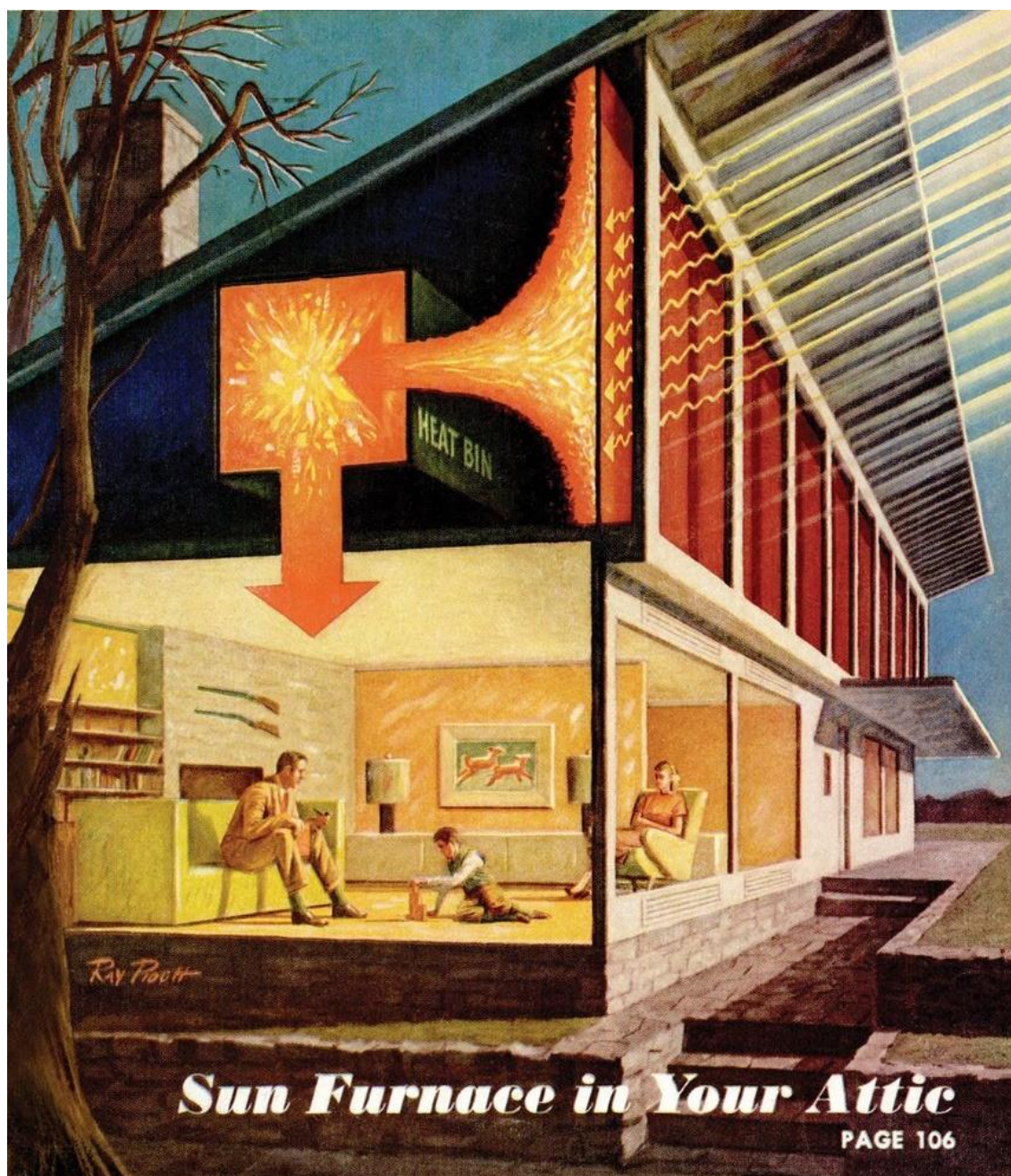


Ilustración 1. La casa solar del futuro, por Popular Science en marzo de 1949. Fuente: <https://www.popsoci.com/how-to-stash-sunlight/>

En marzo de 1949, la revista Popular Science publicaba en su portada una imagen (Ilustración 1) de su tema central que daba cuenta de la expectativa y asombro que generaba el poder del sol como fuente renovable, ya en aquel momento, “al alcance de cualquier hogar”. En ella se puede apreciar como los rayos del sol son captados en el ático de una vivienda unifamiliar, siendo conducidos a una especie de acumulador de energía, la cual es discretamente llevada al interior para suplir las diferentes necesidades de la residencia típica norte americana de mitad del siglo XX.

Hoy, más de 70 años después, se ha desarrollado una gama de tecnologías de pequeña y gran escala que permiten captar la radiación solar y convertirla en diferentes formas de energía, al tiempo que existen otras que aprovechan diferentes fuentes naturales e inagotables de energía, también al alcance de un hogar promedio. Pero también existen otras preocupaciones globales relacionadas con los impactos potenciales en el medio ambiente, como el consumo excesivo de energía, la emisión de gases de efecto invernadero, entre otras.

El sector de la construcción aporta los mayores consumos energéticos con la construcción de edificaciones nuevas; igualmente, las edificaciones terminadas y en uso presentan importantes consumos derivados de la operación. La demanda creciente de construcción de edificaciones para vivienda, comercio e industria, como consecuencia del crecimiento de la población mundial y la ocupación masiva de ella en las ciudades, trae consigo una serie de impactos sociales y ambientales, entre ellos el cambio climático, que deben ser minimizados a través de estrategias que reduzcan los consumos de recursos y de energía, y que contribuyan a ser más efectivas las estrategias de eficiencia energética durante todo el proceso constructivo y de operación en las edificaciones.

De acuerdo con González-Vallejo et al (2015), la actividad constructora es la mayor consumidora de recursos naturales; en Europa se la considera responsable del consumo final del 40% de la energía. *“La construcción y el uso de los edificios en España suponen más del 30% del consumo de energía, principalmente no renovable, 30% de la generación de emisiones de CO<sub>2</sub>, más del 20% de las extracciones de materiales de la corteza terrestre y entre el 30 y el 40% de los residuos sólidos generados”*. En la misma línea, el GABC (2016) advierte que las emisiones de CO<sub>2</sub> de edificios representa entre el 10 y el 20% de la huella de carbono de ese sector.

Los usuarios de las edificaciones también tienen una importante responsabilidad, puesto que durante la etapa de operación se generan consumos que requieren de prácticas conscientes de ahorro de recursos y energías relacionadas con la construcción y de las actividades propias del mantenimiento y de aspectos metabólicos de los ocupantes. De esta manera, una construcción genera impactos por sus consumos energéticos, de recursos, y por la producción de residuos en todas sus etapas, desde la extracción de materias primas, pasando por la demolición, hasta la disposición final y posible reutilización de materiales y estructuras (San Pablo, 2012). Una de estas prácticas, el reciclaje de materiales y elementos de una edificación es una estrategia que claramente permite el ahorro de recursos e insumos, reduce los consumos energéticos y la afectación a los ecosistemas.

Incluso en edificaciones antiguas, la operación puede presentar altos consumos que no siempre son estimados o previstos, asociados con el diseño, implantación, materiales utilizados (y su degradación), instalaciones obsoletas, y posiblemente, condiciones interiores que no contribuyan al bienestar de sus ocupantes.

A su vez, los materiales y elementos constructivos utilizados han pasado por un ciclo similar en su fabricación generando residuos, contaminantes y consumos, que tienen relación directa con su huella ecológica, con la afectación de los suelos, el calentamiento global y la generación de gases y partículas dañinas para los seres vivos, y en todos estos impactos siempre ha habido un consumo energético que es directamente proporcional. Al

respecto, Jaime San Pablo afirma que “... conforme aumenta la eficiencia energética de las edificaciones, su demanda de energía a lo largo de su vida útil tenderá a disminuir [...] Los procesos constructivos requieren elevadas cantidades de materiales de diferentes características en función del uso al que se destinan (estructural, envolvente, acabados, etc.)” (Ibídem).

Este enfoque, que considera los impactos de un producto, servicio o edificio en todo su ciclo de vida más allá de la etapa de uso, es comúnmente denominado como perspectiva de ciclo de vida. En el ámbito normativo y de organizaciones se encuentra estandarizada por la ISO 14001 de 2015, aunque también es considerada como una de las herramientas dentro del “ecodiseño”, que introduce el impacto ambiental y la responsabilidad social como factores clave.

Por tanto, la sostenibilidad aplicada en la arquitectura y la construcción se centra en hacer más eficientes los procesos en todo el ciclo de vida edificatorio para minimizar sus impactos ambientales a corto y largo plazo. Para ello, se desarrollan diferentes aplicaciones en eficiencia energética, siendo la implementación de fuentes no convencionales de energía una de ellas.

La eficiencia energética como estrategia de sostenibilidad en el sector de la construcción está cada vez más aplicada en diferentes proyectos, contemplando los sistemas activos y los pasivos. El implementar energías renovables en lugar de las tradicionales de origen fósil contribuye al alcance de los objetivos de desarrollo sostenible y a los lineamientos de política nacional en el tema. Para el logro de estas iniciativas es necesaria su articulación a través de edificaciones de diferentes usos, incluyendo el uso residencial.

Autores como Chel y Kaushik (2018) distinguen cuatro estrategias principales para la reducción de energía de los edificios, así como sus emisiones de CO<sub>2</sub>, de las cuales, las estrategias 2 y 4 constituyen el enfoque que aborda la presente investigación:

1. Confort en el diseño de edificios pasivos y su orientación para aprovechar la energía solar.
2. Materiales de baja energía embebida en la construcción.
3. Electrodomésticos energéticamente eficientes para conservar la energía operativa.
4. Integrando tecnologías de energías renovables.

En esa misma línea, la Organización de las Naciones Unidas lanzó en 2011 el programa “Sustainable Energy for All (SE4ALL)” con la meta de alcanzar tres objetivos para 2030<sup>1</sup>: (i) asegurar el acceso universal a servicios de energía modernos; (ii) duplicar la tasa global de mejora en eficiencia energética; y (iii) duplicar el uso de fuentes no convencionales de energía.

En el Climate Summit de 2014, SE4ALL, se anunció la puesta en marcha del “Global Energy Efficiency Accelerator Platform”, una asociación entre distintos sectores y gobiernos locales para llevar a cabo, entre otros, la implementación del Building Energy Efficiency Accelerator (Programa BEA), el cual es financiado con recursos del Global Environment Facility (GEF) y con la gestión del World Resources Institute (WRI). La ciudad de Medellín y de Bogotá, ambas en Colombia, forman parte de este programa.

---

<sup>1</sup> <https://www.seforall.org/>

Todas estas iniciativas están enmarcadas en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, documento aprobado por la Asamblea General de las Naciones Unidas el 25 de septiembre de 2015 a través de la resolución A/RES/70/1. En el se establecen los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)<sup>2</sup> junto con 169 metas integradas que se basan en los Objetivos de Desarrollo del Milenio fijados en el año 2000, y que procuran conjugar las dimensiones económica, social, y ambiental, en concordancia con el concepto de desarrollo sostenible aportado por el Informe Brundtland en 1987. Anteriormente, también en 2015, fue aprobado el Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres que tiene vigencia hasta 2030.

A finales de 2015 se llevó a cabo en París, Francia, la XXI Conferencia Internacional de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP21), y la 11ª Conferencia de las Partes en el Protocolo de Kyoto<sup>3</sup>, la cual fue organizada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En el marco de este evento internacional se desarrolló y adoptó el Acuerdo de París por los 175 países miembros<sup>4</sup>, aprobando también la Agenda 2030 y se establecieron medidas y acciones políticas desde el año 2020 hacia la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y la mitigación del fenómeno del calentamiento global.

Cada uno de los ODS está especificado a través de varios indicadores cuantitativos de acuerdo con la resolución de la ONU A/RES/71/313, permitiendo evaluar el desempeño de cada nación frente al acuerdo. Si bien todos los indicadores tienen una naturaleza transversal y diferentes acciones pueden abarcar varios ODS, en la presente investigación se han considerado como marco referencial algunos ODS, junto con sus indicadores y metas:

- ODS 7: Energía asequible y no contaminante

Metas	Indicadores
7.1 De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos	7.1.2 Proporción de la población cuya fuente primaria de energía son los combustibles y tecnologías limpios
7.2 De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas	7.2.1 Proporción de energía renovable en el consumo final total de energía
7.3 De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética	7.3.1 Intensidad energética medida en función de la energía primaria y el PIB
7.a De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias	7.a.1 Corrientes financieras internacionales hacia los países en desarrollo para apoyar la investigación y el desarrollo de energías limpias y la producción de energía renovable, incluidos los sistemas híbridos

- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura

<sup>2</sup> Los ODS se gestaron en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible celebrada en Río de Janeiro en 2012, conocida como Río 2012 o Río+20.

<sup>3</sup> El Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de por lo menos 6 tipos de gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Fue inicialmente adoptado en 1997 en Kioto, Japón, pero entró en vigencia a partir de 2005.

<sup>4</sup> <https://unfccc.int/es/news/175-estados-firman-el-acuerdo-de-paris>

<b>Metas</b>	<b>Indicadores</b>
9.4 De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas	9.4.1 Emisiones de CO <sub>2</sub> por unidad de valor añadido

- ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles

<b>Metas</b>	<b>Indicadores</b>
11.6 De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo	
11.a Apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional	11.a.1 Proporción de la población residente en ciudades que aplican planes de desarrollo urbano y regional que tienen en cuenta las previsiones demográficas y las necesidades de recursos, desglosada por tamaño de ciudad
11.c Proporcionar apoyo a los países menos adelantados, incluso mediante asistencia financiera y técnica, para que puedan construir edificios sostenibles y resilientes utilizando materiales locales	11.c.1 Proporción del apoyo financiero a los países menos adelantados que se asigna a la construcción y el reacondicionamiento con materiales locales de edificios sostenibles, resilientes y eficientes en el uso de recursos

- ODS 12: Producción y consumo responsables

<b>Metas</b>	<b>Indicadores</b>
12.2 De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales	12.2.1 Huella material en términos absolutos, huella material per cápita y huella material por PIB
	12.2.2 Consumo material interno en términos absolutos, consumo material interno per cápita y consumo material interno por PIB
12.a Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles	12.a.1 Cantidad de apoyo en materia de investigación y desarrollo prestado a los países en desarrollo para el consumo y la producción sostenibles y las tecnologías ecológicamente racionales

- ODS 13: Acción por el clima

<b>Metas</b>	<b>Indicadores</b>
13.3 Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana	
	13.3.2 Número de países que han comunicado una mayor creación de capacidad institucional, sistémica e individual para implementar actividades de adaptación, mitigación y transferencia de tecnología, y medidas de desarrollo

Los indicadores tienen como objetivo evaluar estrategias sobre criterios mensurables basados en cálculos numéricos y vectores para acercarnos sin subjetividades al desarrollo sostenible, y por tanto, están en permanente medición y redefinición (Montaner, 2015: 203).

Según la Agencia Francesa de Desarrollo, en 2012, Colombia era el tercer país más vulnerable al cambio climático<sup>5</sup>. Esta condición, sumada a los compromisos adoptados por el gobierno nacional al respecto en la COP21, y normativas como la 2501 de 2007 sobre acciones y reglamentos técnicos de eficiencia energética en sistemas de iluminación y alumbrado público, la Resolución 180919 de 2010 que formuló el Plan de Acción Indicativo del Programa de Uso Eficiente de Energía (Prooure), la Ley 697 de 2001 sobre el uso eficiente de la energía, la Ley 1715 de 2014 que promueve las fuentes de energía no convencionales, y la Resolución 348 de 2017 sobre lineamientos de generación de excedentes a pequeña escala, definitivamente marcan una necesidad y un apoyo al desarrollo de investigaciones en este tema dada su relevancia.

Por otro lado, según el Global Alliance for Buildings and Construction (GABC, 2016), para promover edificios resilientes, con eficiencia energética y cero emisiones de GEI es necesario cumplir varios objetivos, como implementar políticas de planificación urbana para la eficiencia energética, acelerar la mejora del desempeño de edificios existentes, todos los edificios nuevos deben alcanzar un desempeño de emisiones operativas casi nulo, mejorar la gestión de edificios, fomentar la energía descarbonizada, la reducción de la energía embebida y emisiones de GEI, reducir la demanda de energía de electrodomésticos, y reducir los riesgos relacionados con el cambio climático.

Para lograr tales objetivos, de manera transversal y fundamental está presente la implementación de Edificios de consumo de Energía Casi Nulo (EECN) o Nearly Zero Energy Buildings (NZEB), cuyo concepto original los define como edificios de altos estándares de eficiencia energética con un consumo de energía de la red pública cercano a cero gracias a que buena parte de su demanda esta suministrada por energías renovables en sitio y de manera autónoma<sup>6</sup>.

El objetivo relacionado con la reducción de la energía embebida y de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es de especial interés, porque implica reducir los impactos ambientales del edificio desde un enfoque de ciclo de vida aplicado a materiales y equipos, lo cual significa que reducen energía y emisiones desde la extracción de materias primas para la fabricación de los materiales hasta el fin de vida útil de la construcción. Este indicador es difícil de plantear así como su fecha, pero se propone reducir un 50% la huella de CO<sub>2</sub> existente cuya unidad de medida aún está por determinar (GABC, 2016: 21)<sup>7</sup>.

En 2015, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia generó la Resolución 0549 por la cual se reglamentó los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y la adopción de la Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones, refiriéndose a las Fuentes No Convencionales de Energía como estrategia a ser considerada.

---

<sup>5</sup> <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12389073>

<sup>6</sup> Edificios de emisiones operativas Net-Zero: un edificio residencial o de servicios altamente eficiente desde el punto de vista energético que produce in situ, o adquiere, suficiente energía renovable sin carbono para satisfacer el consumo de energía de las operaciones del edificio cada año (GABC, 2016: 25; traducción del autor).

<sup>7</sup> En líneas generales se proponen tres alcances: 1- Desarrollar un enfoque del ciclo de vida en el sector de la construcción, preferiblemente de la cuna a la cuna y garantizando un enfoque sistémico. 2- Promover la adopción de materiales y tecnologías de baja emisión de carbono. 3- Valorando las soluciones vernáculas.



En 2018, el Departamento Nacional de Planeación de Colombia, generó el CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social) 3919 “Política Nacional de Edificaciones Sostenibles” (DNP, 2018a), refiriendo una “Ausencia de definición de criterios de sostenibilidad para edificaciones en todos los usos y dentro de todo el ciclo de vida, y débil implementación de la reglamentación existente”, así como: “Débil información sectorial para el seguimiento al mercado de edificaciones y a la implementación de la normativa existente con criterios de sostenibilidad”. Uno de los planes de acción establecidos por este documento es “Diseñar e implementar instrumentos de política pública que permitan incluir criterios de sostenibilidad para todos los usos y dentro de todas las etapas del ciclo de vida de las edificaciones (Ibídem)”.

Estos documentos CONPES constituyen la ruta de navegación en políticas nacionales. Existen otros documentos relevantes para este trabajo como el CONPES 3934 sobre crecimiento verde, y 3918 sobre implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Colombia. Los Conpes 3919 y 3918 plantean metas asociadas a la movilización de recursos al año 2030 para aumentar la inversión en infraestructura, la cooperación internacional, la investigación y tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables; en cuanto edificaciones, se están impulsando medidas de aumento de la generación de energía limpia según lo dispuesto en la Ley 1715 de 2014, encontrando que el potencial de ahorro en la utilización de energías alternativas en sedes de entidades del Gobierno es del 2.7%.<sup>8</sup>

En ese mismo año (2018) se estableció la Estrategia Nacional de Economía Circular, que propende por la articulación del sector productivo en la reincorporación de recursos al final de su vida útil en las cadenas productivas. Estas iniciativas deben contar con el concurso del sector productivo y la academia, promover grupos o redes de profesionales interesados en los temas de sostenibilidad, dinamizando un uso racional de los recursos naturales y promoviendo las estrategias y conceptos de las edificaciones sostenibles. Una de las herramientas para evaluar posibilidades de reincorporación (circularidad) de un producto al final de su vida útil, así como sus impactos, es el análisis de ciclo de vida; este conocimiento es útil no solo para el sector de la edificación, sino también, para los fabricantes e instaladores de los sistemas de Fuentes no Convencionales de Energía Renovable (FNCER).

Desde el gobierno central colombiano, y en concreto desde el Ministerio del Medio Ambiente, se lidera la consolidación y promoción de aplicación del Sello Ambiental Colombiano como parte de las iniciativas de desarrollo enmarcadas en el marco del Plan Estratégico Nacional de Mercados Verdes, donde se quiere estimular la demanda y suministro de productos y edificaciones que en su ciclo de vida consideren buenas prácticas ambientales propendiendo por el uso racional de los recursos naturales, y mitigando la afectación a los entornos<sup>9</sup>.

Un futuro de etiquetas y certificaciones de eficiencia energética para edificios no solo tendrá en cuenta la disminución de la energía operativa (energía consumida en climatización, electrodomésticos, iluminación, etc.) a través de estrategias activas y pasivas, como lo son los NetZero Energy Building, sino también la reducción de los

---

<sup>8</sup> En el marco normativo, se explica con un poco más de detalle las acciones establecidas para promover las energías renovables en Colombia, según el CONPES 3934 sobre la “Política de crecimiento verde”.

<sup>9</sup> <https://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/sostenibilidad-sectores-productivos/sello-ambiental-colombiano>

impactos ambientales embebidos asociados en todo su ciclo de vida, como la huella de carbono, energía embebida o huella hídrica, e incluye todos los equipos instalados, como por ejemplo, los sistemas de FNCER. Actualmente, en Colombia las certificaciones más aplicadas son EDGE, LEED, CASA y HQE<sup>10</sup>, las cuales otorgan puntaje a los edificios que incorporen energías renovables, entre otras características.

Finalmente, para el autor, esta investigación se ha realizado siguiendo el interés profesional y académico de abordar con profundidad competencias en el ámbito de la arquitectura sostenible, cuyos temas he tenido la oportunidad de abordar previamente a través de consultorías, docencia de posgrado, e investigaciones relacionadas desde hace más de 8 años. Como casi cualquier tema que se aborda con cierto detalle, los límites de las competencias profesionales son cada vez más difusos y se exploran esferas vinculadas originalmente con profesiones puramente ambientales; sin embargo, como arquitecto y diseñador de edificios, opino que poseer estas competencias específicas será cada vez más demandado para contribuir a los objetivos globales de reducción de la energía y de descarbonización en el sector de la construcción.

### **1.1.1. Panel Intergubernamental de Cambio Climático**

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (o IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, por sus siglas en inglés) es una entidad internacional de las Naciones Unidas compuesta por científicos y expertos en cambio climático cuyo objeto es proveer un concepto objetivo y justificado académicamente sobre fuentes secundarias acerca de sus impactos, riesgos, y posibilidades de solución política y económica. Además de recibir el Premio Nobel de la Paz en 2007 junto con el ex vicepresidente de Estados Unidos, Al Gore, a este Panel se le ha encomendado elaborar informes que contribuyan a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

El quinto informe de evaluación (AR5) del IPCC en 2014 fue un aporte científico al Acuerdo de París en 2015 donde se ratificaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Este informe está compuesto por 16 capítulos sobre diversos sectores industriales, tendencias, instrumentos y promotores con potencial hacia la reducción y mitigación del cambio climático, y el desarrollo sostenible.

El noveno capítulo de este informe (Lucon et al, 2014) está dedicado al sector de la edificación, donde además de evaluar costos de implementación, riesgos, políticas sectoriales, barreras y oportunidades, también examina estrategias relacionadas con nuevos edificios, rehabilitación de edificios existentes, electrodomésticos, gases fluorados, evitar sistemas mecánicos, usos de la biomasa, energía embebida y ciclo de vida de los materiales de construcción, impactos por hábitos y estilo de vida, y perspectivas sistémicas frente a las redes de infraestructura.

Además de resaltar que “los edificios representan una pieza crítica de un futuro bajo en carbono y un desafío global para la integración con el desarrollo sostenible” (Ibídem: 677), se hace referencia a las principales estrategias de mitigación y reducción del consumo de energía, entre las que se encuentran los edificios que integran energías

---

<sup>10</sup> <https://edgebuildings.com/?lang=es>, <https://www.usgbc.org/leed>, <https://www.cccs.org.co/wp/casa-colombia/>, <https://www.behqe.com/>



renovables (ER), generación de electricidad fotovoltaica en las cubiertas, estufas de biomasa, los distritos térmicos, efecto de menor consumo de energía durante el ciclo de vida, y los edificios de consumo de energía casi nulo, donde la vivienda multifamiliar de países en desarrollo tiene el potencial de alcanzar ahorros de energía entre 30% y 60% por refrigeración o calefacción respectivamente.

Entre las opciones de tecnología de mitigación y prácticas recomendadas para viviendas nuevas, se refiere a la importancia del área de cubierta para ubicar los equipos de generación de energía, por lo que es necesario que esta mantenga una relación respecto a la demanda de energía del edificio; eso se logra estableciendo un límite en las alturas y en la densidad urbana. En cuanto a energía embebida y ciclo de vida de materiales de construcción, estudios han confirmado que el uso total de energía del ciclo de vida de los edificios eficientes es menor que el de los edificios convencionales a pesar de la energía embebida suele ser mayor en los materiales, así como su amortización, por lo que este aspecto cobra mayor importancia en ciudades con altos índices de construcción.

Finalizando, el documento incentiva a realizar evaluaciones de edificios bajo un enfoque holístico que considera toda la vida útil, incluida la planificación, el análisis del ciclo de vida, y el diseño integrativo. Es posible lograr una mayor mitigación del GWP (Global warming potencial, o Potencial de cambio climático) combinando la incorporación de energías renovables y la sustitución de combustibles fósiles por electricidad baja en carbono. Esto significa un papel cada vez más importante de la descarbonización del suministro de energía, que puede implicar a la denominada “bioenergía” como mecanismo de compensación, al capturar y almacenar dióxido de carbono para reparar las emisiones restantes de los edificios y otros sectores de uso final (Ibidem: 714).

### **1.1.2. Problemática**

De acuerdo con Lucon et al (2014: 678), las emisiones de GEI directas e indirectas del sector de la edificación se han duplicado desde 1970 hasta 2010, alcanzando 9.18 GtCO<sub>2</sub>eq/año, que representa casi el 25% de las emisiones totales mundiales. De estas emisiones, 2.18 GtCO<sub>2</sub>eq/año directas y 3.5 GtCO<sub>2</sub>eq/año indirectas corresponden al sector residencial; la mayoría del total (6.02 Gt), son emisiones indirectas de CO<sub>2</sub> por consumo de electricidad en edificios.

Las emisiones de CO<sub>2</sub>eq<sup>11</sup> son directamente proporcionales al consumo de energía eléctrica, pues la fabricación de la infraestructura de generación eléctrica, más su mantenimiento, funcionamiento y transporte por la red, genera emisiones y pérdidas. En 2010, los edificios residenciales consumieron cerca de 24.3 PWh, lo que representa el 24% del uso total de energía final mundial (respecto a un 8% del uso comercial), de los cuales, la cocina y el calentamiento de agua fueron los usos finales más representativos (AIE, 2013, citado en Lucon et al, 2014) (ver Gráfico 7).

---

<sup>11</sup> Dióxido de carbono equivalente es una unidad de medida dado a la masa total de gases de efecto invernadero según su equivalencia en CO<sub>2</sub>, incluyendo gases con mayor potencial como el metano o los óxidos nitrosos. Esta acordado usar el CO<sub>2</sub> como el equivalente al total de los gases de efecto invernadero porque ha experimentado mayor crecimiento y es el más abundante en la atmósfera terrestre.

*... La migración a las ciudades, la disminución del tamaño de los hogares, el aumento de los niveles de riqueza y los cambios en el estilo de vida, incluido el aumento en el espacio de vida personal, los tipos, cantidad y uso de electrodomésticos y equipos, contribuyen a un aumento significativo en el consumo de energía en los edificios. El rápido desarrollo económico, acompañado de la urbanización y los cambios de la vivienda informal a la formal están impulsando una importante actividad de la construcción en los países en desarrollo (WBCSD, 2007). [...] En los edificios residenciales, tanto el número creciente de hogares como el área por hogar tienden a aumentar el consumo de energía, mientras que la disminución en el número de personas por hogar y el empleo de energía específica tienden a disminuir el consumo de energía (Lucon et al, 2014: 681, 683; traducción del autor).*

En Colombia, las instalaciones de generación de energía renovable en diferentes escalas incluyendo edificaciones, se ha incrementado por los incentivos financieros, el impulso a través de las hojas de ruta en política pública, los precios decrecientes y la aparición de nuevos modelos de negocio relacionados. Los incentivos desde la política designados a diversas industrias aparecen como estrategia pública de eficiencia energética, descarbonización de la economía y mitigación al cambio climático.

Como se vio anteriormente, la aplicación de energías renovables tanto a gran escala (parques eólicos, granjas solares, etc.) como a pequeña escala en edificios y construcciones, son una de las estrategias que cobran mayor fuerza en la agenda del desarrollo sostenible internacional, gestándose una transición de fuentes de energía, donde tradicionalmente están las de origen fósil (que se agotan y de gran impacto ambiental) hacia las renovables que aprovechan los características climáticas y recursos del lugar, y son de bajo impacto. La incorporación de estas tecnologías en edificios reduce su demanda de energía operativa, así como sus emisiones de CO<sub>2</sub> durante su uso, en concordancia con los edificios de consumo de energía casi nulo o NetZero Energy Building.

No obstante, a la hora de desarrollar una evaluación de impactos ambientales embebidos en edificaciones (carbono, energía, huella hídrica, etc.), es común desestimar estos impactos en los equipos de energía renovable porque de manera predeterminada se consideran como benéficos y externos a la edificación. Dependiendo de los materiales que componen estos equipos, pueden traer consigo una carga ambiental embebida producto de su fabricación que entra a compartirla con el edificio una vez son instalados.

Para plantear un edificio bajo en emisiones y energía embebida, se hace necesario conocer los impactos de ciclo de vida asociados al edificio y a los equipos y dispositivos utilizados. Bajo esta perspectiva holística, se requiere generar un conocimiento que permita estimar las posibles cargas y beneficios ambientales para comprobar la eficiencia real de la energía renovable en edificios, buscando que estos sean totalmente neutros en consumo y emisiones, de manera que se articulen con las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las políticas relacionadas en Colombia, cuyo caso experimental en esta investigación es la vivienda colectiva (también llamada multi-unit residential buildings MURBs, por sus siglas en Inglés) debido a su alta demanda energética.

Ante este panorama, surge la pregunta que conduce esta investigación: ¿Existen métodos para calcular el aporte en energía embebida de los equipos de energía renovable a escala residencial y en su ciclo de vida, respecto al consumo total del edificio?

En ese sentido, y tal como lo amplía la hipótesis más adelante, es posible que la energía embebida de los equipos de energía renovable sea tan alta, que la generación de energía no compensa esta energía u otros impactos de un edificio residencial NetZero EB de alta densidad en un periodo de tiempo determinado, un año por ejemplo.

### **1.1.3. Objetivo general y específicos**

Esta investigación se plantea, como objetivo general:

Definir un marco de procedimientos de cuantificación de la energía y carbono embebidos, y el impacto de las fuentes no convencionales de energía renovable de pequeña escala, por medio del análisis de ciclo de vida aplicado a vivienda de alta densidad en la ciudad de Bogotá, Colombia, con el fin de determinar su contribución, así como alternativas de evaluación frente a las características de una edificación NetZero EB (Nearly Zero Energy Buildings) y su huella de carbono.

En cuanto a los objetivos específicos:

- OE 1. Identificar conceptos, marco normativo, demandas y procedimientos técnicos para desarrollar edificios de vivienda que incorporan energías renovables.
- OE 2. Reconocer tecnologías de energía renovable de pequeña escala e iniciativas de identificación de la energía embebida o evaluación de impactos en el ciclo de vida de materiales de construcción en Colombia.
- OE 3. Establecer un conjunto de operaciones conducentes a la evaluación de los comportamientos de demanda energética operativa y de energía embebida en un prototipo de estudio a partir de su diagnóstico. Para ello se recolectará información de consumo de energía y mediante simulación<sup>12</sup>, para determinar su perfil de demanda y cuantificar sus emisiones.
- OE 4. Desarrollar un ACV y recursos argumentativos (conceptos, tablas, gráficos) que faciliten el análisis detallado de la contribución de la energía y carbono a través de la implementación de energías renovables en todo el ciclo de vida del edificio estudiado.
- OE 5. Definir procedimientos de cuantificación y balance energéticos y de emisiones de carbono por ACV, dando cuenta de las ventajas y retos de la aplicación de energías renovables de pequeña escala como característica de los NetZero EB, y específicamente, en un caso hipotético bajo las características típicas de un proyecto de vivienda.

---

<sup>12</sup> Se propone el uso del software Design Builder y/o otros métodos de simulación estática.

#### **1.1.4. Hipótesis**

La complejidad en la estimación de la contribución de energía embebida de los equipos de energía renovable en una edificación es alta, así como de sus magnitudes probables. Sin embargo, el desarrollo de ciertos procedimientos vinculados con el ACV como herramienta base, permiten determinar si esta energía es compensada por la energía renovable generada en un tiempo razonable.

Esta característica podría ser aún más evidente en proyectos residenciales de alta densidad, pues la demanda de energía del edificio es considerable debido al número de viviendas, haciendo de la “compensación” con energías renovables un aporte muy pequeño. A esto hay que agregar que existen características de estos edificios (altura, estructura, etc.), especialmente el área de la cubierta, que podrían variar el desempeño de las renovables.

## 1.2 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Es bien sabido que los edificios, sus materiales y el sector de la construcción en general generan una gran cantidad de impactos ambientales, emisiones (más de 9,18 GtCO<sub>2</sub>eq/año, alrededor del 30%) y consumo de energía a nivel mundial, por tanto, teniendo en cuenta el constante crecimiento urbano y los patrones de operación durante el uso, el potencial global de reducción de dichos impactos está muy ligado a esta industria a corto y largo plazo, incluyendo a los edificios existentes.

Es preciso desarrollar acciones de mitigación y cuantificación con un enfoque de ciclo de vida tanto en materiales como en edificios, que son antecedidas internacionalmente por acciones específicas de fomento como los incentivos financieros, las ecoetiquetas, los bonos de carbono, las estrategias de descarbonización y circularidad, o el establecimiento de las Contribuciones Determinadas Nacionales. Esto requiere el desarrollo de mecanismos de cuantificación, evaluación, monitoreo, reporte y verificación de las cantidades de energía y/o emisiones que se están reduciendo por cuenta de estas acciones para retroalimentar las políticas públicas y acceder a otras formas de incentivo, según los acuerdos para el desarrollo sostenible.

La eficiencia energética es otro aspecto clave, tanto con estrategias pasivas como activas, y donde las energías renovables tienen cierto protagonismo debido a los beneficios escalables que tienen para el logro de los objetivos que exista una transición de fuentes de energía de origen fósil hacia otras que generan menos impactos. En consecuencia, se han desarrollado diferentes programas internacionales que ofrecen apoyo para su implementación, y que ha sido avalados por estudios relacionados. Actualmente, se puede decir que, en Colombia, ya existe una apropiación por parte del mercado, de las energías renovables de pequeña escala y también un primer nivel regulatorio. Sin embargo, aún quedan por resolver retos normativos que dificultan su masificación.

En este contexto, surgen los llamados edificios NetZero EB (EECN) o también llamados edificios de consumo de energía casi nulo, los cuales tienen altos estándares de eficiencia energética y su demanda esta suministrada por energías renovables (una parte o total, dependiendo del alcance). Esta estrategia edificatoria debería comportar claros beneficios de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al reducir la carga sobre la matriz energética, que tradicionalmente está compuesta por combustibles de origen fósil y una infraestructura de gran escala que requiere altos consumos de recursos y también genera emisiones. Profundizar en la reducción de estos impactos será una tendencia e implica considerar una perspectiva de ciclo de vida de los edificios.

Tanto las características de los NetZero EB, como de los programas internacionales y de los objetivos trazados desde la política pública, están enmarcadas por la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y el Acuerdo de París de 2015 donde se ratificó como horizonte común la implementación de los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS). A partir de las metas e indicadores definidos, podemos encontrar aquellas relacionadas con las energías renovables y el análisis de ciclo de vida, como por ejemplo, la “energía asequible y no contaminante”, la “industria, innovación e infraestructura”, “ciudades y comunidades sostenibles”, “producción y consumo responsables”, y “acción por el clima”.

La Agenda 2030 y el Acuerdo de París cuentan con un soporte científico aportado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático IPCC y su quinto informe de evaluación. En él, se hace referencia al potencial de los edificios que integran energías renovables (ER), la cuantificación de la energía embebida, el análisis de ciclo de vida de los materiales, y los NetZero EB o edificios de consumo de energía casi nulo. Estas estrategias proporcionan reducciones y mitigación del Potencial de cambio climático (GWP) expresado en CO<sub>2</sub>eq al implicar a la “bioenergía” o electricidad baja en carbono, entre otros mecanismos de compensación.

Pero, así como los edificios y sus materiales tienen una energía embebida, los equipos de energía renovable de pequeña escala también, lo cual implica que una fracción es cedida al edificio por cuenta de estos equipos; incluso, podría ser posible que la energía embebida de estos equipos sea tan considerable, que no es compensada rápidamente por la energía que generan, especialmente en vivienda de alta densidad donde la demanda es muy alta. Por ello, es necesario generar el conocimiento y afianzar los métodos para determinar este balance, lo cual permitirá tomar medidas correctivas o fomentar las ya existentes.

### **1.2.1. Bibliografía del capítulo**

Congreso de la República de Colombia. Ley 697 de 2001 (octubre 3). Diario Oficial No. 44.573 de 05 de octubre de 2001

Congreso de la República de Colombia. Ley 1715 de 2014 (mayo 13). Diario Oficial No. 49.150 de 13 de mayo de 2014

Chel, A., & Kaushik, G. (2018). Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 655–669. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.027> <Consulta: 09 de julio de 2018>

DNP Departamento Nacional de Planeación, 2018a. Documento CONPES 3919, Política Nacional de Edificaciones Sostenibles. Consejo Nacional de Política Económica y Social. República de Colombia

DNP Departamento Nacional de Planeación, 2018b. Documento CONPES 3934, Política de Crecimiento Verde. Consejo Nacional de Política Económica y Social. República de Colombia

Global Alliance for Buildings and Construction, GABC (2016). Towards Low-GHG and resilient buildings: Global roadmap. UN Environment. <https://globalabc.org/uploads/media/default/0001/01/0d6a71a346ea7e6841b1b29c77eba6d6ae986103.pdf> <Consulta: 04 de octubre de 2018

González-Vallejo, P., Solís-Guzmán, J., Llácer, R., Marrero, M. (2015). La construcción de edificios residenciales en España en el período 2007-2010 y su impacto según el

indicador Huella Ecológica. Informes de la Construcción, 67(539): e111, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.017>

Lucon O., D. Ürge-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L. F. Cabeza, N. Eyre, A. Gadgil, L. D. D. Harvey, Y. Jiang, E. Liphoto, S. Mirasgedis, S. Murakami, J. Parikh, C. Pyke, and M. V. Vilariño, 2014: Buildings. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Edenhofer, O. et al (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ministerio de Minas y Energía. Decreto 348 de 2017 (marzo 01). República de Colombia.

Montaner, Josep (2015). La arquitectura de la vivienda colectiva: políticas y proyectos en la ciudad contemporánea. Editorial Reverté, Barcelona

San Pablo, J. (2012). Análisis del Ciclo de Vida de una vivienda media de la Región de Murcia. Edición electrónica. Máster en Energías Renovables. Murcia, España: Universidad Politécnica de Cartagena. Recuperado de: <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/2856/1/tfm110.pdf>

## 2. MARCO REFERENCIAL



## 2.1 MARCO METODOLOGICO

Según Hernández, Fernández & Baptista (2014), existen principalmente tres enfoques de investigación, el cuantitativo, el cualitativo y el mixto. En el cuantitativo se desarrollan teorías e hipótesis muy acotadas con el propósito de ser medidas rigurosamente para aplicar estadísticas o tendencias que la prueben, por tanto, requiere un desarrollo secuencial y probatorio como fuente de discusión. Por su parte, el enfoque cualitativo plantea conceptos más amplios y un desarrollo subjetivo e inductivo, que no puede ser estrictamente medido ni tener una secuencia lineal, y el papel de la formulación de hipótesis puede llegar a ser permanente de acuerdo al marco referencial. El enfoque mixto es una combinación del cualitativo y cuantitativo.

En las disciplinas relacionadas con sostenibilidad se suele recurrir a indicadores u otros tipos de cálculos que permitan cuantificar los resultados para su análisis y comparación, dejando de lado concepciones subjetivas. Esto es justamente parte de la metodología en el análisis de ciclo de vida respecto a los impactos ambientales y el consumo energético, y en la medición de consumo de energía de una vivienda con o sin generación de energía por fuentes no convencionales, a veces relacionada también con los mecanismos de transferencia de calor.

Desde la concepción de la presente investigación, siempre se tuvo en cuenta la necesidad de cuantificar con relativa precisión<sup>13</sup> las demandas de energía durante la operación de una vivienda, así como su energía embebida a través de los materiales para ser contrastadas e identificar estrategias de implementación según las características de las edificaciones NetZero EB (EECN o NZEB, Nearly Zero Energy Buildings) que conduzcan a la reducción del consumo energético y su huella de carbono.

De esta manera, se determina que el enfoque de investigación a implementar es el cuantitativo, pues se parte de una delimitación clara y que para llegar a formular estrategias o comparaciones es necesario desarrollar procesos de cuantificación de generación y consumos de energía en el marco de las metodologías específicas de las renovables y del ACV, siguiendo un proceso lineal de definición de variables, selección de las muestras, recolección de datos, análisis de datos, y reporte de resultados.

En el enfoque de investigación cuantitativo existen cuatro tipos de investigación de acuerdo con la revisión bibliográfica y a la forma de aproximarse a los objetivos: exploratorio, descriptivo, correlacional, y explicativo. En el exploratorio se abordan problemas poco estudiados, buscando innovación al emprender nuevos enfoques y conceptos; el descriptivo se enfoca en un fenómeno definiendo variables y conceptos. El tipo correlacional busca asociar variables y conceptos para establecer comportamientos o predicciones; finalmente, el explicativo busca entender estructuradamente las causas de un fenómeno.

Como se mencionó anteriormente, la presente investigación busca tomar elementos del consumo energético de edificios de vivienda colectiva abastecidos por energías

---

<sup>13</sup> Relativa precisión porque en el caso de las energías renovables se realizan procedimientos de cálculo a nivel de predimensionamiento, y para el caso del análisis de ciclo de vida se toman cantidades de materiales que no corresponden exactamente a la tipología definida ya que muchos de esos datos son restringidos.

renovables para ser contrastados bajo un análisis de ciclo de vida, lo cual tiene pocos precedentes incluso dentro del estado del arte consultado, por tanto, se trata de una investigación “experimental” con características afines al tipo exploratorio. Además, esta cualidad le otorga el potencial de convertirse en un punto de partida para futuros trabajos descriptivos, correlacionales y explicativos que precisen sus variables.

*“Los estudios exploratorios sirven para familiarizarnos con fenómenos relativamente desconocidos, obtener información sobre la posibilidad de llevar a cabo una investigación más completa respecto de un contexto particular, indagar nuevos problemas, identificar conceptos o variables promisorias, establecer prioridades para investigaciones futuras, o sugerir afirmaciones y postulados”* (Hernández, Fernández & Baptista, 2014: 91).

Por estas mismas características, según Hernández, Fernández & Baptista (2014) no es necesario plantear claramente una hipótesis (a pesar de que fue formulada) que conduzca el desarrollo de este trabajo, y en cuyo caso, la calidad se relaciona con el grado de experimentos que permitan identificar variables y relaciones. En consecuencia, el diseño, plan o estrategia se caracteriza por ser experimental, al generar una situación poco usual de contraste (FN CER versus ACV) para identificar aspectos comunes en las variables independientes<sup>14</sup> de demanda de energía operativa versus energía embebida de edificios.

Sin embargo, los dos primeros objetivos específicos de esta investigación (OE1, OE2) están enfocados en identificar un marco normativo y técnico, así como reconocer iniciativas locales de análisis de ciclo de vida, lo cual plantea la necesidad de desarrollar un enfoque descriptivo exclusivo para ellos, pero sin llegar a un análisis exhaustivo ya que estos objetivos no son el fin último, sino que sirven como insumo. Esto significa que se perfilará y recopilará información sobre los lineamientos, contexto y desarrollos en estos aspectos, sin indicar necesariamente cómo se relacionan.

Para ello se revisarán las normativas y guías técnicas en energías renovables en Colombia, especialmente de aplicabilidad en edificios. Debido a que el ACV es una herramienta regulada por metodologías internacionales, estas serán identificadas, así como las redes de investigación y trabajos relevantes en ese campo a nivel nacional.

Los tres objetivos específicos restantes (OE3, OE4, OE5) comprenden desarrollar una metodología de análisis del comportamiento de la demanda energética (de la red y embebida), el desarrollo de una matriz de cálculos y evaluación de estrategias, y la definición de ventajas y retos fruto del análisis de las variables resultantes, en concordancia con los lineamientos de los edificios NetZero EB. Debido a que en estos últimos tres objetivos se manifiesta la esencia de esta investigación, y, por tanto, arrojarán la materia prima para interpretar los resultados, es necesario abordar plenamente el tipo exploratorio de investigación.

Para estos objetivos es necesario plantear una serie de operaciones secuenciales encaminadas a cuantificar todos los aspectos relacionados con los flujos de energía en un edificio, que son la variable dependiente, y así desarrollar un control o la validez interna de la situación experimental que determina la relación causal y determinando grupos de

---

<sup>14</sup> Las variables independientes son estímulos, influencias o intervenciones para observar sus efectos sobre otras variables que son las dependientes (Hernández, Fernández y Baptista, 2014: 129).

comparación con posible análisis estadístico o de tendencia de acuerdo a las siguientes operaciones:

- A. Establecer una sola tipología<sup>15</sup> hipotética de edificio de vivienda colectiva basada en la oferta del mercado actual en la ciudad analizada, con el fin de acercarnos a una validez externa del ejercicio. Para establecer esta tipología se realizará un ejercicio simplificado de identificación de características de viviendas colectivas presentes en la oferta actual de la ciudad de estudio a través de páginas web inmobiliarias.
- B. Definir un solo perfil de demanda de energía eléctrica de un apartamento y del edificio de acuerdo con un promedio mensual y uno anual, para establecer una línea base de consumos por las mismas razones del punto anterior.
- C. Realizar cálculos a nivel de predimensionamiento de aplicación de energías renovables de acuerdo con las características climáticas, y de esa manera, estimar la/s más conveniente/s.
- D. Desarrollar una evaluación de impactos ambientales, con énfasis en el consumo de energía embebida basado en la metodología de análisis de ciclo de vida usando el software SimaPro o Athena. Para ello se requiere obtener un archivo de cantidades de materiales y de obra del edificio o uno similar.
- E. Los pasos anteriores permitirán alimentar una matriz de datos que identificarán relaciones en la demanda de energía de la red pública (definida en la operación B) respecto a la energía embebida del edificio junto con la tecnología de energía renovable aplicada.

Vale la pena señalar que, si bien se parte de un solo tipo de edificio de vivienda identificado, este no se considera como estudio de caso sino un experimento, ya que obedece a un escenario diseñado, mas no a un caso concreto existente, tampoco a un momento determinado (transeccional), y sus condiciones son modificadas de acuerdo a parámetros propuestos.

No obstante, podría discutirse si estas condiciones metodológicas obedecen más a un “diseño de preprueba / posprueba” de una sola muestra y no a un experimento de una sola fase, ya que a la tipología edilicia se le aplicaría un escenario o situación previa (edificio sin energías renovables), y después se cuantifican las variables posterior a la aplicación de estas tecnologías en energía renovable para identificar su aporte en energía embebida respecto a la operativa, asumiendo a esta como situación final. Esto permite desarrollar un seguimiento del punto de referencia inicial respecto al final, además de una probable causalidad al hacer una posible comparación entre las características climáticas abordadas. En ese sentido, se considera un abordaje mixto.

Para este tipo de vivienda experimental, se define un solo perfil de demanda energética mensual que multiplicado por doce proporciona el perfil anual. Esto se aclara debido a que en otras latitudes ese cálculo debe ser más complejo y variable pues el consumo varía todo el año de acuerdo a la estación climática del año, especialmente en verano e invierno.

En Colombia, por su latitud y cercanía con la línea del Ecuador, mantiene unas condiciones climáticas casi constantes durante todo el año sin estaciones y sin variación

---

<sup>15</sup> Si bien se puede hablar de características morfológicas y espaciales diferentes, una sola tipología edilicia permite caracterizar y comparar como influyen las características externas en la demanda energética y en los impactos ambientales.

del uso de climatización cuando es instalado en climas cálidos<sup>16</sup>. Esta operación metodológica ha sido realizada de manera similar por Vares et al (2019), con la diferencia que incorpora un perfil con datos por hora, y hace variaciones en la tecnología renovable y en las características de conexión / desconexión de la red.

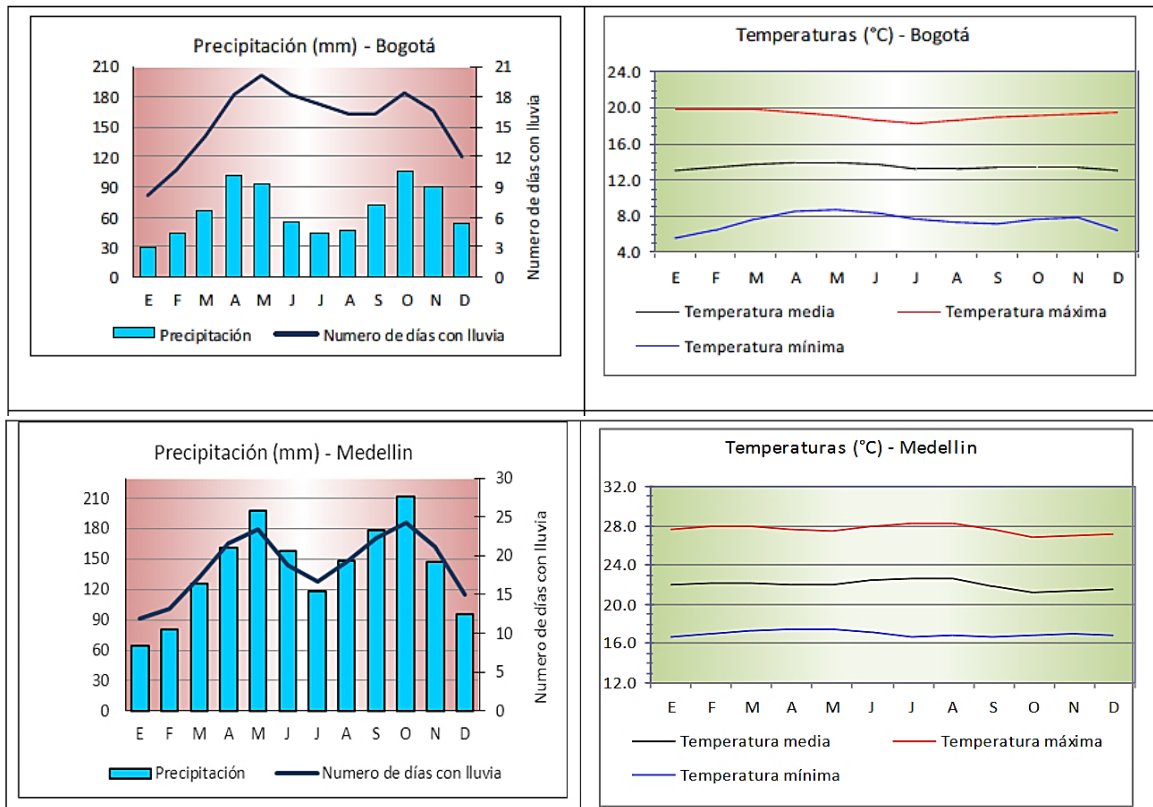


Ilustración 2. Promedios climáticos y de precipitaciones anuales para Bogotá y Medellín. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>

El tipo de recolección de datos que mejor se acomoda a las características de la investigación es el análisis de contenido cuantitativo y las pruebas estandarizadas. El contenido cuantitativo recopilado se basa en las diferencias de las variables de entrada en el punto de referencia inicial, que corresponden a la operación B, respecto a las nuevas variables presentes en las operaciones C y D, ya que estas fases comprenden cálculos que permitirán el análisis cuantitativo. La prueba estandarizada consiste en el análisis de ciclo de vida que se realizará en la operación D, el cual se encuentra regulado por la familia normativa ISO 14040 y por la Regla de Categoría de Producto correspondiente a edificios proporcionada por el EPD System.

El análisis de datos se realiza identificando las variaciones en demanda y oferta energética en los edificios de vivienda, describiéndolas y señalando su trazabilidad. Este análisis se ha realizado a través de matrices u hojas de cálculo donde se manifiestan distribuciones de frecuencias que pueden ser graficadas a través de histogramas o de otro tipo para mayor comprensión.

<sup>16</sup> En general, las grandes ciudades en Colombia tienen clima cálido y templado, cuyas variaciones se dan principalmente por la diversidad altimétrica derivadas del sistema montañoso y dos periodos de lluvias, mas no por la existencia de estaciones.

La versión inicial de la metodología, planteaba buscar herramientas espaciales y procedimientos para desarrollar altos estándares de eficiencia energética en vivienda colectiva, donde el concepto NetZero primaba, con la posibilidad de ser replicadas en cuatro ciudades de análisis. De esta idea, se mantiene que es necesario realizar un análisis sobre las particularidades y aspectos de diferentes proyectos residenciales pero aplicado a una sola ciudad colombiana, que es su capital Bogotá, haciendo referencia a la actual normativa de ahorro de energía y agua, Resolución 549 de 2015. Estos puntos se desarrollarán bajo un enfoque descriptivo a través de las operaciones A y B ya descritas.

De acuerdo al cronograma o plan de trabajo, se conciben seis etapas de desarrollo denominadas "procedimientos / resultados", desarrollando linealmente: 1. Marco teórico y metodológico, 2. Investigación bibliográfica, 3. Trabajo de campo, 4. Análisis de resultados, 5. Redacción, y 6. Versión preliminar y final.

En estas etapas se consideraba el desarrollo de trabajo de campo en la etapa 3 al seleccionar proyectos relevantes en Colombia para encontrar datos, características y oportunidades de intervención. No obstante, como se mencionó, se ha definido que la recolección de datos se basa en un modelo experimental bajo condiciones creadas y que no obedecen a proyectos reales que integren FNCER, debido a su casi inexistencia y porque requiere de enumerar las características espaciales y morfológicas de cada uno, conduciendo los resultados de la matriz a dichas características y condicionando los resultados a varias tipologías de edificios, por tanto, no se contempla estudios de caso.

En síntesis, esta tesis pretende identificar la relación, incremento o reducción de la energía embebida en proyectos de vivienda en Colombia incorporando energías renovables. Para ello, se estudiará 1 tipo de vivienda colectiva hipotética ubicada en Bogotá. Se examinará mediante el programa SimaPro el ACV para determinar la energía embebida con base en los materiales implicados y la elaboración de un perfil de consumo de energía operativa. Con todo, en el marco de la vivienda colectiva actual colombiana, se examinará la posibilidad de reducir dicha energía embebida y operativa, de acuerdo con los estándares de los NetZero EB y de las energías renovables en la edificación.

## 2.2 MARCO TEÓRICO

### 2.2.1. Energía embebida

Este es un concepto crucial para la investigación, y para definirla es necesario definir también a la energía operativa. Esta última es la energía demandada por el edificio durante su vida útil, por lo general consumida por electrodomésticos, agua caliente, cocina, iluminación y climatización. A su vez, la energía operativa se divide en energía entregada, que corresponde a la recibida a través de la red pública proveniente de fuentes primarias fósiles<sup>17</sup>, la energía generada, la cual proviene de cualquier tecnología renovable en sitio y/o cercano, la energía primaria que se refiere a la asociada en los recursos primarios (generalmente fósiles) antes de ser procesadas en recursos secundarios junto con sus pérdidas, y la energía evitada (o generación evitada, según Vares et al, 2019) es la cantidad consumida proveniente de las energías renovables que evitan el consumo de la red.

La energía embebida es definida por Koezjakov et al (2018) y Thiel et al (2013), como la energía inicial requerida para fabricar los materiales del edificio, así como la necesaria para el transporte hasta el sitio de construcción, teniendo en cuenta su ciclo de vida. Para Dixit (2017) también implica la administración y servicios relacionados, y aporta cerca de un 10% en el total de la fase de construcción. Chastas, Theodosiou, & Bikas (2016) agregan que es la energía necesaria para la construcción del edificio, el mantenimiento, reparación, reemplazo de materiales y sistemas técnicos durante la vida útil del edificio, así como la energía para la posible demolición y su gestión al final de su vida útil.

Su cálculo se deduce de la diferencia entre todo el consumo energético en todo el ciclo de vida y la energía operativa (Ibídem). Por su parte, Macías et al (2017), para una vivienda social de un piso, la calculan sumando en m<sup>2</sup> la energía embebida de muros, cimentación, y cubierta; Guan, Walmsely, & Chen (2015) desarrollan el cálculo gracias a una base de datos por cada material, que al sumarse de acuerdo al edificio se divide por el área habitable para obtener el promedio.

Autores como Dixit (2017) reiteran la importancia de proporcionar este valor en unidades de energía primaria, lo cual requiere del cálculo de un factor que es propio de cada contexto, pues las proporciones de origen de la energía varían de acuerdo a la localización, clima, matriz energética, representatividad temporal y técnica, etc., y siendo el sector residencial el mayor consumidor. La energía para la demolición y transporte al final de la vida útil del edificio se excluye porque depende de procesos futuros sin certeza, al igual que la energía recurrente, que se refiere a una parte de la embebida compuesta por elementos de vida útil corta respecto al edificio y que dependen de las preferencias del consumidor.

---

<sup>17</sup> Existen tres aspectos clave según Dixit (2017): la eficiencia en la conversión, las pérdidas en la transmisión y distribución, y el tipo de combustible. También se refiere a la “energía de materia prima” (feedstock energy) como el calor de combustión o el contenido energético de los insumos utilizados como ingredientes en el proceso de fabricación de un producto, en donde en algunos casos es ignorada si proviene de fuentes renovables.

A su vez, esta energía se divide en directa e indirecta, en estrecha relación con los límites del sistema a ser estudiados. La energía embebida directa en un edificio se refiere a la consumida en las fases de construcción, transporte, gestión y consultoría dentro y fuera del sitio, mientras que la indirecta se consume a través del uso de ciertos materiales, ensamblajes y otros equipos instalados en el edificio; podría incluirse también que la movilidad de los usuarios del edificio fuese cero (Muñoz, 2013: 30). Esto se relaciona con cuatro niveles de regresión dependiendo del nivel de profundidad del estudio, donde el cuarto nivel contempla la energía embebida implicada en la fabricación de la maquinaria necesaria para la producción de los materiales de construcción (Dixit, 2017).

Las diferentes investigaciones consultadas se refieren al cálculo y análisis de la energía embebida y su relación con el carbono embebido y/o operativo<sup>18</sup>, pero es complicado aplicarlo en las etapas futuras después del uso del edificio, es decir, en su fin de vida y posible reciclaje o también llamado de la cuna a la cuna (etapas de inventario de ciclo de vida C y D), debido a que es opcional, presenta alta incertidumbre y una metodología de análisis y de inventario diferentes que pocas veces es considerada. Llamaremos a esta etapa de demanda energética futura como energía proyectada o energía de demolición, que por lo general tiene valores entre el 1 y 4%, a su vez que la energía embebida (EE) varía entre 10 y 30% (Guan, Walmsely, & Chen, 2015), y la EO contribuye entre el 80 y 85% (Cabeza et al, 2014).

Es importante mencionar que Koezjakov et al (2018), se basa en una investigación realizada en diferentes tipos de vivienda en Holanda con proyección a 2050, encontrando que a mayores estrategias de eficiencia energética en nuevos edificios y de rehabilitación, se disminuye la energía operativa pero se incrementa la energía embebida y cuya tendencia tiende a aumentar, con rangos entre 3.0 y 6.4 GJ/m<sup>2</sup>; esto se debe al uso de materiales de alta intensidad como el concreto reforzado prefabricado y materiales de aislamiento térmico en la envolvente, al igual que casos de instalaciones técnicas y sistemas de producción de energía cuya proporción es cercana al impacto ambiental de la estructura (Chastas, Theodosiou, & Bikas, 2016).

En una investigación similar, Finnegan, Jones, y Sharples (2018), identifican el carbono embebido de varias tecnologías en energía aplicada a edificios, basados en información secundaria donde predominan los procesos de la cuna a la puerta y hallando inconsistencias para poder comparar datos como la falta de análisis de sensibilidad, diversidad de métodos y límites de sistema truncados, haciendo necesario modificar las cuantificaciones de acuerdo a la unidad funcional. Algunas de las tecnologías revisadas son paneles fotovoltaicos y colectores solares, encontrando alta incertidumbre en los datos de origen, pero concluyendo que a pesar de que son tecnologías con alto carbono embebido, es compensado con la notable reducción de emisiones logradas durante la operación.

De esta manera, se pueden establecer dos tendencias en el diseño de edificios, la que se enfoca en reducir la energía operativa aumentando la embebida a través de edificios de alto desempeño y livianos, y, por otro lado, la que implementa materiales de baja energía embebida pero menos eficientes en cuanto a prestaciones. Esto abre un debate sobre qué enfoque es más conveniente en términos de sostenibilidad, o si es posible evaluar una

---

<sup>18</sup> Según Muñoz (2013: 29), además del indicador estándar que es la energía primaria, existen otros indicadores que pueden resultar adecuados como las emisiones de CO<sub>2</sub>, la exergía, o la emergía.

comparación entre estudios de caso similares con ambos enfoques que permita determinar el menor demandante de energía.

Vares et al (2019) determinaron los impactos de un edificio residencial con una vida útil de 25 años<sup>19</sup>, y con una demanda de energía anual de 19,822 kWh. En cuanto a los impactos por emisiones de CO<sub>2</sub>eq, un 38% correspondía a energía operativa y un 62% a energía embebida, lo cual es un patrón que es contradictorio frente a los objetivos de un NetZero EB. Vale la pena mencionar que las emisiones de carbono se incrementaban de acuerdo a la tecnología escogida, sus materiales en sitio y el método de cálculo.

Por su parte, Chastas, Theodosiou, & Bikas (2016), examinan 90 proyectos residenciales de varias partes del mundo para aplicar análisis energético del ciclo de vida, encontrando que la energía embebida de los mismos cubre un rango muy amplio entre 5% y 100%, de los cuales el transporte representa entre el 0.1% y el 7%, y el procesamiento de residuos entre el 0.1% y el 3.5%; los que corresponden con edificios NetZero EB el rango de EE estaba entre el 74% y el 100%<sup>20</sup>. Por otro lado, se identificaron importantes diferencias entre los edificios analizados con ACV por los métodos de análisis híbrido, de proceso, y de entrada salida, 3.92 veces más alto el primero respecto al segundo, y más bajo el segundo respecto al tercero en edificios NetZero EB. Se debe considerar un protocolo de energía embebida para una cuantificación y análisis homogéneos.

Si bien se considera que la industria de la infraestructura de edificios y de vivienda es intensa en sus emisiones y demanda de recursos energéticos, consumiendo alrededor del 30% - 40% de la energía primaria mundial, las viviendas de apartamentos tienen la menor energía embebida y operativa. La energía operativa depende de los patrones de uso de los habitantes, las condiciones climáticas, el diseño, prácticas de construcción, y aislamiento; para su cálculo, existen dos alternativas: con análisis estadístico cuya fuente es el valor de las facturas del servicio público de electricidad, o por software de simulación energética (Macías et al, 2017).

Es importante mencionar que, de manera general, se entiende que los procesos de reciclaje no contienen energía y carbono embebidos cuantificables de manera adicional o se considera negativa o neutra, debido a que estos procesos reincorporan materiales previamente utilizados a la cadena de suministro de fabricación de materiales. Sin embargo, Koezjakov, et al (2018) menciona que el reciclaje también es responsable de otros impactos (energéticos) relacionados con el transporte y el reprocesamiento, que pueden generar más gasto energético que evitarlos, y Chastas, Theodosiou, & Bikas (2016) proponen integrarlos en las cuantificaciones de energía embebida.

Ante estas condiciones, los edificios NetZero EB se convierten en los mayores consumidores de energía embebida y se alejan de su origen conceptual como de energía nula; su consumo fluctúa dependiendo de la elección crítica de materiales (especialmente de aislamiento), cuya energía embebida depende de su proceso de fabricación. Para crear

---

<sup>19</sup> Un tiempo de vida corto, pero obedece a que se buscaba que coincidiera con la vida útil de la mayoría de tecnologías de energía renovable sin mantenimiento ni remplazo. Por otro lado, se evidenciaron grandes diferencias entre los datos base por hora o por año, los cuales podrían ser mayores en países cuya base energética es el carbón.

<sup>20</sup> Es de aclarar que al igual que con las investigaciones antes mencionadas, entre mayor eficiencia energética tenga un edificio, la proporción de energía embebida aumenta por los materiales y equipos incorporados, entre ellos los de generación de energía renovable.



verdaderos edificios de estas características es necesario un protocolo unificado que permita su cálculo, comparación entre casos y disminución de su demanda.

### 2.2.2. Análisis de ciclo de vida

Según la definición de la ISO 14040, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es la “Recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a través de su ciclo de vida”. Thiel et al (2013) refiriéndose a su aplicación en edificios lo definen como un método y herramienta para evaluar los impactos ambientales a través de entradas y salidas en todas sus fases, desde la extracción de materias primas, pasando por la fabricación de materiales, el uso, hasta su disposición final.

Autores como Chastas, Theodosiou, & Bikas (2016), y Finnegan, Jones, & Sharples (2018), afirman que existen tres métodos para desarrollar el inventario de ciclo de vida, cada uno con sus ventajas y desventajas, que son el análisis de proceso, el análisis de entrada-salida, y el análisis híbrido (combinación de los anteriores). Dixit (2017) menciona que el análisis híbrido, especialmente el que se basa en entrada-salida, es el más completo y preciso<sup>21</sup>.

No obstante, el análisis de proceso es el más usado porque se basa en las cuantificaciones físicas para las estimaciones energéticas, pero también contiene algunas fallas derivado de las restricciones de los límites del sistema. El análisis de entrada salida se basa en las cantidades y el precio del material de construcción trazando un mapa de flujos y su intensidad energética, pero está limitado por las fluctuaciones del mercado.

Los mismos autores se refieren también a la importancia de definir los límites del sistema, el tiempo de vida útil del edificio<sup>22</sup>, hacer explícito el año del estudio, que la unidad funcional sea la misma para comparar dos o más ejemplos, y definir muy bien las proporciones de origen de la energía nacional porque afectan significativamente los resultados de energía y emisiones. Pasar por alto estas consideraciones conlleva a datos poco precisos y al recurrente error de truncamiento originado al redondear cifras en grandes cálculos, que se traducen en amplios márgenes de desfase en los datos finales y que dificultan el proceso de normalización.

En la misma línea, Dixit (2017) hace una revisión de literatura sobre estudios en energía embebida en el sector residencial a través de ACV encontrando también grandes discrepancias atribuidas a la falta de un protocolo de cuantificación, así como la exclusión de componentes como muebles, accesorios, servicios, instalaciones, transporte, demolición, y aborda tres dimensiones en la delimitación del sistema. Para hacer comparaciones es necesario normalizar la unidad de energía embebida por unidad de área por año de vida útil, incorporar la energía de materia prima y la laboral en los cálculos, desarrollar una serie de pasos informativos de precisión, y cuantificar la incertidumbre al asumir datos en los cálculos.

---

<sup>21</sup> El autor cita otros estudios donde existen variaciones considerables entre los resultados provenientes de diferentes métodos, incluso entre híbridos de diferente base, llegando a ser más del doble en un edificio residencial (de 6.6 GJ/m<sup>2</sup> a 16.4 GJ/m<sup>2</sup>).

<sup>22</sup> La vida útil más aplicada en edificios residenciales es de 50 años.

Thiel et al (2013) analiza los impactos ambientales en materiales iniciales de un NetZero EB no residencial con el propósito de alcanzar la certificación Living Building Challenge, usando el método de cálculo “Cumulative Energy Demand” (CED), encontrando que la cimentación, excavación y estructura representan los mayores impactos ambientales, destacándose por su alto impacto y energía el uso de materiales como concreto, acero y paneles fotovoltaicos, pero que son compensados en la fase de operación del edificio. Es de resaltar que se evaluaron los impactos ambientales con y sin paneles y geotermia, cuantificando el potencial de cambio climático en 16% y 5%, y 49% y 4% en energía embebida respectivamente, reconociendo también importantes impactos en las categorías de salud humana, eutrofización, y consumo de agua.

Cabeza et al (2014) menciona un estudio de Norman et al (2006, citado en Cabeza, 2014) que compara edificios de alta y baja densidad donde se utilizó como unidad funcional superficie habitable por m<sup>2</sup> y número de habitantes en una vivienda per cápita, el cual demuestra que la energía y emisiones en la cadena de suministro fueron 1.5 veces más altas para el caso del edificio de baja densidad que para el de alta densidad, y casi al contrario si se considera el área de vivienda; los materiales de construcción de mayor EE fueron mampostería, ventanas, drywall, y concreto estructural.

Teniendo en cuenta la importancia de la cuantificación de la energía embebida en edificios NetZero EB a través de metodologías de ACV, Chastas, Theodosiou, & Bikas (2016) aplican el concepto de “Análisis energético del ciclo de vida” (AECV, o LCEA por sus siglas en Ingles), definiéndolo como un enfoque detallado para estimar las entradas, salidas y flujos de energía a través del ciclo de vida de un edificio, y cuyos parámetros metodológicos aún no están claramente definidos.

En un contexto suramericano, Macías et al (2017) retoman el concepto de AECV para aplicarlo en vivienda social en Ecuador utilizando el método de cálculo CED en tres sistemas constructivos: formas de concreto aisladas, muros de carga y mampostería confinada. Los resultados muestran que, en fuentes de energía, la mayor cantidad de energía embebida proviene de fuentes fósiles no renovables con un 77.3% en todos los sistemas constructivos, seguido de biomasa entre el 10,6% y el 25,4%; de los elementos constructivos analizados, los muros son los que más contribuyen con un rango entre el 41.9% y 60.5%. Vale la pena mencionar, que se encontraron casos con bajas cantidades de EE respecto a la EO debido al bajo aislamiento de este tipo de viviendas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el ACV es una metodología para estimar y cuantificar la energía embebida (además de otras salidas) de un edificio a través del método de análisis de proceso o de entrada-salida, y el CED como cálculo, identificando las entradas, que son los materiales que componen el edificio además de algunos elementos adicionales, que en este caso, son los sistemas de generación de energía renovable en sitio. Es necesario definir muy bien los alcances, las unidades de medida y un proceso de normalización de datos, porque de lo contrario puede conducir a diferentes errores de trazabilidad.

Osma et al (2015) revisa varios enfoques conceptuales, donde llama la atención el de LC-ZEB (Life cycle zero energy buildings), pues reúne las características estudiadas por esta investigación al integrar las características de los edificios NetZero EB con energías renovables y la evaluación energética por análisis de ciclo de vida de los mismos. El

término LC-ZEB fue propuesto por Hernandez & Kenny (2010), donde el balance se busca a través de la cuantificación de la energía del ciclo de vida anualizada (ALCE), que es igual a la suma de la energía primaria operativa y la energía embebida anuales, y debería ser igual o menor que la energía producida por la ER en su ciclo de vida, y cuyo procedimiento es correspondido por los cálculos y conceptos de energía embebida ya vistos. Sin embargo, la literatura reciente parece adoptar con más fuerza el concepto de “Análisis energético del ciclo de vida” (o LCEA, por sus siglas en Ingles) referido anteriormente.

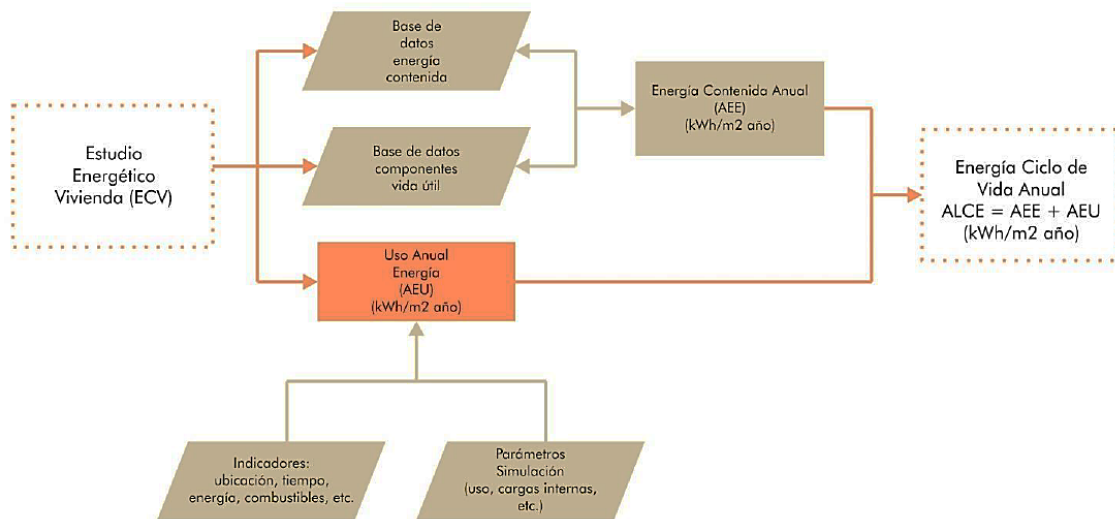


Ilustración 3. Diagrama de flujo energético de edificios LC-ZEB. Fuente: Hernández and Kenny, 2009; citado por Muñoz, 2013.

### 2.2.3. Energías renovables

De acuerdo con Chel & Kaushik (2018: 8) las energías renovables se derivan de procesos naturales que se reponen permanentemente, entre las que se encuentran las derivadas del sol o del calor generado en lo profundo de la tierra, que se traducen en electricidad y/o calor aprovechado a través de diferentes tecnologías, e incluyen al hidrógeno derivado de recursos renovables.

La directiva europea 2010/31/EU del 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios, la define como energía procedente de fuentes renovables no fósiles, es decir, energía eólica, solar, aerotérmica, geotérmica, hidrotérmica y oceánica, hidráulica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración y biogás.

Un término similar es abordado en Colombia por la Ley 1715 de 2014, que regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético, y define a las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) como aquellos “recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares”.

En un marco más amplio, se pueden considerar como tecnologías de energía sostenible, definidos por Finnegan, Jones, & Sharples (2018) como piezas de equipo para alimentar, ventilar, calentar y/o enfriar un edificio, y que se basa en recursos que no tienen un impacto ambiental adverso a largo plazo. La definición de impacto ambiental se refiere al impacto en todo el ciclo de vida de la tecnología, que incluye el impacto operativo (en el uso) y el impacto incorporado, que incluye la energía embebida y el carbono embebido liberados para crear, fabricar, transportar, usar y desechar cada tecnología.

Harkouss, Fardoun, & Biwole (2019), desarrollan una factibilidad económica y ambiental sobre la implementación de energías renovables en un NetZero EB residencial de acuerdo a tres climas diferentes de tres ciudades representativas, con base en los resultados de distintos indicadores de balance<sup>23</sup>, de simulación y de herramientas de toma de decisión. En este estudio se escogen seis conjuntos de tecnologías de ER que incluyen generación eléctrica a través de solar fotovoltaica, turbinas eólicas y biomasa térmica y de potencia, aclarando que no existe un estándar global que los recomiende según el clima. Se concluye que para la ciudad de clima frío y cálido el conjunto de renovables para enfriamiento compuesto por generador de biodiesel, enfriador de absorción, bomba de calor de fuente de aire, y fotovoltaica y eólica para abastecimiento eléctrico, era la solución más conveniente.

Además de las mencionadas tecnologías, Chévez (2018) y Chel & Kaushik (2018) aplican este concepto también a estrategias pasivas de diseño bioclimático al tener en cuenta las propiedades de los materiales y la configuración espacial de los edificios para calentar o enfriar espacios manteniendo condiciones de confort térmico.

Por tanto, las ER aplicadas a edificios residenciales aprovechan los recursos naturales y del clima para su transformación en diferentes clases de energía de bajo impacto ambiental que aportan en la fase operativa, y su conversión en electricidad implica necesariamente a las ER no convencionales, pues están compuestas por sistemas complejos que están siendo ampliamente desarrollados por el mercado. Existen tecnologías tanto para climatización como para generación de energía, entre las cuales, las más ofertadas en la actualidad son los paneles fotovoltaicos, las turbinas mini eólicas, los colectores solares, la geotermia y la biomasa.

Sus materiales son variados y la información sobre sus impactos ambientales y energéticos durante su fabricación no es de fácil acceso, por tanto, para esta investigación se aplicará la referencia más parecida que se encuentre en la base de datos de inventario de ciclo de vida materiales de ACV para determinar sus impactos. Es pertinente hacer énfasis que en este trabajo solo se contempla a los sistemas que generan energía eléctrica y de calentamiento de agua, omitiendo los aplicados a climatización de espacios o como estrategia de diseño pasivo.

---

<sup>23</sup> Indicador de eficiencia energética (consumo total de energía), indicador de equilibrio y autosuficiencia energética: índice de ajuste de carga, índice de interacción de la red; indicadores económicos: costo de energía nivelado, costos de ciclo de vida, período de amortización simple; indicador ambiental: emisiones de CO<sub>2</sub>eq. Vale la pena destacar que se establece como restricción de balance que la diferencia entre la generación de electricidad por ER y la carga eléctrica del edificio debe ser entre 7 y 10 kWh / año m<sup>2</sup>.

#### **2.2.4. Edificios neto cero o de consumo de energía casi nulo (EECN o NetZero EB)**

Cuando hablamos de un edificio que incorpora estrategias de eficiencia energética, y además cuenta con generación de energía renovable, con seguridad nos referimos a un NetZero EB. La directiva europea 2010/31/EU del 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios, define los edificios de consumo de energía casi nulo (EECN, o Nearly zero-energy building, NetZero EB, por sus siglas en inglés) como edificios de alta eficiencia energética, donde la “energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables” producida in situ o en el entorno.

Es importante señalar que mediante esta directiva y su regulación 244/2012, la Unión Europea ha delegado a los países miembros para que complementen esta definición, así como sus requerimientos a nivel local, en línea con los objetivos señalados para el año 2020, donde todos los nuevos edificios deben ser NetZero EB en un esfuerzo por incrementar la generación de energía por renovables y la eficiencia energética. Vale la pena mencionar que la definición del CTE español en su última versión de 2019, capítulo “DB-HE Ahorro de Energía”, establece que se trata de edificios nuevos o existentes, que cumplen con el mismo documento en lo referente a la limitación del consumo energético; esto es porque se considera que todo nuevo edificio será NetZero EB.

Además de lo anterior, para el Departamento de Energía de Estados Unidos (U.S. Department of Energy, 2015), son edificios donde la energía anual consumida es menor o igual a la energía renovable exportada en el sitio<sup>24</sup>. De manera similar, Sartori et al (2012), citado por Vares et al (2019), los definen como edificios que mantienen un balance entre la energía tomada y la exportada a la red a través de ER en un periodo de tiempo determinado, o de manera anual según Thiel et al (2013), y Harkouss, Fardoun, & Biwole (2019).

Cuando se habla del objetivo de la reducción del consumo energético, es común relacionarlo con otro objetivo implícito que es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, por tanto, también podemos hablar de edificios carbono cero/nulo o “Zero-Net Carbon”. Estos son definidos por Eley (2018) como construcciones muy eficientes en el consumo de la energía que produce en sitio, o la obtiene libre de carbono para su consumo operativo al año. Este autor también proporciona un estándar que establece los requisitos mínimos de desempeño energético y cero emisiones para este tipo de edificios residenciales en altura, de acuerdo con el estándar Ashrae 90.1, así como los mínimos de energía renovable en sitio o externamente.

Bajo este mismo concepto, Lucon et al (2014: 689) se refiere a los edificios de energía / carbono cero, y plantea una extensión del mismo que son los edificios de energía positiva con producción neta de energía. Estos se caracterizan por implementar fuentes de energía renovables fuera del sitio y tener en cuenta el uso de energía en su ciclo de vida, entre otros aspectos. Estas definiciones están en línea con los requisitos para estos edificios propuestos por González (2018) y que se sintetizan en la Ilustración 4.

---

<sup>24</sup> Debido a que propone unos factores de balance y conversión de fuente de energía con base en una fórmula de cálculo. Para mayor información del programa “Zero Energy Ready Homes” visitar <https://www.energy.gov/eere/buildings/zero-energy-ready-homes>

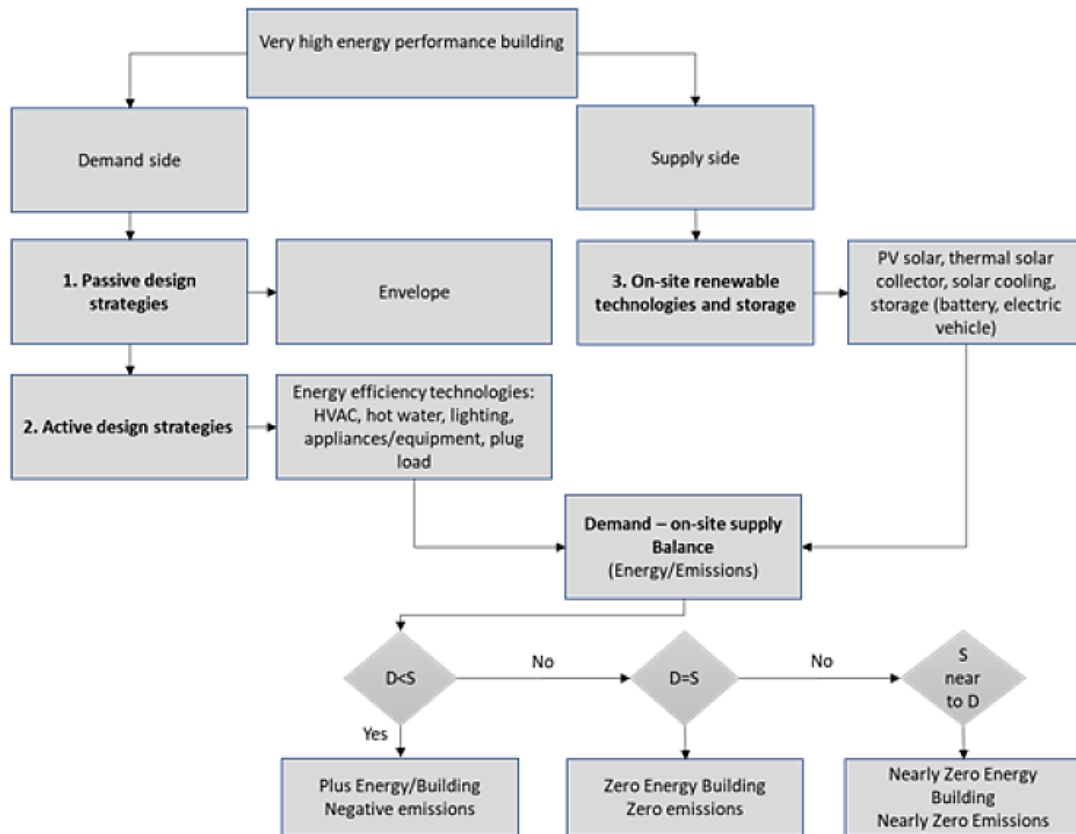


Ilustración 4. Diagrama de requisitos para edificios NetZero. Fuente: González, 2018

Osma et al (2015) hace una revisión de los enfoques y metodologías de balance para la concepción de NetZero EB y su aplicación en Colombia; entre los principales enfoques conceptuales se encuentran el ya conocido nZEB, junto los LC-ZEB donde la energía primaria y la embebida es igual o menor que la energía renovable generada en sitio, los nZEB-Grid que están conectados a la red pública buscando equilibrio entre la energía vendida y la energía comprada, y los PEB que generan más energía que la que consumen de la red. Este autor también identifica los principales tipos de balance que son calculados a través de un indicador que caracteriza la energía que entra o sale del sistema: sitio ZEB, Fuente ZEB, Costo ZEB, y Emisiones ZEB.

*“El balance es el estudio comparativo de los factores que juegan un papel en el proceso energético de un sistema. El objetivo principal de cualquier NZEB es producir un equilibrio, que se hace buscando la forma correcta de mejorar los procesos de energía. El período elegido para los cálculos de balance de un edificio se denomina período de balance de energía”* (Ibídem, traducción del autor).

En cuanto a los rangos de consumo energético que debe contemplar los NetZero EB residenciales para considerarse como tal, los países miembros de la Unión Europea informan que los consumos máximos de energía primaria oscilan entre 33 kWh/m<sup>2</sup>/año y 95 kWh/m<sup>2</sup>/año, siendo el más común entre 45 o 50 kWh/m<sup>2</sup>/año, y donde la proporción de energía renovable aún no está ampliamente definida (Ecofys, 2014: 12). Estos datos se pueden contrastar con los proporcionados por el proyecto Zebra2020<sup>25</sup> donde se

<sup>25</sup> <http://www.zebra-monitoring.enerdata.eu/>

clasifican estos proyectos respecto a su consumo y a una zona climática europea, demostrando que aquellos en climas cálidos mediterráneos consumen menos energía, con valores entre 24 y 59 kWh/m<sup>2</sup>/año.

Si bien en la literatura consultada, un edificio de bajo consumo energético es un edificio diseñado con características y medidas especiales para alcanzar un nivel de eficiencia energética mayor al requerido por las regulaciones normativas de un país, sus características son diferentes a los NetZero EB porque no necesariamente incorporan sistemas de ER. Estos sistemas son fundamentales para una reducción considerable del consumo de energía eléctrica de la red y de emisiones de CO<sub>2</sub> por el edificio, pero se requiere de un estándar de amplia aceptación que dicte su proporción ni su conveniencia según las condiciones climáticas y del entorno.

Es importante tener en cuenta la existencia de diversos indicadores de balance que se basan en la cuantificación de la proporción de energía captada de la red respecto a la embebida y la generada, y cuyo periodo de análisis más común es anual.

## 2.3 MARCO NORMATIVO

### 2.3.1. Análisis de ciclo de vida

A nivel mundial, la Organización Internacional de Normalización (ISO) es el organismo que promueve el desarrollo y estandarización de normas internacionales voluntarias para productos y servicios, dirigido a empresas y organizaciones públicas y privadas con sede en Ginebra (Suiza). Está compuesta por una serie de delegaciones y comités gubernamentales y no gubernamentales afiliados en diferentes países.

Una de las ISO más acordes con la metodología de ACV es la familia 14040, donde se encuentran la 14040, 14044, 14048, 14047, 14049, entre otros. En ellas se puede apreciar los principios, marco general, requisitos, alcances, formatos para la documentación de datos, ejemplos, etc.

Teniendo en cuenta lo anterior, también existen las normas ISO 14024 sobre etiquetas y declaraciones ambientales tipo I e ISO 9001 sobre gestión de calidad, frente a la cual los fabricantes de materiales pueden certificar sus productos en diseño, producción y comercialización. Si bien en Colombia no se ha desarrollado una estandarización metodológica propia, existe a nivel nacional, los lineamientos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) abarcan los temas de adaptación al cambio climático, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero entre otros, y específicamente, se ha desarrollado el Plan Nacional de Negocios Verdes que en conjunto con las Corporaciones Autónomas Regionales, los Institutos de Investigación, los productores y las entidades públicas y privadas, cuentan con programas como Biocomercio Sostenible que tiene como objetivo fomentar la oferta y la demanda de los negocios y productos verdes y sostenibles.

El MADS, junto con el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec)<sup>26</sup> y otras entidades crearon el Sello Ambiental Colombiano SAC, el cual está reglamentado por la Resolución 1555 de 2005 y consiste en una ecoetiqueta voluntaria otorgada a determinados productos y servicios que cumplan con determinados requisitos de gestión ambiental y ecodiseño, proporcionando una ventaja comercial y de valor agregado en el mercado. Es importante mencionar que en el marco del SAC se ha creado la etiqueta ambiental tipo I NTC 6112: 2016 que corresponde a criterios ambientales para diseño y construcción de edificaciones sostenibles para uso diferente a vivienda.

De esta manera, a través de las ecoetiquetas este sello busca el reconocimiento de productos que utilicen menos energía, fomenten energías renovables y las tecnologías limpias o que mejoren su desempeño ambiental, cuya evaluación y posterior declaración se basan en el ACV.

Al igual que en la gestión ambiental y las declaraciones ambientales, la ISO ha desarrollado una serie de normativas internacionales mencionadas anteriormente, que proporcionan lineamientos para desarrollar análisis de ciclo de vida y son las más aceptadas internacionalmente; entre ellas están:

---

<sup>26</sup> El Icontec es un organismo privado y sin ánimo de lucro adscrito a la *International Organization for Standardization* ISO.



ISO 14040:2006. Revisada en 2010 y precedida por una versión de 1997, establece los principios, necesidades básicas y marco general para llevar a cabo un ACV y describe las fases del proceso sin detalle. Una de sus premisas reza que la comparación de dos o más resultados de ACV o de Inventario de Ciclo de Vida (ICV) solo es posible si el contexto de cada uno son equivalentes.

ISO 14044:2006. Revisada en 2010, proporciona los requisitos, alcances y lineamientos para llevar a cabo un ACV. De manera similar al anterior, describe que para que dos edificios puedan compararse, deben de tener los mismos límites del sistema, los métodos de evaluación de impactos ambientales y la misma unidad funcional, la cual proporciona una referencia donde se relacionan las entradas y salidas.

ISO/TS 14048:2002. Revisado en 2013, proporciona formatos para la documentación de datos, con énfasis en la fase de inventario, donde se recopilan las entradas y salidas de los procesos.

ISO 21930:2017. Proporciona los principios, especificaciones y requisitos para desarrollar una declaración ambiental de producto (DAP) para productos y servicios de construcción, elementos y sistemas técnicos integrados en cualquier tipo de obra de construcción. Complementa la ISO 14025 al proporcionar requisitos específicos para las DAP de productos y servicios de construcción, y establece un conjunto básico de requisitos que se deben considerar como reglas de categoría de producto (RCP).

ISO/TS 21931-1:2010. Precedido por una versión del 2006, ofrece un marco metodológico de evaluación de desempeño ambiental en trabajos de construcción y edificios. Dentro de ese parámetro, resalta la importancia del ACV como opción de evaluación de materiales y de sistemas de construcción, debido a que los impactos dependen también de la manera en que los materiales son colocados, de los requisitos de mantenimiento, de la vida útil y de la distancia de transporte (Hernández, 2013: 55).

ISO TR 14047:2012. Proporciona un ejemplo ilustrativo de cómo aplicar la norma ISO 14044 en evaluaciones de impacto.

ISO/TR 14049:2012. Proporciona ejemplos ilustrativos de aplicación de la ISO 14044 para la definición del objetivo, alcance y análisis del inventario, al proporcionar ejemplos parciales para realizar un inventario de ciclo de vida ICV.

ISO 14041:1998, ISO 14042:2000 e ISO 14043:2000. Fueron eliminados pero su contenido reposa en la 14040 y 14044. En ellas se especificaban los procedimientos para desarrollar los objetivos, el alcance del estudio, interpretar y elaborar un informe del análisis del inventario del ciclo de vida, ICV, así como la estructura y requerimientos de la fase de análisis del impacto. De acuerdo con la antigua versión de la 14040, la 14041 proporcionaba el objetivo, alcance y análisis de inventario, la 14042 el análisis del impacto, y la 14043 la interpretación de resultados.

ISO 14025: 2006. Etiquetas y declaraciones ambientales, Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos

EN 15804: 2012 +A1 2014, +A2 2019. Identificación de la regla de categoría de producto. Pautas específicas, requisitos y guías para el desarrollo de los estudios de ACV y la obtención de los indicadores ambientales. Estas reglas son específicas para cada categoría de sistema/producto. Regla de Categoría de productos de construcción, así como metodología de evaluación de la huella de CO<sub>2</sub>. La actualización +A2 de 2019 incorpora cambios sustanciales como la incorporación de 19 categorías de impacto donde se reporta por separado los diferentes tipos de CO<sub>2</sub>eq como el carbono biogénico y su almacenamiento, es obligatorio reportar las etapas C y D, reglas para nuevas DAP, revisión de RCP existentes, los datos deben estar disponibles en formato ILCD, y se establece una nueva metodología de cuantificación de final de vida denominada Huella ambiental de producto (PEF, por sus siglas en Inglés). Debido a que esta norma es muy reciente y entra en vigencia en julio de 2022, no fue incorporada en esta investigación.

ISO 14001:2015. enfatiza que la perspectiva de ciclo de vida sea contemplada desde la planificación, considerando el impacto ambiental desde la cadena de suministro hasta el fin de vida del producto o servicio.

CEN/TR 15941:2011. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Metodología para la selección y uso de datos genéricos.

EN 15942:2012. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Formato de comunicación negocio a negocio

EN 15978:2012. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo

EN 15643-2: 2012. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 2: Marco para la evaluación del comportamiento ambiental.

PCR UN CPC 531: Este es un documento con una propuesta metodológica de RCP para edificios proporcionado por un operador de DAP (EPD System), mas no una normativa o estandarización internacional; sin embargo, este se referencia ya que el desarrollo metodológico del caso de estudio experimental se basa en este documento. Proporciona Reglas de Categoría de Producto (RCP) para la evaluación del desempeño ambiental de los Edificios y la declaración de este desempeño. No cubre edificios prefabricados, que ya están especificados por otra RCP.

### **2.3.2. Renovables en Colombia**

En la Ilustración 5 se presenta un esquema de la normatividad colombiana en materia de generación y uso de las energías renovables. A partir de la Ley 1715 de 2014 se introduce la posibilidad de entregar excedentes de la generación de energía a la red, representando ahorros o eventualmente ingresos al usuario y manejando un esquema de créditos para sistemas de autogeneración, lo cual hace económicamente más atractiva esta inversión, así como mecanismos de financiamiento, divulgación e incentivos fiscales. El procedimiento de evaluación para acceder a los beneficios tributarios de los proyectos que incorporen estos sistemas está reglamentado por la Resolución UPME 585 de 2017.

La Resolución UPME 196 de 2020 (que derogó a la 463 de 2018) especifica los alcances de incentivos tributarios para proyectos residenciales entre otros, y deben estar apoyados por una certificación en construcción sostenible. Por otro lado, define a los distritos térmicos (o District Heating / Cooling) como “*una red de distribución que produce vapor, agua caliente y agua helada –a partir de una central- y que transporta estos productos por tuberías a diferentes dependencias de una edificación (intramural) o a edificaciones cercanas (extramural), con el fin de proporcionarles servicios de acondicionamiento térmico de espacios (calor o frío) o de agua caliente sanitaria*”. Posteriormente, se expide la Ley 2099 del 10 de julio de 2021, sobre dinamización del mercado energético a través de la promoción de fuentes no convencionales de energía, precisando algunos incentivos.

Se adiciona el Decreto 829 del 10 de junio de 2020 del Ministerio de Hacienda y crédito público, el cual reglamenta o modifica algunas disposiciones de la Ley 1715 de 2014 y al Decreto 1625 de 2016 sobre Materia Tributaria, con el fin de formalizar incentivos financieros a la generación de energía eléctrica con fuentes no convencionales a través de la Unidad de Planeación Minero Energética –UPME.

Recientemente, fue expedida la Ley 2036 del 27 de julio de 2020, la cual promueve la participación de las entidades territoriales en los proyectos de generación, distribución, comercialización y autogeneración a pequeña escala de energías renovables FNCER a través del financiamiento con aportes del Presupuesto General de la Nación y el Sistema General de Regalías. Igualmente, el Decreto 829 de 2020, por medio del cual el Gobierno Nacional facilita el acceso a los incentivos tributarios definidos en la Ley 1715 de 2014 al delegar a la UPME como única entidad para evaluar y certificar los proyectos de FNCER y de eficiencia energética.

No obstante, es hasta el Decreto 348 de 2017 y la Resolución CREG 30 del 30 de febrero de 2018 que se establecen los lineamientos y se regulan las actividades de autogeneración de energía a pequeña escala, así como la entrega a la red, comercialización o remuneración de excedentes por balance neto a través de un medidor bidireccional.

La Resolución CREG 30 de 2018 define al “Autogenerador a pequeña escala -AGPE-”, el cual cuenta con una potencia instalada de renovables menor o igual a 100 kW (escala residencial), que en caso de entregar energía a la red, esta no debe superar el 50% del promedio anual de las horas de mínima demanda diaria del año anterior, e incluir el cálculo teórico de la energía producida en la solicitud. Así mismo, se establecen las responsabilidades para la empresa operadora de servicios públicos domiciliarios, y fórmulas para determinar los precios de comercialización de la energía.

El documento Conpes 3934 de política de crecimiento verde, establece con detalle un panorama de implementación y de potencial estimado de las renovables, de las cuales, la solar tiene 1.886 MW, el eólico en la costa norte del país 20.000 MW, la biomasa (entre residuos agrícolas y pecuarios) 151.098 TJ/año, y la Geotermia entre 1.000 y 2.000 MW; de estos sistemas se contempla una capacidad efectiva neta de generación por eólica (18 MW), energía solar (10 MW), el bagazo (tipo de biomasa, un residuo vegetal, 113 MW) e incluyen a las pequeñas centrales hidroeléctricas (216 MW). Fruto de ese diagnóstico se instauran varias líneas de acción, de las cuales son de interés la 10 y 11 sobre “Promoción de la inversión en proyectos de generación con FNCER” y “Fomento a la integración de las FNCER al mercado de energía”.

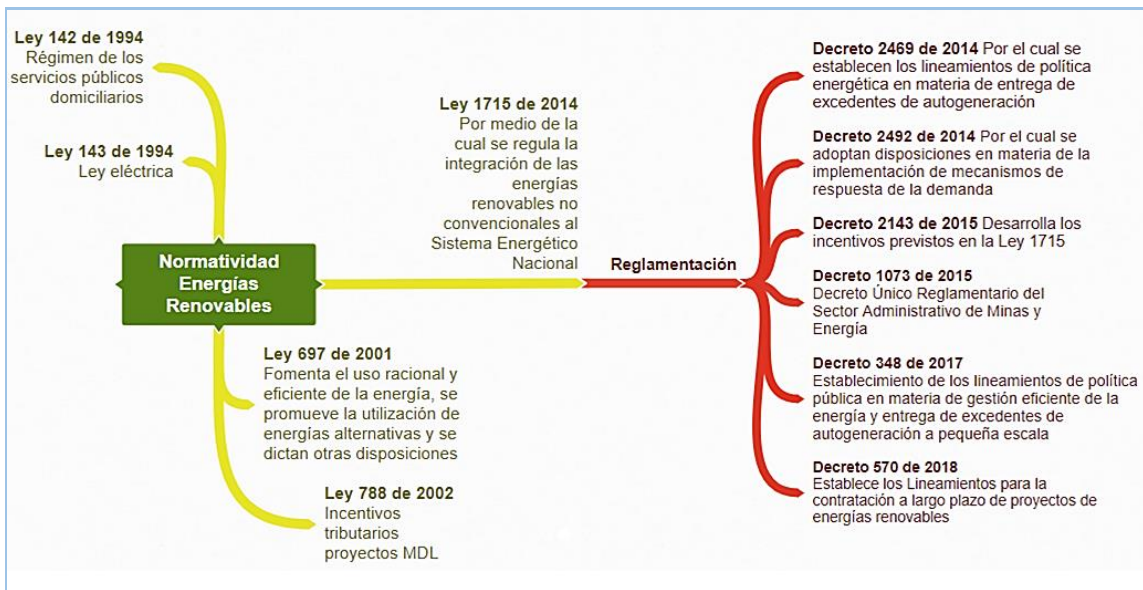


Ilustración 5. Resumen normativo colombiano en energías renovables. Fuente: <http://www.ser-colombia.org/index.php/energias-renovables/normatividad>

Otra normativa de gran impacto es la Resolución 41286 de 2016 que establece el Plan de Acción Indicativo, PAI 2017-2022, para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y demás Formas de Energía No Convencionales PROURE que define acciones y metas sectoriales, entre esos el residencial de estratos 1, 2 y 3, tomando en cuenta las indicaciones de la Ley 1715 de 2014. El PAI determina el aumento de la meta de eficiencia energética global al 2022 que alcanza el 9,05%, y propone la creación de un Gestor de Información de Eficiencia Energética GIEE. “Se plantea la instalación en aproximadamente 100.000 viviendas, de Sistemas Solares Fotovoltaicos, SFV, durante la vigencia de este Plan, que puedan suministrar hasta 150 kWh/mes cada uno. Lo anterior deberá articularse con las políticas que, para tal fin, defina el MME y otras entidades con injerencia en la materia” (Ministerio de Minas y Energía, 2016: 86).

Otras normativas indirectamente relacionadas son:

Familia ISO 15686. Se ocupa de la planificación de la vida útil de un componente de construcción o edificio. Asegura un perfil de costos de ciclo de vida al tiempo que se abordan factores ambientales como el análisis de ciclo de vida, el mantenimiento y las consideraciones del final de la vida útil, incluida la obsolescencia y la recuperación de energía embebida. La planificación de la vida útil está cada vez más vinculada con el desarrollo sostenible y la valorización.

ASTM E632-82 (1996). Práctica estándar para el desarrollo de pruebas aceleradas para ayudar a predecir la vida útil de los componentes y materiales de construcción. Derogada en 2005.

## 2.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

El enfoque de investigación más acorde con la naturaleza de la presente investigación es el cuantitativo porque se basa en la cuantificación rigurosa y secuencial para establecer tendencias que corroboren teorías e hipótesis bien definidas, lo cual suele estar asociado con indicadores para verificar y comparar los resultados, y permite proyectar estrategias evitando la subjetividad. Esto se ve reflejado en la cuantificación de la generación y consumos de energía por cuenta de los equipos de ER y otros valores energéticos relacionados con el ACV, teniendo en cuenta las variables, recolección y análisis de datos, y el reporte de resultados.

Dentro de este enfoque, se aborda principalmente el tipo de investigación exploratorio con tendencia experimental. La aplicación de un análisis de ciclo de vida para establecer un balance energético de todo un edificio residencial con ER es una aproximación escasamente conocida y con pocos precedentes, que requiere emprender nuevos enfoques bajo una metodología definida, pero con vacíos en esta especialidad, agregando cierta incertidumbre a la planeación y resultados esperados de esta investigación. Si bien esto implica abordar nuevos problemas, e identificar conceptos o variables sin contar necesariamente con una hipótesis, también deja en evidencia el potencial de que se convierta en un punto de partida para futuras investigaciones más completas que precisen sus variables al ser descriptivas, correlacionales o explicativas.

De esta manera, para desarrollar el objetivo general y los específicos planteados por esta investigación, se necesita un enfoque descriptivo sin llegar a detalle analítico para desarrollar el marco referencial. Por otro lado, el desarrollo de una metodología de análisis del comportamiento de la demanda y flujos de energía (de la red y embebida) y de una matriz de evaluación de estrategias, implica una serie de operaciones secuenciales establecidas en el marco metodológico donde se aborda plenamente el tipo exploratorio de investigación. Estas estrategias están encaminadas al análisis de contenido cuantitativo y de pruebas estandarizadas entre escenarios que permitan comparar y validar causalmente la situación experimental planteada, que no es un estudio de caso.

El marco teórico pone de manifiesto los principales conceptos vinculados con la investigación, como son: Energía embebida, Análisis de ciclo de vida, Energías renovables, y Edificios de consumo de energía casi nulo (EECN o NetZero EB). Estos conceptos constituyen la base para el esbozo de las conclusiones del capítulo y finales.

Según la literatura consultada, la energía operativa es la que se consume durante la vida útil del edificio a través de los electrodomésticos, climatización, cocina, e iluminación, y está compuesta por la entregada (por la red pública), la generada (por el/los equipos de energía renovable), y la evitada (la que no se consume de la red por cuenta de la ER). Por otro lado, tenemos la energía embebida, la cual se refiere a la energía consumida en todas las etapas de ciclo de vida del edificio excluyendo a la operativa, es decir, en la fabricación de los materiales, el transporte hasta la obra, la construcción e instalación de equipos, el mantenimiento y remplazo, y en la demolición y gestión de los RCD (Ilustración 6).

Dentro de la embebida, algunos autores consideraban como energía directa a la relacionada con el transporte a la obra, la construcción, e incluso, la planificación y

diseño, mientras que la energía indirecta correspondía a las demás etapas con poca injerencia por parte del equipo de diseño y construcción. Por razones similares, y la incertidumbre debido a procesos futuros poco previsibles y que dependen de los usuarios, la energía necesaria para el mantenimiento y reemplazo (recurrente), y para la demolición y gestión de RCD debería ser excluida de los análisis. La energía primaria es una forma de cuantificación de estas energías, normalmente ligada a la energía operativa, pero que podría aplicarse en la embebida.

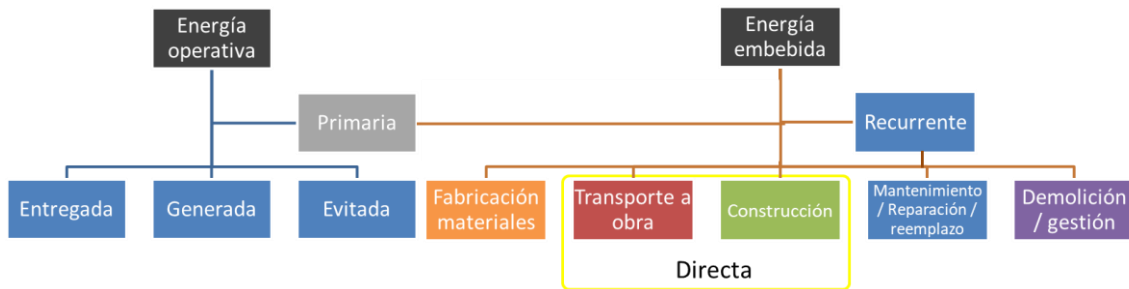


Ilustración 6. Conceptos y tipos relacionados con energía operativa y embebida. Fuente: Elaboración propia.

El análisis nos muestra dos tendencias en el diseño de edificios sostenibles. Por un lado, la que se enfoca en reducir la energía operativa aumentando la embebida a través de edificios de alto desempeño, debido a los materiales de aislamiento y otros que varían según su proceso de fabricación, por otro, está la tendencia que implementa materiales de baja energía embebida pero menor desempeño. Bajo esa premisa, los edificios NetZero EB se convierten en altos consumidores de energía embebida, dejando abierto un campo de estudio hacia la gestión de este tipo de energía en edificios.

Está claro que la industria de la construcción de edificios y de vivienda es intensa en emisiones y en demanda de energía, sin embargo, a nivel global las viviendas de apartamentos tienen el menor consumo de energía embebida y operativa. Para planificar y construir edificios de alto desempeño energético, no solo a nivel operativo sino también de energía y carbono embebido, es necesario crear un protocolo unificado de cuantificación que permita su cálculo, comparación entre casos y disminución de su demanda.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es un método y herramienta para evaluar los impactos ambientales potenciales de un edificio o material a través de la recopilación de entradas y salidas en todas sus etapas. Uno de los propósitos de estos estudios es hacer comparaciones con otros casos, por lo que se recomienda normalizar la unidad de energía embebida y operativa por unidad de área y año de vida útil. Existen tres métodos para desarrollar un inventario de ciclo de vida, que son el análisis de proceso, el análisis de entrada-salida, y el análisis híbrido. Esta metodología es útil para estimar y cuantificar la energía embebida y huella de carbono entre otros impactos, donde el método de cálculo CED es esencial para los temas relacionados con energía.

Estudios realizados en diferentes tipos de viviendas, revelan que la cimentación, excavación y estructura representan los mayores impactos ambientales, mientras que los materiales destacados por su alto impacto y energía son el concreto, mampostería, ventanas, drywall (tabiquería seca), acero y paneles fotovoltaicos. El origen principal de esta energía son las fuentes fósiles no renovables, donde los muros tienen la mayor contribución.

El interés que ha despertado la cuantificación de los flujos de energía embebida en edificios a través de metodologías de ACV, ha conducido a establecer el concepto de “Análisis energético del ciclo de vida” (AECV, o LCEA por sus siglas en Inglés), que se ha incorporado en la presente investigación. En el ámbito de los NetZero EB, el balance se busca a través de la cuantificación de la energía del ciclo de vida anualizada (ALCE), que es igual a la suma de la energía primaria operativa y la energía embebida anuales, y debería ser igual o menor que la energía producida por la ER en su ciclo de vida. Los parámetros metodológicos para desarrollar estos cálculos aún no están claramente definidos, sin embargo, se recomienda definir muy bien los alcances, las unidades de medida y un proceso de normalización de datos.

Las energías renovables son definidas como sistemas de generación de electricidad y/o transferencia de calor que aprovechan el clima y procesos naturales disponibles que se restauran permanentemente a través del uso de diferentes tecnologías, evitando las energías de origen fósil; las denominadas fuentes no convencionales de energía renovable se refieren a aquellas tecnologías de escasa utilización o aprovechamiento por el mercado, como por ejemplo, algunas derivadas del sol o del calor generado en el subsuelo.

En el caso de los edificios, son tecnologías o equipos de pequeña escala para proveer energía, ventilar, calentar y/o enfriar sus espacios sin impactos ambientales a largo plazo, tanto durante su uso (operativo), como en sus demás etapas de ciclo de vida (impactos embebidos). Estudios relacionados vinculan su desempeño y amortización económica según las características climáticas y a veces con soluciones mixtas, es decir, incluyendo más de una tecnología según el caso, tanto para la generación eléctrica, como la de calor.

Si bien esta generación de energía aportada en la fase operativa es de bajo impacto ambiental, existen tecnologías que son más apropiadas para climatización o para generación de electricidad, siendo las más ofertadas en la actualidad y dependiendo del país los paneles fotovoltaicos, turbinas mini eólicas, colectores solares, geotermia y biomasa.

Estas tecnologías son esenciales al referirnos a los edificios neto cero o de consumo de energía casi nulo (EECN o NetZero EB), los cuales son definidos como edificios de alta eficiencia energética donde su demanda de energía es menor (lo cual implica excedentes a la red) o igual a la generación por fuentes renovables in situ o en el entorno, en un periodo de tiempo determinado. En la Unión Europea se ha establecido que todos los nuevos edificios deben ser NetZero EB a partir de 2020.

Además de la energía, debido al cumplimiento de los ODS y las metas de reducción del cambio climático por gases de efecto invernadero GEI, este tipo de edificios encarnan características de descarbonización de los mismos, denominándose también como edificios carbono neto cero/nulo o “Zero-Net Carbon”, los cuales son eficientes y obtienen energía libre de carbono para su consumo operativo. Un nivel “superior” de estas características implica generar energía excedente (posiblemente fuera del sitio) y tener en cuenta el uso de la energía en todo su ciclo de vida, lo cual define a los edificios de energía positiva.

En ese orden de ideas, los equipos de ER son fundamentales para una reducción considerable del consumo de energía eléctrica de la red y consecuentemente de emisiones

de CO<sub>2</sub> por el edificio. Sin embargo, más allá de los indicadores de balance en energía primaria, que se basan en la cuantificación de las proporciones de energía generada respecto a la demandada, está pendiente el desarrollo de un procedimiento concertado y aceptado que determine la proporción de generación de energía por edificio (o m<sup>2</sup>), así como su conveniencia según las condiciones del entorno.

Finalmente, el marco normativo describe las normas nacionales e internacionales más relevantes frente a los conceptos vistos. En cuanto a características de los NetZero EB y la gestión de la energía embebida, ningún estándar ha sido aceptado ampliamente. El análisis de ciclo de vida se encuentra estandarizado por la familia de la ISO 14040, las Reglas de Categoría de productos de construcción por la EN 15804, las declaraciones ambientales de producto por la ISO 14025, y de manera complementaria y concreta para productos de la construcción se cuenta con la ISO 21930.

Frente a energías renovables, Colombia cuenta con una buena cantidad de normativas que se articulan a partir de la Ley 1715 de 2014 que regula la integración de las energías renovables en el sistema energético nacional. Entre las más destacables se encuentran el Decreto 348 de 2017 y la Resolución CREG 30 de 2018 sobre autogeneración de pequeña escala. Por último, es bueno tener en cuenta a la Resolución 41286 de 2016 que establece el PAI 2017-2022 junto con el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y demás Formas de Energía No Convencionales PROURE, el cual no está enfocado al tema de las ER pero si plantea metas de instalación de paneles solares en viviendas durante su vigencia.

Lo abordado en este marco referencial da cumplimiento al Objetivo específico 1 (OE1) de la presente investigación, el cual comprende “Identificar conceptos, marco normativo, demandas y procedimientos técnicos para desarrollar edificios de vivienda que incorporan energías renovables”.

#### **2.4.1. Bibliografía del capítulo**

Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.03> <Consulta: 15 de junio de 2019>

Congreso de la República de Colombia. Ley 1715 de 2014 (mayo 13). Diario Oficial No. 49.150 de 13 de mayo de 2014

Chastas, P., Theodosiou, T., & Bikas, D. (2016). Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review. *Building and Environment*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.040> <Consulta: 15 de Abril de 2019>

Chel, A., & Kaushik, G. (2018). Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 655–669. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.027> <Consulta: 09 de julio de 2018>



Chávez, Pedro (2018). Energías renovables y eficiencia energética: Análisis de medidas orientadas al sector residencial. Ediciones de la U.

Dixit, M. K. (2017). Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.051> <Consulta: 16 de Abril de 2019>

DNP Departamento Nacional de Planeación, 2018a. Documento CONPES 3919, Política Nacional de Edificaciones Sostenibles. Consejo Nacional de Política Económica y Social. República de Colombia

DNP Departamento Nacional de Planeación, 2018b. Documento CONPES 3934, Política de Crecimiento Verde. Consejo Nacional de Política Económica y Social. República de Colombia

Ecofys (2014). Overview of Member States information on NZEBs: Working version of the progress report -final report. Por orden de la Comisión Europea. Recuperado de: <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Updated%20progress%20report%20NZEB.pdf> <Consulta: 15 de Abril de 2019>

Eley, C. (2018). Zero Code: Architecture 2030 Building Energy Standard: Energy Efficiency Requirements Based on ASHRAE Standard 90.1-2016. Architecture 2030. Recuperado de: <https://zero-code.org/wp-content/uploads/2018/04/ZERO-Code.pdf> <Consulta: 30 de mayo de 2019>

Finnegan, S., Jones, C., & Sharples, S. (2018). The embodied CO<sub>2e</sub> of sustainable energy technologies used in buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 181, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.037> <Consulta: 15 de Abril de 2019>

González, Rosa (2018). Designing nearly zero energy buildings: energy efficiency and on-site generation. Tesis de doctorado Programa de Planeamiento Energético. Instituto Alberto Luiz Coimbra para Estudios de Posgrado e Investigación en Ingeniería. Rio de Janeiro. Recuperado de <http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/teses-e-dissertacoes/2018/1467-designing-nearly-zero-energy-buildings-energy-efficiency-and-on-site-generation-2>

González-Vallejo, P., Solís-Guzmán, J., Llácer, R., Marrero, M. (2015). La construcción de edificios residenciales en España en el período 2007-2010 y su impacto según el indicador Huella Ecológica. *Informes de la Construcción*, 67(539): e111, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.017>

Guan, L., Walmsely, M., & Chen, G. (2015). Life Cycle Energy Analysis of Eight Residential Houses in Brisbane, Australia. In *Procedia Engineering* (Vol. 121, pp. 653–

661). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1059> <Consulta: 15 de junio de 2019>

Harkouss, F., Fardoun, F., Biwole, P. (2019). Optimal design of renewable energy solution sets for net zero energy buildings. *Energy*, 179, 1155-1175. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.013>. <Consulta: 15 de noviembre de 2019>

Hernández, J. (2013) Metodología basada en ACV para la evaluación de sostenibilidad en edificios. Documento de tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Documento pdf disponible en <<http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/116927/TJHS1de1.pdf?sequence=1>> [Consulta: 12 de febrero de 2016]

Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación. 6ª edición. McGraw-Hill Interamericana Editores, México D.F.

Hernandez, P., & Kenny, P. (2010). From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). *Energy and Buildings*, 42(6), 815–821. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.001> <Consulta: 15 de junio de 2019>

ISO Organización Internacional de Estandarización. Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia. Ginebra, Suiza: ISO, 2006. (ISO 14040)

Koezjakov, A., Urge-Vorsatz, D., Crijns-Graus, W., & van den Broek, M. (2018). The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings. *Energy and Buildings*, 165, 233–245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.036> <Consulta: 16 de Abril de 2019>

Kouloumpis, V., Sobolewski, R. A., & Yan, X. (2020). Performance and life cycle assessment of a small scale vertical axis wind turbine. *Journal of Cleaner Production*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119520> <Consulta: 10 de septiembre de 2020>

Macías, J., Iturburu, L., Rodriguez, C., Agdas, D., Boero, A., & Soriano, G. (2017). Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador. *Energy and Buildings*, 151, 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.016> <Consulta: 29 de mayo de 2019>

Ministerio de Minas y Energía (2016). Plan de acción indicativo de eficiencia energética – PAI PROURE 2017 - 2022. República de Colombia. Recuperado de: [http://www1.upme.gov.co/Documents/PAI\\_PROURE\\_2017\\_2022.pdf](http://www1.upme.gov.co/Documents/PAI_PROURE_2017_2022.pdf)

Osma P, G. et al. (2015). Energy considerations of social dwellings in Colombia according to NZEB concept. *DYNA* 82(192): 120. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n192.48587> <Consulta: 31 de mayo de 2019>

Muñoz, C. (2013). Estudio de la energía incorporada y emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de viviendas en Chile. Memoria para optar al grado de doctor. Doctorado en arquitectura y urbanismo, Universidad del Bio-Bio. Concepción, Chile. Recuperado de: <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/2217> <Consulta: 13 de diciembre de 2019>

Thiel, C. L., Campion, N., Landis, A. E., Jones, A. K., Schaefer, L. A., & Bilec, M. M. (2013). A materials life cycle assessment of a net-zero energy building. *Energies*, 6(2), 1125–1141. <https://doi.org/10.3390/en6021125> <Consulta: 18 de Abril de 2019>

Vares, S., Häkkinen, T., Ketomäki, J., Shemeikka, J., & Jung, N. (2019). Impact of renewable energy technologies on the embodied and operational GHG emissions of a nearly zero energy building. *Journal of Building Engineering*, 22, 439–450. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.12.017> <Consulta: 15 de Abril de 2019>

U.S. Department of Energy. (2015). A Common Definition for Zero Energy Buildings. Recuperado de: <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/common-definition-zero-energy-buildings> <Consulta: 17 de Abril de 2019>

# 3. ENERGÍAS RENOVABLES

### 3.1 FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGIA RENOVABLE

Se denomina energía renovable (ER) a la energía que proviene de fuentes convencionales, no convencionales y naturales virtualmente inagotables, ya que contienen una gran cantidad de energía (que es emanada) porque son capaces de regenerarse por medios naturales y con una reducida generación de impactos ambientales. Según la UPME (2015), “la dependencia mundial en el petróleo, el carbón, el gas natural y aun en los combustibles nucleares, como recursos fósiles disponibles en grandes cantidades pero finitas, las coyunturas económicas y geopolíticas asociadas, con su distribución geográfica y su dominio, han generado en muchos países la necesidad de iniciar una transición hacia el uso de recursos energéticos de carácter renovable, que a su vez contribuyan a la reducción de emisiones de efecto invernadero y a la mitigación del cambio climático que viene experimentando el planeta”.

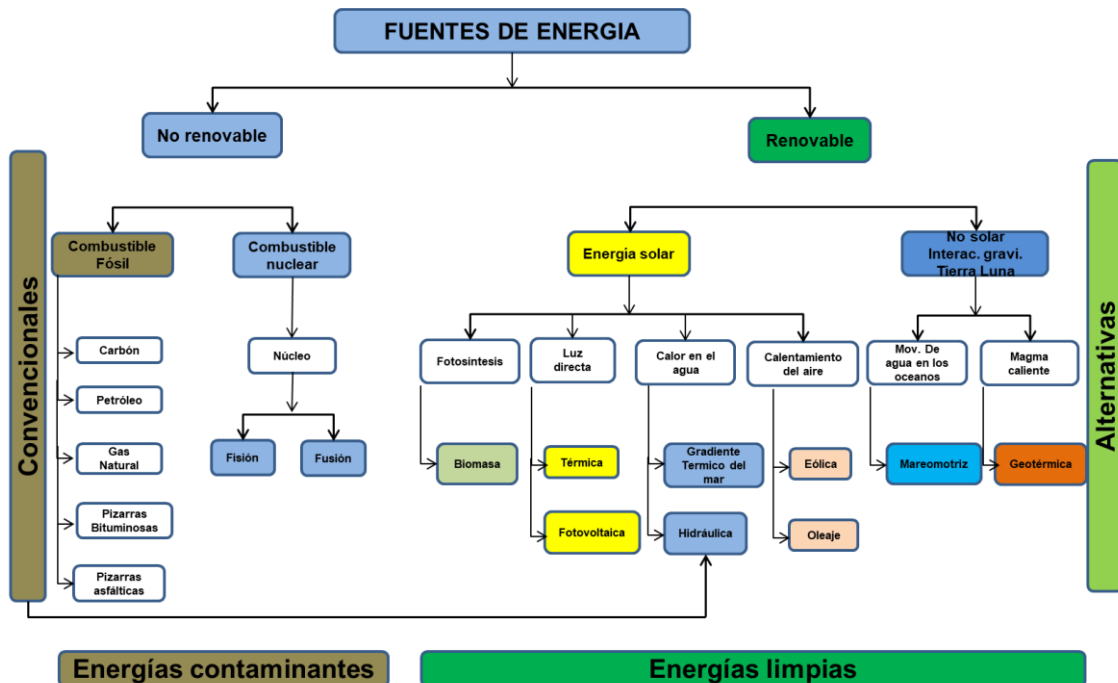


Ilustración 7. Fuentes de energía. Fuente: Elaboración propia con base en <http://ticsenlaiedr.blogspot.com/2014/08/las-fuentes-de-energia.html>

Al plantear una clasificación de las diferentes fuentes de energía, podemos establecer dos grandes grupos: energías no renovables o convencionales y energías renovables o alternativas o no convencionales (vale la pena aclarar que la hidroeléctrica se considera como renovable convencional). Las energías no renovables se denominan como contaminantes pues se agotan sin poder renovarse y sus reservas son limitadas, además de las consecuencias ambientales y económicas por su extracción y alta demanda. Ver Ilustración 7.

Por su parte, las energías renovables están compuestas por las de origen no solar y solar, las cuales se dividen en indirecta y directa, que a su vez están compuestas por la hidráulica, eólica, biomasa, térmica y fotovoltaica; las de origen no solar se componen de mareomotriz y geotérmica. Estas energías son denominadas como limpias porque se obtienen de fuentes naturales inagotables o de capacidad de regeneración natural, sin

grandes impactos ambientales (existe algo de debate al respecto), y al ser no convencionales requieren de cierta reconversión frente a la cadena de distribución de energía tradicional.

Existen otros tipos de energía renovable de menor desarrollo o sin aplicación a escala de la edificación como la hidráulica, mini hidro, aerotermia (ya aplicada pero debatida), solar fotovoltaica de concentración, termosolar de concentración, paneles solares termodinámicos, algas para la generación de calor (<https://www.arup.com/projects/solar-leaf>), y subtipos de la mareomotriz como la undimotriz, maremotérmica y osmótica.

En tal contexto, países como China, Alemania, India, Japón y Estados Unidos (REN21, 2019: 25), se consolidan como países pioneros en el desarrollo de las mayores capacidades instaladas en tecnologías relacionadas con la energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica y de la biomasa, las cuales hacen su aporte en el proceso de transición en la generación de energía eléctrica. Dada la disponibilidad de al menos una de las fuentes renovables anteriormente mencionadas en cualquier posición geográfica del planeta, y la abundancia relativa de una o varias de estas fuentes en algunas regiones favorecidas, las fuentes de energía renovables representan a su vez inmensos potenciales energéticos para ser aprovechados en la medida en que su investigación, su desarrollo y el despliegue comercial de las tecnologías asociadas continúen avanzando como ha venido sucediendo en los últimos 40 años.

La implementación y reconversión de la matriz energética en diferentes países en el mundo ha crecido exponencialmente, según Chel y Kaushik (2018: 8) “alrededor del 18% del consumo global final de energía en 2006 provino de fuentes renovables”<sup>27</sup>; por su parte, el Irena (2017: 15) acerca de su aplicación en edificios señala que en 2013, “aproximadamente el 20% del uso de energía de todos los edificios y de transporte en las ciudades fue suministrado por energía renovable”, suministrando casi una cuarta parte de la energía que utilizaban.

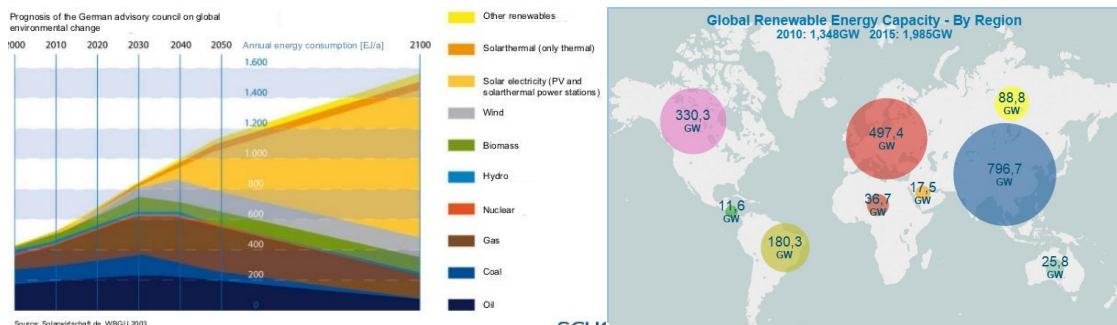


Ilustración 8. Energía renovable global a 2100 y Capacidad global por región en 2015. Fuente: solarwirtschaft.de WBGU 2003 - <https://public.tableau.com/profile/irena.resource#!/>

Así lo demuestran diferentes gráficos de instituciones encargadas de la promoción de las renovables (Ilustración 8), donde en 2015, el líder de la capacidad instalada de ER es China con 796.7 Gw, luego Europa con 497.4 Gw y Latinoamérica está representada por Brasil con 180 Gw. Por otro lado, proyecciones del Consejo Alemán asesor en cambio climático pronostica que tanto el consumo anual de ER como energías convencionales

<sup>27</sup> “... un 13% proveniente de la biomasa tradicional, como la quema de leña. La energía hidroeléctrica fue la siguiente fuente de energía renovable con un 3%, seguida de agua caliente / calefacción, que contribuyó con un 1,3%. Las tecnologías modernas, como la energía geotérmica, eólica, solar y oceánica, en conjunto proporcionaron alrededor del 0,8% del consumo final de energía” (traducción del autor).

seguirá en aumento hasta el 2030, donde habrá una transición de adaptación, para luego, en 2040, presentarse una reducción fuerte de las energías convencionales que incluye las renovables de biomasa y eólica; también puede observarse que simultáneamente hay un incremento potente del aprovechamiento de energía solar directa a 2100.

Según Greenpeace<sup>28</sup>, la utilización de energías renovables para producir el total de la demanda energética es técnicamente viable y económicamente asumible, por lo que solo hace falta voluntad política y desarrollar paralelamente una alta eficiencia energética. La producción de energías de bajo impacto ambiental verdes va en aumento por los claros compromisos políticos, así como por la reconversión tecnológica.

Se encontró que la principal razón para el relativo subdesarrollo de estas tecnologías en Colombia radica en que, a raíz de los costos de inversión asociados, un contexto energético de relativa abundancia de recursos convencionales ligado a una fuerte participación de hidroenergía en la matriz eléctrica, sumado a dificultades socioculturales y políticas para el ejercicio de acciones dirigidas a producir resultados de largo plazo. Como parte de las recomendaciones finales para lograr la integración de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) al Sistema energético nacional (SIN), se debe fomentar un fácil acceso a incentivos, esquemas de mercado intradiario, mesas de trabajo y financiación, y hacer una evaluación y optimización técnico económica de cada proyecto apoyado.

Las zonas urbanas representan más de la mitad de la población mundial, así como el 65% de la demanda mundial de energía y el 70% de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) relacionadas con la energía, por lo tanto, necesitan actuar para satisfacer las crecientes necesidades de sus poblaciones, manteniendo un entorno de vida saludable, combatiendo la pobreza y mitigando el cambio climático. La transición a las energías renovables recorre todo el paisaje energético urbano, desde los edificios hasta el transporte, y la industria; significa integrar la oferta y la demanda de energía entre los diferentes sectores, a través de tecnologías inteligentes, planificación rigurosa y la toma integral de decisiones.

Estas consideraciones junto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODSs) y reducción del cambio climático solo pueden ser alcanzados cuanto mayor sea el aprovechamiento de las fuentes de energía renovable, pues son abundantes y cada vez más competitivas, al ofrecer generación de energía de menor costo en todo tipo de lugares, incluyendo zonas no pertenecientes al SIN. Las ciudades desempeñan un papel cada vez más importante en esta transición energética debido a sus consumos de recursos y energía en su ciclo de vida, razón por la cual esta estrategia hace parte de las agendas globales de cara a los compromisos adquiridos al 2030.

Si bien el potencial de las ER es alto, varía dependiendo de las características de cada ciudad, la densidad de población, las perspectivas de crecimiento y los perfiles de demanda en climas fríos y cálidos; es necesario realizar una evaluación de estos datos para determinar las oportunidades en su implementación, incluyendo su uso en edificios urbanos y sistemas de transporte. De esta manera, las soluciones de ER forman parte de una agenda más amplia de desarrollo sostenible de las ciudades, por lo cual necesitan romper sus barreras internas y forjar nuevos vínculos entre los responsables de la

---

<sup>28</sup> <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/energias-renovables/>

planificación urbana, las políticas públicas, el gobierno, el transporte, la gestión de residuos, entre otros.

### 3.1.1. Aplicación en edificios de vivienda

De acuerdo con la Agencia Internacional de las Energías Renovables (Irena, 2016: 11), a principios de la década del 90 las ciudades consumían menos de la mitad de la oferta mundial de energía; actualmente, la proporción del uso de energía urbana frente al suministro total de energía primaria en la mayoría de las grandes ciudades ha tenido un aumento mucho más significativo que el mismo crecimiento urbano, apreciándose diferencias entre los ingresos per cápita por ciudad, donde las ciudades de altos y medios ingresos usan la mayor parte de su energía en edificaciones y transporte, y casos como el Latinoamericano donde la mayor parte de la energía es consumida por la industria.

Bajo este contexto urbano de alto crecimiento, los edificios (tanto nuevos como existentes) y el sector transporte tienen el mayor potencial de reducción de uso de energía, al incorporar estrategias y estándares de eficiencia energética. Los países en vías de desarrollo tienen una gran responsabilidad para implementar estos lineamientos debido a sus grandes presiones e impactos que genera el rápido crecimiento urbano y de densidad demográfica frente a la falta de inversión, información e implementación<sup>29</sup>.

En la actualidad, las tecnologías comunes de energía renovable que tienen aplicación en viviendas, es decir, de pequeña escala como mecanismo de autoconsumo, son la solar térmica con los colectores solares, la solar eléctrica con paneles fotovoltaicos (FV, sin duda la más aplicada), la biomasa con calderas de reacción exotérmica, la geotermia con conductores subterráneos y la mini eólica con pequeños aerogeneradores. Así mismo, la autogeneración de energía se divide principalmente en eléctrica y térmica (calefacción / refrigeración), las cuales sirven esencialmente para climatizar los espacios y como suministro eléctrico.

Algunos autores como Chévez (2018) y Chel & Kaushik (2018) se refieren a ciertas estrategias de diseño bioclimático como sistemas de energía renovable pasivos debido a que aprovechan un recurso renovable como el sol, sacando ventaja de las propiedades de los materiales y la configuración espacial propia del edificio; estos sistemas son la ganancia solar, los acumuladores de calor, y los invernaderos. De manera opuesta, los sistemas activos “incorporan elementos adicionales” a la arquitectura; se trata de la energía solar fotovoltaica y la solar térmica, esta última comprendida por colectores de agua con o sin cubierta plana, o por aire, o con tubos al vacío.

La aplicación de sistemas de generación de energía renovable en edificios tiene ventajas como que reducen fuertemente las pérdidas de energía (al evitar la disipación de potencia en los cables que transportan la energía entre el generador y el punto de conexión), los impactos en el paisaje y los costos implicados en la generación por grandes centrales y su transmisión al lugar de consumo. Por otro lado, también dependen de las condiciones

---

<sup>29</sup> “Se necesita mucha más inversión en la consolidación de la eficiencia energética para cumplir con los objetivos internacionales del cambio climático, y mantener las temperaturas globales promedio dentro de los 2° C de los niveles preindustriales. La inversión total deberá aumentar de USD 80-100 mil millones en 2014 a aproximadamente USD 215 mil millones por año en 2020” (Irena, 2016: 14).



climáticas del sitio, un área de cubierta bien orientada, las posibles sombras, la morfología del edificio y la urbana.

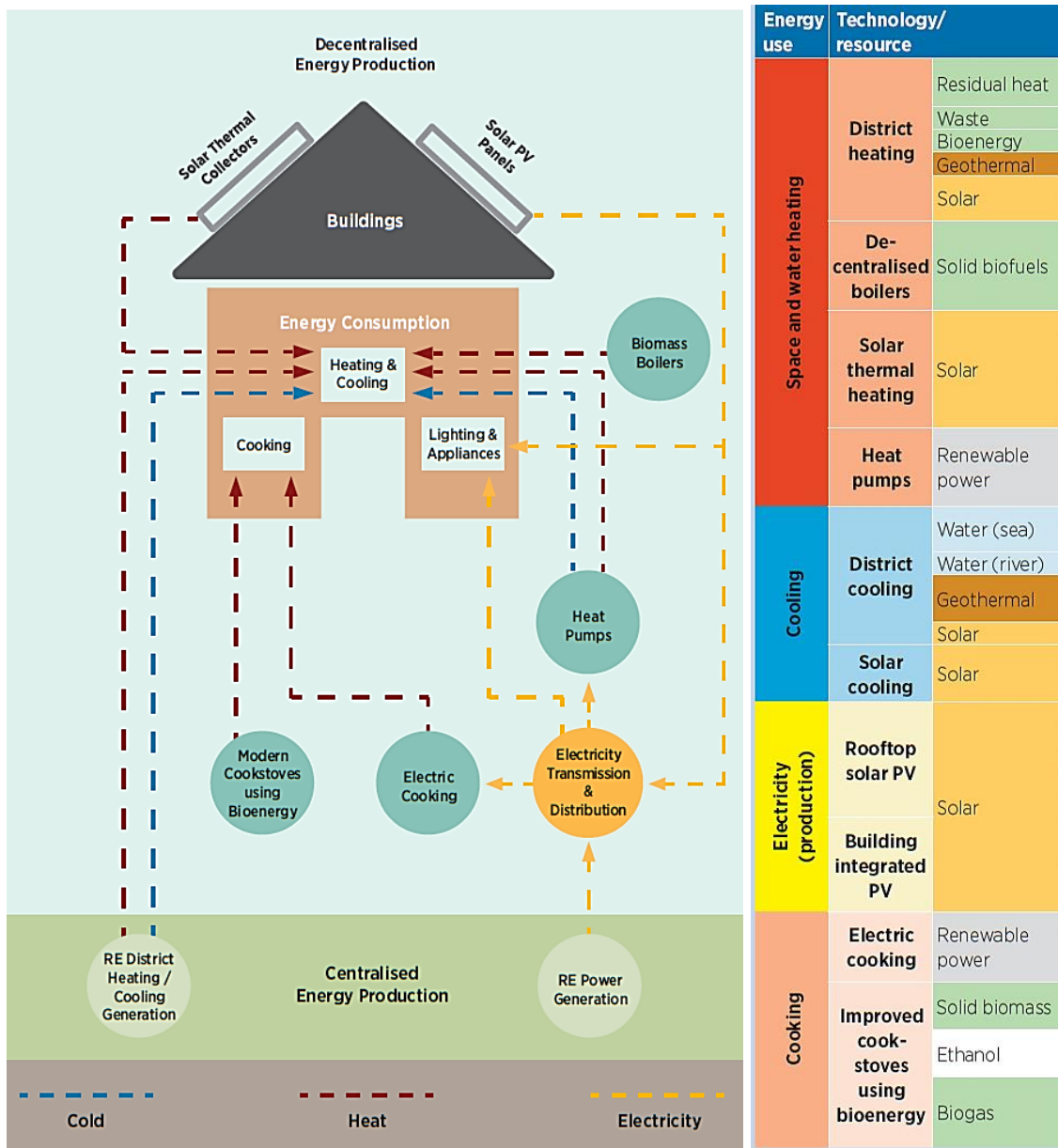


Ilustración 9. Incorporación de renovables en la edificación. Fuente: Irena, 2016

En el análisis de incorporación de energías renovables autónomas en la edificación, el International Renewable Energy Agency (Irena, 2016) analiza su posible articulación en distritos térmicos y divide sus aplicaciones o usos con una o más tecnologías asociadas: calefacción, refrigeración, cocción y producción de electricidad. Si bien la práctica general es incorporar uno o dos sistemas en edificaciones, este análisis permite pensar en una tecnología específica de energía renovable que mejor se acople a ciertos usos de una vivienda o edificación y plantear mecanismos para independizar el consumo de energía en la cocina, al usar hornos alimentados con biocombustibles o biomasa (Ver Ilustración 9). En Colombia, esto va en línea con algunas disposiciones del PROURE 2017-2022 y la Resolución 196 de 2020; en el caso europeo, existe la Directiva 2009/28/CE relativa al fomento de Energías Renovables que insta a la integración en los sectores del urbanismo y la edificación.

El distrito térmico, también llamado redes de calefacción y refrigeración urbana son una “nueva” perspectiva de generar y distribuir energía, al contar con una red de tuberías aisladas y subterráneas que bombean agua caliente o fría a varios edificios agrupados, o a escala de barrio, y cuya producción de electricidad o calor se da de manera centralizada para su posterior distribución, que es contrario a la generación descentralizada que se da en un solo edificio para su propio consumo. La fuente energética de esta producción se da a través de cualquiera de las tecnologías de generación de energía renovable existentes, y cuya viabilidad depende del contexto geográfico y la disponibilidad de recursos.

La reducción de precios de tecnologías como la solar fotovoltaica ha logrado que los habitantes de edificaciones residenciales y comerciales pasen a convertirse en productores de electricidad con opción de integrar sus excedentes en la red pública, gracias a políticas que regulan esta actividad y que en Colombia ya se encuentra normatizado. En estos casos, los distritos térmicos cambian su naturaleza ya que no producen energía centralizada en un edificio, sino que un punto o una red genera electricidad para un conjunto de edificios, por lo cual su tratamiento estaría sujeto a leyes de propiedad horizontal o de condominio, dependiendo del contexto.

En el distrito térmico, el almacenamiento de energía y la distribución pública de los excedentes de la generación se convierten en tecnologías de soporte para un sistema urbano de energía integrado, con capacidad de acople con la industria y el transporte, y cuyas iniciativas están siendo desarrolladas por varios países a la vanguardia (Irena, 2016: 28).

Para lograr un buen desempeño del sistema de energía renovable implementado y lograr mayores reducciones de energía en los edificios, es necesario que estos estén integrados con estrategias de eficiencia energética tanto pasivas como activas cuando apliquen, lo cual podría facilitar que el edificio opte por una certificación ambiental de construcción sostenible o calificarse como edificio NetZero EB (o de consumo de energía casi nulo EECN), lo cual es obligatorio para todos los edificios nuevos en la Unión Europea a partir del año 2020.

Es por ello que los aspectos climáticos y pasivos aportados por la orientación, la ubicación, la temperatura y las horas de brillo solar entran a determinar las cargas y diseños de calefacción y/o refrigeración que demanda un edificio para su operación, así como la viabilidad y disposición de la tecnología en energía renovable.

De acuerdo con Chel & Kaushik (2018: 8), recientemente, los sistemas de energía solar como colectores solares térmicos y paneles fotovoltaicos han tenido una amplia aceptación por la reducción de sus precios para cubrir las demandas de calefacción, refrigeración, electricidad e iluminación. Estos sistemas se ubican en fachadas y en cubiertas horizontales o inclinadas de edificios de diferentes usos como residenciales, hoteles, centros deportivos, etc., ya que se configuran como superficies disponibles y apropiadas para su uso. Así mismo, mencionan diferentes sistemas de energía solar de buena adopción alrededor del mundo:

1. *Unidades de termosifón de placa plana (FPTU) y almacenamiento de colector Integrado (ICS)*
2. *Colectores solares con absorbentes de colores*

3. *Colectores solares con reflectores de refuerzo*
4. *Colectores solares sin esmaltar*
5. *Sistemas híbridos fotovoltaicos / térmicos (PV / T)*
6. *Lentes Fresnel*
7. *Integración del edificio de sistemas solares / eólicos*
8. *Unidad de manejo de aire inteligente en Bélgica*

En la discusión sobre el fomento del autoconsumo por renovables también existe el tema de los modelos de facturación o de compra de la energía producida respecto a la consumida en la red, especialmente en entornos urbanos ya que hacen parte del SIN. En el modelo Feed in Tariff (FIT) el usuario generador de energía sigue comprando energía a la red a una tarifa convencional, al mismo tiempo que vende sus aportes a la red por generación en sitio a tarifas preferenciales, lo cual significa que esta es medida e inyectada en la red sin ser consumida en el interior de la vivienda. Por tanto, existen dos facturas, una de compra y otra de venta, y para ello se requiere de dos medidores unidireccionales, uno para medir el consumo y otro para medir la compra.

Por otro lado, el modelo de balance neto (o medición neta, o Net Metering) es un esquema de incentivo público de amplia aplicación que permite el autoconsumo y compensa los excedentes de energía producida de manera instantánea o diferida a través de la red pública; esto permite pagar solo lo que se consuma neto de la red, descontando los excedentes autónomos generados que son aportados a la red o para un consumo posterior (crédito de energía). Esto quiere decir que el usuario paga la diferencia entre la energía producida respecto a la consumida de la red (de ser necesario), y para ello se requiere de un contador bidireccional que mida tanto la energía que sale a la red como la que entra al edificio.

De acuerdo con SOM Energía (2020), el autoconsumo “colectivo” en bloques de piso (vivienda colectiva o multifamiliares) es una modalidad normalizada en España por el Real Decreto 244/2019 (en Colombia este tipo de normatividad aún no existe), donde un grupo de consumidores se reparten de manera acordada la energía eléctrica que procede de instalaciones de generación en sitio. Para tal propósito, existen diferentes configuraciones posibles bajo acuerdo de las partes, en cuanto a quién utiliza la instalación, quién es el propietario, y quién tiene la titularidad. Se recomienda la configuración de red interior con excedentes y compensación simplificada, de uso, propiedad y titularidad comunitaria. El mecanismo de compensación simplificada se asemeja al modelo de balance neto, al ofrecer una retribución económica por la energía no utilizada de forma instantánea y que es registrada por el contador.

Frente al proceso de inventario para realizar ACV de edificios, la entrega de excedentes de generación a la red no ofrece reducciones proporcionales de CO<sub>2</sub> embebido a gran escala, pues la cuantificación de estos procesos por lo general se da en la etapa de ciclo de vida “D, Reutilización/ recuperación/ potencial de reciclaje” y no como ahorros de la etapa operativa (EN 15978), haciendo difícil predecir la proporción de emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas al ignorar que la electricidad puede importarse en algunos momentos y luego exportarse en otros, además que existe una correlación entre la generación por ER en sitio y la generación en otros lugares conectados a la misma red eléctrica, bajo supuestos de emisiones asociadas a dicha red (Galpin & Moncaster, 2017).

En la práctica, el impacto de consumir o generar electricidad varía con el tiempo dependiendo de las formas de generación de electricidad en funcionamiento. La aplicación de factores de uso de energía operativa, en lugar del factor de emisiones promedio de la red, podría dar como resultado que las emisiones de carbono evitadas por la generación de electricidad renovable sean más altas que las emisiones promedio de la red, lo cual favorece a las medidas de reducción de emisiones por energía operativa y haciendo parecer a las ER como un método de disminución de emisiones de carbono demasiado efectivo (Ibídem).

La generación eléctrica en Colombia tiene cuatro maneras de comercializar la energía: un mercado spot, un mercado de contratos bilaterales, un mercado de confiabilidad y un mercado de reservas<sup>30</sup>. La producción se realiza mediante un despacho de generación centralizado, en el que participan plantas en su mayoría hidráulicas y térmicas (gas y carbón) mayores de 10 o 20 MW, que hacen sus ofertas de disponibilidad y precio y producen según su mérito o competitividad (Rodríguez, Cadena, y Aristizábal, 2015: 56). Con la Resolución CREG 30 del 30 de febrero de 2018, se regulan las actividades de autogeneración de energía menor o igual a 100 kW, así como la entrega o remuneración de excedentes a través de un medidor bidireccional.

Aunque podría parecer que se dan las condiciones normativas y económicas para que las ER prosperen en el sector, aún faltan por superar algunas barreras. Entre ellas, el alto costo inicial de estas tecnologías, la alta tasa de descuento en el segmento residencial, la falta de mecanismo de financiación, la falta de conciencia frente a los beneficios, las cuestiones culturales e informativas, y la capacidad del edificio (González, 2018: 154).

Actualmente existen diferentes herramientas informáticas que ayudan con el dimensionamiento y cálculo de las instalaciones y equipos necesarios de ER en edificios, pero están enfocados en sistemas fotovoltaicos. Algunos de estos softwares son PVsyst, Transol, PVsol, Skelion, y Homer Energy.

El dimensionamiento de un sistema conectado a la red y uno autónomo son diferentes, pues el primero busca que su rendimiento y generación energética sea lo más elevada posible para entregar sus excedentes y existe menos probabilidad de errores. El sistema autónomo, en cambio, se basa en que debe ser lo más fiable posible asegurando un correcto funcionamiento al tener equipos ajustados a los requerimientos de la demanda, la cual debe ser igual al valor de generación de energía. Esto significa que se requiere disponer de ciertos espacios dentro del edificio para las instalaciones, lo cual suele competir con su aprovechamiento útil y los costos.

Para todos los sistemas es fundamental implementar un prototipo de monitoreo que realice mediciones y evaluación de variables para proporcionar información sobre el desempeño técnico y la calidad de potencia eléctrica generada por este tipo de fuente alternativa, teniendo en cuenta parámetros como: la eficiencia del inversor; la eficiencia de conversión del generador; la eficiencia de conversión del sistema; la energía generada

---

<sup>30</sup> Un mercado spot o “mercado de dinero en efectivo”, es donde el valor del activo financiero se paga al contado en el momento de la entrega. El mercado de contratos bilaterales son acuerdos directos de venta entre un productor y un comprador (por lo general, grandes empresas) buscando estabilidad en el precio a largo plazo. El mercado de confiabilidad o “carga por confiabilidad”, es una forma de remuneración que hace viable una inversión a pesar de estar sometida a condiciones adversas. El mercado de reservas o de “energía mayorista” intercambia grandes cantidades de electricidad en el SIN a precios bajos mediante la participación de grandes actores implicados, y mediante las Leyes 142 y 143 de 1994.

por el generador; y también de datos climáticos en función del tipo de sistema implementado, como de la radiación solar global y de la temperatura ambiente en sistemas FV (Aristizábal, Botero & Gordillo, 2010).

Con el fin de estimar el aporte en energía de los diferentes sistemas y tecnologías de generación de energías renovables en edificaciones, es necesario realizar un “predimensionamiento” simplificado que nos aproxime a la demanda de energía del edificio. A partir de ello, se podrá estimar una cantidad de elementos, contrastarlo con la cuantificación de generación energética, su relación costo beneficio y valorar el aporte de las condiciones climáticas. El cálculo se basa en fórmulas simplificadas provenientes de fuentes académicas para cada tecnología, lo cual es un insumo para calcular una pre factibilidad económica, denominada de esta manera porque no está teniendo en cuenta factores como el rendimiento del sistema, la depreciación, posibles tasas de interés por adquisición bajo crédito, ni las actividades asociadas con la cuantificación, ni costos de instalación y mantenimiento.

A continuación, se explicará con más detalle las diferentes tecnologías, pero se ha omitido la geotermia, ya que la ciudad de Bogotá no reúne las características que la hagan viable para su operación. Esto será explicado en el capítulo “5.4 INCORPORACION DE SISTEMAS DE ENERGIA RENOVABLE”.

### **3.1.2. Paneles fotovoltaicos**

Este sistema aprovecha la energía solar como fuente de energía renovable produciendo principalmente electricidad, al captar la radiación solar mediante una serie de dispositivos semiconductores denominados celdas fotovoltaicas, generalmente compuestos por silicio monocristalino o policristalino<sup>31</sup>, o una deposición de metales sobre un sustrato denominado célula solar de película fina, y cuya fabricación e implementación ha avanzado considerablemente en los últimos años.

Es por eso que la energía solar fotovoltaica (SF) recientemente se ha convertido en la tercera fuente de energía renovable más importante de acuerdo a su capacidad instalada a nivel global, después de las energías hidroeléctrica y eólica, pero tiene proyecciones de aquí al año 2030 que la convertirían posiblemente en la primera. Esto gracias a que en varios países en el mundo se han ofrecido incentivos económicos, sistemas de autoconsumo y balance neto. Del año 2010 al 2015 la capacidad instalada en el mundo creció más de cinco veces, sumando 222.36 MW, ver Ilustración 10. Solo en el año 2014, la capacidad mundial instalada fue de casi 177 Gw que equivalen a 1.500 millones de m<sup>2</sup> y un 35% adicional por año (Chévez, 2018: 138), siendo liderado por China y Alemania.

Debido a que la generación de electricidad depende de la radiación solar, es imprescindible que los paneles se encuentren alineados perpendicularmente al sol, de lo contrario existen pérdidas en el desempeño. No obstante, existen condiciones climáticas adversas que no son previsibles y que también afectan el desempeño, como la falta de horas de sol directo, nubosidad o suciedad sobre los paneles. Esto significa que la práctica

---

<sup>31</sup> Con rendimientos cercanos al 16% y 14% respectivamente, o 14% y 13% según Laleman, Albrecht, & Dewulf (2013). Vale la pena mencionar que además de su sensibilidad a las sombras, las altas temperaturas pueden afectar negativamente el voltaje. El policristalino es el más usado actualmente.

de “desconectar” una vivienda de la red eléctrica pública aun es arriesgada, por lo que este sistema se sigue instalando con apoyo de la red para estos casos de baja eficiencia.

Este sistema al estar integrado en edificios se conoce como BIPV o BAPV (Building Integrated Photovoltaics o Building Applied Photovoltaics, por sus siglas en inglés) cuyos módulos están integrados a la arquitectura o estructura de un edificio principalmente en la cubierta<sup>32</sup>, pero existen ya varios ejemplos de aplicación en fachadas. Los costes mundiales de esta tecnología han disminuido considerablemente, posibilitando que su coste final sea amortizado rápidamente por la reducción del gasto en consumo de energía de la red y/o de otros materiales de construcción.

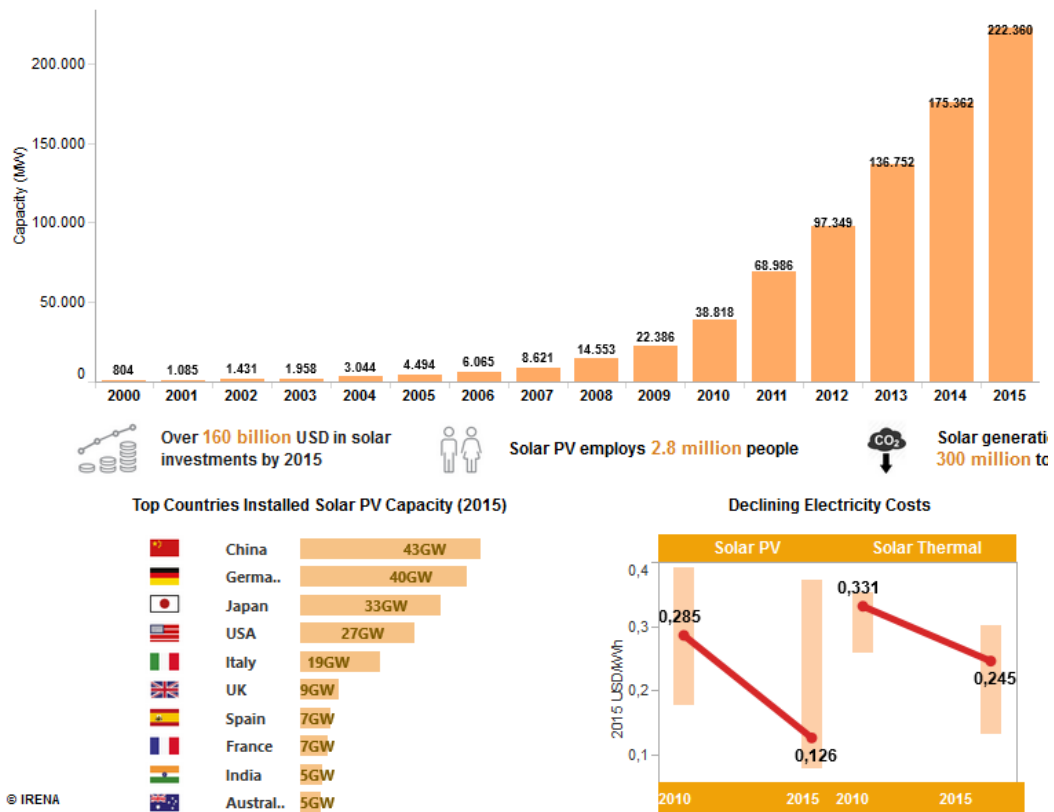


Ilustración 10. Capacidad instalada de SF en el mundo 2000-2015. Fuente: <https://public.tableau.com/profile/irena.resource#!/>

A pesar de las ventajas, existen dificultades para su replicación en edificios de vivienda colectiva, relacionados con la diversidad de los propietarios y sus perspectivas de inversión (González, 2018), la influencia del comportamiento de sus vecinos, la cantidad de cableado y equipos necesarios para instalarse en cada vivienda, y la falta de instaladores calificados.

Si bien se le denomina como energía limpia debido a que durante su funcionamiento no emite ningún tipo de emisiones de GEI asociadas, ni requiere de importación de diesel, existen estudios que vinculan su fase de fabricación con altas cantidades de energía (es

<sup>32</sup> Existen proyectos de promoción a nivel mundial como:  
<http://www.pvdatabase.org/index.php>  
<http://www.polis-solar.eu/>  
<https://www.mapdwell.com/es/solar>  
[http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html)

decir, de energía embebida) provenientes de combustibles fósiles que producen gases de efecto invernadero. Además, en su proceso de fabricación se usan materiales peligrosos y cancerígenos como el arsénico, cadmio, polisilicio y otros relacionados con el método Czochralski de purificación del silicio.

*“La producción de 1 kWh de energía fotovoltaica tiene asociadas unas emisiones de 81,2 g CO<sub>2</sub> equivalentes, así como el consumo de 9,35 litros de agua, aproximadamente 95% de los cuales se asocian al proceso de fabricación de las celdas de silicio”* (Pascualino, Cabrera y Vanegas, 2015: 70).

Por otro lado, pueden existir otros impactos dependiendo del contexto en las fases de construcción y desmantelamiento, relacionados con emisiones de gases, partículas, vertidos líquidos, consumo de recursos y agua para mantenimiento, generación de residuos y afectación permanente del medio biótico. Además, en el caso de granjas solares, ciertas zonas rurales o de alta cobertura vegetal, pueden verse afectadas por la construcción de vías de acceso y de edificaciones auxiliares (Ibídem). Esto ha incentivado diferentes iniciativas para la buena disposición y reciclaje de estos componentes<sup>33</sup>.

Galpin & Moncaster (2017) hacen una revisión de emisiones de carbono embebido en paneles policristalinos según varios estudios, encontrando valores desde 1224 a 1730 kgCO<sub>2</sub>eq/kWp; además, debido a la juventud de este mercado, aun no se cuentan con DAP ni datos suficientes sobre la forma de disposición de los residuos al final de su vida útil por parte del usuario, que se estima en 30 años.

Los principales materiales utilizados para fabricar los inversores son acero, cobre, aluminio, plástico y materiales de embalaje. Al desarrollar análisis de ciclo de vida, Vares et al (2019) han encontrado que el sistema fotovoltaico cuenta con una alta energía embebida por el uso de baterías para almacenamiento (que también depende de la tecnología seleccionada) que, a su vez, necesitan de un albergue independiente que incrementa exponencialmente los impactos. Así mismo, los sistemas fotovoltaicos instalados en NetZero EB contribuyen con el aumento de hasta un 20% del carbono embebido (Wiik et al citado por Vares et al, 2019).

El sistema fotovoltaico autónomo está compuesto por los paneles fotovoltaicos, el regulador de carga, el inversor, y la batería (o acumulador). Recordemos que un inversor es un dispositivo que cambia o transforma un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje de salida de corriente alterna de acuerdo a la necesidad y aparatos a ser alimentados, posibilitando también que esta corriente sea inyectada en la red eléctrica o usados en otras instalaciones eléctricas aisladas. Por su parte, el regulador de carga es un dispositivo que se encarga de controlar la entrada de la energía a la batería de acuerdo a la carga y obteniendo parámetros de funcionamiento<sup>34</sup>. Hay que tener en cuenta que, si se tiene contemplado emplear un esquema de balance neto o medición neta de electricidad, no se requiere de batería ni regulador, y en su lugar habría un contador bidireccional.

Existen métodos sofisticados para determinar el potencial fotovoltaico de un edificio o de una zona urbana, como son la “Probabilidad de pérdida de carga LLP” que es un indicador de falla de suministro del sistema, y la tecnología LiDAR que escanea en tres dimensiones

---

<sup>33</sup> <http://www.pvcycle.org/es/>, <http://ecocycle.org/>

<sup>34</sup> Eventualmente se pueden agregar a la instalación baterías inteligentes, puntos de carga de coche eléctrico, optimizadores de sombras, o monitorización extra.

para determinar las superficies útiles, con base en la radiación solar y datos por SIG. Por otro lado, en internet existen algunas páginas web que aportan un cálculo simplificado para el dimensionamiento de paneles fotovoltaicos<sup>35</sup>, los cuales se basan en la radiación global, las horas de sol día (o brillo solar) y la potencia del panel solar seleccionado.

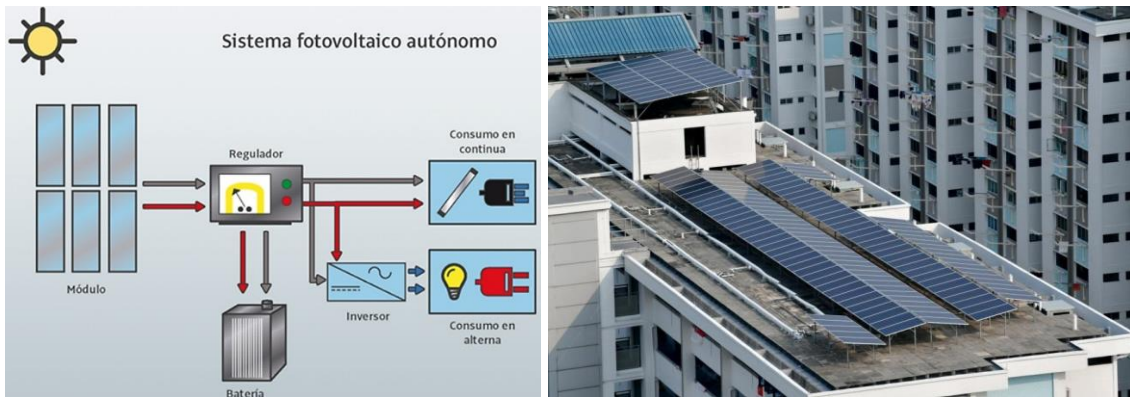


Ilustración 11. Composición de un sistema de paneles fotovoltaicos autónomo y ejemplo instalado.  
Fuente: App Construye 2020, <https://www.straitstimes.com/singapore/environment/solar-energy-to-meet-4-of-singapores-energy-demand-by-2030-up-from-less-than-1>

Para algunas metodologías, el pre dimensionado comienza con una estimación del consumo, luego el cálculo del ángulo óptimo de inclinación de los paneles, del generador fotovoltaico, del sistema de acumulación (baterías, pero podría no necesitarse si se está conectado a la red), cálculo del regulador, dimensionado del inversor y finalmente, del cableado, según la propuesta de Aguilera & Hontoria (s.f.), y Abella (s.f.). En el caso del presente estudio, se ha omitido el cálculo del ángulo óptimo de inclinación de los paneles ya que diferentes estudios de la UPME lo establecen alrededor de 10°, que obedece a 5° por la latitud de una ciudad como Bogotá y su proximidad a la línea del Ecuador, y en segundo lugar, a un mínimo de 10° de inclinación para evitar que se acumule agua y polvo, los cuales podrían disminuir su desempeño.

Esta propuesta simplificada se basa en el método “Amperios-hora”, el cual parte del cálculo del consumo diario teniendo en cuenta el rendimiento del sistema y la carga de la batería para que pueda abastecer el consumo cuando no hay sol durante un determinado número de días consecutivos, y tomando como referencia al mes con menor radiación solar. Uno de los datos más relevantes a la hora de incorporar generación fotovoltaica a un edificio es tener una aproximación al número de paneles necesarios para cubrir la demanda de energía, la cual está dada por la Ecuación 1.

$$N_T = E_T / (P_p \cdot G_{m\beta} \cdot P_G)$$

Ecuación 1. Número de paneles necesarios. Fuente: Aguilera & Hontoria (s.f.)

- ET: Energía requerida (Wh)
- Pp: Potencia Pico del Módulo (Wp)
- Gmb: Radiación Global (kWh /m<sup>2</sup>)
- PG: Factor Global de Pérdidas

<sup>35</sup> <https://arqgea.wordpress.com/2012/08/20/cuantos-paneles-solares-necesito/>  
<https://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2013/03/17/panel-solar-como-calculiar-cuanta-energia-produce/>



En un ejercicio para dimensionar paneles fotovoltaicos para residencias en Chía, Cundinamarca, Colombia, (parte de la Sabana de Bogotá), Rodríguez, Cadena, & Aristizábal (2015) desarrollan un método que parte de estimar la demanda energética de la vivienda<sup>36</sup>, y con ese valor que es la energía que se debe recibir por los paneles, se puede determinar el inversor y el número de paneles apropiados siguiendo la fórmula:

$$P_{GFV} = \frac{E}{HSS * N * PR}$$

Ecuación 2. Potencia requerida de los paneles. Fuente: Rodríguez, Cadena, & Aristizábal, 2015

E: energía demandada mensualmente (kWh-mes)

HSS: Horas de sol estándar

N: número de días en el que consume la energía E

PR: factor de rendimiento del sistema

Las horas de sol estándar (HSS) o también llamada horas de sol pico (HSP), se reportan como promedios mensuales o anuales, representando el número de horas para las cuales el sol está radiando a 1000 W/m<sup>2</sup> o un kilovatio sobre una superficie de un metro cuadrado durante una hora (Aristizábal, Botero & Gordillo, 2010), por tanto, se puede emplear el valor aportado por los mapas de radiación solar en kWh/m<sup>2</sup>. Es posible hacer cálculos estadísticos y de probabilidad para determinar la variabilidad de la radiación solar contemplando la desviación estándar ( $\sigma$ ), pero se simplifica al incorporarlo dentro del PR; así mismo, este último permite introducir un sobredimensionamiento del 10-20%.

De esta manera, se estima la potencia a la salida del inversor proveniente de los paneles, y así seleccionar el más acorde en el mercado teniendo en cuenta su punto máximo de potencia (MPP), de modo que puedan soportar la potencia pico. Por tanto, es de gran importancia tener en cuenta las características y costos de los paneles e inversores que ofrece el mercado local para su dimensionamiento.

MODULO	ISOFOFOTON IS-150 / 12	ISOFOFOTON IS-150 / 24	ISOFOFOTON IS-200 / 32	KYOCERA KC 130	SHARP NT - 180U1	INVERSOR	XANTREX GT3.3N	SMA SUNNY BOY 300U	SUNPOWER SPR-3000m
Potencia máxima (Pmax)	150 Wp	150 Wp	200 Wp	130 Wp	180 Wp	Potencia máxima salida AC	3100 W	3000 W	3000 W
Corriente de máxima potencia (Imax)	8.7 A	4.35 A	4.35 A	7.39 A	5.02 A	Tensión nominal de salida AC	208 V	208 V	208 V
Tensión de máxima potencia (Vmax)	17.3 V	34.6 V	46.08 V	17.6 V	35.86 V	Rango de tensión de salida AC	183 - 229 V	183 - 229 V	183 - 229 V
Corriente de corto circuito (Isc)	9.3 A	4.7 A	4.7 A	8.02 A	5.60 A	Tensión DC máxima de circuito abierto	600 V	500 V	500 V
Tensión de circuito abierto (Voc)	21.6 V	43.2 V	57.6 V	21.9 V	44.8 V	Rango de tensión DC para MPPT	200 - 400 V	180 - 400 V	180 - 400 V
						Corriente DC máxima de corto circuito	24 A	30 A	24 A

Tabla 1. Características de paneles fotovoltaicos y de inversores de distintos fabricantes. Fuente: Aristizábal, Botero & Gordillo, 2010

### 3.1.3. Turbinas de baja potencia (aerogeneradores minieólicos)

También conocidos como turbina mini eólica, se trata de un elemento en el que el viento en movimiento impacta sobre los álabes giratorios, convirtiendo la energía mecánica o

<sup>36</sup> Teniendo en cuenta que también se puede partir de la disponibilidad económica para dimensionar el sistema.

cinética (potencia eólica) en energía de rotación, y consecuentemente en electricidad. Por tanto, son considerados como sistemas de producción de energía eólica, es decir, energía renovable al aprovechar el movimiento del aire como recurso inagotable y regenerativo por medios naturales.

Esta energía es generada a partir del movimiento de las masas de aire sobre la tierra a diferentes temperaturas y diferentes intensidades de radiación solar, produciendo corrientes convectivas ascendentes y descendentes de circulación del aire, y que con una turbina de 4 Kw podría abastecer a un hogar promedio europeo (Fenercom, 2012: 13)

La norma del Comité Electrotécnico Internacional IEC 61400-2 dispone que un aerogenerador de baja potencia es aquel cuya área de barrida no supera los 200 m<sup>2</sup>, lo cual equivale a 50 ó 60 kW de potencia nominal. Existen otras caracterizaciones como que poseen una altura entre 2 y 20 m, diámetro de hasta 3 metros y una potencia menor a 10 Kw (Manchado, 2017)<sup>37</sup>.

A pesar de la existencia de regulaciones normativas, esta tecnología no se ha desarrollado al igual que la eólica de gran escala (aplicada en parques eólicos) debido a que hace falta a nivel mundial mayor especificidad en este sistema, una retribución económica adecuada para la energía generada respecto los altos costos, el ruido acústico que produce, la baja potencia nominal a baja velocidad de viento, de la alta velocidad de viento de arranque que requiere, y finalmente, por la incertidumbre en la estimación de los obstáculos inherentes de los entornos urbanos y residenciales donde la velocidad y dirección del viento está afectada por estelas y concentraciones originadas en los edificios de altura (efecto cañón o efecto calle)<sup>38</sup>.

La energía eólica ha incrementado su producción a nivel mundial, representada especialmente por los grandes parques eólicos on-shore y off-shore. De manera más modesta, es el mismo caso de los aerogeneradores de baja potencia que han alcanzado 440 Mw de capacidad instalada, donde más del 50% de los fabricantes se concentran en Canadá, China, Alemania, Reino Unido y EEUU en 2011, pero es China con 450.000 unidades (166 Mw) y Estados Unidos con 144.000 unidades (179 Mw) los países con mayor aplicación. Se estima que en el año 2020 este mercado tendrá un volumen de alrededor de 750 Mw (Fenercom, 2012: 17).

Los aerogeneradores de baja potencia se componen de un rotor (incluye los alabes o palas) cuyo eje desarrolla el torque, una nariz (o tapacubo o buje), un generador, sistema de frenado, un sistema de orientación por timón de cola en el caso de los de eje horizontal, un sistema aerodinámico de protección contra sobrevelocidad, y una torre de soporte que puede ser en celosía o atirantada<sup>39</sup>. Adicionalmente, se requiere de los demás componentes eléctricos como inversor, regulador y una batería o medidor bidireccional.

---

<sup>37</sup> Así mismo existen microturbinas (< 3 KW), pequeños aerogeneradores (< 50 KW), grandes aerogeneradores (< 850 KW) y aerogeneradores multimegawatt (1-3 MW).

<sup>38</sup> Fenercom (2012: 64) menciona que existe un potencial del 30% de energía extra contenida en la turbulencia urbana, pero la de pequeña escala es difícilmente aprovechable porque se necesita de un rotor muy pequeño y liviano (de baja inercia) para que sea menor que los vórtices existentes.

<sup>39</sup> Por seguridad, eficiencia y acústica, algunos aerogeneradores incorporan también un rotor carenado (Swift Wind Turbine) o un difusor aumentador. Para el arranque, algunos cuentan con generador asíncrono o de inducción conectados a la red, o bien, un generador síncrono de excitación mediante electroimanes o imanes de ferrita o Neodimio-Hierro-Boro.

Usualmente, se clasifican de acuerdo a la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento, por tanto, se dividen en aerogeneradores de eje vertical y de eje horizontal, pero también se podrían clasificar por el número de alabes y la velocidad del rotor. Las turbinas de eje horizontal son más económicas y eficientes porque tienen más tiempo de desarrollo, pero no soportan las continuas orientaciones y su eficiencia se reduce bajo turbulencia.

Las turbinas de eje vertical se utilizan frecuentemente para sistemas autónomos de baja potencia en edificios porque siempre están orientados al viento predominante, el mantenimiento es sencillo, tienen menos vibraciones, se afectan menos por la turbulencia, y pueden ser instalados en lugares donde las velocidades de viento sean bajas. A su vez, tienen un rendimiento bajo y menor superficie de barrido respecto a los de eje horizontal. Los tipos más comunes de aerogeneradores verticales son los basados en arrastre y los basados en sustentación, compuestos por tecnologías como Darrieus, Savonius, Giromill y los híbridos.



Ilustración 12. Mini turbinas eólicas instaladas en edificios. Fuente:  
[https://www.solaripedia.com/13/297/3330/twelve\\_west\\_wind\\_turbines.html](https://www.solaripedia.com/13/297/3330/twelve_west_wind_turbines.html),  
<https://www.bgp.ch/en/news/elbarkaden-receive-eco-label-hafencity-gold>

Como materiales usados para la fabricación de los alabes, se ha vuelto recurrente aplicar compuestos ligeros de resina epoxy reforzada con madera, poliamidas como el nylon, fibra de vidrio, fibra de carbono o combinados. El proceso de fabricación artesanal de los alabes generalmente es costoso porque requiere de un posicionamiento manual de la fibra en un molde, se inyecta resina con bolsas de vacío, se cura a cierta temperatura, se lija, y posteriormente se aplica un revestimiento anti radiación ultravioleta y anti erosión; el relleno suele tener espuma u otro material ligero. El otro método de fabricación es de pultrusión de un plástico que tiene menos coste y es adecuado para perfiles sin secciones complejas (Fenercom, 2012: 31). La torre de soporte suele ser de acero galvanizado.

Existen algunas consideraciones adicionales al incorporar este sistema en edificios descritas en Fenercom (Ibídem: 64), como la existencia de bordes afilados poco aerodinámicos o bordes redondeados aerodinámicos, pues estos afectan el efecto de la capa límite, y así mismo, podría determinar la ubicación más adecuada en la cubierta de un edificio; una herramienta de análisis es la dinámica de fluidos computacional CFD. Por otro lado, las cubiertas de edificios altos son una manera de lograr el acceso a mayores

velocidades de viento debido a menor rugosidad del terreno, pero se debe tener en cuenta que se deben aplicar rotores pequeños y livianos porque de lo contrario producirían altas cargas mecánicas que se traducen en costos mayores. Finalmente, se establece que una buena velocidad del viento media anual para esta tecnología está entre 4-5 m/s, igualmente que una producción de energía anual entre 200 - 300 kWh/m<sup>2</sup>.

En cuanto a impactos ambientales, existe amplia literatura que evalúa a los parques eólicos con grandes turbinas de más de 80 metros de altura y diámetros de barrido de más de 90 metros, identificando impactos especialmente en el ocupamiento y uso de la tierra con la construcción de vías de acceso y edificaciones auxiliares. También son importantes los impactos visuales, paisajísticos, de ruido, interferencia electromagnética, y muerte de algunas especies de aves. Si bien la cantidad de investigaciones es menor para mini aerogeneradores, Rivarola y Madrazo (2016) concluyen que los materiales y/o procesos de fabricación de la torre y el generador son los que más contribuyen en los impactos de ciclo de vida, que se traducen en daños potenciales sobre la salud humana, sobre los recursos naturales y en menor medida en la calidad de los ecosistemas.

El potencial energético del viento aprovechable con los aerogeneradores (Ecuación 3) depende de la densidad del aire, de la velocidad del viento (ambos ligados a aspectos climáticos no previsible de manera permanente), y del área de barrido o superficie incidente. Existen otros aspectos mecánicos que influyen en el rendimiento de la potencia eólica como: la resistencia aerodinámica e interferencia de los álabes; la compresibilidad del viento como fluido; la ley de Weibull, que ofrece una distribución de densidad de probabilidad; y las características de la velocidad del viento. Además, según la Ley de Betz<sup>40</sup>, no es posible convertir más del 59,3% de la energía cinética del viento en energía mecánica mediante una turbina eólica.

Si se trata de comparar el funcionamiento de diferentes turbinas eólicas, es necesario conocer la relación de velocidad tangencial, la cual se determina en una ecuación que contempla el radio del aerogenerador, las revoluciones por minuto y la velocidad del viento. Hay que tener en cuenta que algunos estudios han encontrado que a menor número de alabes o palas, la potencia del aerogenerador crece (Torres, 2015), pero también suelen ser más ruidosas al requerir una mayor velocidad de rotación y son susceptibles frente a la fatiga del material, lo cual es proporcional a su vida útil. En consecuencia, la mejor eficiencia está en la turbina tripala (Fenercom, 2012: 29).

$$P = C_p \left( \frac{1}{2} \rho A v^3 \right)$$

Ecuación 3. Potencial energético aprovechable del viento. Fuente: Torres, 2015

$C_p$ : coeficiente de potencia del aerogenerador, no superior al de Betz

$A$ : área de barrido por el rotor

$\rho$ : densidad del aire

$v$ : velocidad del viento corregido frente a la altura

Para esta investigación, se ha desarrollado un predimensionado del potencial energético del viento y la energía generada por mini aerogeneradores basado en el procedimiento

---

<sup>40</sup> Albert Betz (1885-1968) fue un físico alemán especializado en mecánica de fluidos que participó en la elaboración de las bases teóricas de las turbinas eólicas.

realizado por Manchado (2017) para una planta de tratamiento de residuos. Se empieza por hacer corrección de la velocidad del viento en función de la altura a la que estará la turbina, se calcula la densidad del aire, la potencia útil y la potencia generada por la turbina. Se desarrollan estos cálculos para cada dirección del viento de acuerdo a su velocidad y frecuencia.

Con la información de potencia y energía generada, se contrasta con la demanda energética del edificio, costos y posible retorno de la inversión. Con el objetivo de minimizar el efecto sombra aerodinámica entre mini turbinas, la distancia entre los que componen una fila no será nunca inferior a dos diámetros del rotor y la distancia entre filas será superior a ocho diámetros del mismo (Ibídem).

### **3.1.4. Biomasa**

Esta tecnología se refiere al combustible que proviene de fuentes naturales, residuales o cultivadas, la cual es incinerada en una caldera y su calor es aprovechado generalmente para proveer ACS y calefacción de espacios en casas (estufas), edificios, industria, etc., aunque también existe la posibilidad de generar electricidad. Existe una gran variedad de combustibles biomásicos, donde los más empleados son subproductos madereros pretriturados, biomasa densificada (pellets) y residuos agrícolas<sup>41</sup>. Algunas de las características más importantes para la consideración de un combustible es su poder calorífico inferior<sup>42</sup>, porcentaje de humedad y precio.

Uno de los combustibles más populares en países de amplio uso del sistema y que cuenta con estándares de producción es la biomasa densificada o también llamada pellets, los cuales son aglomerados a presión de residuos de la industria maderera y agroforestal como aserrín y viruta, con una forma cilíndrica de aproximadamente 6 cm de largo o menos, alta eficiencia de combustión y distribuida en bolsas de diferentes tamaños. En países europeos como España ya existe una amplia difusión de esta tecnología en edificios residenciales, ya que “dos kilogramos de pellets equivalen aproximadamente a un litro de gasóleo” (DGIEM, 2006: 22).

En el caso colombiano, para la producción de energía existen dos fuentes que son producto de las actividades sociales, y por otro lado, de las actividades de la cadena agroindustrial incluyendo los residuos forestales, conformada por los Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) y Residuos Agrícolas Industriales (RAI). Sin embargo, es la proveniente de actividades sociales en los grandes centros urbanos del país, la fuente que más nos interesa, debido a que estas implican vivienda de alta densidad como la estudiada en esta investigación, y que se encuentran apartadas de la actividad agrícola; los centros urbanos generan los denominados residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU o RSU)<sup>43</sup> que provienen de diferentes actividades y poseen alto valor energético por su composición físico química. Estos se componen de residuos de papel, madera, carbón vegetal,

---

<sup>41</sup> Entre los que se encuentran leña, astillas, cortezas, pellets, briquetas y los residuos agroindustriales como los huesos de aceituna, pepas de uva, cáscaras de frutos secos (almendra, piña, etc.), poda de vid, etc.

<sup>42</sup> El poder calorífico inferior es el calor de combustión que no aprovecha la energía de condensación del agua; por su parte, el poder calorífico superior aprovecha esta energía y genera más calor.

<sup>43</sup> Algunos textos mencionan los FORSU: Fracción Orgánica de los R.S.U.



alimentos, aguas negras, residuos vegetales, y la poda de zonas verdes (UPME, 2011: 122).

Si bien esta fuente de energía puede ser transformada en combustibles gaseosos, líquidos o sólidos, posee un contenido energético menor respecto a los combustibles fósiles. La transformación energética a combustible se da mediante procesos térmicos y biológicos, que, en el caso de los RSOU, se aplica el proceso de termólisis<sup>44</sup> para producir combustible sólido que genera calor, o el proceso de digestión anaerobia<sup>45</sup> que produce biogás que genera calor o electricidad con la ayuda de celdas combustibles (UPME, 2011: 125), o bien, a través de una combustión que genera vapor y su posterior expansión dentro de una turbina acoplada a un generador eléctrico.

Los altos precios de las celdas de combustible y los gasificadores han tenido impacto en la poca evolución de este sistema en la producción de energía eléctrica (al contrario del aprovechamiento de calor y ACS), así como la casi nula existencia de equipos de baja potencia en el mercado colombiano ante la ausencia de producción de combustibles biomásicos de alta eficiencia, y que la mayoría del territorio nacional tiene un clima cálido permanente que lo hace prescindible.

Existen varios tipos de caldera de acuerdo con su uso, tamaño y requerimientos, entre las que se encuentran con combustión en cascada, de gasóleo con quemador de pellets, con parrilla móvil, con alimentador inferior, para distritos térmicos (600 - 2500 kw), estufas, calderas de baja potencia con quemador integrado (8 - 70 kW), equipos compactos, y policomcombustible para ser alimentadas con combustibles atípicos como los RSU. Esta última tipología es la más empleada en edificios y residencias por su facilidad de limpieza y uso, con una potencia considerada baja media de hasta 150 kw, o entre 50 y 500 kw para edificios residenciales. No obstante, requieren de un silo para almacenamiento y alimentación de combustible cerca de la caldera (interno o externo), y de una empresa especializada en su instalación, operación, mantenimiento y suministro de combustible a medio y largo plazo.



Ilustración 13. Biomasa de baja potencia instalada en edificios. Fuente:

<https://www.ecointeligencia.com/2015/01/guia-biomasa-para-tu-casa-5/>, <http://ukrfuel.com/news-wood-pellet-boilers-66.html>

<sup>44</sup> La termólisis es la reacción en la que un compuesto se separa en al menos otros dos cuando se somete a un aumento de temperatura. Se requiere de una caldera.

<sup>45</sup> La digestión anaeróbica es un proceso en el cual bacterias descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno. Se requiere de un biodigestor.

Además de la caldera y el silo, este sistema está compuesto por un sistema de transporte del almacenamiento a la caldera (tornillo sin fin, rascadores giratorios, suelo inclinado, etc.), chimenea, un intercambiador de calor entre los humos y el agua, cúpula de distribución de gases, sistema de retirada de cenizas y de regulación. Por lo general, se recomienda agregar una válvula mezcladora de tres vías cuando la producción de ACS se hace mediante un circuito con radiadores de fundición y tubos, con el fin de evitar que la temperatura de retorno sea baja, lo que produce corrosión por condensación de agua y ácidos en el interior.

No fue posible identificar suficiente información sobre los materiales que componen cada una de las partes de la instalación de biomasa, además porque depende del fabricante, de la potencia generada, si es un equipo compacto, con alimentación inferior, con alimentación superior, de parrilla fija, o parrilla móvil. Por ejemplo, al consultar la ficha técnica de un equipo automático SMART 150–500 kW de Smart Heating, se menciona que incorpora algunos materiales refractarios cerámicos pero sin mayor especificación.

Uno de los aspectos más importantes a considerar, es que este sistema necesita de mayor espacio interior que cualquier otro, con el fin de mantener áreas de acceso y trabajo, y ubicar los diferentes componentes, de los cuales, la caldera y el silo de almacenamiento son los más voluminosos. Estos componentes se instalan en el primer piso o sótano, especialmente en edificaciones nuevas que tienen contemplado este sistema desde el inicio, ya que, en el caso de construcciones existentes, el obtener este espacio extra puede llegar a ser demasiado costoso.

El predimensionado de este sistema parte de estimar la demanda térmica de calefacción y de consumo de ACS para luego desarrollar los cálculos propuestos por IDEA (2009) y Murguía (2018) a partir de la densidad aparente del combustible, su poder calorífico inferior y las cargas térmicas de la vivienda. Los resultados arrojados son cantidad de combustible demandado, el volumen de almacenamiento y área del silo (dependiendo si es de suelo horizontal o inclinado), así como la energía almacenada. Cabe agregar que se requirió consultar bibliografía adicional para establecer los datos de entrada del combustible local que son los RSOU, siendo el de densidad aparente el de mayor incertidumbre por las diversas fases de compactación que atraviesan estos residuos.

Por las características climáticas de la ciudad objeto de estudio, no se consideró necesario estimar la demanda de calefacción de espacios, pero si la demanda de ACS, la cual se determina con base en el número de usuarios, tipo de instalación, simultaneidad, temperatura de consumo y temperatura de red. Por otro lado, no se encontró en el mercado calderas de biomasa residenciales que funcionen con RSOU, lo que hace suponer que esta tecnología está disponible para usos industriales debido a sus costos y tamaño; sin embargo, para propósitos de comparación se desarrollará el predimensionamiento respectivo tomando en cuenta la densidad y poder calorífico de los RSOU.

La biomasa es considerada como una energía limpia y sostenible debido a que utiliza combustibles y mano de obra autóctona, tiene un balance neutro de emisiones de CO<sub>2</sub>, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero al sustituir combustibles fósiles, contribuye a la diversificación energética, y es inagotable; no obstante, su punto débil son las emisiones que produce la combustión a pesar de considerarse neutras y que evita otro tipo de emisiones.

Al comparar las emisiones de una caldera a base de pellets frente a las de gasóleo y gas natural, se ha encontrado que las calderas de biomasa tienen emisiones bajas de SO<sub>2</sub> (generador de la lluvia ácida), levemente altas de NO<sub>x</sub> y CO, y muy altas de partículas, pero dentro de los límites admisibles (Comunidad de Madrid, 2006: 44). Por otro lado, los RSOU, al contener elevados niveles de humedad, contienen material volátil, carbono orgánico, oxígeno, nitrógeno, y azufre, los cuales pueden determinar la eficiencia en la producción de biogás (UPME, 2011: 141).

### 3.1.5. Colectores solares

Los colectores solares, también llamados energía solar térmica o calentador de agua solar termosifón, son una forma de aprovechamiento de la radiación solar para convertirla en calor útil aprovechado para la generación de ACS y calefacción, al tiempo que reduce el consumo de electricidad (ligada a combustibles fósiles) utilizada por el edificio para calentar el agua o para climatización de suelo radiante u otros. Como se mencionó anteriormente, estos equipos están comprendidos por colectores de agua con cubierta (o plano), sin cubierta, por aire, o calefones (serpentín donde circula el agua calentándose) solares de tubos al vacío.

El sistema se inicia con un panel colector encargado de captar la radiación solar y transmitírsela a un fluido caloportador que fluye en su interior a lo largo de unos tubos transparentes a la radiación de onda corta u opacos a la radiación de onda larga. Estos tubos se extienden con un circuito térmico hasta el acumulador, donde intercambian el calor con el agua potable, convirtiéndola en ACS lista para abastecer a la vivienda bajo demanda en duchas, lavamanos y/o calefacción. En ocasiones, la transferencia de calor no se da en el acumulador sino en un intercambiador de calor, que funciona conectando un circuito cerrado de captación y de almacenamiento antes de distribuir a la red interna, incrementando la eficiencia energética (Ilustración 14).

La circulación del agua desde el colector hasta el acumulador se realiza a través del uso de una bomba (circulación forzada) o por circulación natural, aprovechando las diferentes densidades entre el agua fría y caliente (termosifón), donde el agua se vuelve menos densa subiendo hacia el intercambiador, y el agua fría que es más densa desciende hacia el colector.

Los materiales y recursos necesarios para fabricar los componentes de un colector solar son aluminio, acero, cobre, poliamida, lana de roca, lana de vidrio, caucho, silicona, vidrio templado, madera, etilvinilacetato, espuma de polietileno, energía eléctrica, gas natural, plástico y cartón de embalaje, entre otros. Un análisis de huella de carbono de estos componentes para un captador solar térmico en 30 años de vida útil ha arrojado como resultado un valor medio en la fabricación de 112,5 kg CO<sub>2</sub>eq, la energía media generada 56.290 kWh, y un coste de huella de carbono por unidad de energía de 2,1 grCO<sub>2</sub>/kWh (Asociación Solar de la Industria Térmica ASIT, 2019). Como dato para comparar, Albizzati (2016) reporta 343 CO<sub>2</sub>eq de emisiones en colectores de placa plana y 179,9 kg CO<sub>2</sub>eq en un colector de tubos evacuados.



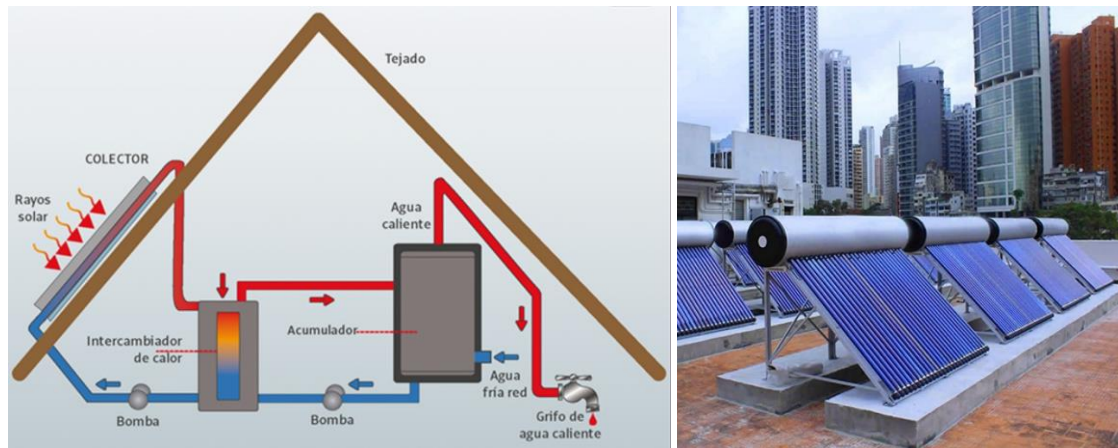


Ilustración 14. Composición de un sistema de colectores solares y ejemplo instalado. Fuente: App Construye 2020, <https://solsumenergy.in/commercial-solar-water-heater.php>

Para predimensionar este sistema se han seguido los cálculos propuestos por Zeggaf (2015), donde, a partir de los valores de radiación global y al brillo solar, se calcula la intensidad diaria aprovechable, la curva de rendimiento instantáneo, y la energía útil por día o por mes. Con estos datos, junto con la demanda de ACS por vivienda o del edificio, se calcula la superficie colectora demandada y el número de colectores necesarios. Murguía (2018) adiciona cálculos de intensidad de potencia captada al día, y la potencia captada total por colector.

Como se verá más adelante, la factibilidad económica de esta tecnología puede ser inferior respecto a las que generan electricidad, por tanto, no será aplicada en el caso experimental de estudio.

### 3.2 ENERGIAS RENOVABLES EN COLOMBIA

Hasta hace unos años, Colombia tenía una explotación nacional de recursos primarios constituida en un 93% por origen fósil (en orden: carbón mineral, petróleo, gas natural), un 4% de hidroenergía, y un 3% de biomasa y residuos; en cuanto a la capacidad instalada de generación eléctrica, la energía hidroeléctrica representa el 70%, y las plantas térmicas fósiles un 29% (ver Gráfico 1) (UPME, 2015: 24).

Actualmente, se están construyendo diversos sistemas de generación de energía de gran escala, principalmente solar, biomasa, pequeña hidroeléctrica y eólica, que suman una capacidad estimada de más de 1.240 megavatios según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), compuesto principalmente por granjas solares y parques eólicos. Los proyectos se concentran en la Guajira con 925 Mw, Cesar con 100 Mw, Santander con 80 Mw, Valle del Cauca con 67,79 Mw, Caldas con 11,54 Mw y Quindío con 4,50 Mw (Portafolio, 2018).

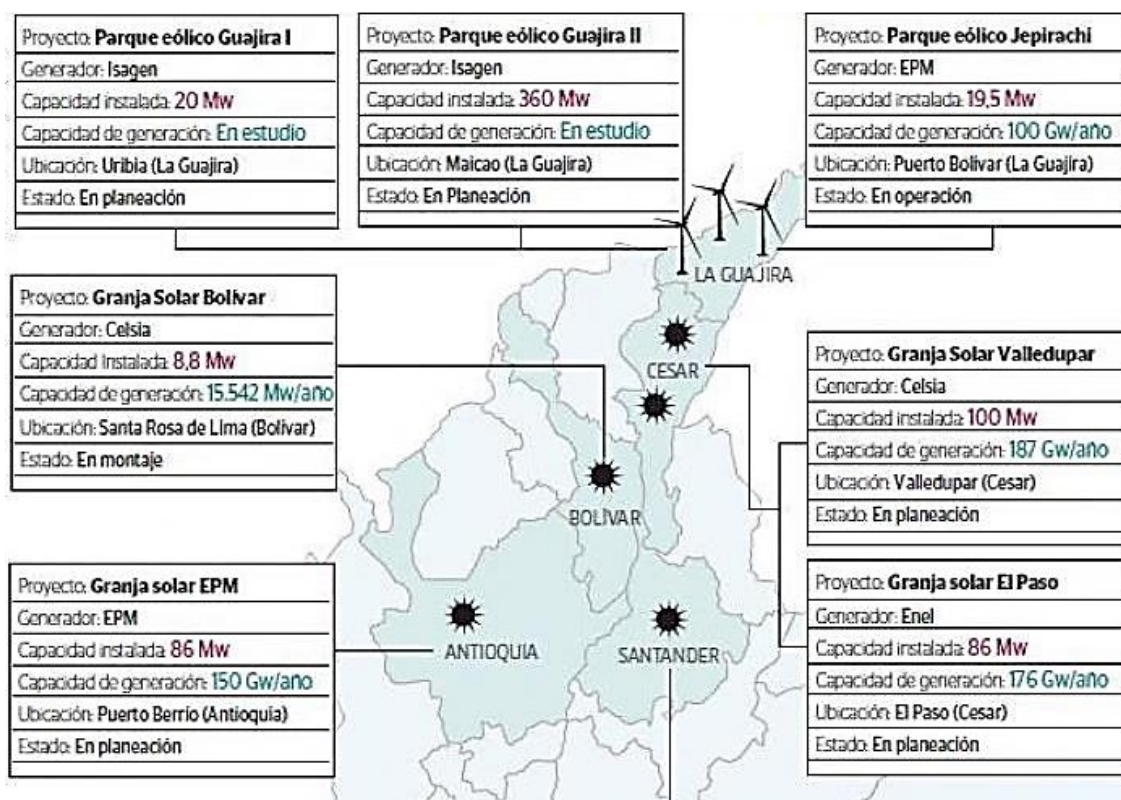


Ilustración 15. Proyectos de generación de energía renovable a gran escala en Colombia. Fuente: Portafolio, 2018

Si bien, los datos consolidados sobre proyectos que incorporen energías renovables en edificaciones de vivienda en Bogotá son inexistentes, en Colombia existen algunos muy recientes en Medellín y Valledupar<sup>46</sup> que incorporan paneles fotovoltaicos, sin pasar aún

<sup>46</sup> <http://colombia-inn.com.co/proyectos-sostenibles-de-vivienda-con-altura/>, <http://www.elcolombiano.com/antioquia/una-casa-autosuficiente-se-usara-como-laboratorio-de-investigacion-IN7852208>

por un estudio comparativo y evaluativo post instalación, pero se prevé que esta tendencia aumentará por los incentivos del gobierno y la cantidad de plantas de generación en construcción.

En Colombia el aumento de la capacidad de sistemas solares FV se ha incrementado a 11,5 MWp en 2015, es decir, un 30% (frente a un 55% global) en aproximadamente 5 años, dadas sus características como modularidad, su fuente inagotable como es el sol, su facilidad en la instalación y una tendencia a la baja de los costos debido a los avances de la tecnología. Por ello, se realizó un cálculo aproximado de la potencialidad de la energía solar FV en Bogotá (replicado a todo el país), a partir del 40% del cálculo de áreas en m<sup>2</sup> de los techos residenciales, además de estratificación, tipología unifamiliar y ocupación por propietarios, donde el potencial técnico era de 282 MWp (UPME, 2015), y según González (2018: 84, 102), el potencial técnico en el sector residencial es de 9.1 GWp (13,10 TWh/año), especialmente en las ciudades de Bogotá, Cali y Cartagena en el estrato 3, sin dejar de lado los estratos 1 y 2<sup>47</sup>.

Hace unos años las proyecciones dependían de dos escenarios, el primero de la reglamentación del esquema de medición y el segundo de un esquema de facturación, los cuales ya están siendo superados con las normativas recientes. Si bien los costos del sistema dependen de la tecnología (monocristalino o policristalino, en el caso de los paneles fotovoltaicos), si es certificado y su procedencia, actualmente es fácil encontrar paneles fotovoltaicos cuyo costo promedio de uno de 150w está en \$330.000 COP (93 €), un inversor de 300w en \$500.000 COP (141 €), el regulador de 20 amp \$110.000 COP (31 €) y un medidor bidireccional en \$800.000 COP (226 €), a precios de 2018.

La biomasa tiene ya una alta presencia en el sector industrial colombiano, que es todo lo contrario frente al sector residencial, con un aumento previsto del 16,7% al año 2030 gracias a sus costos constantes respecto a los combustibles convencionales fósiles. Una de las mejores opciones es el aprovechamiento de residuos agrícolas, especialmente los provenientes de la palma de aceite y de la caña de azúcar (Colombia es el séptimo en el mundo), cuyo bagazo tiene amplios estudios de transformación en bioetanol y energía; a pesar de ello, aún falta por desarrollar ejemplos de aplicación en el sector residencial.

Igualmente, la mini eólica no tiene aplicaciones en prácticamente ningún sector en Colombia, lo cual se asocia a los costos y la desconfianza hacia tecnologías no probadas localmente, a pesar de que varias regiones del país cuentan con buenas velocidades de viento. Existen muy pocos distribuidores, por lo que la adquisición de una turbina de esta escala se hace a través importadores no especializados, donde encontramos ejemplos de 400w y 1.5m de diámetro en los álabes cuyo costo promedio es de \$950.000 COP (968 €) sin impuestos.

La matriz eléctrica en Colombia a diciembre de 2014, produce aproximadamente un 17% de la energía final consumida, con una amplia participación de la energía hidroeléctrica como recurso renovable convencional, representando el 70% frente al total de capacidad instalada de 15.645 Mw, 30% por plantas térmicas fósiles, y un 0,6% por otras fuentes renovables no convencionales (UPME, 2015: 25). Como se observó anteriormente, la matriz energética colombiana ha variado sus fuentes hacia las renovables y existe mayor

---

[https://www.findeter.gov.co/publicaciones/avanza\\_instalacion\\_de\\_paneles\\_solares\\_en\\_urbanizacion\\_lorenzomoralessdevalleduparpub](https://www.findeter.gov.co/publicaciones/avanza_instalacion_de_paneles_solares_en_urbanizacion_lorenzomoralessdevalleduparpub)

<sup>47</sup> La definición y aplicación de los estratos socioeconómicos se explica mas adelante.

información sobre la localización de proyectos de generación de FNCER<sup>48</sup>, así que se espera que futuros reportes oficiales demuestren un aumento de esta participación.

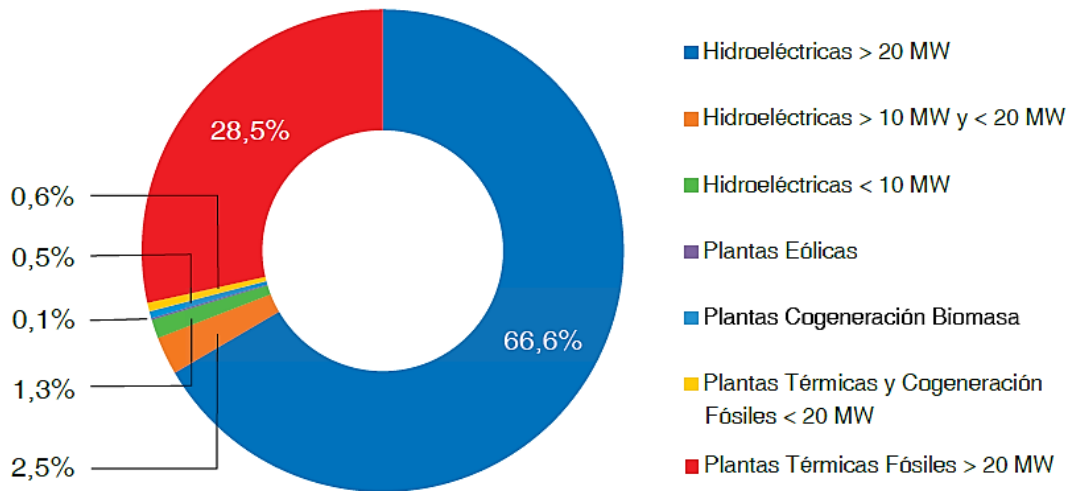


Gráfico 1. Capacidad de generación eléctrica del sistema interconectado colombiano. Fuente: UPME, 2015

La matriz energética colombiana presente en las bases de datos de Ecoinvent 3.5 (Tabla 2) se basa igualmente en información de 2014, donde las entradas para la transformación de 1 kWh de electricidad de alto voltaje proviene en su mayoría por hidroeléctrica con un 76%, seguido de gas natural de ciclo combinado con 9%, carbón 8%, gas natural con central convencional 6%. Estos valores difieren en una pequeña fracción respecto a los datos oficiales (Gráfico 1), al aumentar casi 6% el aporte de las hidroeléctricas y reducir esa parte a las de origen fósil. Estos dataset<sup>49</sup> aportados por Ecoinvent fueron usados para los respectivos cálculos de ACV del prototipo experimental que se detallan en el capítulo “5.5 RESULTADOS”.

Electricity, high voltage {CO}  electricity, high voltage, import from VE   Cut-off, U	0,1	%
Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hard coal   Cut-off, U	8,3	%
Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, U	76,1	%
Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, combined cycle power plant   Cut-off, U	9,2	%
Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, U	6,1	%
Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, oil   Cut-off, U	0,2	%
Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	0,1	%
Transmission network, electricity, high voltage {GLO}  market for   Cut-off, U	6,6E-09	km
Transmission network, long-distance {GLO}  market for   Cut-off, U	3,2E-10	km

Tabla 2. Entradas que componen la matriz energética colombiana según Ecoinvent. Fuente: Elaboración propia con base en Ecoinvent 3.5

<sup>48</sup> <http://geovisor.minenergia.gov.co/ideme/view/>

<sup>49</sup> Nombre como se le conoce a las bases de datos de ciclo de vida o un conjunto de estos datos: [http://simapro.mx/archivos/SP\\_ACVETI\\_1\\_5\\_DATASET.pdf](http://simapro.mx/archivos/SP_ACVETI_1_5_DATASET.pdf)

### 3.3 NETZERO EB Y VIVIENDAS

El concepto de “energía neta” o “energía cero” aplicado en el desempeño de la edificación no es reciente, pues se tienen registros de estudios que lo abordan desde finales de los años 70, usualmente para describir el balance entre la energía demandada y la energía producida por renovables. Antes de ello, a finales del siglo XIX, se le atribuyó al médico ucraniano Sergei Podolinski, quien buscaba aplicar los principios de la termodinámica a la producción económica, el uso de los valores de energía incorporada por flujos energéticos de entrada – salida de la economía de EE.UU. para compararlos con los consumos de energía del parque de viviendas (Podolinsky, 2004 y Hannonn, 1978, citado en Zabalza, 2011: 17). Por otro lado, recordemos la visión que ya se tenía de las ER provenientes del sol aplicadas en viviendas, manifestado por la revista Popular Science en 1949 (Ilustración 1).

Ignacio Zabalza (2011) y Josep María Montaner (2015) consideran como proyectos pioneros en este campo de la sostenibilidad y eficiencia energética a la “Casa Solar MIT I” del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) de EE.UU. en 1939, que incluía una superficie de captación solar térmica y almacenamiento de agua; posteriormente se construyó en Boston, Estados Unidos (1948), la “Dover Sun House” una vivienda diseñada por la arquitecta Eleanor Raymond bajo criterios bioclimáticos y paneles fotovoltaicos en colaboración con el mismo MIT, y que probablemente inspiró a la portada de Popular Science. Luego, vendría la “Bliss House” (1955), que utilizaba captadores solares de aire y almacenamiento térmico en rocas.

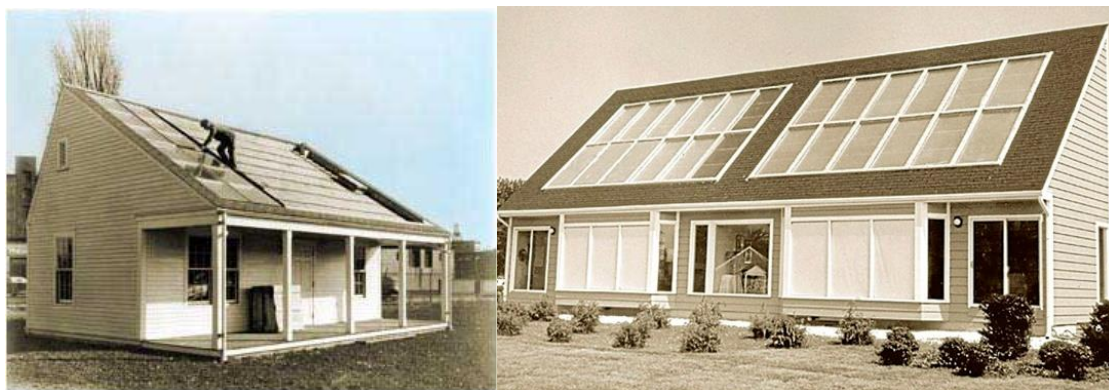


Ilustración 16. Casa Solar MIT I y la Dover Sun House. Fuente:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_pioneering\\_solar\\_buildings](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pioneering_solar_buildings),  
<https://www.elmundo.es/baleares/2016/04/29/57238bc3e2704eeb408b464c.html>

Por otro lado, se encuentran las “viviendas solares” (1985) en Orbassano, Italia, por los arquitectos Roberto Gabetti y Aimaro Isola, que consisten en un bloque triangular, aperturas retrocedidas en fachada y cuyo muro sur del bloque está cubierto por paneles fotovoltaicos. Ya recientemente, se hace referencia a proyectos de vivienda de Fernando Maniá (2003) en Madrid, España, y las viviendas de alquiler (2003) por Jerónimo Durán y Lluís Grau en Mataró, España, que incluyen sistemas de aprovechamiento solar en colectores, paneles o cortasoles.

En su reciente actualización, el CTE de España define a los edificios de consumo de energía casi nulo (NetZero EB) como “edificio, nuevo o existente, que cumple con las



exigencias reglamentarias establecidas en este Documento Básico” (CTE, Documento Básico HE), “en lo referente a la limitación de consumo energético para edificios de nueva construcción”. Entre los cambios más relevantes de esta normativa es que se reduce el límite de consumo de energía primaria para vivienda en un 40%, y los sistemas de ER deben cubrir la demanda de ACS entre un 60% y 70%, mientras que la generación de electricidad es obligatoria solo para edificios no residenciales de gran superficie.

Sin embargo, no se ha acordado una definición o estándar internacional ampliamente adoptado sobre que es un NetZero Energy Building. La literatura establece una diferencia entre NZEB (NetZero Energy Buildings) y ZEB (Zero Energy Buildings), donde este último consiste en un edificio totalmente autónomo de la red, mientras que el NZEB sugiere que el edificio está conectado a la infraestructura energética (González, 2018), en línea con las definiciones aportadas por el 2.2 MARCO TEÓRICO. En la actualidad se encuentra en desarrollo y revisión el estándar Ashrae 228P “Method for Evaluating Zero Net Energy and Zero Net Carbon Building Performance”.

A pesar de ello, en Europa y otras partes del mundo, es más frecuente la construcción de edificios residenciales NetZero EB, especialmente por directivas como la 2010/31/EU y la Recomendación (UE) 2016/1318 sobre las directrices para promover los edificios de consumo de energía casi nulo y las mejores prácticas para garantizar que antes de que finalice 2020 todos los edificios nuevos posean estas características.

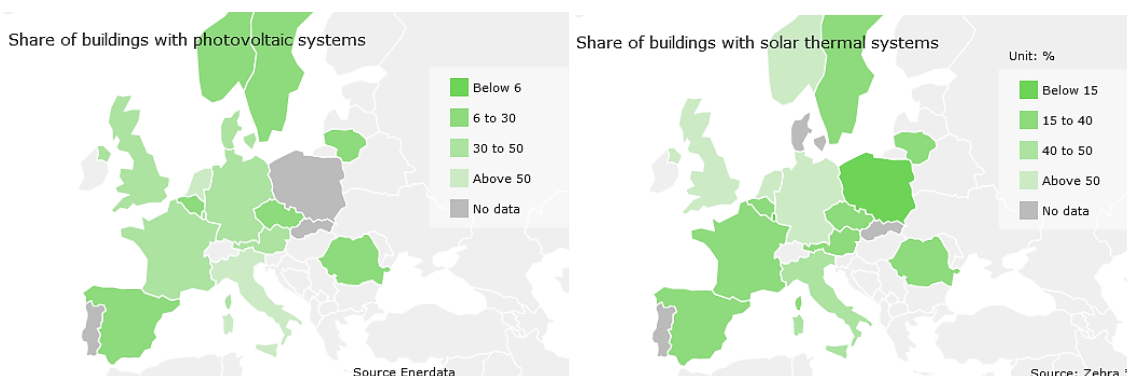


Ilustración 17. Porcentaje de edificios residenciales NetZero EB en Europa. Fuente: <http://www.zebra-monitoring.enerdata.eu/>

Bajo este objetivo, se han creado varios tipos de iniciativas y programas a nivel internacional, como por ejemplo, el “Building Technologies Program” (BTP) del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), el “Task 40” del “Solar Heating & Cooling Program” de la Agencia Internacional de la Energía, el “Annex 52” del “Energy conservation in Buildings and Community Systems Programme”, el “Green/Sustainable Building Challenge” (GBC/SBC), liderado por el International Initiative for a Sustainable Built Environment iSBE, el “Low Carbon Buildings Programme” por el Departamento de Energía, Cambio Climático y Ahorro Energético del Reino Unido, y el Clear 2.0 Project por diferentes organizaciones europeas<sup>50</sup>.

A la fecha, en Colombia no se registra oficialmente ningún edificio que cuente con las características de NetZero EB, pues a pesar de que algunos cuentan con paneles

<sup>50</sup> Respectivos links: <https://www.energy.gov/eere/buildings/building-technologies-office>, <http://task40.iea-shc.org/>, <https://www.iea-ebc.org/>, <http://iisbe.org/index.html>, <http://www.lowcarbonbuildings.org.uk/>, <https://www.clear2-project.eu/>.

fotovoltaicos como mecanismo de generación de energía, este aporta un porcentaje menor respecto a la demanda. Sin embargo, desde la política pública se están dando pasos importantes, ya que actualmente se está desarrollando una hoja de ruta para implementar edificaciones NetZero carbono en proyectos nuevos al año 2030 y en edificios existentes a 2050, a través de asistencia técnica y financiera proporcionada por el World Resources Institute WRI, con el fin de reducir las emisiones un 51% al año 2030 y llegar a la carbono neutralidad, según la Contribución Nacional Determinada (CND) presentada por el gobierno colombiano<sup>51</sup>.

De acuerdo con las características de las ciudades colombianas, es posible desarrollar clasificaciones del potencial según la capacidad instalada, la escala, el suministro, y el sector de aplicación. Osma et al (2015) desarrolla una clasificación con datos mundiales de 2013<sup>52</sup> donde resalta que los sistemas de generación eólica, fotovoltaica y térmica pueden adaptarse fácilmente al sector residencial que es donde existen más ejemplos y en clima tropical, pero dependerán de la velocidad del viento y la radiación solar. A través de examinar la frecuencia de uso de sistemas de ER en NetZero EB a nivel mundial, también reafirman el alto potencial que tiene la energía solar para producir electricidad o calor, seguido de biomasa y muy por detrás la eólica.

Renewable Energy			On-site	Off-site
Wind	Small scale	<2.5kW	✗	-
	Medium scale	2.5kW-20MW	✗	✗
	Large scale	>20MW	-	✗
PV	Residential system	<10kW	✗	-
	Industrial buildings	10kW-100kW	✗	-
	Small industrial plants	100kW-1MW	✗	✗
	Large plants	>1MW	-	✗

Tabla 3. Clasificación de sistemas de ER según su capacidad de generación. Fuente: Osma et al, 2015

Existe un proyecto de vivienda social (protegida) ubicado en Valledupar, Colombia, llamado urbanización Lorenzo Morales, y su Centro de Desarrollo Infantil (CDI), los cuales cuentan con paneles fotovoltaicos en las terrazas y áreas comunes, lo que ha permitido la reducción en el consumo de energía de la red eléctrica y menores costos de este servicio para la población.

En el marco de un estudio de aplicación de renovables en ciudades, el IRENA ha desarrollado una clasificación del potencial de acuerdo a si se trata de una ciudad consolidada o en desarrollo y si se tiene altos o bajos niveles de densidad demográfica (ver Ilustración 18). Para el caso de la ciudad de Bogotá, se ha asumido que es una ciudad en vías de desarrollo y de alta densidad<sup>53</sup>, por lo cual su mayor potencial se encuentra en el transporte público eléctrico, cocinas con bioenergía y el desarrollo de distritos térmicos centralizados para calefacción y aire acondicionado, ya que la demanda de climatización

<sup>51</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=4XXksXTHvQ4>

<sup>52</sup> Según datos de la Universidad de Aalborg de ese año. <https://www.byggeri.aau.dk/sektioner/architectural-engineering/zeb/>. También existe el proyecto Zebra2020 con datos sobre la implementación de EECN en Europa: <http://www.zebra-monitoring.enerdata.eu/>, y la base de datos del New Buildings Institute NBI en EEUU.: <https://newbuildings.org/resource/getting-to-zero-database/>.

<sup>53</sup> Población total de 8.181.047 de habitantes y densidad de 5184,44 hab/km<sup>2</sup> según proyecciones del 2005 por el DANE. Fuente: [www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06\\_20/ProyeccionMunicipios2005\\_2020.xls](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/ProyeccionMunicipios2005_2020.xls)

crecerá así como los costos de adaptación de estas redes a edificios existentes, por lo cual se recomienda que sean implementadas tempranamente en la construcción de edificios nuevos.

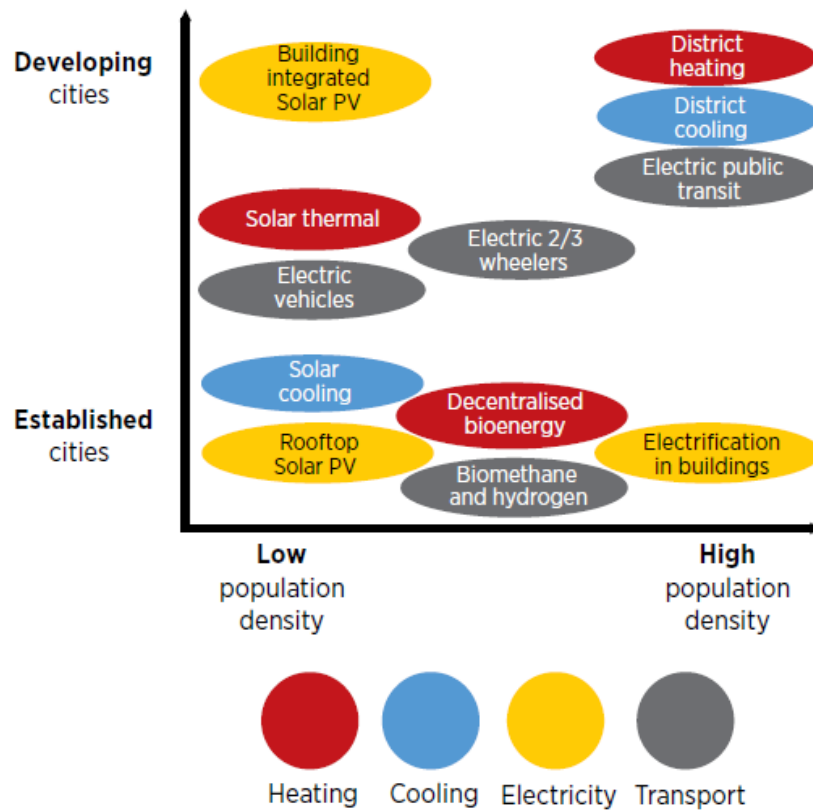


Ilustración 18. Opciones de energía renovable de acuerdo al potencial y tipo de ciudad. Fuente: Irena, 2016

No obstante, la estimación de ese potencial fue realizado de acuerdo al nivel de consolidación y las densidades, sin tener en cuenta aspectos climáticos, ambientales y técnicos de que son fundamentales; por ejemplo, en Bogotá no es recurrente la utilización de sistemas de climatización por tener un clima estable y poco extremo durante todo el año, así como otros aspectos que podrían limitar ciertos sistemas.



### 3.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Las energías renovables (ER) son fuentes de generación convencionales, no convencionales y naturales que son inagotables y de bajo impacto ambiental, debido a su capacidad de regeneramiento natural y autónomo, además de que es posible encontrar la disponibilidad de al menos una o más de estas fuentes en cualquier posición geográfica del planeta, haciendo evidente su potencial especialmente en zonas urbanas. Por su parte, las energías no renovables se consideran contaminantes pues se agotan sin poder renovarse, generan altas emisiones de GEI en el proceso, y sus reservas son limitadas, como por ejemplo, las de origen fósil.

Alrededor del mundo ha crecido exponencialmente la aplicación de energías renovables en diversas escalas, pues se contaba con una capacidad instalada en 2006 cercana al 18%, y el 20% en 2013 considerando solo edificios y transporte (Chel & Kaushik, 2018; Irena, 2017). El crecimiento continuará hasta 2040, donde se pronostica que algunas tecnologías como la biomasa y eólica decrecerán, mientras que la energía solar seguirá su camino de crecimiento constante hasta 2100. Este crecimiento también está siendo promovido por los distritos térmicos, donde se aplican ER de forma centralizada para proveer a varios edificios agrupados o barrios.

Los elevados índices de crecimiento urbano en las últimas décadas van acompañados en igual proporción con el consumo de energía, convirtiendo a estas fuentes en una alternativa plausible de reducción de la demanda y de generación de GEI en edificios, ciudades y transporte. Si bien el potencial de las ER es elevado, está claro que esto depende de las características de cada ciudad, la densidad de población, las perspectivas de crecimiento, los perfiles de demanda, y la orientación, sombras y morfología del edificio.

Estas características y variables pueden ser calculadas a través de fórmulas de “predimensionamiento” que ayudan a establecer la proporción de generación energética sobre la demanda, cantidad de elementos, relación costo beneficio, y valorar el aporte de las condiciones climáticas. Teniendo en cuenta que el procedimiento de cálculo difiere respecto a sistemas autónomos, en esta investigación se ha optado por los sistemas conectados a la red, pues las tecnologías no consiguen el 100% de cobertura, se buscaba maximizar el rendimiento que diera paso a excedentes, y se evitan las fallas o picos bajos de generación. Este tipo de sistemas requieren de espacios disponibles dentro del edificio para las instalaciones, lo cual suele competir con su aprovechamiento útil y costos.

Existe una gran variedad de renovables a partir de la energía solar que se manifiestan de diferentes formas y en tecnologías de aprovechamiento, como la biomasa (en procesos naturales y artificiales) la térmica (que aprovecha el calor), la fotovoltaica (celdas que transforman la radiación solar), la hidráulica (originada por el gradiente térmico), la mareomotriz (oleaje), y la eólica (las dos últimas, por medio del calentamiento y movimiento de las masas de aire). Las tecnologías de pequeña escala como mecanismo de autoconsumo en edificaciones se dividen principalmente en eléctrica y térmica, donde las más implementadas actualmente por el mercado son los colectores solares, los paneles fotovoltaicos, la biomasa, la minieólica, y la geotermia (y el potencial identificado sigue ese orden).

De las tecnologías mencionadas, los paneles fotovoltaicos compuestos de celdas semiconductoras de silicio han presentado el mayor crecimiento a nivel mundial, incluso en edificios, los cuales son conocidos como BIPV o BAPV (Building Integrated Photovoltaics o Building Applied Photovoltaics, por sus siglas en inglés) debido a la abundancia de radiación solar en casi cualquier lugar y la disminución progresiva de sus costos. Entre sus desventajas encontramos que su rendimiento está sujeto a condiciones climáticas imprevisibles, y dificultades de aplicación en vivienda colectiva como la diversidad de propietarios con sus propias perspectivas de inversión, la cantidad de equipos necesarios en cada vivienda, entre otros.

A pesar de las evidentes bondades, esta tecnología también presenta impactos ambientales por el consumo de agua para la fabricación y el mantenimiento, extracción de minerales, en el proceso de purificación del silicio, el uso de materiales peligrosos y cancerígenos como el arsénico, cadmio, polisilicio, y el uso de otros materiales relacionados con equipos auxiliares que hacen parte del sistema (regulador, inversor, baterías y/o medidor bidireccional), como el requerimiento de espacios independientes, uso de acero, cobre, aluminio, plástico y materiales de embalaje.

Las turbinas minieólicas o de baja potencia aprovechan la energía cinética producto del movimiento de las masas de aire convectivas ascendentes y descendentes con diferentes temperaturas, y se clasifican de acuerdo a la dirección de su eje de giro, siendo las de eje horizontal las más comunes, económicas y en determinados casos, con mejor desempeño. Algunos estándares consideran la eólica de baja potencia cuando el área de barrida no supera los 200 m<sup>2</sup>, no obstante, para ampliar mucho más este mercado se necesita una retribución económica adecuada, solucionar el ruido acústico, la alta velocidad de viento de arranque y una adecuada generación eléctrica.

Los datos disponibles sobre impactos ambientales que podrían estar asociados a esta tecnología, se refieren a daños potenciales sobre la salud humana, sobre los recursos naturales y en menor medida en la calidad de los ecosistemas, los cuales se concentran en los materiales y/o procesos de fabricación de la torre y el generador. Entre las materias primas para estos elementos se encuentran compuestos ligeros de resina epoxy reforzada con madera, poliamidas como el nylon, fibra de vidrio, fibra de carbono, revestimiento anti radiación ultravioleta y anti erosión, procesos de pultrusión de plástico, entre otros.

La biomasa por termólisis es una tecnología que se refiere al combustible que proviene de fuentes naturales, residuales o cultivadas, la cual es incinerada en una caldera y su calor es aprovechado generalmente para proveer ACS y calefacción de espacios. Entre los combustibles disponibles están los subproductos madereros pretriturados, biomasa densificada (pellets), y residuos agrícolas. En el caso colombiano, los combustibles de mayor potencial por su alto valor energético en contextos urbanos son producto de las actividades sociales que generan los denominados residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU), compuestos por residuos de papel, madera, carbón vegetal, alimentos, aguas negras, residuos vegetales, y la poda de zonas verdes.

Estos combustibles son sometidos a aumento de temperatura en calderas policombustible con quemador integrado con potencias bajas entre 50 y 500 kw para edificios residenciales, pero es de resaltar que esto requiere de áreas considerables especialmente

para la caldera, el silo de almacenamiento y otros, muy posiblemente ubicados en el primer piso o sótano.

En cuanto a biomasa, existen pocos datos sobre los impactos ambientales producto de los materiales y fabricación de estos equipos, y aún persiste el debate sobre si son compensadas las emisiones que se producen durante la combustión del combustible para uso del mismo. Se cuenta con información de que los RSOU contienen material volátil, carbono orgánico, oxígeno, nitrógeno, y azufre; por su parte los pellets tienen emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, y de partículas.

Los colectores solares son equipos normalmente dispuestos en la cubierta de edificios que aprovechan la radiación solar para convertirla en calor que genera ACS y calefacción a través de un fluido caloportador que circula gracias a una bomba y a la diferencia de densidades entre el agua fría y caliente. En Colombia, este equipo ya ha sido usado por diferentes tipos de edificaciones, especialmente en áreas rurales, y existe más de un fabricante o distribuidor. Los materiales implicados en la fabricación son aluminio, acero, cobre, poliamida, lana de roca, lana de vidrio, caucho, silicona, vidrio templado, madera, etilvinilacetato, espuma de polietileno, energía eléctrica, gas natural, plástico y cartón de embalaje, entre otros, los cuales están asociados con diversos impactos y afectaciones a la salud humana; sin embargo, no se cuenta con estudios suficientes acerca de los impactos en su ciclo de vida y si estos son compensados con el ahorro energético que traen consigo.

Frente a los NetZero EB, los primeros ejemplos de residencias con ER y otras características fueron construidos en Estados Unidos desde finales de la década de 1930 y se han replicado en otras partes del mundo de acuerdo con los avances tecnológicos, y sus bases conceptuales empezaron a ser consolidadas desde finales de los años 70. Aunque no existe una definición o estándar internacional ampliamente adoptado, actualmente sus características están siendo promovidas internacionalmente desde diferentes códigos, iniciativas, programas, o proyectos de política pública, incluido Colombia.

En los últimos años, Colombia ha estado desarrollando diferentes proyectos de energías renovables no convencionales de gran escala que diversificarán su matriz energética, la cual está actualmente compuesta en más de un 70% por energía hidroeléctrica (ER convencional) y menos de un 30% por fuentes de origen fósil. Ese impulso no ha aplicado para las renovables de pequeña escala en edificios residenciales, pues no se cuenta con bases de datos públicas sobre los mismos, ni estudios comparativos post instalación de los conocidos; sin embargo, se prevé que este tipo de instalaciones aumentarán su presencia (especialmente los fotovoltaicos) por los incentivos financieros del gobierno y la reducción de costos.

A pesar del relativo subdesarrollo de estas tecnologías instaladas en edificaciones residenciales, en el país se ha venido consolidado el modelo de facturación y compra de energía “balance neto” (o medición neta, o Net Metering) menor o igual a 100 kW, que permite el autoconsumo y la venta de los excedentes a la red pública, o para consumo posterior (crédito de energía), al tiempo que se paga lo consumido neto de la red que no es cubierto por los equipos. Esto significa que los habitantes de edificaciones residenciales pasan a convertirse en productores de electricidad con opción de vender sus excedentes a la red pública; sin embargo, aunque ya se cuenta con normativas que alientan

esa figura, aún quedan por definir los procedimientos de solicitud y responsabilidades, especialmente en viviendas de alta densidad que agrupan varias unidades residenciales. Existen otras barreras identificadas como el costo inicial de las tecnologías, la alta tasa de descuento en el segmento residencial, la falta de mecanismos de financiación, y el poco conocimiento de los beneficios.

### 3.4.1. Bibliografía del capítulo

Abella, Miguel A. (s.f.). Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos autónomos. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Master en Energías Renovables y Mercado Energético. Tomado de [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45302/componente45301.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45302/componente45301.pdf)

Agencia Extremeña de la Energía (s.f.). Biomasa para Proyectistas: Curso Técnico de Sistemas de Biomasa y Sistemas Híbridos. Recuperado de: <https://www.agenex.net/images/stories/deptos/biomasa-para-proyectistas.pdf>

Aguilera, Jorge y Hontoria, Leocadio (s.f.). Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. Departamento de electrónica. Escuela Politécnica Superior Universidad de Jaén. Tomado de <https://manuelberaun.files.wordpress.com/2011/12/dimensionado-de-sfv-autonomos.pdf>

Albizzati, E. (2016). Evaluación de la sustentabilidad de instalaciones solares con colectores de placa plana y tubos evacuados. En *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 32, núm. 3, 2016, pp. 315-322. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/370/37046488006.pdf> <Consulta: 06 de enero de 2021>

Aristizábal, Andrés; Botero, Mónica; y Gordillo, Gerardo. (2010). Evaluación del Desempeño Energético de un Sistema BIPVS de 3,4kW y Dimensionamiento de un Sistema BIPVS para un Usuario Doméstico Típico en Bogotá, Colombia. Segunda Conferencia Iberoamericana de Ingeniería e Innovación Tecnológica, Orlando, USA.

Asociación Solar de la Industria Térmica ASIT (2019). Estudio de la huella de carbono de la energía solar térmica. [en línea] Disponible en: <https://www.interempresas.net/Instaladores/Articulos/260544-Estudio-de-la-huella-de-carbono-energia-solar-termica.html> <Consulta: 06 de enero de 2021>

Chel, A., & Kaushik, G. (2018). Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 655–669. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.027> <Consulta: 09 de julio de 2018>

Chévez, Pedro (2018). Energías renovables y eficiencia energética: Análisis de medidas orientadas al sector residencial. Ediciones de la U.

Comunidad de Madrid (2006). Guía práctica Sistemas Automáticos de Calefacción con Biomasa en Edificios y Viviendas. Gráficas Arias Montano, S.A. Madrid, España.

Recuperado de: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-practica-sistemas-automaticos-de-calefaccion-con-biomasa-en-edificios-y-viviendas-fenercom.pdf>

Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, DGIEM (2006). *Sistemas Automáticos de Calefacción con Biomasa en Edificios y Viviendas: Guía práctica*. Madrid, España.

Fenercom, Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid (2012). *Guía sobre tecnología minieólica*. Graficas Arias montano S.A. Madrid, España. Recuperado de: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-sobre-tecnologia-minieolica-fenercom-2012.pdf>

Galpin, C., & Moncaster, A. (2017). Inclusion of on-site renewables in design-stage building life cycle assessments. In *Energy Procedia* (Vol. 134, pp. 452–461). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.603> <Consulta: 10 de febrero de 2020>

González, Rosa (2018). *Designing nearly zero energy buildings: energy efficiency and on-site generation*. Tesis de doctorado Programa de Planeamiento Energético. Instituto Alberto Luiz Coimbra para Estudios de Posgrado e Investigación en Ingeniería. Rio de Janeiro. Recuperado de <http://www.ppe.ufri.br/index.php/pt/publicacoes/teses-e-dissertacoes/2018/1467-designing-nearly-zero-energy-buildings-energy-efficiency-and-on-site-generation-2>

IDAE. (2009). *Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios*. 84 p. Recuperado de: <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-instalaciones-de-biomasa-termica-en-edificios>

IRENA (2017). *Renewable Energy in Cities*. International Renewable Energy Agency- (IRENA), Abu Dhabi. [www.irena.org](http://www.irena.org)

Manchado, Rebeca (2017). *Evaluación de la implantación de energía minieólica en plantas de tratamiento de residuos municipales*. Trabajo fin de grado para la obtención del título de graduado en ingeniería química. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: [http://oa.upm.es/47643/1/TFG\\_REBECA\\_MANCHADO\\_PERERO.pdf](http://oa.upm.es/47643/1/TFG_REBECA_MANCHADO_PERERO.pdf)

Ministerio de Fomento (2019). *Documento Básico HE: Ahorro de energía*. Código Técnico de la Edificación (CTE). Gobierno de España

Montaner, Josep (2015). *La arquitectura de la vivienda colectiva: políticas y proyectos en la ciudad contemporánea*. Editorial Reverté, Barcelona

Murguía, A. (2018). *Rehabilitación de las instalaciones térmicas de una vivienda unifamiliar*. Trabajo fin de grado en Ingeniería en Tecnología Industrial. Universidad del País Vasco. Recuperado de: <https://addi.ehu.es/handle/10810/29485>

Osma P, G. et al. (2015). Energy considerations of social dwellings in Colombia according to NZEB concept. *DYNA* 82(192): 120. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n192.48587> <Consulta: 31 de mayo de 2019>

Pascualino, J; Cabrera, C y Vanegas, M. (2015). Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe Colombiano. *Prospect*, Vol 13, N° 1, 68-75

Portafolio.com (2018). Los proyectos de energía renovable que piden pista. marzo 27 de 2018. <http://www.portafolio.co/economia/los-proyectos-de-energia-renovable-que-piden-pista-515628> <Consulta: 20 de abril de 2018>

REN21. (2019). *Renewables 2019: Global Status Report* (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-9818911-7-1

Rivarola, A. y Madrazo, I. (2016). Evaluación de un aerogenerador nacional de baja potencia empleando metodología de análisis de ciclo de vida. En: *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 20, pp 06.51-06.58, 2016. Argentina

Rodríguez, Ana; Cadena, Ángela y Aristizábal, Andrés (2015). Diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica para usuarios residenciales en Chía, Cundinamarca. *Revista Mutis* 5(1); pág. 55-65.

SOM Energía (2020). Guía práctica para la autoproducción colectiva en bloques de pisos. Recuperado de: <https://blog.somenergia.coop/som-energia/2020/11/publicamos-una-guia-practica-de-autoproduccion-colectiva-en-bloques-de-pisos/> <Consulta: 12 de enero de 2021>

Torres, Daniela (2015). Diseño de un generador eólico de eje vertical de baja potencia. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira

Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (2011). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bucaramanga (Colombia): Universidad Industrial de Santander. 180 p

Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Convenio ATN/FM-12825-CO

Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (2018). Resolución 463 del 28 de agosto de 2018. República de Colombia.

Vares, S., Häkkinen, T., Ketomäki, J., Shemeikka, J., & Jung, N. (2019). Impact of renewable energy technologies on the embodied and operational GHG emissions of a nearly zero energy building. *Journal of Building Engineering*, 22, 439–450. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.12.017> <Consulta: 15 de Abril de 2019>

Zabalza, I. (2011). Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Recuperado de: <https://zaguan.unizar.es/record/5751?ln=es#> <Consulta: 17 de diciembre de 2019>

Zeggaf, I. (2015). Estudio de la autosuficiencia energética de una vivienda unifamiliar. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/86405> <Consulta: 06 de enero de 2021>

# 4. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE CICLO DE VIDA



## 4.1 ANALISIS DE CICLO DE VIDA

La elección de materiales a utilizar en un proyecto, se ha basado tradicionalmente en aspectos económicos, funcionales y estéticos. Hoy en día, a pesar de los rezagos por cuenta de la reconversión tecnológica que implica, la demanda de materiales a nivel mundial comienza a volverse más exigente frente a su desempeño ambiental que contempla los impactos y consumos de energía y recursos, medibles desde su extracción, así como los procesos de transformación, las distancias de transporte, su eficaz puesta en obra, las prestaciones en la operación, emisiones de gases de efecto invernadero, potencial de reciclaje y/o reusabilidad, durabilidad y mantenimiento, modulación, origen basado en renovables, valores de conductividad térmica, generación de partículas volátiles, entre otros.

Dentro de ese marco de posibilidades, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se destaca porque es un procedimiento que valida la toma de decisiones frente al mejor desempeño ambiental (bajo uno o más parámetros) de un producto o servicio en todas sus etapas, y como comunicación para dar conocimiento al público sobre estas características, gracias a las declaraciones ambientales de producto (DAP).

El ACV es una herramienta metodológica desarrollada a finales de los años 60 y durante la década del 70 a raíz de la crisis energética, que permite analizar los impactos ambientales y energéticos que se generan durante los procesos de fabricación, consumo y disposición final de materiales de construcción u otros productos o procesos. El análisis se basa en la compilación y cuantificación de las entradas y salidas (inputs/outputs) del proceso para obtener unos resultados que expongan los impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos, gracias a su enfoque holístico, que se basa en que un fenómeno no puede ser explicado de manera individual sino por las partes que lo componen.

Estos impactos pueden ser medidos desde la extracción de las materias primas para fabricar los diferentes materiales de construcción, hasta el final de su vida útil en una edificación que es demolida, teniendo en cuenta la integración total de todos los aspectos que participan. El análisis de este proceso se puede dividir en cuatro grandes alcances o límites del sistema que dependen de la delimitación e impactos que se desea analizar (igualmente complejos): “de la cuna a la tumba”, “de la cuna a la puerta”, “de la puerta a la puerta” y “de la cuna a la cuna”, los cuales contemplan el análisis de impactos por vertimientos, emisiones, residuos y consumos de energía implicada en la extracción de las materias primas, fabricación del material, transportes, puesta en obra y construcción, uso de la edificación y disposición de los residuos y escombros (Ihobe, 2009). Este ciclo contempla el análisis de impactos de:

- Extracción de las materias primas para su elaboración, con el debido respeto a las normativas para reducir impactos.
- Fabricación del material.
- Transportes durante todo su ciclo para lo cual se consideran distancias y dimensiones de las cargas.

- La puesta en obra y construcción de la cual se pueden generar contaminación por el uso de sustancias químicas. En este sentido es prioritaria una adecuada elección de materiales saludables, de bajo impacto y con posibilidades de reciclabilidad.
- El uso de la edificación con un adecuado mantenimiento que garantice espacios saludables y confortables y con durabilidad.
- Disposición de residuos y escombros de la construcción, la demolición y la posibilidad de reutilizar elementos.

Dicho de otro modo, el ACV “es un proceso para evaluar, de la forma más objetiva posible, «las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno; para determinar el impacto que ese uso de recursos y esos vertidos producen en el medio ambiente, y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental” (Rieznik y Hernández, 2005).

El ACV como método de evaluación de consumos e impactos durante todas las fases de producción de un material, está directamente relacionada con los costos acumulados que se les ofrece a posibles compradores, y que es denominado como el Costo de Ciclo de Vida (CCV). Trabajar conjuntamente en el desarrollo de una metodología para el ACV y el CCV es una práctica de sostenibilidad que permite incrementar la reducción de impactos, de consumos y de generación de gases y partículas. El desarrollo de una metodología que permita evaluar los ACV y los CCV, implica la recolección, el análisis y cruce de información tomando en cuenta aspectos como los insumos y las normativas en cada proceso de cada fase. Quiere decir, que el CCV analiza los costos intrínsecos del ciclo de vida de los materiales empleados en las edificaciones en todas sus etapas, logrando resultados que muestren la relación Costo – Beneficio y su contribución al equilibrio entre lo económico, lo social y lo ambiental.

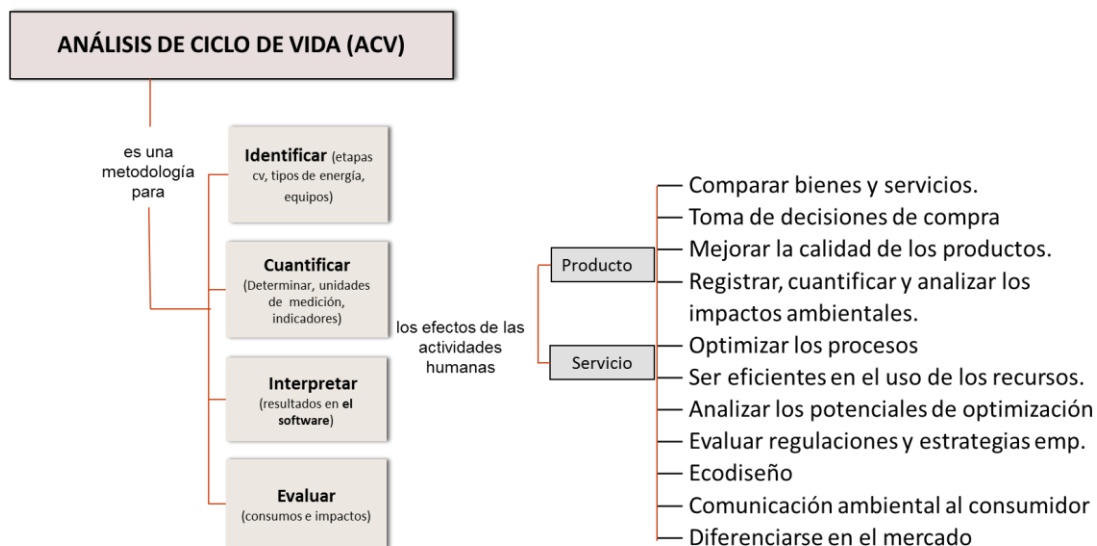


Ilustración 19. Definición y alcance del Análisis de Ciclo de vida. Fuente: Ballén et al, 2016

En el ámbito de las edificaciones (no de materiales), la evaluación tradicional de energía e impactos se da a partir de la construcción y operación de la misma, no obstante, esto depende a su vez del ciclo de los materiales empleados, debido a que estos han pasado por procesos de transformación junto con consumos energéticos que definen su vida útil. Como se revisó en el 2.2 MARCO TEÓRICO 2.2 MARCO , esta acumulación de energía

consumida por los materiales y procesos en todas sus etapas y que es cuantificada se denomina energía embebida.

En relación con la demanda energética, indicadores de uso de energía primaria o evaluación de la energía embebida, las herramientas del software utilizado integran la información modelada más las bases de datos, cuyo resultado puede evidenciar la ruta de la demanda considerando los impactos de toda la cadena de suministro. En buena parte de los resultados de estudios en materiales de construcción, el mayor flujo y demanda de energía se concentra en los procesos de extracción a cielo abierto de las materias primas y su demanda de combustibles fósiles como el diésel y el petróleo, que a su vez, implican a otros impactos energéticos.

Por otro lado, el ACV es una herramienta que permite a los fabricantes de materiales evaluar los impactos ambientales, a los ecosistemas y a la salud humana que están causando los procesos de fabricación y/o transformación de recursos asociados a un producto o proceso que están desarrollando. Esta información permite adelantar estrategias encaminadas a su optimización y posterior declaración pública de producto para lograr una mayor reputación en el mercado. El diseño e implementación de estrategias de reducción de consumos se refleja en los costos finales y de operación del edificio y por consiguiente su valorización.

*“El uso del ACV ayuda a promover la construcción de Edificios de Cero Emisiones de Ciclo de Vida (LC-ZEB) con un nulo impacto medioambiental, integrando técnicas avanzadas de ecodiseño arquitectónico, bioconstrucción, ahorro energético, agua y materiales, y energías renovables, obteniendo la máxima eficiencia de los recursos disponibles y el máximo confort térmico.*

*[...] El ACV permite dar una respuesta clara para cada edificio particular, a cuestiones tales como: ¿cuál es la mejor combinación de materiales de construcción para la fachada?, ¿qué estructura es más respetuosa con el medioambiente?, ¿qué fuentes energéticas son las más adecuadas?, ¿cuál es el espesor de aislamiento óptimo?, ¿en cuánto se reduce el impacto medioambiental al instalar sistemas renovables como captadores solares térmicos, paneles fotovoltaicos, calderas de biomasa o aerogeneradores de pequeña potencia? ...” (Zabalza, 2011: 109, 112).*

#### **4.1.1. Categorías de impacto**

Para desarrollar un ACV, es necesario seleccionar una o más categorías de impacto ambiental de la cual se desea obtener los resultados, y cuyo procedimiento se basa en la Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida (EICV), según lo establece el estándar internacional ISO 14040 (ISO, 2006). De esto depende el desarrollo del análisis del inventario y las mediciones en campo relacionadas, además para proporcionar un enfoque metodológico que responda a los impactos ambientales evaluados y su cuantificación.

Es necesario contar con un conocimiento previo del proceso del material y/o de la edificación y sus fases de producción para seleccionar las categorías de impacto ambiental más acordes, teniendo en cuenta el objetivo del estudio, público objetivo, nivel de

exactitud de los resultados y necesidades del demandante, es decir, teniendo claro los alcances.

Las categorías de impacto más comunes son cambio climático, destrucción de la capa de ozono estratosférica, acidificación del suelo y agua, eutrofización, agotamiento de recursos abióticos, formación de ozono troposférico, agotamiento de ozono, e indicadores de uso de energía primaria (la mayoría relacionadas con la metodología “CML-IA”, creada por el “Institute of Environmental Sciences” de la Universidad de Leiden). No obstante, de acuerdo a las necesidades de ecoetiquetado de ciertos productos, algunas industrias han desarrollado categorías particulares. Cada una de estas categorías está definida por un indicador cuantificado, por una unidad de medida específica, y sobre un parámetro ajustado a cada contexto (Zabalza, 2011: 80), llamado factor de caracterización.

Se han identificado, como categorías relevantes para ser desarrolladas y comunicadas en el actual contexto, la de potencial de calentamiento global (cuantificado en Kg CO<sub>2</sub>eq) y la de uso de energía primaria y embebida (cuantificado en MJ) que conduzca a establecer la energía embebida de un material o edificación. A estas categorías se suman las establecidas por la RCP respectiva (Tabla 4). El rigor con que se pueda realizar un análisis de inventario se reflejará en una correcta clasificación, caracterización y posterior graficación por parte del software. Para ello se tienen en cuenta los consumos de energía utilizados en el proceso de fabricación de cada material a través de máquinas, equipos, y transporte de materias primas.

Impact Category	Parameter	Unit (expressed per functional unit)
Depletion of abiotic resources		
- Elements	Abiotic depletion potential (ADP-elements) for non-fossil resources	kg Sb equiv
- Fossil fuels	Abiotic depletion potential (ADP-fossil fuels) for fossil resources	MJ, net calorific value
Acidification for soil and water	Acidification potential of soil and water, AP	kg SO <sub>2</sub> equiv <sup>3</sup>
Ozone Depletion	Depletion potential of the stratospheric ozone layer, OPD	kg CFC 11 equiv
Global Warming	Global warming potential, GWP	kg CO <sub>2</sub> equiv
Eutrophication	Eutrophication potential, EP	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> equiv
Photochemical ozone creation	Formation potential of tropospheric ozone, POCP	kg Ethene C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> equiv

Tabla 4. Categorías de impacto requeridas por la RCP para edificios. Fuente: PCR UN CPC531 2014:02

Las Reglas de Categoría de Producto (RCP) son documentos administrados por ciertos operadores (mencionados más adelante) que proporcionan reglas, requisitos y pautas para desarrollar una Declaración Ambiental de producto para un elemento o material específico, que a su vez están estandarizadas por la ISO 14025.

Si bien la RCP del operador *EPD System* exige análisis en las seis categorías presentadas en la Tabla 4, el enfoque que tiene la presente investigación exige un desarrollo y énfasis en las categorías “Non renewable, fossil” y “Renewable, wind, solar, geoth”, que por su relación con la energía están presentes en la metodología CED (Cumulative Energy Demand); adicionalmente, se hace énfasis en la categoría “Global warming potential

GWP” (o Potencial de calentamiento global) cuya unidad de resultados son las emisiones de CO<sub>2</sub>eq, calculadas tanto por la metodología ReCiPe, como CML-IA. La metodología ReCiPe cuenta con tres versiones, de las cuales, la perspectiva Jerárquica (H) es de largo plazo, asume que los combustibles fósiles no son fácilmente sustituibles, y es la perspectiva predeterminada.

#### 4.1.2. Metodología de ACV

Desarrollar un proceso de ACV es complejo por la gran cantidad de variables y requisitos a la hora de ingresar datos de entradas y la recopilación de datos de inventario. Por lo tanto, anteriormente se hacían llamados para desarrollar protocolos acordes con las necesidades de un material específico, una meta, o una función determinada; hoy en día, se podría decir que estos protocolos son las RCP. Los estándares internacionales y la literatura son reiterativos en cuanto a que este estudio no sirve para comparar productos con condiciones y propósitos diferentes, sino, más bien, servicios y/o cantidades de un producto que lleven a cabo la misma función. Para ello, se deben identificar claramente los límites del sistema, posterior al planteamiento de la aplicación prevista, las hipótesis, los criterios de exclusión, los datos, las limitaciones económicas y el destinatario previsto (Antón, 2004).

Como parte de la metodología de ACV establecida por la ISO 14040, el desarrollo se encuentra dividido en estructura y aplicación, las cuales se retroalimentan mutuamente. A su vez, la estructura consiste en una serie de etapas metodológicas ya definidas que se relacionan entre ellas: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto, e interpretación de los resultados, lo que da cuenta de una estructuración estándar de las actividades secuenciales necesarias para alcanzar el objetivo de análisis y sus posibles aplicaciones (Ilustración 19).

Si bien existe cierta flexibilidad metodológica siempre y cuando se sigan los parámetros normativos, es necesario definir claramente los objetivos precisando con detalle los temas tratados y el propósito final, debido a que el estudio se desarrollará de diferente manera de acuerdo a lo que se espera de él. Se resuelven cuestiones como las razones para llevar a cabo el estudio, a quien va dirigido, intenciones y decisiones derivadas de los resultados, el tipo de información requerida, si se someterá a una ecoetiqueta, si se harán comparaciones, se publicarán los resultados, o si se hará una mejora ambiental.

Además de lo que dispone la ISO 14040, hace falta definir un método específico estándar para el cálculo de la energía embebida de los materiales de construcción y de un edificio. Sin embargo, es comúnmente aceptado que se trata de cuantificar la energía necesaria para la fabricación de los materiales desde la extracción de materias primas, el de los equipos implicados y el transporte hasta la construcción final, es decir, de la cuna a la puerta como límite del sistema de producto<sup>54</sup>. Para calcular el CO<sub>2</sub>eq como potencial de calentamiento global u otra categoría de impacto, si es indispensable el uso de factores de emisión y de caracterización a través de software de ACV.

---

<sup>54</sup> La norma ISO 14040 2006 define sistema de producto como un “conjunto de procesos unitarios conectados material y energéticamente que realizan una o más funciones definidas”. En ese sentido, el sistema de producto puede ser un edificio o material que sean objeto de estudio, y los procesos unitarios consisten en cada una de las etapas del proceso de fabricación.

Para delimitar el sistema en productos como un material de construcción tradicional, lo más práctico es desarrollar un estudio que abarque desde la obtención de la materia prima, pasando por el transporte hasta y dentro de la fábrica, y su instalación como elemento constructivo en una edificación, es decir, de la cuna a la puerta.

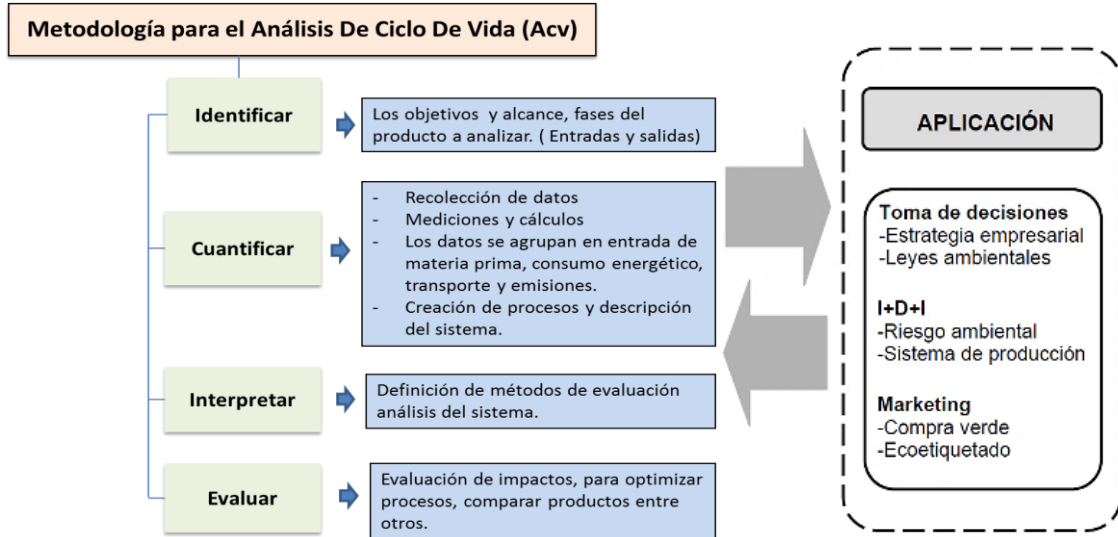


Ilustración 20. Aspectos metodológicos del Análisis del ciclo de vida. Fuente: Ballén et al, 2016, e ISO 14040

Estos alcances deben estar delimitados de acuerdo con los objetivos, el ámbito geográfico y temporal y el presupuesto, y además evidenciando los sistemas a estudiar, la hipótesis, el nivel de detalle y la búsqueda de datos. Esto dará paso a definir la unidad funcional del sistema, la cual permite identificar de manera más precisa lo que se pretende analizar y cómo se puede expresar el análisis de inventario, lo que lo convierte en un punto clave de esta etapa.

Según la Norma ISO 14040, la unidad funcional se trata de una “cuantificación de la función de un sistema del producto, servicio o actividad, que se utiliza como unidad de referencia en el estudio de ACV”. En otras palabras, es una unidad de medida base o referencia para el registro matemático de las entradas y salidas, y describe la función del sistema, lo cual facilita que puedan ser comparadas con las de otro sistema cuando amerite. Esto quiere decir, que la unidad funcional es determinante para el éxito cuando se trata de estudios comparativos debido a que se necesita de una equivalencia, que, en el caso de edificios, está determinado por los requisitos y pautas propuestos por la PCR UN CPC531 2014:02, como lo son los m<sup>2</sup> del edificio bajo un enfoque de la “cuna a la tumba”.

En caso de que no exista una RCP específica para materiales o productos que guie la formulación de la unidad funcional, lo puede hacer el desarrollador del estudio bajo un método fiable y válido para ser medido. Comúnmente, en las aproximaciones a estos estudios, se toma como unidad un producto que es una unidad de tipo físico, y es usada para mencionar todas las entradas y salidas del sistema, por tanto, debe tomarse un compuesto que componga dicha muestra.

*“Por ejemplo, en el caso de una industria dedicada a la producción de polímeros para uso como envase, si se plantea la cuantificación del impacto ambiental de uno de sus productos, el objeto del estudio puede definirse como: '1 g de polímero'”*

o '100 kg de polímero'. Sin embargo, si se quisiera comparar la función de dos polímeros diferentes, sería relevante definir la función que comparten ambos productos, por ejemplo, “envasar agua mineral”, de modo que la unidad funcional a estudiar sería, por ejemplo, “x” gramos de cada polímero analizado para envasar 1,5 litros de agua” (Feijoo et al., 2007b, citado en Rivela, 2012: 113).

Otra de las consideraciones metodológicas importantes, es que el cálculo de datos de flujo de energía debe tener en cuenta las diferentes fuentes de combustibles y electricidad, sus entradas y salidas, la eficiencia de la conversión y la distribución del flujo en los procesos unitarios (energía de proceso). Se pueden usar fuentes primarias o secundarias publicadas en los últimos cinco años, pero depende de la RCP respectiva.

En el caso de edificaciones, es necesario aplicar metodologías de carácter global que incluyan todas las etapas de su vida útil. De acuerdo con el enfoque energético del trabajo de Muñoz (2013), la categorización de los datos se separa en combustibles fósiles y electricidad, 1 m<sup>2</sup> de edificación como unidad funcional, y 1 MJ/m<sup>2</sup> construido como flujo de referencia, que es la cantidad de producto necesaria para cumplir con la función.

Según las recomendaciones del CEN 350 (2008), la UNE-EN 15978:2012 y de la PCR UN CPC 531, las cuantificaciones y cálculos con base en la unidad funcional deben contemplar cuatro grandes etapas de ciclo de vida o subsistemas obligatorios en edificios nuevos, cuyos nombres se basan en códigos de letra que se refieren a etapas generales, y acompañados por números que se refieren a sub etapas específicas: producción o proceso ascendente (A1-A3), construcción o proceso núcleo (A4-A5), uso (B1-B7), y fin de vida (C1-C4); el planteamiento de escenarios de Reutilización/ recuperación/ potencial de reciclaje (D) más allá de los límites del sistema es opcional. La vida útil estimada es de 50 años.

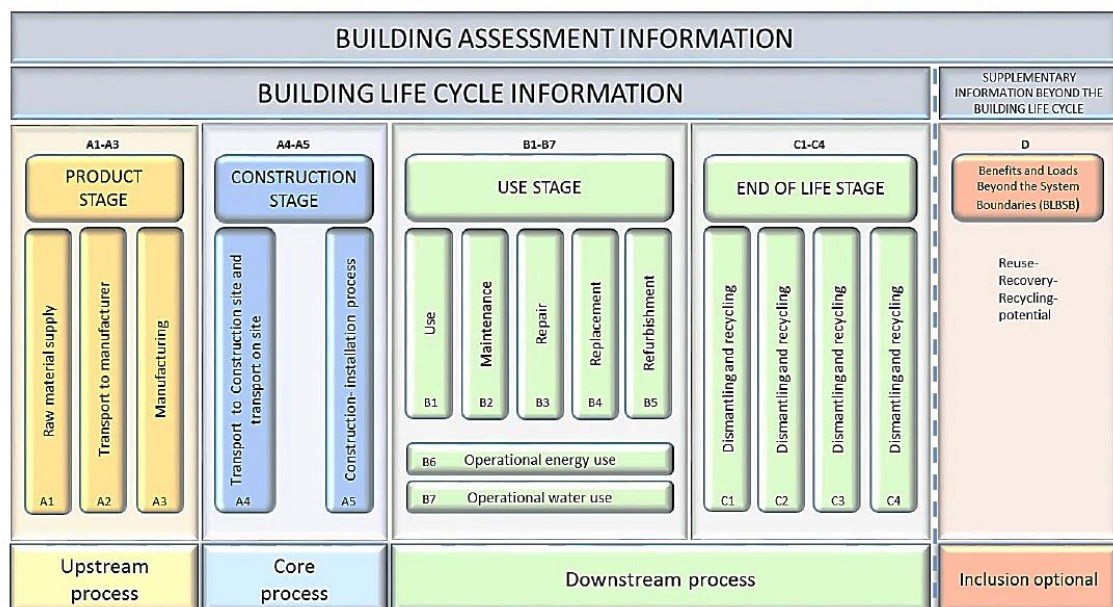


Ilustración 21. Límites del sistema de ciclo de vida para edificios según el estándar EN 15804. Fuente: PCR UN CPC531 2014:02

Estas etapas del ciclo de vida, subprocesos y unidades conforman el sistema a estudio, y deben ser delimitados, desde el inicio, de acuerdo al alcance: es lo que la ISO 14040



denomina como “definir los límites del sistema”. Si dentro de la delimitación se concluye que deben ser omitidas una o más etapas, esta omisión debe estar suficientemente argumentada, y siempre y cuando no altere significativamente los resultados globales (Rivela, 2012: 113). Por lo general, las entradas, salidas o procesos que representan menos del 1% de la masa general del sistema son omitidas como criterio de corte, pero también pueden registrar otras variables, como energía e importancia ambiental.

Es recomendable usar diagramas de flujo o árbol de procesos como herramienta que facilita la descripción de procesos complejos, por ejemplo, los ciclos de vida de materiales o edificios. Para este fin, es importante recalcar que para la descripción de cualquier proceso es indispensable conocerlo muy bien. Con base en ese conocimiento, se busca graficarlo de manera clara y objetiva para entender mejor los procesos, pudiendo identificar al mismo tiempo las entradas y las salidas.

El Inventario del Ciclo de Vida (ICV) es la recopilación y medición de las cargas ambientales que comprenden los datos manifestados en balances de entradas y salidas registradas de materia y de energía de un producto, material, proceso o servicio a lo largo de su ciclo de vida, y que a su vez producen impactos negativos en el ambiente, estableciendo una relación causa-efecto potencial. Ejemplo de ello son las diferentes emisiones contaminantes, vertimientos, residuos sólidos, transporte, producción de energía, consumos de recursos, ruidos, radiaciones, olores, etc.

De esta manera, el inventario comprende la obtención y cuantificación técnica de estos datos que serán evaluados con procedimientos de cálculo para cuantificar dichas cargas ambientales relacionadas con el sistema, la unidad funcional, el objetivo declarado, y la categoría de impacto a estudiar. Por ejemplo, energía embebida, calentamiento global, huella de carbono, huella hídrica, etc. No obstante, también es conocido que, en las primeras etapas del diseño de un edificio, la información disponible como inventario es muy reducida o está sujeta a cambios, mientras que en las últimas etapas si existe la información pero es menos susceptible a cambios; una posible solución a este problema es obtener la información de todas las opciones de diseño desde el principio.

Visto de manera técnica, el inventario comienza con el registro de las materias primas y energía provenientes de la naturaleza (entradas), y termina con el manejo de los residuos del producto que son descargados igualmente en la naturaleza (salidas); en caso de que no provengan o no sean descargados en el ambiente, se debe especificar su origen o destino. En su trabajo sobre metodología de ACV para la evaluación de edificios, Beatriz Rivela (2012) cita a James Fava para enunciar las etapas que componen el ICV, que se referencian a continuación y que han sido modificadas de acuerdo con la propuesta de Muñoz (2013: 56):

1. Construcción del diagrama de flujo, conforme a los límites del sistema establecidos en la etapa de definición de objetivos y alcance.
2. Establecer la calidad de los datos (niveles de precisión requeridos).
3. Definir los límites del sistema.
4. Recolección de datos de todas las actividades en el sistema de producción. Es necesario establecer el origen de esos datos: bibliográficos y/o medidas in situ; en este último caso se debe indicar la metodología empleada.
5. Cálculo de balances de las cargas ambientales referidas a la unidad funcional.
6. Normalización de los datos en lo que respecta a las unidades empleadas.



7. Balances de materia que permitan interrelacionar las entradas y salidas entre los diferentes subsistemas.
8. Cuantificación de los flujos de entrada y salida del sistema desde y hacia la naturaleza y desde y hacia la tecnosfera.
9. Inventario global.
10. Documentación de los cálculos.
11. Redefinición de los objetivos y alcances

La recolección de datos del inventario es una de las fases más largas, costosas, variables y complejas del ACV, ya que requiere de mediciones de consumos y residuos en campo e información primaria que no siempre es de fácil acceso, ya que, sin ello, es posible que los resultados no sean confiables. Los datos seleccionados para el ICV y su evaluación pueden ser obtenidos al hacer mediciones en sitio, calculados, estimados, o una mezcla de estos, sin descuidar su trazabilidad y argumentación. Así mismo, los datos registrados se pueden clasificar en cuatro grupos: medidas directas, documentos publicados, fuentes electrónicas y comunicaciones personales (von Bahr, 2001, citado en Rivela, 2012).

Para la recolección de datos de inventario en edificios ya existentes, según la PCR UN CPC 531, se pueden usar datos genéricos para modelar las etapas de producción y construcción (A1-A5), pero desarrollando datos primarios para la etapa de uso (B1-B7) y el final de la vida útil (C1-C4), incluyendo datos de reparaciones y mantenimiento durante el tiempo de servicio.

La distribución de los flujos de entrada y salida a cada proceso unitario o al/los sistemas de producto es denominado como asignación, la cual se puede realizar de manera física (enfoque de proceso), de manera económica (enfoque de entrada - salida), o híbrida. Como se mencionó en el marco teórico, el enfoque de proceso es el más usado porque se basa en las cuantificaciones físicas de los flujos que además pueden ser visibles, a pesar de poseer algunas fallas; por otro lado, el enfoque de entrada - salida económica se basa en las cantidades y proporción de precios de los materiales trazando un mapa de flujos, pero que está limitado por las fluctuaciones del mercado.

Debido a que la calidad y reproductibilidad de los datos registrados en el inventario puede llegar a determinar el éxito de un estudio, y teniendo en cuenta la complejidad en la recolección de los datos, las bases de datos tienen una gran importancia. Existen diferentes bases de datos en el mercado, desarrolladas por institutos especializados en diferentes países, destacándose los suizos.

Entre las bases de datos más usadas alrededor del mundo esta Ecoinvent (Suiza), Eth-esu (Suiza), Buwal (Suiza), Idemat (Holanda), Ivam (Holanda), Elcd (Europea), U.S. LCI (Estados Unidos), LCA Food DK (Dinamarca), Danish Io (Dinamarca), Bousted Model (Reino Unido), Us Lci Database (Canadá), Gemis (Alemania) y Gabi Database (Varios); de estas, la más utilizada para realizar evaluación de materiales de construcción por la cantidad de procesos incorporados de esta industria es Ecoinvent<sup>55</sup>, que fue desarrollada por el Centro Suizo para Inventarios de Ciclo de Vida. Para el desarrollo del presente trabajo, se partirá de esta base de datos y se comparará con la información de fuentes secundarias, teniendo en cuenta el ajuste de los valores de la matriz energética colombiana.

---

<sup>55</sup> <https://www.ecoinvent.org/>

No obstante, una de las grandes dificultades a la hora de incorporar algunas de las bases de datos es la falta de trazabilidad en la obtención de los mismos, por lo que no pueden revisarse para comprobar su fiabilidad, lo que dificulta su edición si se quiere acoplar a una delimitación geográfica y temporal diferente a la de su país de desarrollo<sup>56</sup>, que es el caso del contexto Latinoamericano y especialmente de Colombia.

En el desarrollo de un ACV, las bases de datos contienen datasets que son útiles para la asignación de cargas ambientales a cada una de las etapas y procesos de objetos de estudio que implican varios productos o ciclos, debido a que en muy pocos casos se dan procesos lineales de un solo proceso. Por el contrario, la mayoría de los procesos producen más de un producto (subproductos) con varias líneas de entrada de materias primas y que también reciclan los productos intermedios y sus residuos, por lo que es necesario registrar a través del modelamiento de ciclos cerrados o abiertos.

Esta es la razón por la cual existen varios programas y entidades que fomentan el desarrollo y difusión de bases de datos de ACV ajustadas a todo tipo de contextos, regiones y/o países. Son ejemplo: el “Life Cycle Initiative” del PNUMA; la Red Iberoamericana de Ciclo de vida; o el Design Life Cycle de la Universidad de California. Es pertinente mencionar también al Athena Sustainable Materials Institute (Canadá); el National Institute of Standards and Technology (NIST, Estados Unidos); Izuba Energies (Francia)<sup>57</sup>; Tally, One Click LCA; y el programa EC3, todas ellas entidades que desarrollan bases de datos y herramientas digitales enfocadas a la arquitectura y la edificación.

Más allá de la construcción, en el mercado existe una amplia oferta de software especializado en ACV para modelar cualquier tipo de proceso o producto, como por ejemplo Simapro, Gabi, Umberto, EcoIt, u OpenLCA. Algunos de ellos con licencia gratuita y otros con licencia de pago, que depende principalmente de la cantidad y calidad de las bases de datos y metodologías de cálculo que incorporan.

Se ha escogido el software SimaPro para desarrollar el correspondiente análisis de esta investigación, porque cuenta con una alta reputación para su uso comercial y académico a lo largo de más de 25 años por varias organizaciones en todo el mundo. Este software se puede utilizar para una variedad de análisis, como la generación de informes de sostenibilidad, huella de carbono y agua, ecodiseño, generación de declaraciones ambientales de productos y determinación de indicadores clave de rendimiento. Esto se logra al modelar los ciclos de vida de forma sistemática, midiendo los impactos ambientales, e identificando puntos críticos en la cadena de suministro.

El software para desarrollar ACV por lo general también incluye una o más metodologías de cálculo para procesar los datos de inventario respecto al consumo de recursos, emisiones y el daño final provocado sobre la salud humana y al ambiente, ofreciendo resultados según las unidades y factores de caracterización manejadas por cada categoría de impacto. Estas metodologías se agrupan en dos tipos denominadas como “impactos de efecto final” e “impactos de efecto intermedio”, en función de la relación causa-efecto

---

<sup>56</sup> Estos datos se basan en información relacionada con la matriz energética, la tecnología utilizada y de los sistemas de transporte propios de cada país o región.

<sup>57</sup> <https://www.lifecycleinitiative.org/>, <https://rediberoamericanadeciclodevida.wordpress.com/>, <http://www.designlife-cycle.com/>, <http://www.athenasmi.org/>, <https://www.nist.gov/>, <https://www.izuba.fr/>. Existen otras aplicaciones referenciadas por Zabalza (2011: 99).

para llegar al cálculo del impacto ambiental. Existe una amplia oferta de metodologías desarrolladas por diferentes entidades internacionales<sup>58</sup>, de las cuales, las más usadas en diferentes campos de investigación son las metodologías Ecoindicador 99 (actualmente descontinuada), CML 2000 y ReCiPe, donde la primera está clasificada en el tipo “de efecto final”, la segunda como “de efecto intermedio”, y la última como una metodología recientemente creada que integra ambos tipos y su uso es cada vez más frecuente por su simplicidad en la comunicación de los resultados (Rivela, 2012).

La metodología de evaluación de impacto CML baseline<sup>59</sup> fue desarrollada por el Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden y aun es considerada una de las metodologías más fiables a pesar de las metodologías más recientes. Esta metodología está definida para un enfoque de impactos de punto medio que proporciona normalización pero no ponderación ni adición, y sus indicadores están basados en el principio de la mejor práctica disponible.

ReCiPe se basa en CML 2000 y Ecoindicador 99, desarrollando una primera versión en 2008 y una actualización posterior en 2016, gracias a una colaboración entre el Instituto Nacional Holandés de Salud Pública y Medio Ambiente (RIVM), la Universidad Radboud Nijmegen, la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, y PRé Consultants. Esta metodología de cálculo contempla 18 indicadores (categorías de impacto) de punto medio y 3 indicadores de punto final, los cuales consideran tres perspectivas (individualista I, jerarquista H, e igualitario E) que representan un conjunto de opciones sobre cuestiones como el tiempo, las expectativas de gestión adecuada, o que el desarrollo tecnológico futuro podría evitar daños futuros.

Como se apreció en el marco teórico, una metodología de evaluación de impacto utilizada en el ámbito energético desde la década de 1970s es la Cumulative Energy Demand V1.08 (CED). Esta metodología se basa en un método originado y ampliado por Ecoinvent que contabiliza cada entrada de energía directa o indirecta. Los factores de caracterización y ponderación se dan en cinco categorías de impacto, definidas y sumadas por el origen renovable o no renovable de la energía y su tipo. Con ello, se obtienen los parámetros de demanda total de energía primaria de acuerdo con las entradas junto con sus datos de producción, transporte, uso y disposición final.

Frente a la cuantificación de energía, Zabalza (2011: 79) advierte que es necesario hacer una distinción entre los distintos tipos de energías renovables, ya que “si un edificio se calienta con biomasa o calor de origen geotérmico, dicha energía consumida no está ya disponible para otros edificios”. Por otro lado, los colectores solares térmicos o los paneles fotovoltaicos en un edificio no reducen esta energía disponible para otros edificios.

Vale la pena destacar que, de manera predeterminada, este tipo de evaluaciones se hacen a partir de la matriz energética europea donde la oferta de sistemas de energía renovable es variada y permiten estos resultados. En el caso colombiano, la principal fuente de energía son las hidroeléctricas (ver Gráfico 1 y Tabla 2), así que los resultados e interpretaciones deben tener en cuenta estas diferencias. Un método alternativo de

---

<sup>58</sup> Algunas de las metodologías más conocidas son CML2, CML92, EPS2000, IPCC2007, Ecoindicador95, Ecoindicador99, Impact2000+, TRACI2002, Ecopuntos97, EDIP97, LIME, ReCiPe, MEEUP, CED, entre otras.

<sup>59</sup> <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>

calcular esta demanda caracterizada en el software es a través del método de ecopuntos<sup>60</sup>, el cual evalúa y expresa, en proporción, la contribución de diversas fuentes de energía asociadas a la metodología y a una o varias categorías de impacto.

La Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV), es un proceso técnico de análisis e interpretación de las cargas ambientales registradas en el inventario y es determinada por la ISO 14040, señalando los impactos obtenidos en razón a la categoría de impacto seleccionada. Esta fase está compuesta por seis sub etapas o elementos. Los tres primeros considerados obligatorios por la norma son: selección, clasificación y caracterización, que comprenden la selección de las categorías, de indicadores, su clasificación y una caracterización, bajo una modelación, cuyas unidades son equivalentes para todas las categorías. Acto seguido, se definen implícitamente unas áreas de protección desde salud humana, entorno natural, entorno sociocultural, hasta recursos renovables. Los últimos tres elementos son considerados opcionales, que son normalización, agrupación y ponderación.

En el elemento obligatorio de selección y clasificación, se debe seleccionar una o más categorías de impacto para su análisis basado en el inventario y, a su vez, los indicadores que los representan, cuyo cálculo se da en la caracterización. En el elemento opcional de normalización, los resultados obtenidos son divididos en factores que representan magnitudes reales o estimadas para poder ser comparados entre diferentes categorías y frente a determinadas características del entorno. Por su parte, la ponderación logra hacer mediciones entre las diferentes categorías para establecer resultados globales o un “índice ambiental”<sup>61</sup> que indique cual podría ser más nociva respecto a las demás. Este tipo de resultado es muy debatible y debería conllevar a un consenso científico al respecto, razón por la cual se aplica poco y puede conducir a emitir juicios subjetivos, como lo menciona Rivela (2012: 126).

La ISO 14044 define que la Evaluación de impactos de ciclo de vida (EICV) debe considerar también la aplicación de un análisis de calidad de los datos e incertidumbre, análisis de integridad, análisis de sensibilidad, y análisis de coherencia, los cuales permiten fortalecer la confianza y fiabilidad en los resultados del estudio. Además de lo anterior, estas normas describen como se debe realizar un informe para terceras partes, y la asignación para reciclaje en ciclo cerrado o abierto.

---

<sup>60</sup> El método de ecopuntos (o Swiss ecological scarcity) es un método suizo que mide en “eco factores” la escasez ambiental mediante una ponderación comparativa. Su última versión es del año 2013, cuyas características se pueden consultar en: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/economy-consumption/economy-and-consumption--publications/publications-economy-and-consumption/eco-factors-2015-scarcity.html>

<sup>61</sup> Según María Asunción Antón, la asignación de cargas ambientales a un proceso y su caracterización se realiza a través del uso de un vector columna  $v$  asociado en el cual las cargas ambientales están agrupadas en tipos de impacto ambiental y que contiene toda la información acerca de los posibles impactos durante todo el ciclo de vida, donde cada elemento corresponde a un contaminante particular. Cada flujo de masa y energía en un proceso ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) lleva asociado este vector y cuyos elementos se expresan en masa ( $\text{kg}$  de contaminante por  $\text{kg}$  de producto) o en energía ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) según la unidad funcional para poder ser acumuladas y hacer balances. Así, el proceso es dividido en unidades o subsistemas con un sistema de ecuaciones que calculan los vectores de las corrientes de salida o intermedias, haciendo que el inventario se realice de manera similar al balance de la materia. “La solución de todo el sistema permite un conocimiento detallado de la procedencia de la contaminación que se adjudica a cada producto” (Antón, 2004: 52).

Debido a la alta complejidad que puede implicar desarrollar un ACV para edificios, en estos estudios frecuentemente se eliminan etapas como forma de simplificación, además de reducir los datos de entrada a los disponibles en el proyecto arquitectónico y de climatización del edificio. Zabalza (2011) basado en otros autores, propone dividir el análisis en 3 etapas principales (producción, gestión y destrucción) y, además, menciona dos tipologías de ACV de acuerdo con la variación en el tiempo de los procesos analizados, es decir, de los rendimientos, deterioro y las mejores tecnológicas: los estáticos y los dinámicos. Además de esto, propone el enfoque atributivo convencional, y el enfoque consecuencial, los cuales también tienen una correspondencia con la cantidad y calidad de datos registrados al tener en cuenta escenarios futuros. Por tanto, otra forma de simplificación es usar ACV estáticos y atributivos porque es el más usado, y reduce la complejidad y requisitos en la calidad de los datos.

Hay que mencionar que esta propuesta se dio antes de que existiera la RCP CPC531 para edificios. Por otro lado, a pesar de que el ACV existe hace casi 50 años, su aplicación en la edificación sigue siendo reducida más allá del ámbito académico, por tanto, es necesario que se sigan adelantando esfuerzos y métodos simplificados que permitan a los actores de la construcción y de infraestructuras modelar procesos rápidamente y tomar decisiones con base en ACV.

A pesar de los avances y de las investigaciones que responsabilizan de los mayores impactos ambientales a la etapa de uso de los edificios, las complejidades de los estudios de ACV siguen siendo altas, pues se debe seleccionar valores por defecto para la gama de escenarios posibles, tener toda la información de cantidades de materiales y procesos de obra, y el uso simultáneo de herramientas de simulación energética de edificios, que a su vez, requieren de datos predefinidos en función del diseño, rangos de confort y climatología. Por tanto, existe un creciente interés en el uso de evaluaciones preliminares del ciclo de vida como herramienta de diseño (Galpin & Moncaster, 2017), especialmente, a través del desarrollo de software incorporándolo a la metodología BIM para agilizar el proceso.

#### **4.1.3. Declaraciones ambientales de producto DAPs**

Por mandato de la Unión Europea, el Comité Europeo de Normalización CEN/TC 350 es el responsable del desarrollo de métodos estandarizados para la evaluación de parámetros de evaluación medioambiental en edificios y obras de ingeniería, tanto nuevas como existentes, incluyendo el desarrollo de normas para la realización de Declaraciones Ambientales de Productos de construcción (DAPc) basadas en la norma europea EN 15804: 2012 + A2: 2019 (Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción) y en la ISO 21930: 2017 que proporciona uniformidad en el método para expresar las DAP utilizando un enfoque modular.

De esta manera, existen varios operadores de programa que administran, registran y publican las DAP realizadas, entre las cuales se puede referenciar el EPD System (internacional), Institut Bauen und Umwelt e.V. (Alemania), GlobalEPD (España), y

Dapcons (España), la cual es gestionada por el Colegio de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Barcelona CAATEEB<sup>62</sup>.

Basado en las normas mencionadas, el EPD System desarrolló la Regla de Categoría de Producto (RCP o PCR por sus siglas en Ingles) “PCR 2019:14 Construction products”, cuyo objetivo es ser la principal forma de desarrollar y registrar una DAP a través del ACV de productos para la construcción en el Sistema Internacional, y además permitir comparaciones. Este documento señala varias combinaciones de alcance y módulos analizados, incluyendo “de la cuna a la tumba” y el módulo D sobre reciclaje; sin embargo, al usarlo en conjunto con otro documento c-PCR, que son RCP específicos para cada material (existen varios y otros están en proceso de desarrollo), es posible ampliar el alcance e incluir el módulo D.

Así mismo, desde el año 2012 con revisión en 2018 (segunda versión), este mismo operador expidió la “PCR UN CPC531 2014:02 Buildings”, la cual proporciona el estándar RCP para la evaluación por ACV del comportamiento ambiental específico para edificios, tanto nuevos como existentes, que conlleve a una declaración ambiental de producto (no aplica para edificios prefabricados), en cumplimiento con la norma EN ya mencionada, además de la UNE-EN 15978:2012 (Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo).

Es importante mencionar que existe una RCP para la evaluación ambiental “UN CPC 171 Energía eléctrica” y “CPC 173 Vapor y agua caliente”, la cual aplica para electricidad, vapor, y agua caliente o fría producida con diferentes tecnologías, incluidas la energía eólica, solar (fotovoltaica y térmica eléctrica), geotermia, mareomotriz (olas, mareas), hidroeléctrica, además de las tradicionales de origen fósil, entre otras. Por su naturaleza, esta RCP está dirigida a evaluar el proceso de generación de electricidad o calor, mas no el proceso constructivo de un edificio y los equipos que lo componen, que es el caso de esta investigación.

Un material de construcción o edificio que ha sido sometido a un ACV puede mostrar sus resultados al público a través de una Declaración ambiental de producto (DAP), la cual es una ecoetiqueta tipo III, que es más profunda y exigente que las ecoetiquetas tipo I y tipo II, que en general, se tratan de planes de gestión ambiental y autodeclaraciones; las ecoetiquetas son procedimientos voluntarios que buscan informar al consumidor sobre el desempeño ambiental de un producto y su comparación.

Las certificaciones medioambientales voluntarias para edificios han cobrado un papel importante en el mercado mundial. Actualmente, los sistemas de certificación de mayor aplicación en edificios en Colombia son LEED (USA), EDGE (internacional), y HQE (Francia), los cuales otorgan mayor puntaje a edificios que presenten declaraciones ambientales de producto DAP de uno o más materiales utilizados, e incrementen el nivel de certificación. Es de resaltar que, si bien EDGE tiene un único nivel de certificación y se basa en la evaluación de tres aspectos principales, uno de ellos es la energía embebida de los materiales, que es cuantificada a través de una base de datos en su software. Por el momento, estas certificaciones no solicitan una DAP del edificio completo y se enfocan en disminuir impactos solo en las etapas de obra y operativa de los mismos.

---

<sup>62</sup> <https://www.virondec.com>, <https://ibu-epd.com/en/>,  
<https://www.aenor.com/certificacion/certificacion-de-producto/declaraciones-ambientales-de-producto>,  
<https://www.csostenible.net/dapcons/index?locale=es>

## 4.2 CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS DE RENOVABLES Y TIPOS DE ENERGÍA

Como se vio anteriormente, el análisis del inventario es una de las fases de la estructura metodológica del análisis del ciclo de vida que cuantifica los impactos de un producto, servicio o proceso a través del registro de las entradas y las salidas del sistema. Es necesario desarrollar una clasificación de los tipos de energía implicada en el proceso de producción de un material para determinar en el futuro la participación de cada uno de dichos tipos y ponderar el total de consumos energéticos para estimar el uso de energía primaria, energía embebida y su equivalente en emisiones de CO<sub>2</sub>eq (Ilustración 22).

Dicha información es clave para identificar, interpretar, comparar y evaluar las fases de mayor impacto ambiental en la producción, y tomar decisiones hacia la mejora de la calidad del producto, optimizar los procesos, analizar los potenciales, evaluar las regulaciones, reducir los impactos en el medio ambiente (residuos, vertidos y emisiones), y como estrategia de comunicación ambiental de productos.

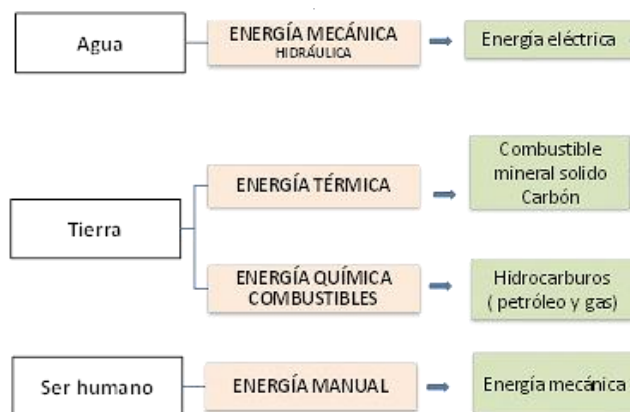


Ilustración 22. Tipos de energía, transformación y usos. Fuente: Ballén et al, 2016.

En línea con lo aportado en el marco teórico, Zabalza (2011: 53) cita varios estudios publicados sobre ACV en la edificación, encontrando que una evaluación exergética del ciclo de vida de 65 tipos de viviendas de bajo consumo energético se estima en 56 MJ/m<sup>3</sup>\*año (De Meester, 2009; citado en Zabalza, 2011). Por otro lado, la energía embebida en materiales puede aumentar hasta un 60% mientras la energía consumida en el uso del edificio disminuye hasta un 35% (Cuchí, 2008; citado en Zabalza, 2011), así como que esta energía se estima en 227.4 GJ, donde solo el concreto tiene un 65% de impacto (Asif, 2007; citado en Zabalza, 2011); por tanto, la incorporación de materiales reciclados en el acero o el aluminio puede conllevar un ahorro de más del 50% (Chen, 2001; citado en Zabalza, 2011). Sin embargo, el aumentar el aislamiento como medida de eficiencia puede representar menos del 10% de los ahorros generados en 30 años de vida, dando lugar a plazos de recuperación económica de menos de 2 años.

Este mismo autor (Zabalza, 2011: 57), hace referencia a diferentes estudios publicados de ACV aplicado a sistemas de energía renovables de pequeña escala que se distinguen por su bajo impacto:

*(Ardente F., et al., 2005) realiza el ACV de un equipo solar térmico por termosifón fabricado en Italia, que incluye un captador solar de placa plana convencional de 2,13 m<sup>2</sup>, un depósito de acero galvanizado de 160 l y la estructura soporte del mismo material, obteniendo unos pay-back en términos energéticos y de CO<sub>2</sub> inferiores a 2 años.*

*(Fleck B., Huot M., 2009) realiza un ACV comparativo entre un sistema eólico formado por un aerogenerador de 400 W, una torre de 10 m, un banco de baterías y un inversor frente a un grupo electrógeno constituido por un generador y un tanque de gasóleo, para viviendas residenciales aisladas de la red. Según este estudio, el sistema eólico conlleva una reducción del 93% de las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el grupo electrógeno, si bien su valor actual neto es un 14% superior, debido a la falta de una “economía de escala”. En esta misma línea (Tremeac B., Meunier F., 2009) realiza un estudio de ACV comparando dos aerogeneradores de 250 W y 4,5 MW. Por cada kilovatio-hora eléctrico producido se requiere entre 0,08 y 0,33 kWh de energía primaria, causando unas mínimas emisiones entre 15,8 y 46,4 g CO<sub>2</sub>, siendo los resultados más favorables para el aerogenerador de mayor potencia. Del mismo modo, el plazo en que se recupera la energía primaria necesaria para fabricar, transportar, operar y desmantelar los aerogeneradores, mediante la producción eléctrica es tan sólo de 0,58-2,29 años.*

*Por otra parte, (García-Valverde R., et al., 2009) demuestra por medio de un estudio de ACV el potencial de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de las instalaciones fotovoltaicas aisladas en los países del sur de Europa, a partir de los datos de una instalación aislada de 4,2 kWp con baterías plomo-ácido ubicada en la Universidad de Murcia. La energía primaria incorporada ronda los 130 MWh, de los que las baterías representan el 51% y los paneles el 42%. Las emisiones específicas de dicha instalación son tan solo de de 131 g CO<sub>2</sub>/kWh producido, con un pay-back energético de 9 años.*

Por otro lado, de acuerdo con Galpin & Moncaster (2017), la generación de energía por ER en sitio se modela como cualquier otro componente de la edificación, y su uso implica un aumento en las emisiones de carbono embebido que será compensado parcialmente por las reducciones operativas. La electricidad consumida reduce las emisiones asociadas en la etapa B6 en el uso, y la electricidad exportada a la red en el módulo D sobre reuso y reciclaje, fuera de los límites del sistema según la EN 15978, aunque sería más razonable informar de los beneficios de la electricidad exportada como una etapa separada en el módulo B sobre uso<sup>63</sup>.

Karunathilake et al (2019) desarrollan una investigación que pretende encontrar la mejor combinación para un sistema híbrido de ER en edificaciones residenciales en Canadá bajo una perspectiva de ciclo de vida, llevándolos a abordarlo como un problema multidimensional complejo, debido a que no existen “recetas” o guías para su desarrollo, ni certeza en los datos de insumo, ni consenso suficiente entre los diferentes intereses de los actores involucrados. Por tanto, para lograr una óptima combinación de energía

---

<sup>63</sup> Recordemos las etapas de análisis ciclo de vida para edificios mencionadas en el capítulo de “4.1.2. Metodología de ACV”, los cuales se determinan mediante códigos de letra y número como producción (A1-A3), construcción (A4-A5), uso (B1-B7), y disposición final (C1-C4), y escenarios de reuso o reciclaje (D).



generada por tecnologías diferentes, teniendo en cuenta los impactos ambientales en todas sus etapas y una alta proporción de energía respecto a la demanda, fue necesario desarrollar una metodología que involucrase los costos de ciclo de vida y de toma de decisión entre varias opciones.

Se aplicó una unidad funcional de 1 mWh de energía producida, el método de evaluación para ACV fue ReCiPe de punto medio, un mínimo de 40% de suministro de energía, y las tecnologías consideradas fueron los paneles fotovoltaicos, colectores solares y geotermia. Los resultados fueron un sistema que combinaba fotovoltaica (12%), geotermia (29%), y abastecimiento de la red pública (59%), para proporcionar un 44% de la energía total demandada y excluyendo a los colectores solares debido a su bajo potencial frente a la fotovoltaica. Además, solo el 11,1% de las emisiones de GEI del ciclo de vida están relacionadas con la producción de energía por ER; por tanto, debido a las características de los recursos y las condiciones económicas, no es posible alcanzar cero consumo de energía de la red pública.

Es importante mencionar que estos autores (Ibídem) clasifican en dos a las metodologías de diseño para incorporar ER en la edificación: la primera es la planificación "basada en escenarios", donde los responsables de las decisiones definen un número limitado de escenarios energéticos combinando diferentes tecnologías de ER y definiendo la mejor combinación de acuerdo con su criterio. La segunda es de "escenarios intermedios", donde no se identifica el tamaño exacto y la capacidad que conducirán a los mejores resultados. Por otro lado, desestiman a los sistemas eólicos debido a consideraciones estructurales, de ruido y de disponibilidad de viento, al igual que a la biomasa, debido a los desafíos de suministro y transporte en un contexto residencial.

Laleman, Albrecht, & Dewulf (2013) desarrollan un ACV de la generación de 1 kWh de electricidad por fotovoltaica, y de un sistema de paneles fotovoltaicos de 3 kWp en techos inclinados residenciales, evaluando seis diferentes tipos de paneles de acuerdo con su composición (monocristalino y policristalino, entre otros), localizados en ciudades europeas seleccionadas de acuerdo con su radiación solar, alta o baja. El análisis se enfoca en el método multidimensional de evaluación Eco-Indicador 99 bajo sus tres perspectivas: Jerárquica, Igualitaria e Individualista; además se evalúa el potencial de calentamiento global, e indicadores de energía como el Cumulative Energy Demand (CED), Energy Pay-back Time (EPT), Net Energy Ratio (NER), y Fossil Energy Requirement, lo cual proporciona una perspectiva más equilibrada de los impactos energéticos.

Los resultados muestran que un mayor uso de energía embebida no necesariamente implica mayores emisiones de GEI, que es el caso de la energía fotovoltaica, al tener emisiones relativamente bajas y de uso de energía fósil en comparación con otras tecnologías de energías renovables. Pero en otros métodos de evaluación obtuvo los peores resultados. Esto se da porque la producción de sistemas fotovoltaicos requiere una gran cantidad de extracción de minerales, especialmente de mineral de cobre y aluminio, incluso suponiendo que la mayoría de estos metales se reciclen. Sin embargo, se halló que la generación de energía es aproximadamente cinco veces mayor que el consumo de energía de por vida en una región con poco sol.

Se concluye que los resultados bajo el Eco-Indicador 99 difieren mucho dependiendo de la perspectiva utilizada. Debido a la intensidad energética de los paneles fotovoltaicos, la eólica y la hidroeléctrica son mejores opciones porque tienen menores impactos, mientras

que la biomasa tiene un impacto similar. Finalmente, se resalta que la vida útil del panel y la irradiación solar donde son instalados, son aspectos cruciales en los resultados de los impactos ambientales de la fotovoltaica.

### 4.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Ante la demanda creciente de atributos de sostenibilidad para cualquier producto o servicio, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se consolida como un procedimiento metodológico basado en entradas y salidas que evalúan el desempeño ambiental de materiales y edificios en todas sus etapas, cuyos resultados son plasmados públicamente en las Declaraciones Ambientales de Producto y conduciendo a establecer posibles estrategias de mejora. A su vez, este tiene alcances o límites del sistema denominados “de la cuna a la tumba”, “de la cuna a la puerta”, “de la puerta a la puerta” y “de la cuna a la cuna”.

Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) son una respuesta a la demanda del mercado de una validación certificada a través de una ecoetiqueta tipo III frente a los atributos ambientales de un material de construcción o edificio, y que son regidas por varios operadores a nivel mundial. Uno de estos operadores, el EPD System, ha desarrollado diferentes RCP para unificar la metodología y requisitos en el desarrollo de DAP para el sector de la edificación, entre las que se encuentran la “PCR 2019:14 Construction products” y “PCR UN CPC531 2014:02 Buildings”, la cual es acogida por el presente estudio.

De acuerdo con bases de datos de ciclo de vida de diversas fuentes, e información registrada y modelada que constituyen el Inventario de Ciclo de Vida (ICV), es posible cuantificar diversos indicadores relacionados con energía, gases de efecto invernadero, salud humana, entre otros, y que son denominados como categorías de impacto. Estas categorías se pueden computar a través de diferentes metodologías de cálculo, entre las que se encuentran CML, ReCiPe, IPCC, Cumulative Energy Demand (CED, de gran interés para esta investigación por sus indicadores y porque proporciona parámetros de demanda de energía primaria), entre otras. Cada metodología incorpora sus categorías de impacto, donde a veces coinciden entre ellas, pero sus factores de caracterización pueden ser diferentes.

La metodología base para el ACV está normalizada por la familia ISO 14040 y de manera más específica por las reglas de Categoría de Producto (RCP) definidas por cada operador. Con una vida útil estimada de 50 años para edificios, la unidad funcional que es una unidad de referencia cuantitativa, se aplica en las etapas de producción o proceso ascendente (A1-A3), construcción o proceso núcleo (A4-A5), uso (B1-B7), fin de vida (C1-C4), y escenarios de reutilización o reciclaje (D) que es opcional. Sin embargo, estas metodologías y sus requerimientos en edificios aún son complejos y demandantes de recursos, por lo que se están desarrollando herramientas informáticas y métodos simplificados que ayuden a los diseñadores a obtener resultados rápidos y fiables.

Galpin & Moncaster (2017) advierten que al realizar estudios de ACV, la no aplicación de factores de emisiones de carbono promedio de la red provoca sobreestimaciones en la reducción de emisiones; por otro lado, la entrega de excedentes a la red debería ser reportada en una etapa separada en el módulo B, ya que esta no ofrece reducciones proporcionales de CO<sub>2</sub> embebido, pues la cuantificación de la proporción de emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas se realiza en la etapa D bajo dificultades de predicción, porque se desconoce los momentos en que la electricidad es importada y exportada. Respecto a la

última dificultad, esta investigación hace contribuciones al método de cuantificación que puedan servir como solución, y que se detallarán en la aplicación y en las conclusiones.

Para incorporar ER a la edificación existe la metodología "basada en escenarios" (aplicada en esta investigación) donde se define un número de escenarios planteando la mejor combinación posible de tecnologías, y la de "escenarios intermedios" donde no se identifica inicialmente el tamaño exacto y potencia instalada del sistema, sino que se deduce a partir de requerimientos de desempeño. Los resultados de estudios que aplican estas metodologías, revelan que la combinación de tecnologías más viable requiere de una alta proporción de excedentes entregados a la red pública y una cobertura de menos de la mitad de la demanda (dificultando el cero consumo), además, se descartan los colectores solares y la minieólica (Karunathilake et al, 2019).

Otro estudio (Laleman, Albrecht, & Dewulf, 2013) determinó que, en el caso de la fotovoltaica y al contrario de otras tecnologías, el mayor consumo de energía embebida no siempre significa mayores emisiones de GEI, ya que sus emisiones son bajas; pero frente a un análisis de consumo de energía, puede ser mejor optar por la eólica o la hidroeléctrica. Así mismo, la vida útil del panel y la radiación solar del lugar son fundamentales en los resultados finales de los impactos ambientales.

#### **4.3.1. Bibliografía del capítulo**

Antón, M. (2004). Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Documento de tesis doctoral. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6827>

Ballén, Sergio et al. (2016). Metodología para el análisis del ciclo de vida de mampostería de arcilla en Cundinamarca, a partir de la evaluación del consumo de recursos energéticos. Informe de Investigación Acuerdo 81 del 27 de octubre de 2015. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Galpin, C., & Moncaster, A. (2017). Inclusion of on-site renewables in design-stage building life cycle assessments. In *Energy Procedia* (Vol. 134, pp. 452–461). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.603> <Consulta: 10 de febrero de 2020>

Ihobe. (2009). Análisis de ciclo de vida y huella de carbono: dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. Gobierno Vasco. España: Edición Ihobe, Sociedad pública de gestión ambiental.

ISO Organización Internacional de Estandarización. Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices. Ginebra, Suiza: ISO, 2006. (ISO 14044)

Karunathilake, H., Hewage, K., Brinkerhoff, J., & Sadiq, R. (2019). Optimal renewable energy supply choices for net-zero ready buildings: A life cycle thinking approach under uncertainty. *Energy and Buildings*, 201, 70–89. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.030> <Consulta: 10 de febrero de 2020>

Laleman, R., Albrecht, J., & Dewulf, J. (2013). Comparing various indicators for the LCA of residential photovoltaic systems. In *Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources* (pp. 211–239). Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5364-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5364-1_10)

Rieznik, N. y Hernández, A. (2005) Análisis del ciclo de vida. [En línea]. Ciudades para un futuro más sostenible. Documentos Temas de Sostenibilidad Urbana. Madrid (España), julio de 2005. <<http://habitat.aq.upm.es/temas/a-analisis-ciclo-vida.html>> [Consulta: 12 de febrero de 2016]

Rivela, B. (2012). Propuesta metodológica de aplicación sectorial de análisis de ciclo de vida (ACV) para la evaluación ambiental de la edificación en España. Documento de tesis doctoral. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: <http://oa.upm.es/14912/>

Muñoz, C. (2013). Estudio de la energía incorporada y emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de viviendas en Chile. Memoria para optar al grado de doctor. Doctorado en arquitectura y urbanismo, Universidad del Bio-Bio. Concepción, Chile. Recuperado de: <http://repositorio.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/2217> <Consulta: 13 de diciembre de 2019>

Zabalza, I. (2011). Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Recuperado de: <https://zaguan.unizar.es/record/5751?ln=es#> <Consulta: 17 de diciembre de 2019>

# 5. APLICACIÓN EN EL PROTOTIPO

## 5.1 OPERACIONES Y PROCEDIMIENTOS DESARROLLADOS

De acuerdo con lo señalado en los Objetivos Específicos 3 (OE3) y 5 (OE5), y en el Marco Metodológico, se ha establecido un conjunto de operaciones y procedimientos cuya finalidad es cuantificar y evaluar los balances y comportamientos de demanda energética y emisiones de carbono operativos y embebidos en el prototipo experimental con equipos de energía renovable (característica de los NetZero EB) a través del ACV, posteriormente definido como Análisis energético de ciclo de vida, AECV.

Debido al número de procedimientos implicados, se ha desarrollado un diagrama (Ilustración 23) que permite dar cuenta de su secuencia y correlaciones que conducen a cumplir con los objetivos trazados por esta investigación. Cada uno de estos procedimientos involucra a su vez una serie de actividades y herramientas con un buen nivel de trazabilidad que posibilitan su control, así como de ser incorporados como modelo de decisión de evaluación ambiental para proyectos arquitectónicos (como futuro campo de estudio), y que además pueda ser replicable en contextos y edificios similares. La incidencia entre procedimientos no consecutivos es señalada con flechas punteadas.

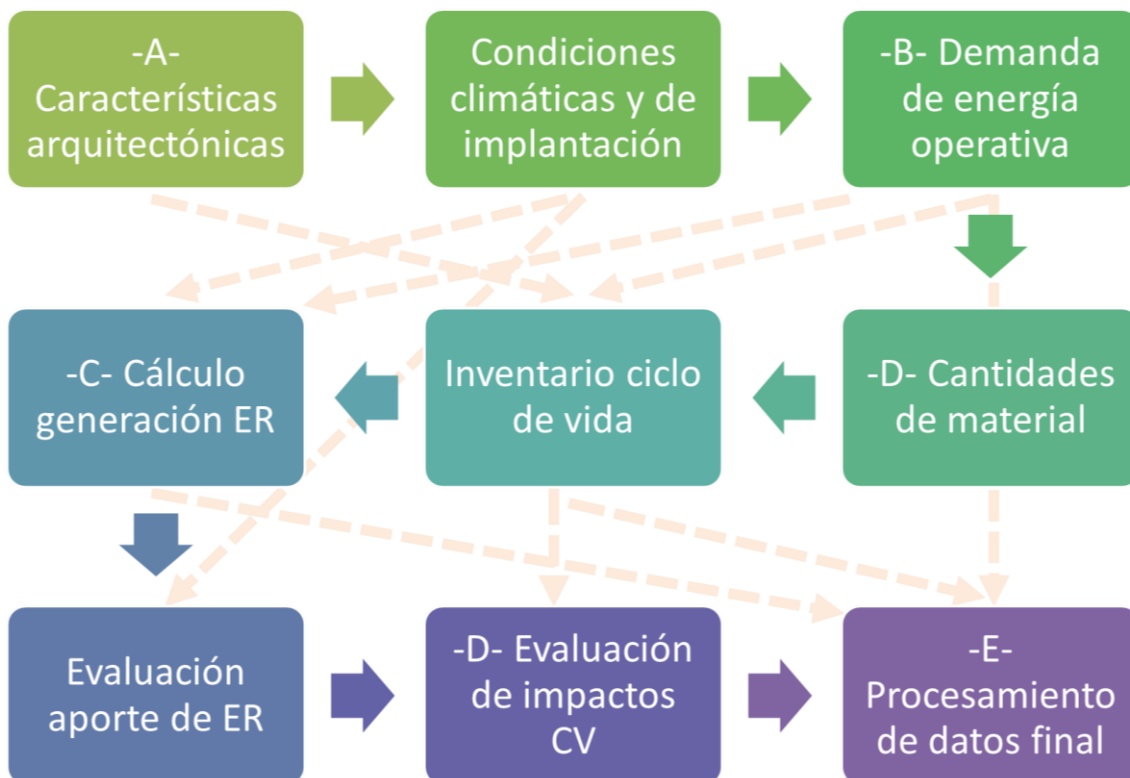


Ilustración 23. Diagrama u hoja de ruta de procedimientos desarrollados. Fuente: Elaboración propia

En el Marco Metodológico se mencionan cinco operaciones concretas (A, B, C, D, E) que fueron vislumbradas en el diseño preliminar de esta investigación, posteriormente ratificadas y ampliadas durante la ejecución técnica de las mismas. Estas operaciones son mencionadas en el diagrama (Ilustración 23), que corresponden a la letra mayúscula en los textos de algunos de los procedimientos; los procedimientos sin letra hacen referencia a actividades que inicialmente se consideraban implícitas, pero que al final demandaron

una buena cantidad de procedimientos y cálculos. El desarrollo de estos procedimientos se expondrá en los subcapítulos siguientes.

Las “características arquitectónicas” (A) obedecen a la definición del edificio, su materialidad a través de una tipología hipotética de vivienda colectiva basada en la oferta del mercado, y la caracterización de los mismos. Las “condiciones climáticas y de implantación” se refieren al desarrollo de archivos climáticos que posteriormente se utilizarán en las simulaciones energéticas, además del registro de las características de la ciudad. La “demanda de energía operativa” (B) fue elaborada a través de fuentes primarias y secundarias con el fin de compararlas, y luego definir un solo perfil. Las “cantidades de material” (D) agrupa los datos de materiales y de obra del edificio. El “inventario de ciclo de vida” surge a partir de las cantidades, procesándolas de acuerdo a la metodología básica de ACV.

Los “cálculos de generación de ER” parten del predimensionamiento realizado según las características de los equipos, el clima, y su viabilidad técnica. La “evaluación de aporte de ER” normalmente se considera implícita en el procedimiento anterior, pero en esta investigación requirió de desarrollar esquemas de instalación y una clasificación tipológica de generación / consumo para el balance. La “evaluación de impactos de ciclo de vida” (D) implica completar e interpretar el análisis de ciclo de vida con énfasis en la energía y carbono embebidos. Finalmente, el “procesamiento de datos final” (E) se origina en los procedimientos anteriores, pero demandando una serie de cálculos y gráficos adicionales para dar cumplimiento a los objetivos, pregunta, e hipótesis de investigación.

Este procesamiento de datos final realiza cálculos comparativos frente a tres escenarios que serán definidos previamente, para establecer las cantidades precisas de energía y carbono embebidos y operativos en las diferentes etapas de ciclo de vida, puntualizando en su relación con las tecnologías de ER y la energía de la red pública, y sobre la base de una clasificación conceptual aportada en las conclusiones.

Si bien podría decirse que la mayor parte de los procedimientos señalados anteriormente son recurrentes en la práctica del ACV y de la evaluación energética de las edificaciones, de acuerdo con lo pronosticado por el Marco Metodológico, se presentaron una serie de situaciones experimentales que debían ser conducidas a la determinación de relaciones causales, de posibles tendencias, y a un análisis comparativo. Por tanto, algunos de estos procedimientos fueron determinados empíricamente, como por ejemplo, la “evaluación de aporte de ER”, y el “procesamiento de datos final”, cuyos resultados son expuestos en las conclusiones, así como operaciones que implicaron la modelación de datasets no incluidos en las bases de datos de ciclo de vida, y cálculos de procesos constructivos en todas las etapas para consolidar el inventario.



## 5.2 CARACTERISTICAS DE LA CIUDAD DE BOGOTA

### 5.2.1. Aspectos generales

Bogotá es la capital de la República de Colombia, ubicada en el departamento de Cundinamarca en el centro del país. En ella se concentra el 17% de la población total de la nación, es considerada como una ciudad en vía de desarrollo y de alta densidad teniendo en cuenta la población total de 7.181.469 de habitantes según datos del Censo de 2018 por el Departamento Nacional de Estadística DANE<sup>64</sup>, y cuyos datos están siendo debatidos por ser incompletos. Se constituye en el principal centro geográfico, político, industrial, económico y cultural del país, con un área de 1587 Kms<sup>2</sup> aproximadamente, por lo que también tiene la mayor demanda energética del país así como la información catastral más completa.

De acuerdo con datos del “Demographia World Urban Areas” (Wendell Cox Consultancy, 2019), Bogotá aparece en el lugar 36 dentro de las áreas urbanas construidas más grandes del mundo y en el lugar 25 dentro de las áreas urbanas construidas por densidad de población urbana con 18.300 hab/km<sup>2</sup>, que es 2 veces el valor de otras ciudades colombianas, y 4 veces el valor presentado en ciudades europeas como Barcelona, y presenta un contraste con el número de habitantes oficial del DANE.

Popula. Rank	Geography	Urban Area	Population Estimate	Land Area		Population Density		Basis Pop. Area	Latest Estimate	Base Year	Base Year Population Estimate
				Square Miles	Square Kilometers	Per Square Mile	Per Square Kilometer				
281	Colombia	Barranquilla	1,890,000	69	179	27,400	10,600	C.B	2019	2005	1,550,000
36	Colombia	Bogota	10,705,000	226	585	47,400	18,300	D.B	2019	2015	9,700,000
511	Colombia	Bucaramanga	1,055,000	27	70	39,100	15,100	C.B	2019	2005	850,000
210	Colombia	Cali	2,445,000	71	184	34,400	13,300	C.B	2019	2005	2,050,000
577	Colombia	Cartagena	925,000	36	93	25,700	9,900	C.B	2019	2005	800,000
665	Colombia	Cucuta	795,000	46	119	17,300	6,700	C.B	2019	2005	650,000
1009	Colombia	Ibague	540,000	13	34	41,500	16,000	C.B	2019	2005	465,000
126	Colombia	Medellin	3,680,000	93	241	39,600	15,300	C.B	2019	2005	3,150,000
964	Colombia	Pereira	560,000	17	44	32,900	12,700	C.B	2019	2005	530,000
	Spain	Alicante	485,000	49	127	9,900	3,800	C.B	2019	2011	450,000
89	Spain	Barcelona	4,810,000	415	1,075	11,600	4,500	C.B	2019	2011	4,500,000
691	Spain	Bilbao	765,000	50	130	15,300	5,900	C.B	2019	2011	775,000
806	Spain	Las Palmas	670,000	80	207	8,400	3,200	C.B	2019	2011	650,000
65	Spain	Madrid	6,345,000	525	1,360	12,100	4,700	C.B	2019	2011	5,900,000
749	Spain	Malaga	720,000	52	135	13,800	5,300	C.B	2019	2011	700,000
1049	Spain	Murcia	515,000	38	98	13,600	5,200	C.B	2019	2011	475,000
986	Spain	Palma	550,000	65	168	8,500	3,300	C.B	2019	2011	500,000
1033	Spain	Santa Cruz de Tenerife	525,000	42	109	12,500	4,800	C.B	2011	2011	525,000
485	Spain	Seville	1,095,000	105	272	10,400	4,000	C.B	2019	2011	1,100,000
342	Spain	Valencia	1,575,000	150	389	10,500	4,100	C.B	2019	2011	1,530,000
737	Spain	Zaragoza	730,000	57	148	12,800	4,900	C.B	2019	2011	700,000

Tabla 5. Áreas urbanas construidas más grandes del mundo. Fuente: Wendell Cox Consultancy, 2019

En cuanto al clima, se estima que tiene una temperatura promedio de 13° C, que puede variar entre los 6-8 °C y los 18-20 °C. Las temporadas secas y lluviosas se alternan durante todo el año, siendo los meses más secos diciembre, enero, febrero y marzo y los meses más lluviosos, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre; los meses de junio, julio y agosto son de fuertes vientos y con mayor oscilación de la temperatura, siendo la zona habitada del país con las temperaturas más bajas. Ver “Anexo 1. Bogotá D.C. y su clima”.

<sup>64</sup> <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>

El desarrollo poblacional que se ha presentado en la ciudad en las últimas décadas ha modificado el perímetro urbano disminuyendo considerablemente el área de zonas verdes y humedales de la ciudad, y generando cambios en los comportamientos de las diferentes variables del clima. Lo anterior, implica un cambio directo en las variables meteorológicas, como es el caso de los regímenes de carácter térmico, dinámico y del componente hídrico en la ciudad (IDEAM, 2007). Con elevaciones entre 2500 y 2800 msnm, la temperatura media anual oscila entre 12 y 15°C para el área urbana, la cual es constante a través del año y por lo general, en los edificios, no se usa ningún sistema de climatización.

La velocidad del viento registra un rango menor o igual a 1.5 m/seg a lo largo del año; sin embargo, desde las 7 hasta las 10 de la mañana, la velocidad en todos los meses aumenta hasta 2.8 m/seg. Entre los meses de junio y agosto se experimenta un aumento de la velocidad desde las 7 am hasta las 12 pm, con valores superiores a 1.5 e inferiores a 3.8 m/seg. Para evaluar el aprovechamiento del potencial energético del viento, se verifica el valor de velocidad del viento en la que el vector fluye con mayor cantidad de energía cinética en un lugar y tiempo determinado, cuyo valor es representativo en el área urbana, llegando hasta 5 m/seg.

Sobre la radiación global y brillo solar, los mayores valores se presentan en los meses de diciembre, enero, febrero, julio y agosto; y los menores valores durante los meses de las temporadas lluviosas como abril, mayo, junio, octubre y noviembre. Los registros más altos se localizan en los sectores sur-occidental con 202 horas de sol en enero y 182 en diciembre, y al occidente (cerca del Aeropuerto El Dorado), con 190 y 159 horas de sol para los meses de enero y diciembre respectivamente (Gráfico 2, otros gráficos relacionados en el Anexo 1. Bogotá D.C. y su clima).

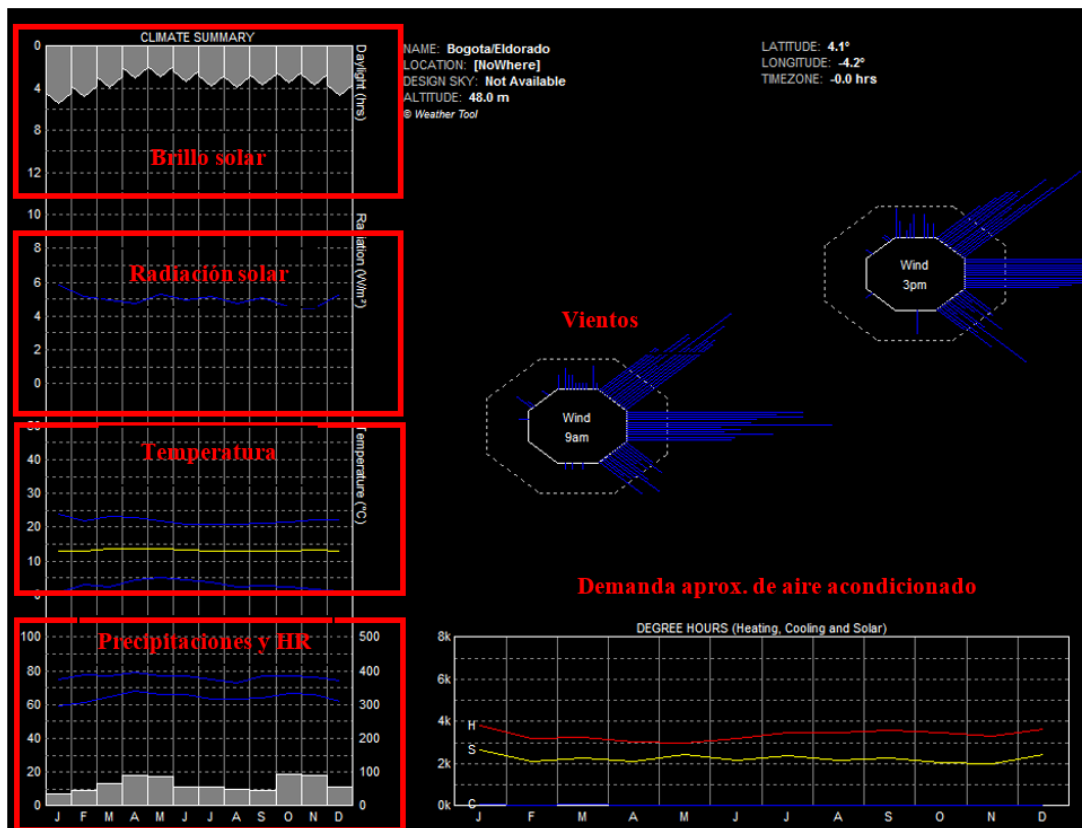


Gráfico 2. Resumen de valores meteorológicos de Bogotá. Fuente: Weather Tool de Autodesk

La mayor alta radiación solar en Bogotá se presenta en los meses de enero (402 cal/cm<sup>2</sup>), febrero (372 cal/cm<sup>2</sup>), marzo (377 cal/cm<sup>2</sup>) y diciembre (370 cal/cm<sup>2</sup>) y los mínimos se observan en los meses de mayo (304 cal/cm<sup>2</sup>) y junio (314 cal/cm<sup>2</sup>) (IDEAM, 2007). Según el mapa de radiación solar oficial (Ilustración 30), el centro urbano tiene una radiación solar promedio entre 4.0 y 4.5 kWh/m<sup>2</sup>, lo cual plantea posibilidades para la implementación de paneles fotovoltaicos en techos urbanos.

### 5.2.2. Parámetros según Res. 549 de 2015

La Resolución 549 de 2015 establece una serie de parámetros de obligatorio cumplimiento en relación con el ahorro del agua y la energía en Colombia, dependiendo del clima y del uso de la edificación. Respecto a medidas pasivas para envolventes se recomienda que los diseños deben apuntar a aumentar la resistencia de la envolvente a las condiciones externas (temperatura y humedad), especialmente a través de la orientación. Adicionalmente, existen otras estrategias como la relación de las áreas opacas (muros) y de ventanas; aumento de los niveles de aislamiento; reducción/aumento de las áreas de fachada expuestas al sol; reducción de la infiltración; aumento de la masa térmica y el control solar; y la creación de zonas de absorción. Cada una de estas estrategias varía de acuerdo con el tipo de clima donde se implanta el proyecto.

Según la clasificación climática de la guía, Bogotá se ubica como clima frío, lo cual requiere maximizar los efectos de la radiación solar aprovechando su trayectoria para calentar los espacios interiores, orientar los edificios en sentido norte - sur para aumentar su exposición a la radiación solar y evitar el ingreso de ventilación de altas velocidades al interior. Así mismo, se requiere renovación de aire (mínima ventilación), maximizar los aportes de energía solar y maximizar el aislamiento térmico para evitar enfriamiento nocturno (Tabla 6). Por otro lado, por su baja latitud existe una escasa oscilación térmica al año, influyendo en la incidencia solar, el ángulo de Azimut y el rendimiento de las placas.

Tipo de clima	Objetivos
FRIO	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximizar los efectos de calentamiento de la radiación solar, ej. orientación solar para calentamiento;</li> <li>Reducir el impacto del viento imperante; y</li> <li>Reducir los volúmenes de orientación este-oeste para aumentar la radiación solar.</li> </ul>
TEMPLADO	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximizar los efectos de calentamiento del sol en las áreas de vivienda principales;</li> <li>Maximizar la sombra en las alcobas y las zonas de cocina; y</li> <li>Controlar el impacto del viento para permitir la circulación del aire en los periodos calientes del día.</li> </ul>
CÁLIDO SECO	<ul style="list-style-type: none"> <li>El edificio debe volverse un buen disipador de calor</li> <li>Maximizar la sombra</li> </ul>
CÁLIDO HÚMEDO	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximizar la sombra, ej. reducir fachada en orientación oeste</li> <li>Aumentar el flujo del viento usando ventilación amontonada y cruzada,</li> <li>Estrategias de zonificación, ej. ubicación de las habitaciones según el viento.</li> </ul>

Tabla 6. Objetivos de diseño por clima en Colombia. Fuente: Guía de ahorro de agua y energía. Resolución 549 de 2015

A partir de estas estrategias generales se desarrollan otras más específicas y de alto potencial para ser aplicadas en edificios residenciales, como por ejemplo la relación ventana pared (RVP, o relación de huecos en fachada), la protección solar, ventilación natural, controles de luz día interior y exterior, iluminación eficiente, sensores de ocupación, corrección del factor de potencia, economizadores de aire y el coeficiente de desempeño.

kWh/m <sup>2</sup> -año	Frío	Con respecto a la línea base	Frío
Hoteles	96,1	Hoteles	20
Hospitales	249,6	Hospitales	35
Oficinas	81,2	Oficinas	30
Centros comerciales	403,8	Centros comerciales	25
Educativos	40,0	Educativos	45
Vivienda no VIS	46,5	Vivienda no VIS	25
Vivienda VIS	44,6	Vivienda VIS	20
Vivienda VIP	48,1	Vivienda VIP	15

Tabla 7. Línea base de consumo y % de ahorro de energía para clima frío en Colombia. Fuente: Guía de ahorro de agua y energía. Resolución 549 de 2015

Para cada uno de los climas de Colombia, y de acuerdo con el uso de la edificación, se establece una línea base de consumo de energía y agua, y a su vez, el porcentaje de ahorro que debe ser conseguido por toda edificación nueva respecto a la línea base. En el caso de energía para viviendas no VIS (es decir, que no son de protección pública) en Bogotá que es clima frío, se establece una línea base de 46,5 kWh/m<sup>2</sup> año de energía de consumo final y un porcentaje de ahorro del 25% frente a esa línea base para nuevos proyectos (Tabla 7). Es de anotar que actualmente, en Colombia no está establecido un coeficiente para el cálculo de la energía primaria.

Las estrategias para el cumplimiento del ahorro de energía para viviendas no VIS son la relación ventana pared, la protección solar, la ventilación natural, el agua caliente solar y la corrección del factor de potencia, esta última como estrategia activa y que constituye una decisión en fase de proyecto por el diseñador de las redes eléctricas. De estas, es de especial interés la reducción del porcentaje de huecos también llamado relación ventana pared (RVP, o relación de huecos en fachada), ya que facilita por medios pasivos la disminución del eventual consumo de calefacción; es de anotar que la calefacción es una medida nada usual en Bogotá, pero fue incluida seguramente por el enfoque de los estándares Ashrae.

La relación ventana pared es una estrategia pasiva común ya que las ventanas son la superficie con menor resistencia al flujo de calor que otros materiales de construcción y una edificación con RVP más alta ganará más calor que una edificación con una RVP más baja; por tanto, se recomienda una RVP de menos del 40%.

El coeficiente de desempeño (COP) es una estrategia activa en equipos de aire acondicionado que resulta en ahorros más altos de energía ya que el equipo de enfriamiento debe alcanzar o exceder el requerimiento mínimo de eficiencia establecido en las tablas de la normativa. Los recuperadores de calor son otra estrategia activa que

consiste en un sistema de recuperación de energía de ventilación que usa un equipo conocido como ventilador de recuperación de calor más un intercambiador de calor con contraflujo para extraer el calor del aire de extracción y reutilizan esa energía para calentar o enfriar el aire fresco; las unidades de recuperación de calor deben contar con al menos 50% de efectividad en la recuperación de energía.

Por otro lado, se encuentra la Resolución 1874 del 23 de septiembre de 2019 que adopta el “Protocolo de Implementación para el cumplimiento de los porcentajes de ahorro en agua y energía para la ciudad de Bogotá D.C., establecidos en la Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio” (SDP, 2019). Este protocolo de implementación en la ciudad de Bogotá, adopta una serie de medidas sugeridas para demostrar el cumplimiento de los ahorros obligatorios como parte de la documentación de un proyecto nuevo.

Este Protocolo presenta dos métodos de procedimiento para el cumplimiento de los porcentajes de ahorro, que son el de desempeño y el prescriptivo, tanto para agua como para energía, los cuales son potestad de cada proyectista o promotor, decidir cuál de los dos es el más conveniente, o usar otra metodología diferente, de acuerdo con la naturaleza de cada proyecto.

En el caso de ahorro de energía para viviendas de estrato 3 y 4 (la justificación del porque este tipo se verá en capítulos posteriores) debe ser del 25%. El método de desempeño plantea siete pasos comenzando por generar una línea base del proyecto, el caso de diseño, y el desarrollo de las condiciones de frontera de acuerdo con los parámetros del apéndice G del estándar ASHRAE<sup>65</sup> 90.1. Posteriormente, se deberán calcular los costos de la energía, comparar y presentar los resultados en un formato establecido. Por su parte, el método prescriptivo plantea una serie de medidas opcionales para escoger una o varias, desarrollar los cálculos respectivos acompañados de fichas técnicas y planos, y presentar los resultados.

El prototipo experimental desarrollado para esta investigación se ha planteado de acuerdo con las características base para vivienda estrato 3 de este protocolo, cuyos parámetros pueden observarse en el “Anexo 4. Características de desempeño energético de la vivienda estrato 3”.

---

<sup>65</sup> “Sociedad Estadounidense de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado”, por sus siglas en Ingles.

### 5.3 PROYECTOS DE VIVIENDA EN COLOMBIA

Es necesario aclarar que, en las ciudades colombianas, al igual que otras de la región, funciona una especie de delimitación socio económica llamada “estratificación” donde los habitantes obtienen una tarifa para pagar servicios públicos e impuestos de acuerdo a sus ingresos. Este modelo fue pensado hace cerca de 25 años como mecanismo para que los habitantes de mayores ingresos paguen una tarifa incrementada que ayude a subsidiar las tarifas bajas otorgadas a habitantes de bajos ingresos. No obstante, existen amplios estudios que indican que dicho modelo se ha convertido en un factor de la segregación socio espacial de la ciudad y que no es un fiel indicador de los ingresos de los habitantes<sup>66</sup>. En Bogotá (Ilustración 24) existe desde estrato 1 hasta 6, siendo este último el de mayores ingresos y tarifas.

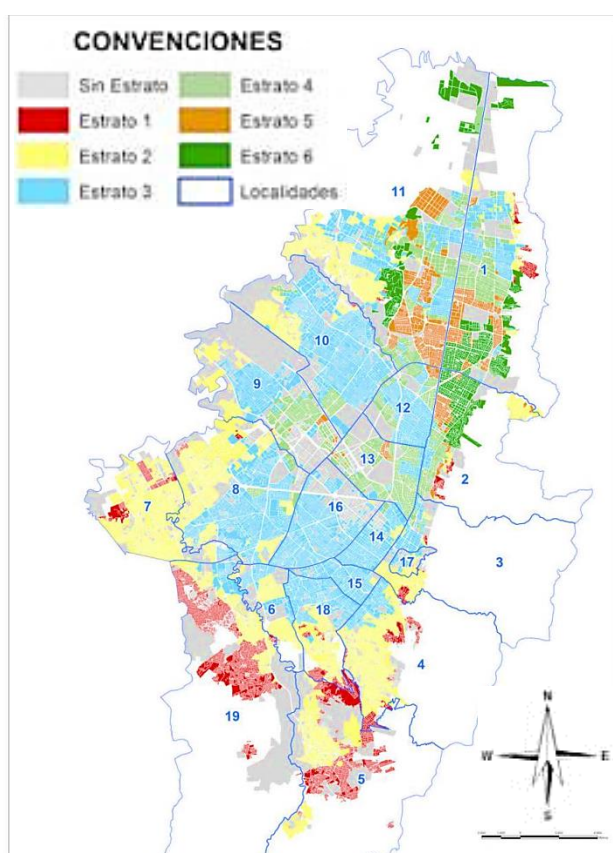


Ilustración 24. Estratificación socio económica de Bogotá. Fuente: [https://elpais.com/internacional/2018/04/20/colombia/1524176587\\_818282.html](https://elpais.com/internacional/2018/04/20/colombia/1524176587_818282.html)

En Colombia, según el Boletín Técnico de Licencias de Construcción de abril de 2019 del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2019) para 302 municipios del país, anualmente se registra un descenso de -6.9% del área licenciada para vivienda respecto el año anterior (2018). Basados en la información de abril de 2018 y abril de 2019, la vivienda de apartamentos tiene mayor producción respecto a casas unifamiliares, correspondiendo a un 68.8% del área total de vivienda. Esta área licenciada se ha concentrado en los estratos 3 (39.1%), 4 (22.8%), y 2 (19.4%), donde el segmento que no es vivienda de interés social (no VIS, o no protegida) tiene mayor representación.

<sup>66</sup> [https://elpais.com/internacional/2018/04/20/colombia/1524176587\\_818282.html](https://elpais.com/internacional/2018/04/20/colombia/1524176587_818282.html)



Se considera una vivienda de interés social VIS según su valor económico, que no debe superar los 135 salarios mínimos legales vigentes. Por otro lado, está la Vivienda de Interés Social Prioritario (VIP) cuyo valor máximo es de 70 salarios mínimos legales mensuales vigentes<sup>67</sup>.

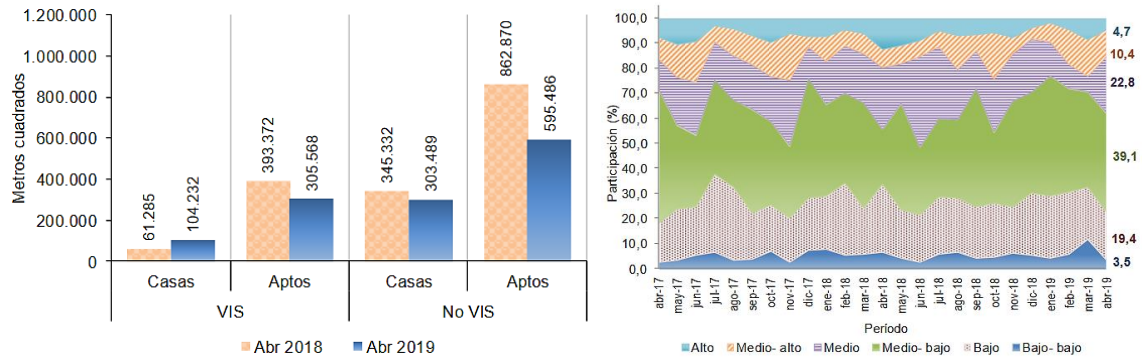


Ilustración 25. M<sup>2</sup> aprobados para vivienda por tipo y Distribución del área aprobada según estrato.  
Fuente: DANE, 2019

De manera similar, para Camacol<sup>68</sup> (2019), las licencias de construcción de vivienda no VIS han disminuido desde 2014. La oferta disponible por estado constructivo está constituida por 66.1% en preventa y 33.9 en construcción y Bogotá tiene una variación del -7.5% en el último periodo anual. Se ratifica que, de las unidades disponibles de vivienda para la venta a nivel nacional, el estrato 3 cuenta con el mayor número de unidades disponibles (38.6%), seguido del estrato 4 (28%) y el 5 (12.6%).

Dados estos valores y el potencial para Energías Renovables (ER) según González (2018), el desarrollo de una tipología de vivienda para abordar el prototipo experimental práctico de Análisis de ciclo de vida frente a las energías renovables tendrá en cuenta las características de la vivienda colectiva bogotana de estrato 3, con la intención de abarcar las características más comunes de este tipo de edificio.

Por otro lado, algunas webs dedicadas al sector inmobiliario en Bogotá, indican que cerca del 77 por ciento de demandantes de vivienda nueva optan por adquirir a las afueras de Bogotá, debido al valor económico, impuestos, cantidad de instituciones educativas, el costo de vida y tarifas de los servicios públicos, los cuales son bajos respecto al interior de la ciudad. Lo anterior se refleja en un incremento de la venta residencial en la Sabana de Bogotá de 5.725 casas en el primer semestre de 2016, que representa un cinco por ciento adicional (MetroCuadrado, 2017).

Estos datos reafirman una tendencia en la construcción de vivienda y de ciudades satélite dormitorio que abastecen de fuerza laboral a Bogotá, pues en la capital existen problemas de disponibilidad de suelo y sus precios. Entre los municipios cercanos con mayor oferta de vivienda nueva están Zipaquirá, Cajicá, Chía, Mosquera y Soacha.

Sin embargo, los estudios de tendencias a nivel nacional ponen en evidencia una alta oferta respecto a la demanda, al mostrar que Bogotá y Cundinamarca concentran el 41,9% del total de unidades construidas sin vender. El segmento de precios que impulsó la

<sup>67</sup> <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-vivienda/vis-y-vip>

<sup>68</sup> La Cámara Colombiana de la Construcción, Camacol, es una asociación gremial de carácter nacional creada en 1957, que reúne actores relacionados con la cadena de valor de la construcción.

comercialización de vivienda no VIS fue el de 135 a 335 salarios mínimos mensuales legales vigentes (smmlv) con un crecimiento continuo registrado desde 2013 a 2016 de alrededor del orden del 4,9% anual, con 52.964 unidades vendidas, mientras que las viviendas con precio superior a los 335 smmlv presentaron tasas de crecimiento anual negativas en el mismo periodo (Camacol, 2016).

### 5.3.1. Materiales y su consumo de energía

El consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero producto de la fabricación de materiales de construcción está relacionado con los diferentes procesos de combustión realizados en el proceso, la generación de gases por descomposición de materia, y el consumo de energía en el proceso. Por tanto, se generan una serie de emisiones, vertimientos, residuos y consumos, directos e indirectos, que pueden ser cuantificados.

Según datos de Construdata (2013), los sistemas constructivos más recurrentes para la construcción de vivienda nacional (incluye VIS) son en orden: mampostería<sup>69</sup> confinada con un 62%, los sistemas industrializados con un 19%, la mampostería estructural con un 15%, y otros sistemas con un 4%. Esto significa que el uso de mampostería como material de construcción suma un 77% de los proyectos residenciales, donde la proveniente de la arcilla cocida es la más usada<sup>70</sup>. Esta clasificación de los diferentes sistemas constructivos obedece a lineamientos de la Comisión Sismo Resistente Colombiana.

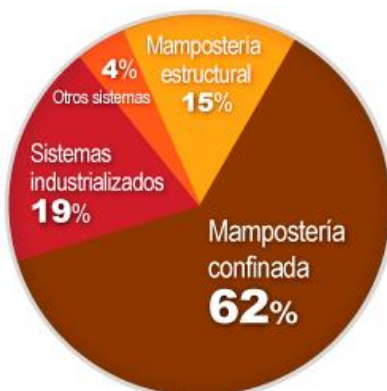


Gráfico 3. Sistemas constructivos en Colombia para VIS y No VIS. Fuente: Construdata, 2013

En cuanto a la ciudad de Bogotá, de acuerdo con Ecoingeniería (2012), estas proporciones varían manteniendo su lugar de participación con un 48%, 24%, 22%, y 6% respectivamente; se reduce la contribución de la mampostería confinada (pero sigue en primer lugar) y sube la participación de los sistemas industrializados y la mampostería estructural, manteniendo una diferencia muy pequeña del 2%. A su vez, el sistema de construcción industrializada con concreto amplía cada vez más su participación a nivel nacional por su rápida ejecución.

<sup>69</sup> En Colombia, la mampostería son bloques de ladrillo de arcilla cocida principalmente o de concreto; en otras partes del mundo este se denomina “fabrica”.

<sup>70</sup> N° 4 y 5. Existe mampostería de arcilla cocida, de concreto y de sílice-cal, sin embargo, no se encontraron datos de uso entre estas. Se ha corroborado esta información con el Censo edificaciones CEED I trimestre de 2017 del DANE.



ÁREA	SISTEMAS CONSTRUCTIVOS VIS y No VIS				
	Mampostería Estructural	Mampostería Confinada	Sist. Industrializados	Otros sist.	Total
URBANA BOGOTÁ	990.085	2.199.391	1.080.362	297.586	4.567.424

Tabla 8. Área construida (m<sup>2</sup>) Bogotá para VIS y No VIS en 2011 según sistema constructivo. Fuente: Ecoingeniería, 2012

Como se expone más adelante, existen varios ejemplos en la oferta de vivienda actual desarrollada con sistemas industrializados en concreto, por lo cual, el prototipo de vivienda hipotético con el que se realizará el componente práctico de esta investigación está basado en este sistema. Por tanto, se detallarán algunas características de este sistema.

En general, todos los sistemas constructivos expuestos para vivienda demandan principalmente (99%) seis materiales en orden (Gráfico 4): agregados triturados, arena de río, cemento gris, tierra de excavación, cerámica cocida, y acero; el 1% restante está compuesto por madera, teja de fibrocemento, vidrio, PVC, cobre, cemento blanco y pintura. Examinado estos consumos en el sistema industrializado, los agregados gruesos representan un 43%, la arena de río 35%, el cemento gris 12%, la roca y tierra excavada 4%, cerámica cocida 3%, y acero 2% (Ecoingeniería, 2012)<sup>71</sup>.

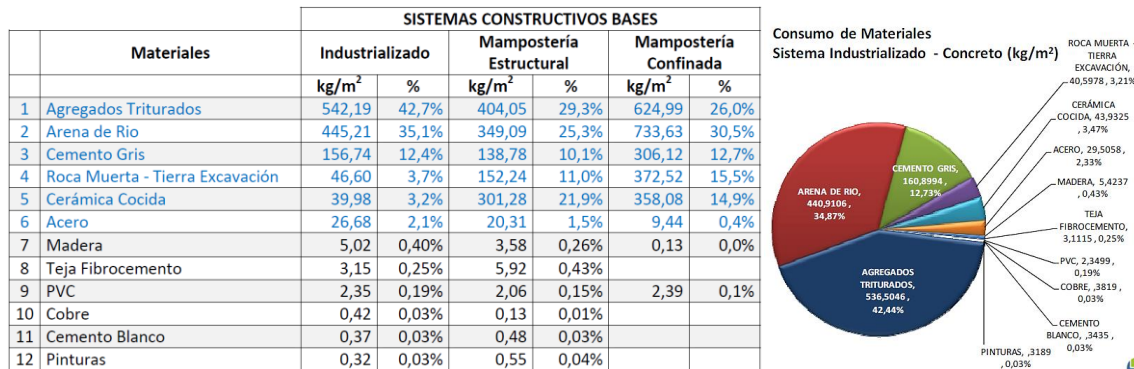


Gráfico 4. Consumo de materiales para vivienda por sistema constructivo. Fuente: Ecoingeniería, 2012

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	VALORES A NIVEL NACIONAL		
	Toneladas	MJ	Ton CO <sub>2</sub>
1 AGREGADOS TRITURADOS	1.090.415,58	193.181.155,75	10.739,44
2 ARENA DE RIO	896.126,12	109.032.579,31	8.707,93
3 CEMENTO GRIS	327.019,11	3.384.909.809,16	381.606,89
5 ROCA MUERTA - TIERRA EXCAVACIÓN	82.512,71	24.941.914,11	874,07
4 CERÁMICA COCIDA	89.290,39	245.513.562,38	21.681,34
6 ACERO	59.968,90	664.649.835,40	162.184,75
7 MADERA	11.023,43	5.511.716,60	-
8 TEJA FIBROCEMENTO	6.323,87	56.048.994,14	327,70
9 PVC	4.776,08	345.195.982,57	36.580,90
10 COBRE	776,10	76.361.943,57	6.691,25
11 CEMENTO BLANCO	698,19	7.226.823,28	814,74
12 PINTURAS	648,07	3.400.168,98	264,36
Área construida (m <sup>2</sup> )	2.569.578,57	5.115.974.485,24	630.473,36
	1,264	2517,2	0,310

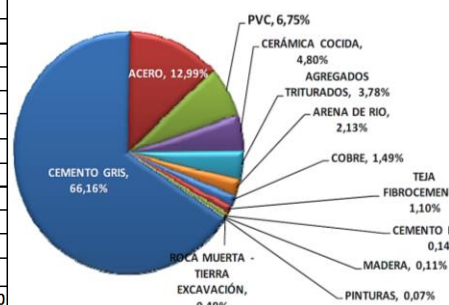


Gráfico 5. Proyección nacional de consumo de materiales, consumo energía y emisiones de CO<sub>2</sub> para el sistema industrializado. Fuente: Ecoingeniería, 2012

<sup>71</sup> Hay que tener en cuenta que la información de cantidades de Ecoingeniería (2012) está enfocada en la industria de la construcción en la ciudad de Cali, Colombia, pero son muy asimilables a otras ciudades del país; este informe tiene por objetivo identificar el consumo energético asociado a la producción de materiales de construcción en Colombia. Vale la pena mencionar que García et al (2016) controvierte estos resultados basado en un análisis de huella de carbono de tres sistemas constructivos a través de software y metodología BIM.

Según la información de estas tablas y gráficos, entendemos que los datos de consumo energético de los materiales se refieren a su energía embebida; de igual manera pasa con las emisiones de CO<sub>2</sub> (Gráfico 5). En ese sentido, en el sistema industrializado en concreto, el material con la mayor energía embebida es el cemento gris, seguido por el acero, el PVC y la cerámica cocida; en total, se alcanzan valores de 2.517 MJ por m<sup>2</sup> construido (Ibídem).

Osma et al (2015) complementan esta información al citar la encuesta de calidad de vida 2012 del DANE que referencia los consumos de energía de la vivienda de acuerdo a tres regiones del país con climas diferentes, como son Bogotá, Atlántico y Antioquia. En ella se puede apreciar que en Bogotá (frio) es notable un mayor consumo de la cocina y el calentamiento de agua, en Atlántico (cálido) el aire acondicionado y de ventiladores, y Antioquia (templado) tiene consumos similares a Bogotá, pero sin presentar picos notables.

De manera similar, hacen ese mismo ejercicio pero clasificando los materiales entre autóctonos y modernos más usados en vivienda social en Colombia de acuerdo al clima; según esta clasificación, la vivienda social moderna en Bogotá utiliza predominantemente muros de mampostería, carpintería de aluminio, cubierta con tejas de fibrocemento y de arcilla cocida, y pavimentos textiles, madera y vinilo, lo cual coincide parcialmente con los datos sobre sistemas constructivos expuesto anteriormente, ya que además del clima, depende del sistema constructivo de la edificación.

CLIMA	FRIO	TEMPLADO	CALIDO
<b>Muros</b>			
<b>Autóctono</b>	Tierra comprimida y adobe	Esterilla de guadua con arcilla y adobe	Esterilla de guadua con arcilla y adobe
<b>Moderno</b>	Unidades de mampostería y pañete	Unidades de mampostería y pañete	Unidades de mampostería y pañete
<b>Cubierta</b>			
<b>Autóctono</b>	Estructura en madera y teja de barro	Madera y teja de zinc	Madera
<b>Moderno</b>	Cubierta con tejas de fibrocemento y de arcilla cocida	Cubierta con tejas de fibrocemento y de arcilla cocida	Cubierta con tejas de fibrocemento, de arcilla cocida y de zinc
<b>Pisos</b>			
<b>Autóctono</b>	Madera	Madera	Baldosa
<b>Moderno</b>	Alfombra, madera y vinilo	Alfombra, madera, vinilo y piso cerámico	Baldosa de cemento y tableta de cerámica
<b>Ventanas</b>			
<b>Autóctono</b>	Madera con inclinación vertical	Oscilante de madera con apertura vertical media	Madera con inclinación vertical de apertura grande
<b>Moderno</b>	Aluminio y vidrio	Aluminio y vidrio	Calados, madera y fique

Tabla 9. Materiales más usados en vivienda social según el clima. Fuente: Osma et al, 2015. Traducción del autor

En cuanto a la energía operativa de las viviendas en Colombia, el sector residencial representó aproximadamente el 20% del consumo final de energía en el país en 2012 (UPME, 2015). Con base en muestras de todos los estratos en áreas urbanas en todos los pisos térmicos<sup>72</sup> del territorio nacional, las fuentes de energía más usadas son la electricidad y el gas natural con participaciones del 55% y 35% respectivamente, y que son consumidas principalmente en cocción (especialmente con gas), refrigeración e iluminación. Si se revisa el consumo exclusivamente eléctrico, se repite el consumo por refrigeración e iluminación en los primeros lugares, además del uso del televisor (UPME, 2016: 39)<sup>73</sup>.

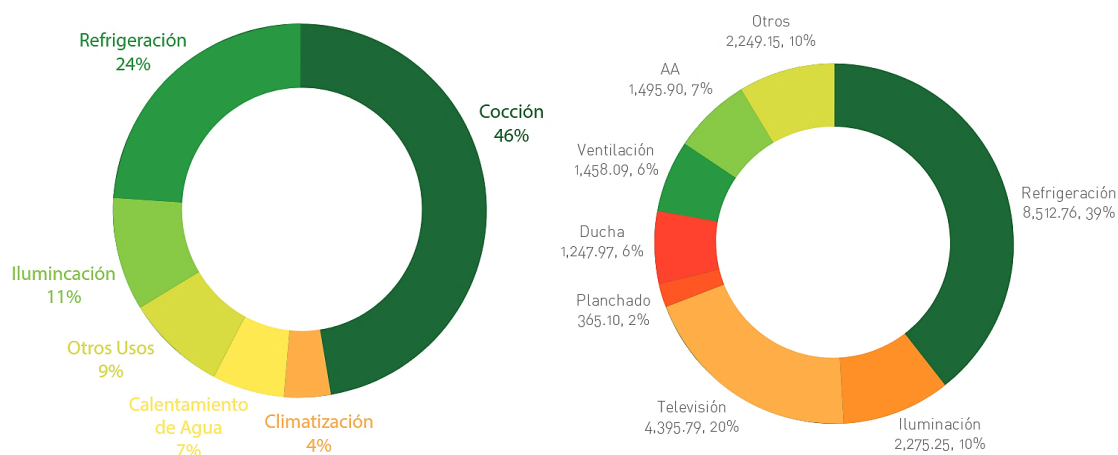


Gráfico 6. Consumo de energía y consumo de energía eléctrica en el sector residencial urbano en Colombia. Fuente: UPME, 2016

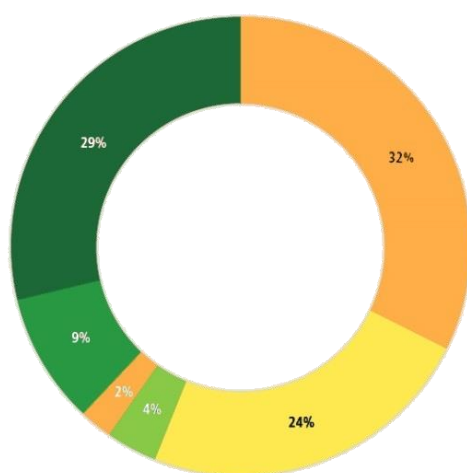


Gráfico 7. Consumo de energía final en edificios residenciales a nivel global. Fuente: Cambio de colores sobre la base de Lucon et al, 2014

En contraste, según datos de Lucon et al (2014: 680) de 2010, a nivel mundial el consumo de energía final en edificios residenciales representó el 24% del uso total de energía final global, donde la calefacción de espacios representó el 32%, además de importantes consumos por actividades relacionadas con la cocina (29%) y el calentamiento de agua (24%) (Gráfico 7).

<sup>72</sup> Los pisos térmicos, también llamados pisos climáticos o pisos altitudinales, se refiere a los diferentes climas presentes en una región con relación principalmente a la altitud determinada por el relieve.

<sup>73</sup> Hay que tener en cuenta que una buena parte de ese consumo proviene del uso de electrodomésticos y bombillas poco eficientes. Por otro lado, la energía consumida en cocción con una participación del 46%, corresponde principalmente a gas natural suministrado a las viviendas por red.

De acuerdo con simulaciones energéticas desarrolladas por SDP (2018) para viviendas estrato 3 y 4 en Bogotá, siguiendo la metodología del Apéndice G del ASHRAE 90.1 2016 en el marco de los parámetros de cumplimiento normativo según la Resolución 549 de 2015 durante un año de operación, se observa que los mayores consumos de energía se concentran en agua caliente, iluminación, y equipos internos, cuyas proporciones frente al costo de la energía son similares.

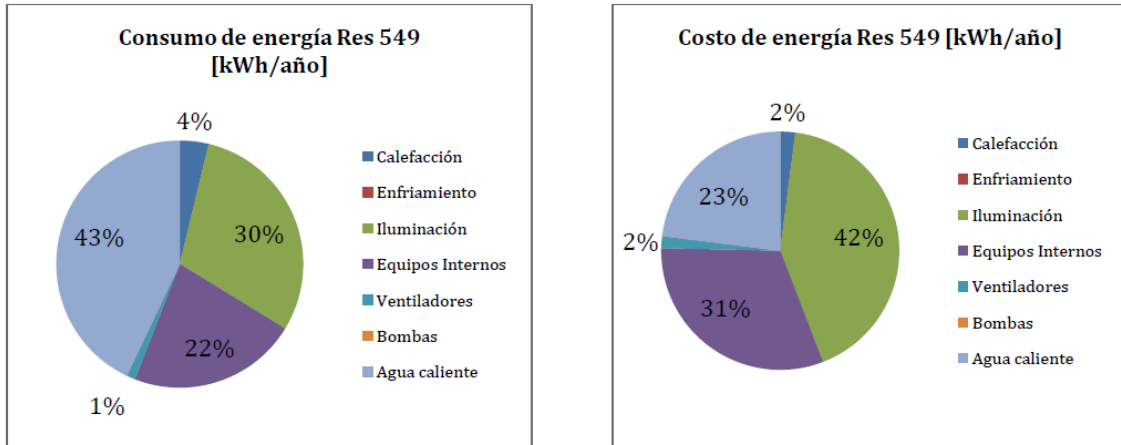


Gráfico 8. Consumo y costo de energía viviendas estrato 3 y 4 según parámetros de la Resolución 549 de 2015. Fuente: SDP, 2018

Un estudio de Corpoema (2012) sobre caracterización energética del sector residencial en Colombia mediante encuestas, divide las ciudades por perfiles residenciales según su estrato y piso térmico definido por la altura sobre el nivel del mar como variable climática (por debajo de los 1.000 msnm, entre 1.000 y 2.000 msnm, o encima de los 2.000 msnm). Bogotá (con altitud media de 2.640 msnm) junto con los municipios de Manizales, Tunja y otros, se encuentran entre el grupo de ciudades por encima de los 2.000 msnm, encontrando que en estrato 3, el tipo de vivienda analizado se divide en casa unifamiliar con 20% (son la mayoría contando todos los estratos), y 16% de apartamento. Además de lo anterior, se establece un indicador por área y el consumo promedio de energía eléctrica por estrato, donde a mayor estrato, mayor consumo, con una leve excepción en estrato 3 y 4.

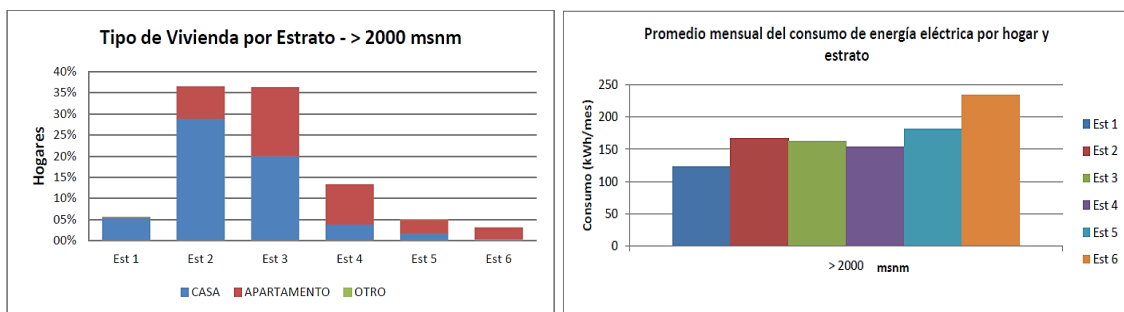


Gráfico 9. Tipo de vivienda y promedio de consumo de energía residencial por estrato en ciudades colombianas > a 2000 msnm. Fuente: Corpoema, 2012

Según esta información y a la Tabla 10, el promedio de consumo mensual de energía eléctrica para una vivienda estrato 3 en Bogotá es de 163 kWh, que equivalen a 1,5 kWh/m<sup>2</sup>, y que son valores similares a la vivienda estrato 4. Frente a otros estratos como el 1 o el 6, la diferencia es más evidente pero no directamente proporcional, pues en el

estrato 1 puede verse un consumo por kWh menor, pero que al normalizarlo por superficie kWh/m<sup>2</sup> es mayor (seguramente por las superficies habitables más reducidas). En la vivienda estrato 6 vemos un consumo por kWh mayor, pero que al normalizarlo por área kWh/m<sup>2</sup> es menor (seguramente por las superficies habitables mayores).

Es de anotar que este estudio cuenta con una matriz de caracterización energética anexa con un indicador por área en m<sup>2</sup>, sobre la cual se infiere que obedece a un valor promedio de vivienda por estrato, pero la recopilación inicial de estos datos no fue clasificada con base a ese indicador; es decir, el valor de consumo por m<sup>2</sup> puede ser impreciso porque se extrajo a partir de un promedio para todas las viviendas de un estrato, las cuales pueden tener diversas características y áreas.

Estrato 1		Estrato 2		Estrato 3	
Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes	Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes	Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes
122,8	1,64	167,1	1,72	163	1,5
Estrato 4		Estrato 5		Estrato 6	
Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes	Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes	Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes
153,5	1,6	180,9	1,67	234,1	1,14

Tabla 10. Consumo promedio e indicador por área de viviendas por estrato > 2000 msnm. Fuente: Elaboración propia con datos de Corpoema (2012).

A manera de comparación, se ha extraído la información de consumos de las ciudades que se encuentran a menos de 1.000 msnm, que son Aguazul, Barranquilla, Bucaramanga, Cali, Florencia, Villavicencio, y Yopal (Tabla 11); estas ciudades se caracterizan mayoritariamente por tener climas cálidos, húmedos o secos (excepto Florencia que es templado), y cuyos consumos de energía son más altos. En ella vemos que frente al estrato 3, el consumo por kWh es mayor (seguramente por la incorporación de aire acondicionado), pero que normalizado por área kWh/m<sup>2</sup> es el mismo.

Estrato 1		Estrato 2		Estrato 3	
Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes	Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes	Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes
170,8	1,94	171,3	1,51	176,7	1,5
Estrato 4		Estrato 5		Estrato 6	
Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes	Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes	Consumo kWh/mes	Indicador kWh/m <sup>2</sup> /mes
222	1,46	239	1,83	295	2,29

Tabla 11. Consumo promedio e indicador por área de viviendas por estrato < 1000 msnm. Fuente: Elaboración propia con datos de Corpoema (2012).

Otra información para comparar, son los datos aportados por la plataforma del Sistema Único de Información de Servicios Públicos SUI<sup>74</sup>, sobre promedios de consumo anuales en Bogotá (Tabla 12). En ellos se evidencia un incremento en el consumo desde el año 2012 al 2019 de alrededor del 50% en todos los estratos, pero también, que los datos son cerca del 30% menores respecto a los datos aportados por Corpoema (2012) para el año 2012 (Tabla 10). Si tomamos los datos de estas dos fuentes y los multiplicamos por 12

<sup>74</sup> <http://www.sui.gov.co/SUIAuth/portada.jsp?servicioPortada=4>

para obtener un promedio de consumo anual para estrato 3, obtenemos 1956 kWh/año, 1257,24 kWh/año (2012) y 2061 kWh/año (2019), los cuales son valores próximos a Brasil y México que son países cercanos geográficamente con datos de 2010, pero que están por debajo del promedio a nivel mundial<sup>75</sup>, según el Gráfico 10. No obstante, al igual que el estudio anterior, esta información debe compararse con precaución porque no está normalizada según áreas en m<sup>2</sup>.

Estrato 1		Estrato 2		Estrato 3	
Promedio consumo 2012 kWh/mes	Promedio consumo 2019 kWh/mes	Promedio consumo 2012 kWh/mes	Promedio consumo 2019 kWh/mes	Promedio consumo 2012 kWh/mes	Promedio consumo 2019 kWh/mes
94,51	157,37	135,87	174,08	104,77	171,75
Estrato 4		Estrato 5		Estrato 6	
Promedio consumo 2012 kWh/mes	Promedio consumo 2019 kWh/mes	Promedio consumo 2012 kWh/mes	Promedio consumo 2019 kWh/mes	Promedio consumo 2012 kWh/mes	Promedio consumo 2019 kWh/mes
112,06	174,81	145,11	218,22	205,74	305,54

Tabla 12. Promedio de consumo anual residencial en Bogotá según el SUI. Fuente: Elaboración propia con datos del SUI

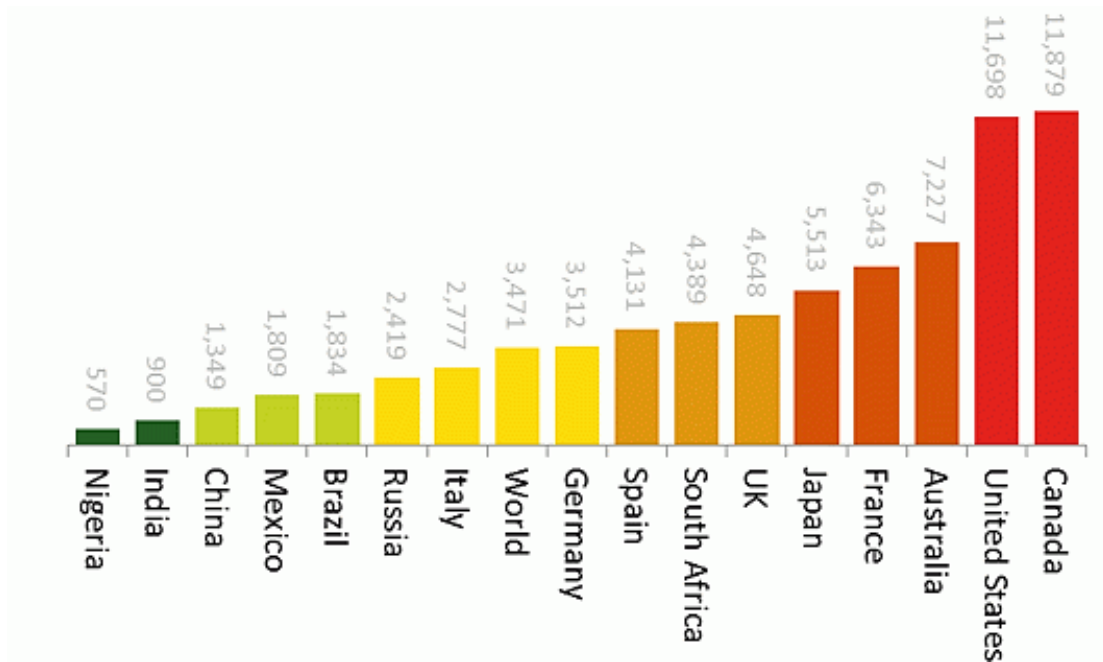


Gráfico 10. Consumo de electricidad residencial en el mundo 2010 (kWh/año). Fuente: <http://shrinkthatfootprint.com/average-household-electricity-consumption>

Lo revisado en capítulos anteriores sobre fuentes no convencionales de energía renovable de pequeña escala, junto con el análisis de ciclo de vida, y la información sobre “materiales y consumo de energía”, dan cumplimiento al objetivo específico 2 (OE2), que comprende “Reconocer tecnologías de energía renovable e iniciativas de identificación de la energía embebida o evaluación de impactos en el ciclo de vida de materiales de construcción en Colombia”.

<sup>75</sup> Existen bases de datos on line interesantes sobre consumo energético residencial para Europa como <http://webtool.building-typology.eu/> y [https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-database\\_en](https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-database_en)

### 5.3.2. Prototipo experimental de vivienda como caso de estudio

Para desarrollar el experimento práctico planteado en el marco metodológico, se hace necesario determinar un prototipo que reúna las características más frecuentes en los proyectos de vivienda en la ciudad de Bogotá, tomando como base la oferta de vivienda multifamiliar nueva y excluyendo los proyectos VIS (protegida) debido a que presentan características morfológicas diferentes, y porque representan una menor porción de la oferta general.

Esta identificación de proyectos está desarrollada en una matriz incluida en el Anexo 2, la cual registra en celdas el nombre del proyecto, promotor, ubicación, n° de pisos, cantidad de apartamentos por piso, tipología, estrato socioeconómico, área, precio por m<sup>2</sup>, n° de alcobas, n° de baños y parqueadero. Como se mencionó anteriormente, se tuvo en cuenta solo la oferta de proyectos nuevos de vivienda colectiva estrato 3 ya que es la más común en la ciudad y en el país.

Para desarrollar esta matriz, en julio de 2019 se acudió a la página web “www.fincaraiz.com.co”, la cual es una de las más populares para ofrecer y buscar vivienda, y de esta manera, realizar una búsqueda de proyectos nuevos tipo apartamento en Bogotá. Se aplicaron filtros adicionales como “estrato 3”, “con foto” y “zona residencial”; se obtuvieron los datos de 25 proyectos, los cuales fueron organizados por áreas de apartamento de mayor a menor.

Finalmente, a estos resultados se les aplicó diferentes cálculos estadísticos con el fin de determinar las características más replicadas; de estos cálculos, se consideró más relevante el promedio (o media aritmética) y la media geométrica, ya que el primero proporciona un valor característico o esperado a partir de los datos cuantitativos, y el segundo es recomendado para promediar razones y números índice, ya que no varía mucho frente a valores muy altos o muy bajos. Ver Anexo 2. Oferta de vivienda en Bogotá.

En general, en estos proyectos podemos encontrar que muchas de las plantas de apartamento y edificio son reticuladas y conformadas por rectángulos y cuadrados en sus diferentes espacios, todos manejan áreas diferentes, pero tienen en común que constan de dos o tres habitaciones, dos baños, un área social denominada sala-comedor y cocina; son pocos los que incluyen un área de estudio. En cuanto al edificio de apartamentos encontramos edificios lineales con un área social y de recepción, y conjuntos habitacionales más grandes con zonas verdes, parqueaderos y zonas sociales altamente definidas como son un área de gimnasio, piscina y salón de juegos.

De acuerdo con la Ilustración 26, las tipologías morfológicas y de implantación características de la vivienda colectiva halladas fueron Bloques perpendiculares, Torres, Bloques en hileras, Bloque rectangular, Predio medianero, y Bloque en L. El bloque rectangular se compone de un edificio con planta similar a un rectángulo; los bloques perpendiculares se refieren a dos o más edificios dispuestos a 90° de rotación respecto al otro; las Torres son bloques cuya planta mantiene una proporción similar a un cuadrado y por lo general de una altura considerable; los bloques en hileras son unidades rectangulares dispuestos paralelamente; el bloque en L es un edificio o dos que se unen marcando una esquina, y finalmente, los edificios de predio medianero pueden contener las formas mencionadas anteriormente pero se construyen en un predio delimitado por



otros predios vecinos debido a que sustituye una edificación existente que fue/va a ser demolida. Ver Anexo 3 sobre tipologías de vivienda.

Se encontró que la tipología más común es la de predio medianero, seguido del bloque rectangular, lo cual corresponde con otras investigaciones relacionadas (Ballén, 2010). El promedio y la media geométrica de las características halladas respectivamente para la tipología de predio medianero fueron 6 pisos con el promedio y 6 pisos con media geométrica, respectivamente, 6 y 6 apartamentos por piso, 59 y 58 m<sup>2</sup> de área de apartamento, 2 y 2 alcobas, y, \$4.367.301 y \$4.343.280 COP de precio por m<sup>2</sup> (996,4 y 990,9 €). En cuanto al bloque rectangular, el promedio y la media geométrica respectivamente fueron 15 y 14 pisos, 8 y 8 apartamentos por piso, 62 y 62 m<sup>2</sup> de área de apartamento, 3 y 3 alcobas, y, \$4.652.569 y \$4.503.541 COP de precio por m<sup>2</sup> (1.061,5 y 1.027,5 €).

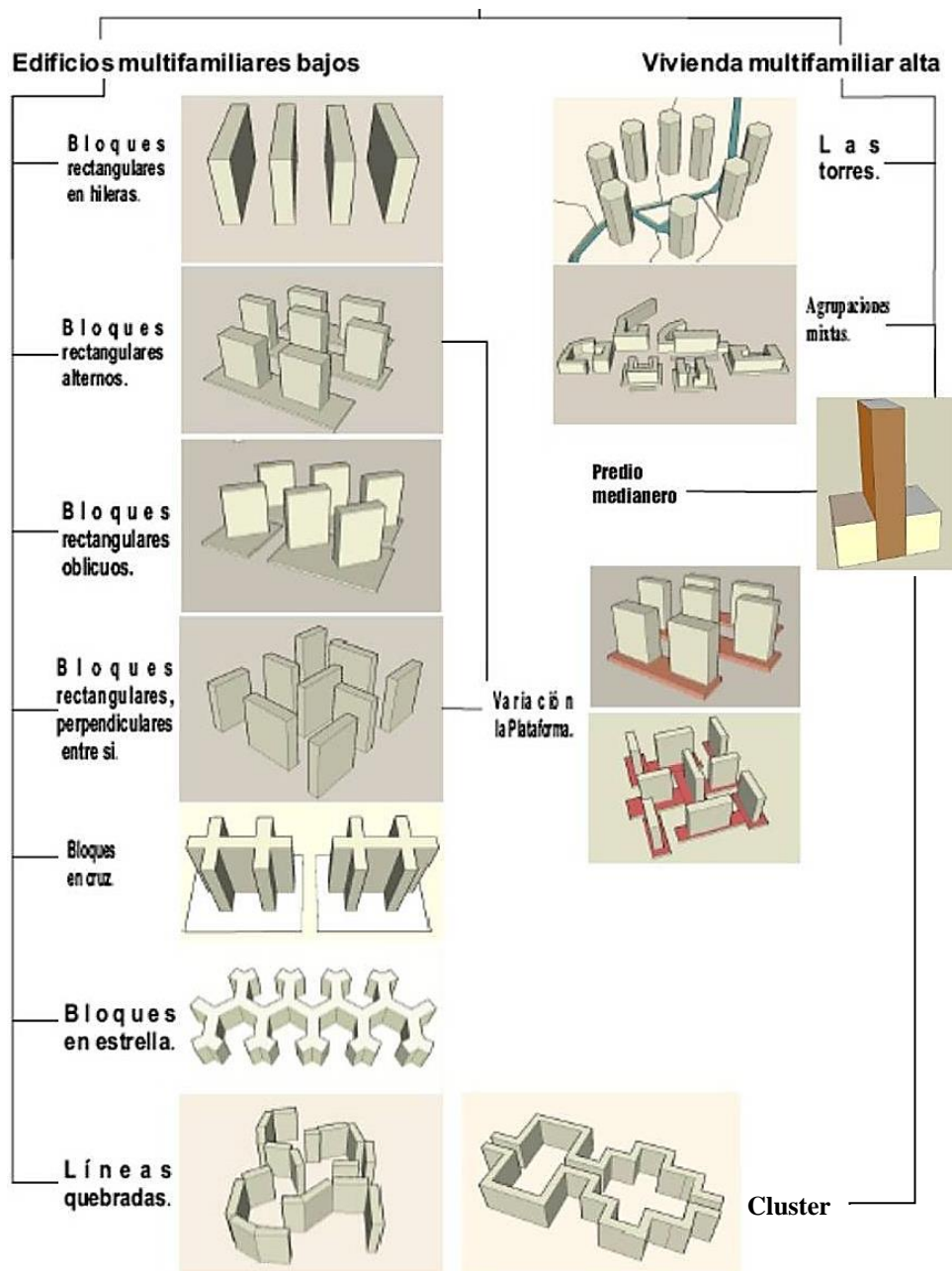


Ilustración 26. Tipologías morfológicas y de implantación en la vivienda colectiva. Fuente: Elaboración propia con base en Ballén, 2010.



Se volvió a revisar el registro de los 25 proyectos de vivienda en Bogotá para identificar cuál de ellos se acoplaba mejor a los datos característicos calculados, encontrando como resultado a un bloque rectangular que va a ser construido sobre un predio medianero con 14 pisos, 10 apartamentos por piso, 69,8 m<sup>2</sup> de área de apartamento, 3 alcobas, 2 baños, y \$ 4.845.639 COP de precio por m<sup>2</sup> (1.306,3 € a septiembre de 2019). Este proyecto se caracteriza por presentar dos puntos fijos de escalera a los extremos del bloque, un punto doble de ascensores en la mitad, un pasillo de distribución con doble crujía de apartamentos, y un sistema constructivo tipo túnel (industrializado en concreto) con muros y placas de hormigón de bajos espesores.

La planta arquitectónica de este proyecto se tomó como base para desarrollar otra planta tipológica de vivienda colectiva de acuerdo a los valores promedio de los bloques rectangulares: 15 pisos y 8 apartamentos por piso de 66.6 m<sup>2</sup> en promedio (el piso 1 tiene 6 apartamentos, teniendo en cuenta el lobby y salón comunal); la dirección del norte fue ajustada según la recomendación de la Resolución 549 de 2015 para clima frío, es decir, fachadas largas en dirección oriente y occidente. Esta tipología será objeto de estudio de la presente investigación, al implementar energías renovables y ACV de acuerdo con los objetivos y la metodología estipulada. Recordemos que una de las operaciones planteadas en la metodología es el establecer una tipología hipotética experimental de apartamento y de edificio basados en la oferta del mercado actual, al realizar un ejercicio simplificado de identificación de características presentes en la oferta actual a través de páginas web inmobiliarias.



Ilustración 27. Planta arquitectónica hipotética. Fuente: Elaboración propia con base en proyectos registrados en la oferta actual

En esta planta arquitectónica tipo existen ocho apartamentos por piso, con áreas próximas a los 62 m<sup>2</sup> según dictaba el análisis de la oferta<sup>76</sup> visto anteriormente. El área total de la planta, así como de la cubierta es de 678.1 m<sup>2</sup>, que al restar las zonas del foso del ascensor y los puntos fijos, resulta en un área útil de la cubierta de 613.03 m<sup>2</sup>. Al igual que el proyecto ejemplo de la oferta, este proyecto cuenta con un sistema constructivo tipo túnel de hormigón, pasillo de distribución con doble crujía de apartamentos, dos puntos fijos

<sup>76</sup> Apto 1: 70.5 m<sup>2</sup>; Apto 2: 70.2 m<sup>2</sup>; Apto 3: 67.3 m<sup>2</sup>; Apto 4: 65.7 m<sup>2</sup>; Apto 5: 56.4 m<sup>2</sup>; Apto 6: 61.8 m<sup>2</sup>; Apto 7: 70 m<sup>2</sup>; Apto 8: 70.6 m<sup>2</sup>.

de escalera en los extremos de la circulación, y un punto con dos ascensores en la mitad. Por tanto, el total de viviendas que tiene este edificio son 118, con una ocupación de 4 personas en cada una, sumando 472 personas, y un área total construida de 9.762,0 m<sup>2</sup> en 15 pisos.

El sistema constructivo tipo túnel de muros y placas macizas en hormigón industrializado se basa en la rotación diaria de la formaletería metálica (encofrado) y de la fundición (vertido), logrando altas velocidades de construcción con bajo personal, y es ideal para proyectos repetitivos. Este sistema se distingue por los pequeños espesores de los elementos, refuerzo con malla electrosoldada, y formaletería (encofrado) de grandes dimensiones para realizar la fundición (vertido) monolítica de muros y placas, por lo que es necesario el uso de equipos adicionales como torregrúas y grúas móviles para su manipulación<sup>77</sup>. En el “Anexo 5. Planimetría del prototipo de vivienda como caso de estudio” se puede apreciar la planta de muros estructurales, planta de cimentación, alzado, y diseño esquemático de instalaciones.

De acuerdo con un ejercicio similar desarrollado por la SDP (2018: 19) en un documento técnico para desarrollar un protocolo de implementación de la Resolución 549 de 2015 en Bogotá, se hizo un reconocimiento de las prácticas actuales de construcción, entre ellas de la vivienda, a través de entrevistas a 22 desarrolladores diferentes y analizando 57 proyectos construidos en los últimos tres años. Con esa información se realizaron estadísticas para comparar sus parámetros geométricos, energéticos y de consumo frente a una línea base estandarizada ajustada a las condiciones locales (denominados como paquetes primarios) y determinar prácticas de ahorro medibles de sostenibilidad en agua y energía que dieran cumplimiento a la normatividad vigente, y cuyo resultado es un nuevo documento de la SDP (2019).

Entre las principales conclusiones de este estudio acerca de viviendas de estrato 3 y 4, se comprueba que las prácticas constructivas recurrentes de los promotores ya aplican equipos de ahorro de energía, especialmente en el sistema de iluminación con el uso de bombillos LED. Por el contrario, el consumo de agua caliente es bastante alto debido a la demanda de gas natural, eléctrica por calentador de acumulación, o de ducha eléctrica. Por otro lado, se identifica que estas edificaciones tienen muy poco aislamiento y usan vidrio crudo, lo cual se traduce en problemas de confort térmico y que merecen ser estudiados a mayor profundidad.

Por tanto, el paquete primario para viviendas de estratos 3 y 4, consta de un edificio de 13 pisos más sótano, sistema estructural aperticado, ningún tipo de aislamiento, ventanería de vidrio crudo (también como vidrio común, se caracteriza por no haber sido sometido a ningún proceso térmico posterior a su fabricación en un horno float), relación ventana pared entre el 40% y el 60%, sanitarios de doble descarga, lavamanos ahorradores, iluminación LED, y sensores de ocupación en escaleras y zonas comunes (SDP, 2018).

Las características de este paquete primario que no fueron contempladas en el desarrollo del prototipo objeto de este estudio han sido adoptadas y se referencian en el “Anexo 4. Características de desempeño energético de la vivienda estrato 3”. Así mismo, los parámetros o condiciones de frontera sugeridos para realizar simulaciones energéticas al

---

<sup>77</sup> Se desarrolló un predimensionamiento estructural del edificio plasmado en la planimetría y en las cantidades de materiales para el inventario. Las características geológicas del suelo en Bogotá, se traducen en pilotes, movimientos de tierra, y volúmenes de estructura considerables.

plantear la línea base y el caso de diseño según el método de desempeño para proyectos de vivienda se relacionan en la siguiente tabla.

Item	Parámetro	Subsistema	Electricidad [kWh/año]	Gas Natural [kWh/año]	Consumo energía línea base [kWh/año]	Consumo [COP]
Horario ocupación	Desde 00:00 hasta 07:00: 100 %	Calefacción	0	6,93	6,93	\$ 1.070,20
	Desde 08:00 hasta 16:00: 0 %					
	Desde 17:00 hasta 24:00: 100 %					
Densidad de ocupación	3,5 personas/Unidad residencial	Enfriamiento	396,54	0	396,54	\$ 160.689,90
		Iluminación	242203,6	0	242203,6	\$ 98.148.164,83
Carga de tomas	2,69 W/m <sup>2</sup>	Equipos Internos	110408,27	0	110408,27	\$ 44.740.743,25
Rango de confort	18,5 °C - 25,5 °C	Ventiladores	346,71	0	346,71	\$ 140.497,29
Carga de iluminación interior	5,04 W/m <sup>2</sup>	Bombas	40,17	0	40,17	\$ 16.278,09
		Agua caliente	0	393147,31	393147,31	\$ 60.713.739,08
		<b>Total</b>	<b>353395,29</b>	<b>393154,24</b>	<b>746549,53</b>	<b>\$ 203.921.182,65</b>

Tabla 13. Parámetros y consumos de energía según línea base para viviendas de estratos 3 y 4. Fuente: SDP, 2019

Los pasos metodológicos desarrollados a continuación consisten en definir un perfil de demanda de energía eléctrica de un apartamento y del edificio, con el fin de evaluar la aplicación de energías renovables e impactos ambientales asociados a través de ACV, haciendo énfasis en el consumo de energía embebida según las cantidades de materiales y de obra del edificio.

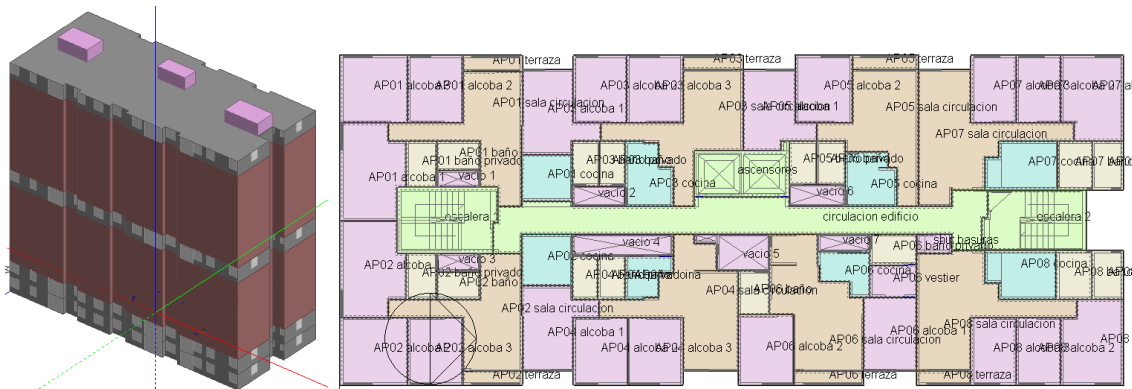


Ilustración 28. Volumetría 3D y planta de la tipología en Design Builder. Fuente: Elaboración propia, usando el software Design Builder

En cuanto a la implementación de ER, según estimaciones iniciales, para el caso de un hipotético proyecto residencial en Bogotá, a pesar de los valores de 6 - 7 m/s de velocidad del viento de máxima energía (ver Ilustración 29), es poco recomendable instalar energía minieólica por los costos asociados, la magnitud de un aerogenerador y, además que esta tecnología aún no tiene presencia en el mercado colombiano.

La opción más probable es la energía solar con paneles fotovoltaicos, debido a que Bogotá cuenta con una irradiación global horizontal entre 4.0 y 4.5 kWh/m<sup>2</sup>/día (ver Ilustración 30), lo que la ubica en un rango medio de aprovechamiento respecto a otras ciudades del país y un brillo solar de aproximadamente 3.9 h/d; la incorporación de energía solar dependerá de la potencia de los paneles fotovoltaicos, la cantidad que se puedan disponer en la cubierta del edificio junto con una buena orientación (inclinación hacia el sur más área de circulación y mantenimiento) y la amortización de la inversión.

De manera general, la generación de energía por biomasa tampoco se recomienda ya que en el edificio no se van a generar suficientes residuos agrícolas, para su aprovechamiento y alimentar la caldera. No obstante, se recomienda hacer una evaluación más detallada debido a que se requiere saber los volúmenes de estos residuos, su calidad de poder calorífico y un espacio al interior del conjunto residencial para albergar la caldera y su

funcionamiento, cuyas dimensiones también varían en razón de la potencia generada, rendimiento y el silo de almacenamiento. Por otro lado, no se tiene evidencia de casos o ejemplos de generación eléctrica bajo esta fuente y en escala residencial en Colombia.

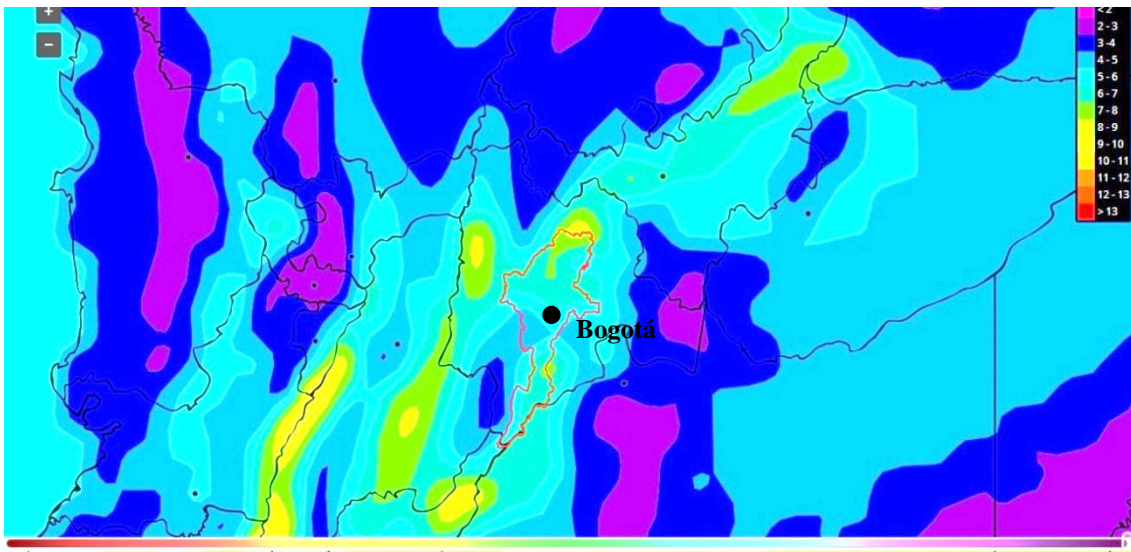


Ilustración 29. Velocidad viento máxima energía. Fuente: Elaboración propia con base en <http://atlas.ideam.gov.co/>

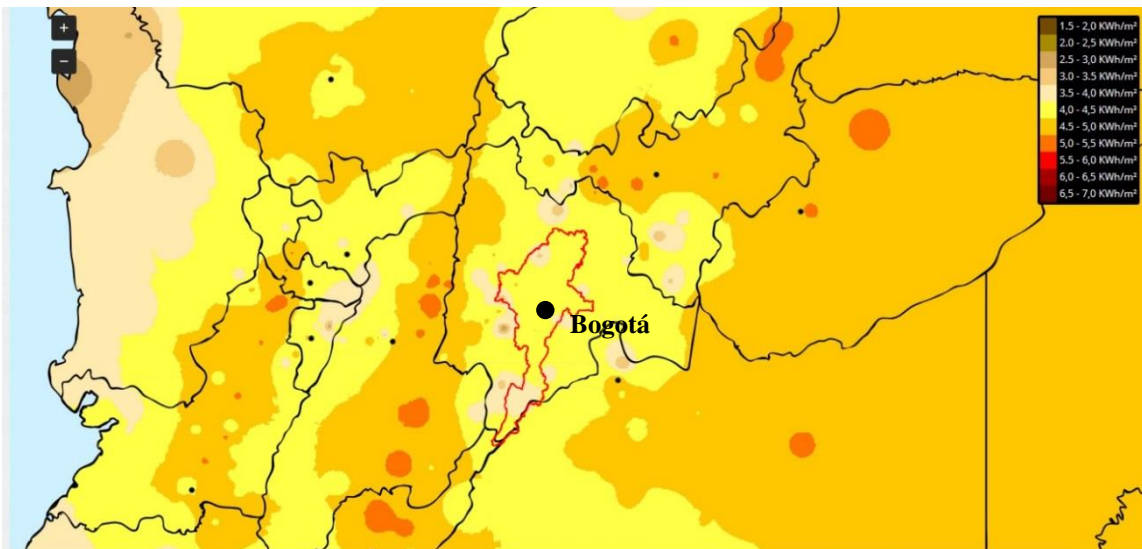


Ilustración 30. Radiación global horizontal. Fuente: Elaboración propia con base en <http://atlas.ideam.gov.co/>

### 5.3.3. Estimación de la demanda de energía

El determinar un valor del consumo de energía de una vivienda tipo implica tener una base para el pre dimensionamiento y valoración de un sistema de energía renovable acorde con las necesidades tanto de cada apartamento como de un edificio o conjunto de edificios, y posteriormente evaluar su contribución en la generación de energía, impacto ambiental y si cumple con estándares de consumo de energía casi nulo NetZeb EB.

Para ello comenzamos con realizar una lista de los electrodomésticos consumidores de energía más comunes en una vivienda tipo analizada, de acuerdo a su clasificación y horas de uso al día, según el Gráfico 11; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Los tiempos de consumo y número de aparatos fueron realizados a partir de los datos de la vivienda del autor, que es un apartamento de dos alcobas, dos baños, cocina, sala comedor, y tres habitantes en la ciudad de Bogotá. Se puede identificar una alta demanda a las 6 am., que se debe al consumo de la ducha eléctrica, la cual tiene 2.600 w de potencia y es utilizada por 4 personas con 9 minutos cada uno, lo que resulta en 1.560 wh día.

Los electrodomésticos se clasifican según su consumo de energía, es decir, de acuerdo a su potencia y su naturaleza; por ejemplo, tenemos los elementos de iluminación, los electrodomésticos que producen calor que tienen un alto consumo (plancha, horno, etc.), los electrodomésticos con motor considerados de consumo medio (ventilador, lavadora, nevera, etc.), y los electrónicos que son de bajo consumo (consola de videojuegos, reloj digital, computador, etc.).

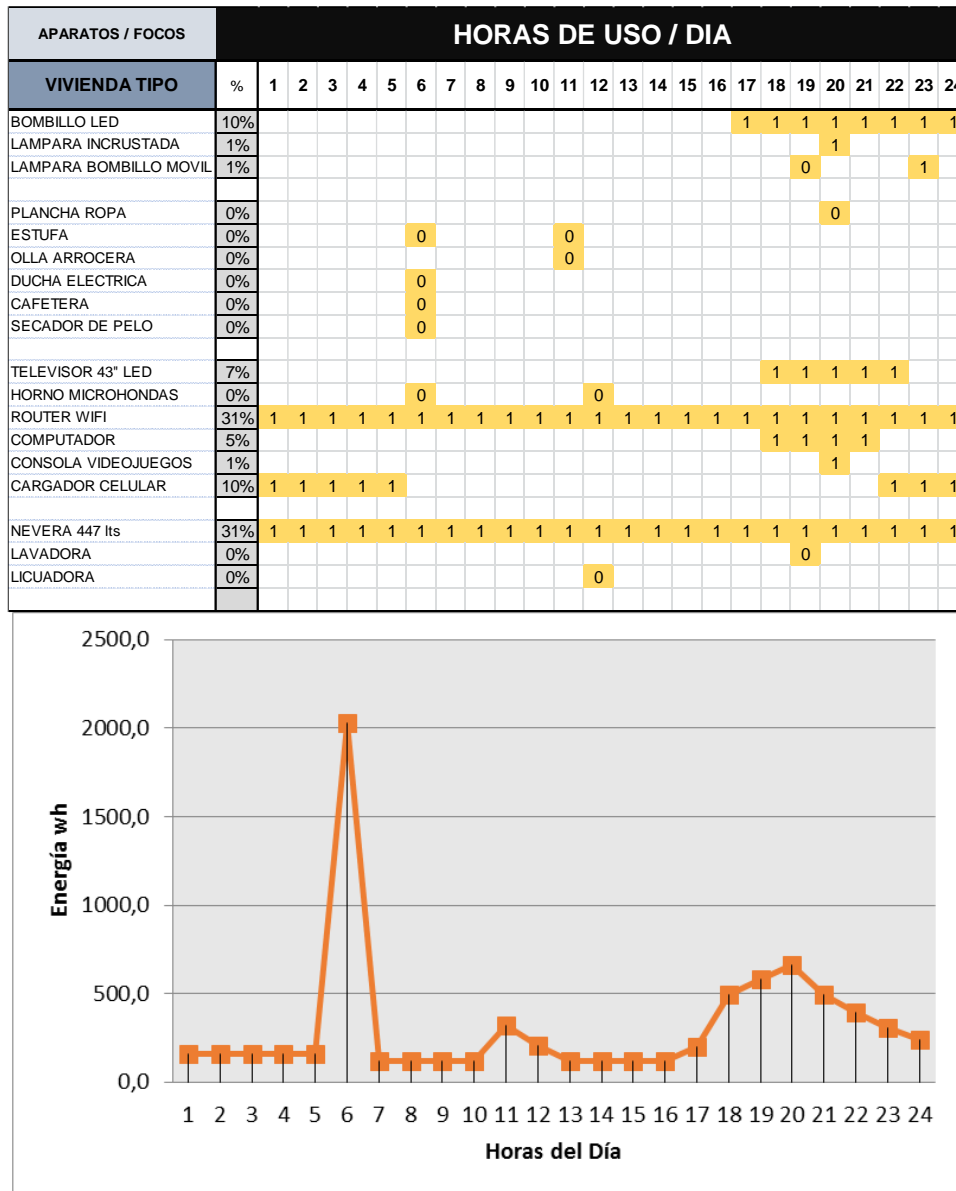


Gráfico 11. Horas de uso al día de electrodomésticos en una vivienda. Fuente: Elaboración propia



Luego, tomamos tales electrodomésticos con sus horas de uso y multiplicamos esos valores por los vatios de potencia por hora<sup>78</sup> y el número de aparatos; se ha excluido la potencia stand by. Estos datos en una hoja de cálculo nos proporcionan el consumo por mes y año de cada aparato y de la vivienda, así como el costo económico teniendo como base un valor de \$528,07 pesos colombianos por kilovatio (0,12 €) a noviembre del año 2019 para estrato 3 (recordemos que el valor varía según el estrato) en Bogotá.

Los valores de consumo total de una vivienda son de 230 kWh al mes, que según el área promedio resulta en 3,45 kWh/m<sup>2</sup> mes y 42,02 kWh/m<sup>2</sup> año. Este valor es más del doble del valor promedio para una vivienda en Bogotá estrato 3 (1,5 kWh/m<sup>2</sup> mes) según la Tabla 10 con datos de Corpoema (2012); esto se debe, primero, a que la mayor parte de la muestra de Corpoema son viviendas unifamiliares cuyas áreas son mayores; segundo, a que la cocina y la producción de ACS del prototipo de esta investigación es eléctrica, la cual tiene alto consumo, mientras que las muestras de Corpoema incorporan gas natural para este propósito. Así mismo, más adelante se mostrará que los datos de consumo obtenidos a través de la simulación en Design Builder son aún mayores.

CONSUMO ENERGÉTICO x VIVIENDA										
APARATOS / FOCOS	AC o DC?	No. APARATOS	POTENCIA watts	HORAS DE USO día	CONSUMO KW/día	CONSUMO KW/mes	CONSUMO KW/año	COSTO MES Kw \$433,07	COSTO AÑO \$433,07	Kwh m2 mes
<b>VIVIENDA TIPO</b>					<b>7,67</b>	<b>230,03</b>	<b>2.798,64</b>	<b>\$99.616,93</b>	<b>\$1.212.005,94</b>	
BOMBILLO LED	DC	9	9,0	8,00	0,65	19,44	236,52	\$8.418,88	\$102.429,72	3,45
LAMPARA INCRUSTADA	DC	1	65,0	0,50	0,03	0,98	11,86	\$422,24	\$5.137,29	
LAMPARA BOMBILLO MOVIL	DC	5	25,0	0,60	0,08	2,25	27,38	\$974,41	\$11.855,29	
PLANCHA ROPA	DC	1	1.000,0	0,10	0,10	3,00	36,50	\$1.299,21	\$15.807,06	
ESTUFA	AC	1	1.800,0	0,20	0,36	10,80	131,40	\$4.677,16	\$56.905,40	
OLLA ARROCERA	DC	1	200,0	0,10	0,02	0,60	7,30	\$259,84	\$3.161,41	
DUCHA ELECTRICA	DC	2	2.600,0	0,30	1,56	46,80	569,40	\$20.267,68	\$246.590,06	
CAFETERA	DC	1	900,0	0,10	0,09	2,70	32,85	\$1.169,29	\$14.226,35	
SECADOR DE PELO	DC	1	110,0	0,10	0,01	0,33	4,02	\$142,91	\$1.738,78	
TELEVISOR 43" LED	DC	2	75,0	5,00	0,75	22,50	273,75	\$9.744,08	\$118.552,91	
HORNO MICROHONDAS	AC	1	650,0	0,20	0,13	3,90	47,45	\$1.688,97	\$20.549,17	
ROUTER WIFI	AC	1	10,0	24,00	0,24	7,20	87,60	\$3.118,10	\$37.936,93	
COMPUTADOR	AC	1	140,0	4,00	0,56	16,80	204,40	\$7.275,58	\$88.519,51	
CONSOLA VIDEOJUEGOS	AC	1	36,0	1,00	0,04	1,08	13,14	\$467,72	\$5.690,54	
CARGADOR CELULAR	AC	4	10,0	8,00	0,32	9,60	116,80	\$4.157,47	\$50.582,58	
NEVERA 447 lts	DC	1	110,0	24,00	2,64	79,20	963,60	\$34.299,14	\$417.306,25	
LAVADORA	AC	1	750,0	0,10	0,08	2,25	27,38	\$974,41	\$11.855,29	
LICUADORA	AC	1	400,0	0,05	0,02	0,60	7,30	\$259,84	\$3.161,41	
VENTILADOR	AC	1	50,0	0,00	0,00	0,00	0,00	\$0,00	\$0,00	
AIRE ACONDICIONADO	AC	1	800,0	0,00	0,00	0,00	0,00	\$0,00	\$0,00	

Tabla 14. Total de consumo de energía y costos de una vivienda. Fuente: Elaboración propia

En proyectos multifamiliares es usual que, debido al gran número de viviendas frente a la escasa área de cubierta, el sistema de energía renovable cubra una pequeña parte de la demanda de energía de las viviendas. Por tanto, una alternativa es que el sistema cubra la demanda de energía de las zonas comunes internas del edificio, el cual se caracteriza por

<sup>78</sup> Los consumos por electrodoméstico fueron tomados inicialmente del documento "Uso inteligente de la energía eléctrica" de la EPM del año 2012.

[https://www.epm.com.co/site/Portals/2/documentos/banco\\_de\\_recomendaciones\\_uso\\_inteligente\\_energia\\_electricamarzo\\_27.pdf](https://www.epm.com.co/site/Portals/2/documentos/banco_de_recomendaciones_uso_inteligente_energia_electricamarzo_27.pdf). Sin embargo, en el proceso se cambiaron varios valores de potencia de electrodomésticos según páginas web de venta de productos para el hogar, pues se evidenciaba que estos valores se han reducido considerablemente en los últimos años en busca de mayor eficiencia energética.

contemplar la iluminación artificial de los pasillos, equipos ocasionales de limpieza de los mismos a través de tomas monofásicas, y el/los ascensores.

Por ello, se ha realizado adicionalmente el perfil de consumo de energía de las zonas comunes internas del prototipo, donde el mayor consumo se da en horas pico por la entrada y salida de los habitantes, además de la iluminación nocturna. En el prototipo existen dos ascensores y la iluminación artificial es requerida durante todo el día, pues la doble crujía no permite que los pasillos tengan iluminación natural; esto se traduce en un consumo mensual de 394,2 kWh, que representa 0,63 kWh/m<sup>2</sup> mes y 7,67 kWh/m<sup>2</sup> año; del total de energía demandada por el edificio, las zonas comunes representan el 1%. No se consideran zonas comunes externas, así que tampoco existe la posibilidad de ubicar equipos fuera del edificio.

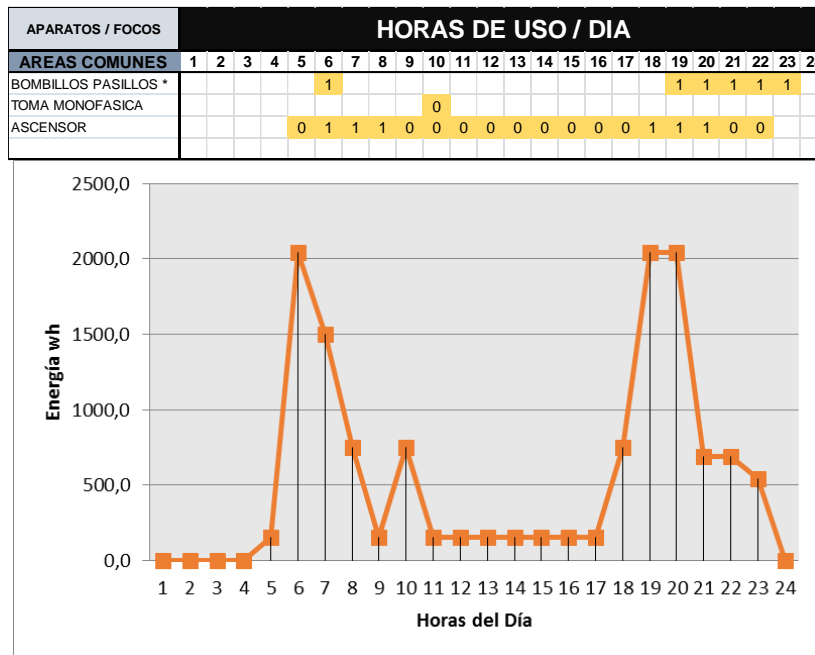


Gráfico 12. Horas de uso al día de equipos en zonas comunes interiores. Fuente: Elaboración propia

ZONAS COMUNES INTERNAS									
APARATOS / FOCOS	AC o DC?	No. APARATOS	POTENCIA watts	HORAS DE USO día	CONSUMO KW/día	CONSUMO KW/mes	CONSUMO KW/año	COSTO MES \$433,07	COSTO AÑO \$433,07
<b>AREAS COMUNES INTERNAS</b>					<b>13,14</b>	<b>394,20</b>	<b>4.796,10</b>	<b>\$170.716,19</b>	<b>\$2.077.047,03</b>
BOMBILLOS PASILLOS *	AC	60	9,0	6,00	3,24	97,20	1182,60	\$42.094,40	\$512.148,58
TOMA MONOFASICA	AC	15	400,0	0,10	0,60	18,00	219,00	\$7.795,26	\$94.842,33
ASCENSOR	DC	2	750,0	6,20	9,30	279,00	3394,50	\$120.826,53	\$1.470.056,12

Tabla 15. Total de consumo de energía y costos de las zonas comunes interiores. Fuente: Elaboración propia

Un aspecto importante a tener en cuenta, es que se tiene que contabilizar el consumo de los aparatos que trabajan con corriente alterna, pues esta debe ser convertida desde corriente continua mediante un inversor. Los equipos de generación de ER como la minieólica y los paneles solares fotovoltaicos proporcionan electricidad en corriente continua, y algunas metodologías de predimensionamiento tienen esto en cuenta.

En cuanto a los resultados arrojados por el software Design Builder versión 4.5.0.148 sobre consumo de energía, se realizó una primera simulación para todo un piso, que incluye los 8 apartamentos y pasillo de circulación (área común); la segunda simulación

se realizó en un solo apartamento, donde se escogió el número 03 por ser el más cercano en área al promedio.

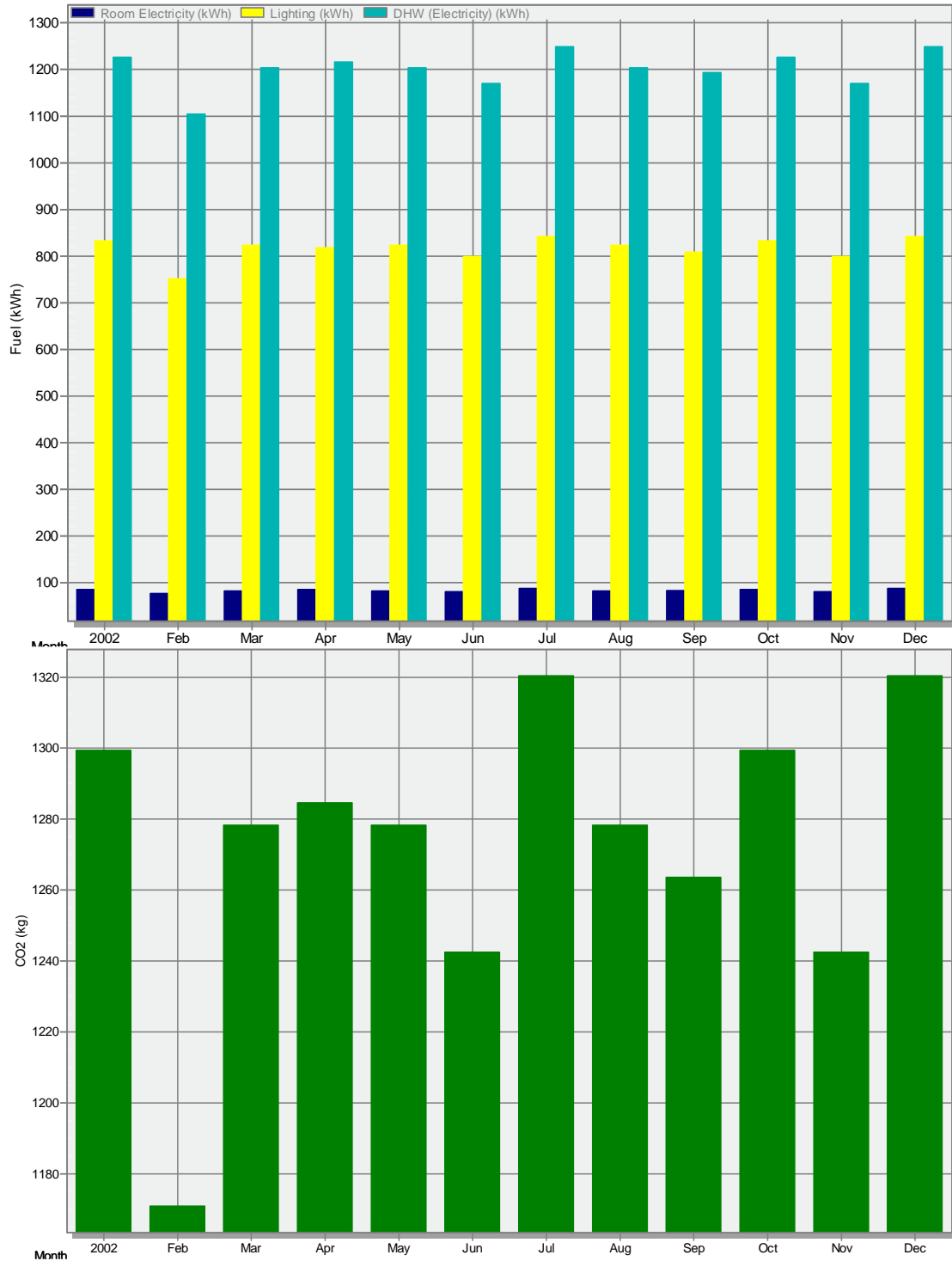


Gráfico 13. Consumo de energía eléctrica y emisiones de CO<sub>2</sub> mensuales para un piso completo. Fuente: Elaboración propia en el software Design Builder

La primera simulación de un solo piso completo (8 apartamentos), muestra un alto consumo de electricidad para ACS, aproximadamente de 14.413,87 kWh anual, y cuyo menor consumo es en febrero con 1.104,46 kWh, y el mayor en julio y diciembre con 1.249,06 kWh. En cuanto a iluminación artificial se consume 9.798,01 kWh donde en los mismos meses ya señalados se consume 751,11 kWh y 842,31 kWh respectivamente; el



total de energía consumida al año es de 25.212,12 kWh; el consumo eléctrico de las habitaciones tiene una demanda anual de 1.000,24 kWh con variaciones desde 76,60 kWh hasta 87,55 kWh. Finalmente, bajo una proporción mensual similar al consumo eléctrico, las emisiones de carbono operativo anuales son de 15.278,53 kgCO<sub>2</sub>, y carbono embebido total de 118.074,8 kgCO<sub>2</sub>eq.

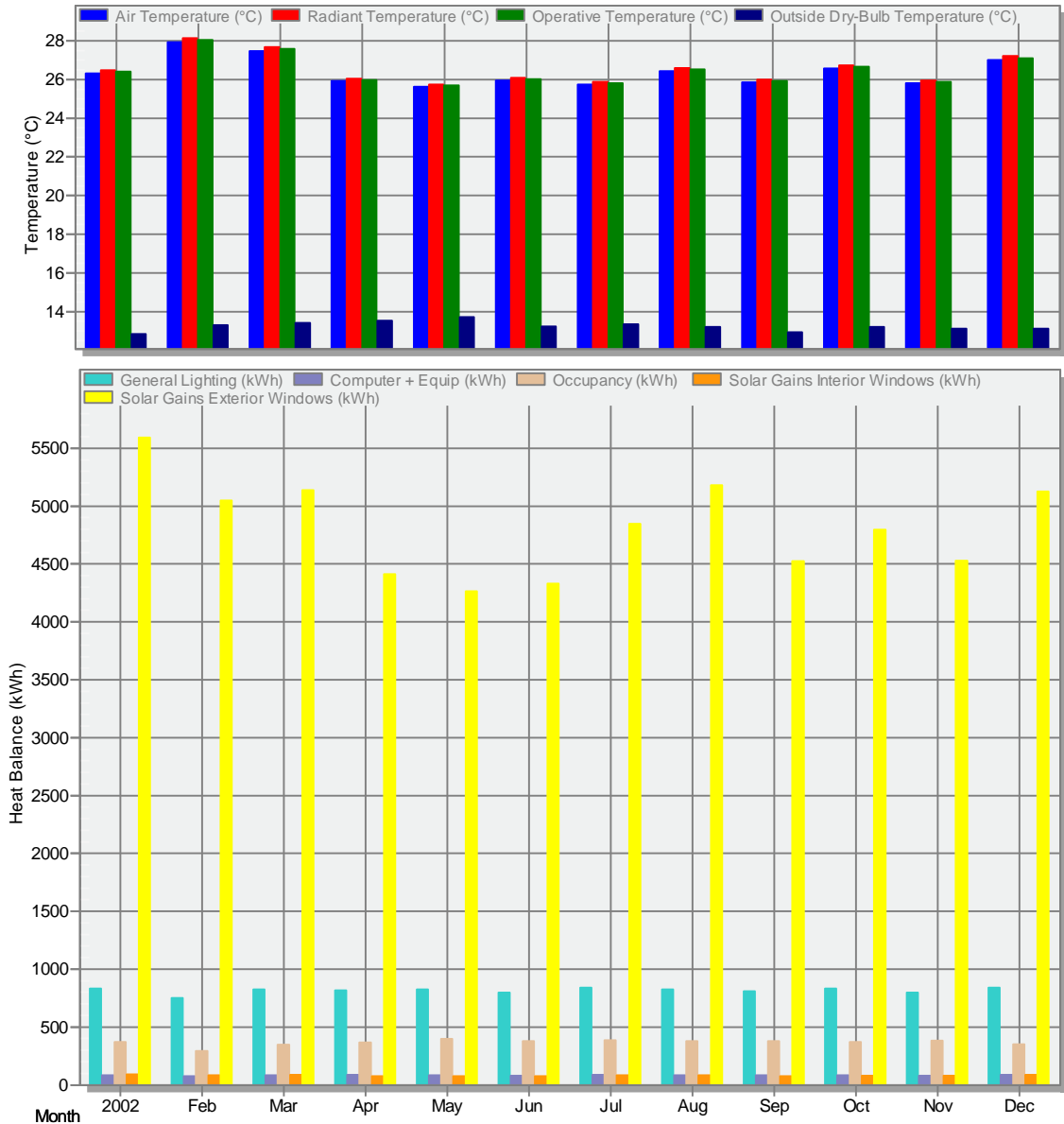


Gráfico 14. Temperatura de confort y ganancias internas mensuales en piso completo. Fuente: Elaboración propia en el software Design Builder

Como complemento, en cuanto a confort del piso completo, la temperatura operativa promedio a lo largo del año es de 26,46°C, registrando la mayor temperatura de 28,04°C en febrero y la menor de 25,69°C en mayo; la humedad relativa anual es de 42,8%, presentando variaciones desde 38,6% hasta 46,1% en mayo. Esto se da gracias a unas ganancias internas que durante el año están representadas por ganancias solares por ventanas exteriores (78%), iluminación general (13%), ocupación (6%), computadores y equipos (1%), y ganancias por ventanas interiores (1%); dichas ganancias solares por ventanas exteriores obedecen a la radiación solar y temperatura exterior, presentando la

mayor en enero y la menor en mayo. Las renovaciones de aire son de 0,23 por hora, que es casi la mitad según lo recomendado por el estándar Ashrae 62.1.

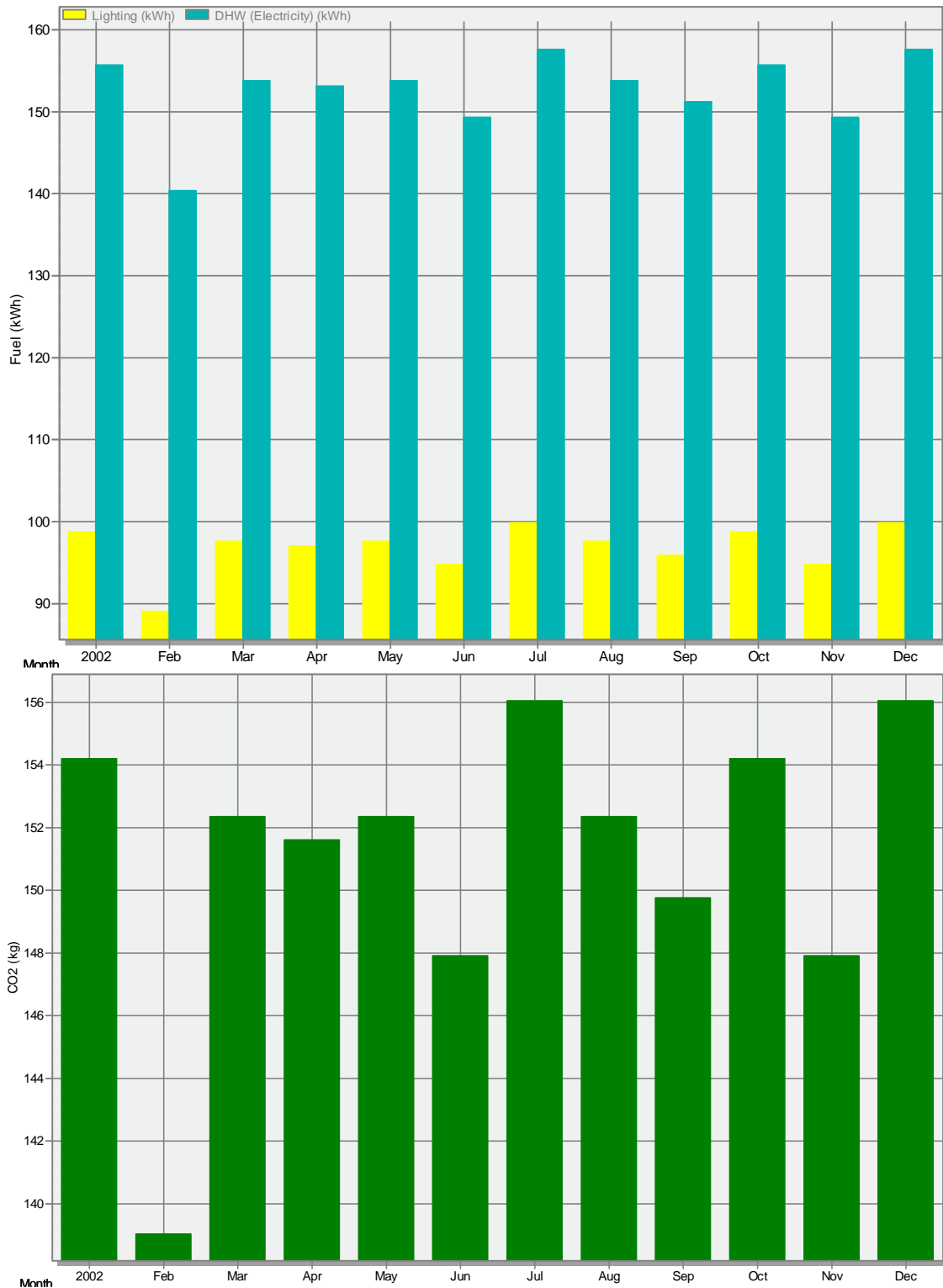


Gráfico 15. Consumo de energía eléctrica y emisiones de CO<sub>2</sub> mensuales en un apartamento. Fuente: Elaboración propia en el software Design Builder

La segunda simulación aplicada en un solo apartamento, de manera similar al piso completo muestra un alto consumo de electricidad para ACS, aproximadamente de 1.831,4 kWh anual, y cuyo menor consumo es en febrero con 140,39 kWh, y el mayor en

julio y diciembre con 157,62 kWh. En cuanto a iluminación artificial se consume 1.161,64 kWh donde en los mismos meses ya señalados se consume 89,05 kWh y 99,89 kWh respectivamente; el total de energía consumida al año es de 2.993,04 kWh. Finalmente, bajo una proporción mensual similar al consumo eléctrico, las emisiones de carbono operativo anuales son de 1.813,78 kgCO<sub>2</sub>, y carbono embebido total de 14.207,4 kgCO<sub>2</sub>eq.

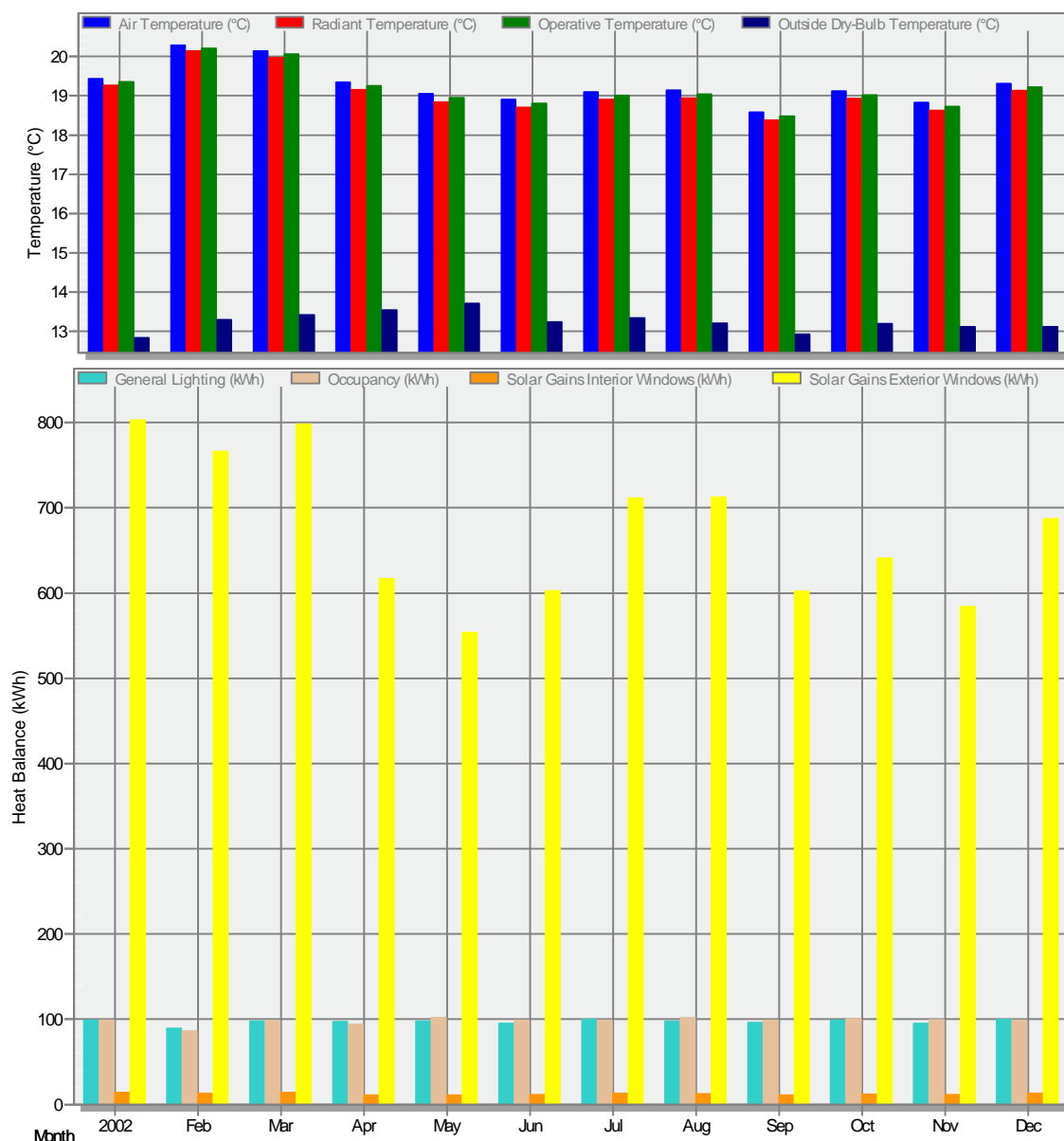


Gráfico 16. Temperatura de confort y ganancias internas mensuales en un apartamento. Fuente: Elaboración propia en el software Design Builder

Como complemento en cuanto a confort del apartamento, la temperatura operativa promedio a lo largo del año es de 19,17°C, registrando la mayor temperatura de 20,21°C en febrero y la menor de 18,47°C en septiembre; la humedad relativa anual es de 68%, presentando variaciones desde 63,41% hasta 71,32% en mayo. Esto se da gracias a unas ganancias internas que durante el año están representadas por ganancias solares por ventanas exteriores (76%), iluminación general (11%), ocupación (11%), y ventanas interiores (1%). Dichas ganancias solares por ventanas obedecen a la radiación solar y temperatura exterior, presentando la mayor en enero y la menor en mayo. Las

renovaciones de aire son de 0,19 por hora, que es menos de la mitad según lo recomendado por el estándar Ashrae 62.1.

Al comparar los resultados (Tabla 16) de consumo de energía del apartamento entre la simulación en Design Builder y el perfil de consumo realizado con cada equipo de uso cotidiano (Corpoema, 2012), es notable que el valor anual de este es un 35% mayor, frente a la plataforma de promedios de consumo de servicios públicos SUI con datos de 2012 es 58% mayor, y al 2019 es 31% mayor. Del valor proporcionado por la simulación en un apartamento, es evidente el protagonismo que tiene el agua caliente para uso doméstico, el cual es también 3 veces mayor que en el perfil de consumo. Por su parte, la iluminación artificial es 4,21 veces mayor. Finalmente, respecto a los cálculos basados en consumos para un apartamento tipo en el prototipo experimental de esta investigación referenciados en la Tabla 14, la simulación por software es 6% mayor.

<b>Fuente</b>	<b>Promedio consumo kWh año</b>
Corpoema, 2012	1.956
SUI 2012	1.257,24
SUI 2019	2.061
Design Builder	2.993,04
El autor (Tabla 14)	2.798,64

Tabla 16. Promedios de consumo eléctrico anuales de una vivienda por diferentes fuentes. Fuente: Elaboración propia.

Esto se puede explicar tal vez, en los datos de potencia de los equipos de consumo que incorpora el software, seguramente altos, pues como se evidenció anteriormente, estos valores cambian permanentemente reduciendo su demanda, especialmente los de iluminación. También es cierto que los datos están basados en los promedios de consumo de energía de países como el Reino Unido (país de origen del software). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, los datos de Corpoema y la plataforma SUI deben compararse con precaución porque las cifras no se exponen en m<sup>2</sup> y promedian consumos por residencia según amplias regiones del país. Debido a que los datos de perfil de consumo desarrollados por esta investigación han sido contrastados con viviendas reales, y que poseen una alta trazabilidad y detalle, se utilizarán estos para estimar la demanda total y los requerimientos de los equipos de ER, ya que son cercanos a los cálculos del software, y omitiendo los valores proporcionados por las demás fuentes.

Lo anterior da cumplimiento al Objetivo específico 3 (OE3), que comprende el “establecer un conjunto de operaciones conducentes a la evaluación de los comportamientos de demanda energética operativa y de energía embebida en un prototipo de estudio a partir de su diagnóstico [...] para determinar su perfil de demanda y cuantificar sus emisiones”. Es claro que aún falta la evaluación de la energía embebida, la cual será desarrollada en el capítulo de resultados.

#### **5.3.4. Cantidades de materiales e inventario**

Con base en la planimetría del edificio (Anexo 5), el predimensionado de cimentación, el sistema constructivo adoptado, y el diseño de redes eléctricas, gas, contraincendio, agua

potable e hidrosanitarias, sobre la planta tipo, se calcularon las cantidades y especificaciones de los diferentes materiales y actividades requeridos para el proyecto, apoyado con memorias de cálculo de los diferentes elementos. La lista de materiales con especificaciones se encuentra en el Anexo 7.

Una vez se cuenta con dichas cantidades de materiales, se procede a hallar los volúmenes, sus densidades y finalmente su peso; así mismo, se clasifican en diferentes categorías. Se ha establecido una categoría “principal” que corresponde a compuestos generales del edificio según su peso para presentarla en un gráfico requerido por la PCR CPC531 2014 sobre informe de análisis de ciclo de vida para edificios (Gráfico 17); una categoría “secundaria” se ha implementado para clasificar los datos según el material. El peso total del edificio es de 13.658,67 toneladas, y recordemos que el área total construida es de 9.762,0 m<sup>2</sup>.

De acuerdo con las categorías principales de clasificación, presentada en la Tabla 17 según su peso en Kg/m<sup>2</sup>, podemos apreciar que los componentes con mayor peso e impacto en el edificio es el movimiento de tierras y la excavación (28%) necesarias para la cimentación, la cual también representa una gran magnitud (33%), la estructura (23%), y un poco más lejos pero también representativo, los revestimientos (11%). Si bien el peso de los equipos de energía renovable no constituye un elemento representativo y que podría estar integrado dentro del componente “Eléctricos y electrónicos”, se ha separado y demarcado dada su importancia para esta investigación.

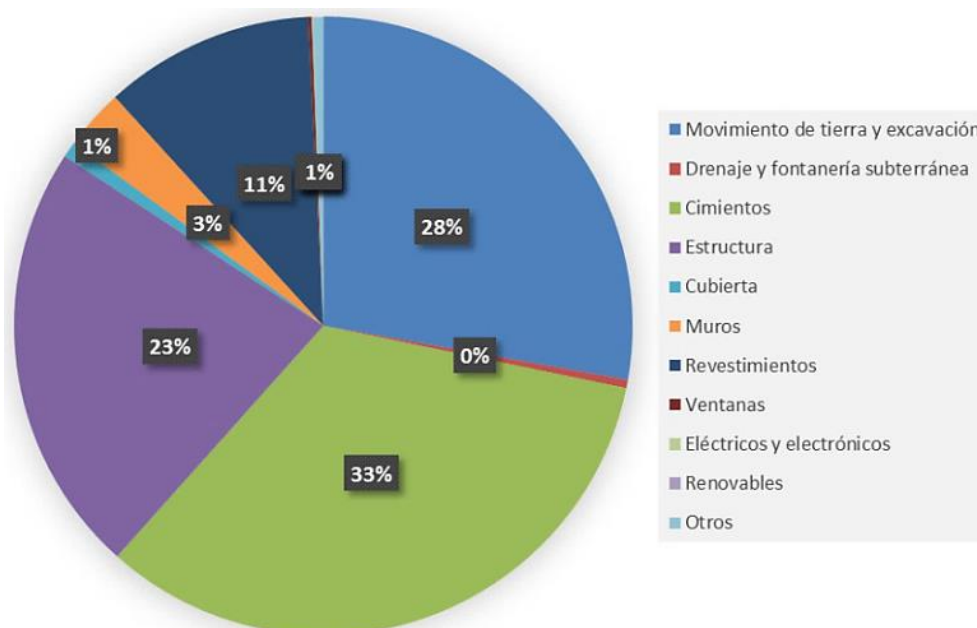


Gráfico 17. Descripción del uso de materiales en el edificio en peso (%), por categoría de componentes.  
Fuente: Elaboración propia

CATEGORIA	CANTIDAD	UN	%
Movimiento de tierra y excavación	388,91	Kg/m <sup>2</sup>	28
Drenaje y fontanería subterránea	6,10	Kg/m <sup>2</sup>	0
Cimientos	467,05	Kg/m <sup>2</sup>	33
Estructura	316,68	Kg/m <sup>2</sup>	23
Cubierta	11,32	Kg/m <sup>2</sup>	1
Muros	44,58	Kg/m <sup>2</sup>	3
Revestimientos	153,34	Kg/m <sup>2</sup>	11

Ventanas	2,79	Kg/m2	0
Eléctricos y electrónicos	0,78	Kg/m2	0
<b>Renovables</b>	<b>0,11</b>	<b>Kg/m2</b>	<b>0</b>
Otros	7,49	Kg/m2	1

Tabla 17. Cantidad de materiales por m2 según categoría principal de clasificación. Fuente: Elaboración propia.

SUBCATEGORIAS	t	%	kg/m <sup>2</sup>
<b>Acero refuerzo</b>	<b>382,88</b>	<b>2,8%</b>	<b>39,2</b>
Aluminio	0,71	0,0%	0,1
Aparatos gas	0,08	0,0%	0,0
Aparatos drenaje	23,99	0,2%	2,5
Aparatos eléctricos	1,41	0,0%	0,1
Ascensor	4,60	0,0%	0,5
Cerramiento	0,53	0,0%	0,1
Cielorraso	85,05	0,6%	8,7
<b>Concreto 3000 psi</b>	<b>6.680,03</b>	<b>48,9%</b>	<b>684,3</b>
Contenedor	20,32	0,1%	2,1
Contraincendio gabinete	0,40	0,0%	0,0
Enchape	103,74	0,8%	10,6
Eólica	0,00	0,0%	0,0
Estuco	62,29	0,5%	6,4
<b>Excavación manual</b>	<b>1.309,70</b>	<b>9,6%</b>	<b>134,2</b>
<b>Excavación mecánica</b>	<b>2.486,81</b>	<b>18,2%</b>	<b>254,7</b>
Formaleta	83,13	0,6%	8,5
Fotovoltaica	1,03	0,0%	0,1
Impermeabilización	8,73	0,1%	0,9
<b>Mampostería</b>	<b>458,82</b>	<b>3,4%</b>	<b>47,0</b>
<b>Mortero y pañete (enlucido) 1:3</b>	<b>1.253,20</b>	<b>9,2%</b>	<b>128,4</b>
Pintura	17,34	0,1%	1,8
Piso cerámica	26,93	0,2%	2,8
Piso madera	50,10	0,4%	5,1
Puerta madera	4,87	0,0%	0,5
Puerta metálica	3,17	0,0%	0,3
<b>Recebo (zahorra)</b>	<b>544,29</b>	<b>4,0%</b>	<b>55,8</b>
Tubería acero carbón	1,21	0,0%	0,1
Tubería aislamiento	0,92	0,0%	0,1
Tubería cable eléctrico	3,03	0,0%	0,3
Tubería cobre	2,12	0,0%	0,2
Tubería polietileno gas	0,01	0,0%	0,0
Tubería pvc	10,52	0,1%	1,1
Vidrio	26,54	0,2%	2,7

Tabla 18. Cantidad de materiales según categoría secundaria de clasificación. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la Tabla 18 expone las categorías secundarias aplicadas para diferenciar los materiales según su peso, porcentaje y proporción según los m<sup>2</sup> construidos. La PCR CPC531 2014 define un criterio de corte del 1%, que en este proyecto son 136,59 toneladas; eso quiere decir, que los materiales por debajo de ese porcentaje deben ser referenciados pero pueden ser omitidos dentro de un análisis de ciclo de vida riguroso de los componentes del edificio. Los materiales por encima de ese porcentaje han sido demarcados pues se les debe hacer el correspondiente inventario de ciclo de vida y posterior análisis para sumar sus impactos y proporcionar el perfil ambiental del edificio. Estos materiales son las barras de acero para refuerzo (forjados), la mampostería de arcilla, el recebo (zahorra) como elemento de relleno en cimentaciones, mortero y pañete con mezcla de 1:3 (cemento, arena y agua), y el concreto (hormigón) que representa casi la mitad del peso total del edificio (49%).

<b>A1-A3 Suministro, Transporte, Fabricación</b>			
	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>MODELO SIMAPRO</b>
ENTRADA	0,2737	m3	Concrete, 20MPa {RoW}  concrete production 20MPa, RNA only   Cut-off, U
ENTRADA	0,0392	t	Reinforcing steel {RoW}  production   Cut-off, U
ENTRADA	0,0470	t	Clay brick {RoW}  production   Cut-off, U
ENTRADA	0,0558	t	Gravel, round {RoW}  gravel and sand quarry operation   Cut-off, U
ENTRADA	0,0001	p	Intermodal shipping container, 20-foot {GLO}  production   Cut-off, U
ENTRADA	0,0307	t	Cement mortar {RoW}  production   Cut-off, U
ENTRADA	0,1263	t	Sand {RoW}  gravel and quarry operation   Cut-off, U
ENTRADA	0,0085	t	Steel, unalloyed {RoW}  steel production, converter, unalloyed   Cut-off, U
ENTRADA	0,0018	t	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RoW}  acrylic varnish production, product in 87.5% solution state
ENTRADA	0,0066	m3	Laminated timber element, transversally prestressed, for outdoor use {RoW}  laminated timber element production, for
<b>A4-A5 Etapa de proceso de construcción</b>			
<b>A4 Transporte hasta y dentro de la obra</b>			
ENTRADA	38,3799	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cut-off,
ENTRADA	0,9092	tkm	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}  processing   Cut-off, U
<b>A5 Instalación en el edificio</b>			
ENTRADA	0,0525	hr	Machine operation, diesel, < 18.64 kW, generators {GLO}  machine operation, diesel, < 18.64 kW, generators   Cut-off,
ENTRADA	681,9480	kg	Tap water {RoW}  tap water production, underground water with chemical treatment   Cut-off, U
ENTRADA	196,6174	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cut-off,
ENTRADA	0,7815	Kwh	Electricity, low voltage {CO}  electricity voltage transformation from medium to low voltage   Cut-off, U
SALIDA	0,1285	kg	Carbon dioxide
SALIDA	0,0000	kg	TSP
SALIDA	0,0000	kg	Particulates, < 10 um
SALIDA	0,0000	kg	Particulates, < 2.5 um
SALIDA	198,4878	kg	Particulates, > 10 um
SALIDA	0,0282	t	Waste wood, untreated {GLO}  treatment of waste wood, untreated, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm)
SALIDA	0,0153	t	Scrap steel {RoW}  treatment of, inert material landfill   Cut-off, U
SALIDA	0,0230	t	Waste plastic, mixture {GLO}  treatment of waste plastic, mixture, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm)
SALIDA	0,0077	t	Waste concrete gravel {RoW}  treatment of waste concrete gravel, collection for final disposal   Cut-off, U
SALIDA	0,0415	t	Waste reinforced concrete {RoW}  market for waste reinforced concrete   Cut-off, U
SALIDA	0,1116	t	Waste brick {RoW}  treatment of waste brick, collection for final disposal   Cut-off, U
SALIDA	0,0068	t	Hazardous waste, for incineration {RoW}  treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration   Cut-off, U
SALIDA	0,0104	t	Municipal solid waste {GLO}  treatment of municipal solid waste, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm)
SALIDA	0,3889	t	Inert waste, for final disposal {RoW}  treatment of inert waste, inert material landfill   Cut-off, U
SALIDA	0,0001	p	Used intermodal shipping container, 20-foot {GLO}  treatment of   Cut-off, U
SALIDA	0,0085	t	Steel and iron (waste treatment) {GLO}  recycling of steel and iron   Cut-off, U
<b>B1-B7 Etapa de uso</b>			
<b>B1 Uso</b>			
<b>B2 Mantenimiento</b>			
ENTRADA	5,125,26	kg	Tap water {RoW}  tap water production, underground water with chemical treatment   Cut-off, U
ENTRADA	1,0659	kg	Soap {RoW}  production   Cut-off, U
ENTRADA	0,0107	t	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RoW}  acrylic varnish production, product in 87.5% solution state
SALIDA	4,1125	m3	Wastewater, from residence {RoW}  treatment of, capacity 1.1E10/year   Cut-off, U
<b>B3 Reparación</b>			
<b>B4 Reemplazo</b>			
ENTRADA	0,4016	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cut-off,
ENTRADA	0,0072	m3	Laminated timber element, transversally prestressed, for outdoor use {RoW}  laminated timber element production, for
ENTRADA	0,0028	t	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RoW}  acrylic varnish production, product in 87.5% solution state
ENTRADA	1,8183	tkm	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}  processing   Cut-off, U
SALIDA	0,0056	t	Waste wood, untreated {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U
<b>B5 Rehabilitación</b>			
<b>B6 Uso operativo de energía</b>			
ENTRADA	510,8000	Kwh	Electricity, low voltage {CO}  electricity voltage transformation from medium to low voltage   Cut-off, U
<b>B7 Uso operativo de agua</b>			
ENTRADA	111,640,78	kg	Tap water {RoW}  tap water production, underground water with chemical treatment   Cut-off, U
SALIDA	89,5814	m3	Wastewater, from residence {RoW}  treatment of, capacity 1.1E10/year   Cut-off, U

<b>C1-C4 Etapa de fin de vida</b>			
<b>C1 Deconstrucción, demolición</b>			
ENTRADA	0,0146	hr	Machine operation, diesel, < 18.64 kW, generators {GLO}  machine operation, diesel, < 18.64 kW, generators   Cut-off, U
SALIDA	0,0000	kg	TSP
SALIDA	0,0000	kg	Particulates, < 10 um
SALIDA	0,0000	kg	Particulates, < 2.5 um
<b>C2 Transporte del producto desechado hasta el lugar de procesado</b>			
ENTRADA	115,0270	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cut-off, U
<b>C3 Procesado de residuos para su reutilización, recuperación y/o reciclaje</b>			
<b>C4 Vertido (eliminación), pre-tratamiento físico y gestión</b>			
SALIDA	0,3041	t	Waste reinforced concrete {RoW}  market for waste reinforced concrete   Cut-off, U
SALIDA	0,0300	t	Scrap steel {RoW}  treatment of, inert material landfill   Cut-off, U
SALIDA	0,0470	t	Waste brick {RoW}  treatment of waste brick, collection for final disposal   Cut-off, U
SALIDA	0,0558	t	Waste concrete gravel {RoW}  treatment of waste concrete gravel, collection for final disposal   Cut-off, U
SALIDA	0,1284	t	Waste cement in concrete and mortar {RoW}  treatment of, collection for final disposal   Cut-off, U
SALIDA	0,0018	t	Waste paint {RoW}  treatment of, inert material landfill   Cut-off, U
SALIDA	0,0051	t	Waste wood, untreated {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U
SALIDA	0,1075	t	Municipal solid waste {GLO}  treatment of municipal solid waste, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm)   Cut-off, U
SALIDA	0,0614	t	Hazardous waste, for incineration {RoW}  treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration   Cut-off, U

Tabla 19. Inventario de ciclo de vida del prototipo de edificio residencial. Fuente: Elaboración propia

Como parte del inventario, no solo se debe realizar un ACV de los principales materiales implicados en el edificio, sino que se deben calcular las actividades de obra como maquinaria (en excavación, movimiento de materiales y otras actividades), generación de RCD, los trayectos de transporte, y energía y agua consumida. Así mismo, los remplazos de componentes, mantenimientos y consumos de agua y energía durante el uso del edificio (operativos), y finalmente, maquinaria, generación de RCD, trayectos de transporte, y energía consumida en la demolición del edificio al final de su vida útil después de 50 años, que es el tiempo estandarizado por la CPC531. Esta información debe estar organizada según los límites del sistema y etapas por los códigos mencionados anteriormente (Ilustración 21).

<b>B4 Reemplazo</b>				
ENTRADA	Mini eólica	0,0002	p	Wind turbine, 5kW, onshore {RoW}  mini wind turbine construction, 5kW, onshore   Cut-off, U
ENTRADA	Fotovoltaica	0,0091	m2	Photovoltaic panel, multi-Si wafer {RoW}  production   Cut-off, U
<b>B6 Uso operativo de energía</b>				
EVITADO	Fotovoltaica	24,5652	Kwh	Electricity, low voltage {CO}  electricity voltage transformation from medium to low voltage   Cut-off, U
EVITADO	Mini eólica	24,5652	Kwh	Electricity, low voltage {CO}  electricity voltage transformation from medium to low voltage   Cut-off, U
ENTRADA	Fotovoltaica	24,5652	Kwh	Electricity, low voltage {RoW}  electricity production, photovoltaic, 3kWp flat-roof installation, multi-Si   Cut-off, U
ENTRADA	Mini eólica	24,5652	Kwh	Electricity, low voltage {CO}  electricity production, wind, 5kw mini turbine, onshore   Cut-off, U
<b>C4 Vertido (eliminación), pre-tratamiento físico y gestión</b>				
SALIDA	Fotovoltaica	0,0005	kg	Waste aluminium {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U
SALIDA	Fotovoltaica	0,0038	kg	Slag from metallurgical grade silicon production {RoW}  treatment of, inert material landfill   Cut-off, U
SALIDA	Mini eólica	0,0090	kg	Waste plastic, mixture {GLO}  treatment of waste plastic, mixture, unsanitary landfill, moist infiltration class (C)
SALIDA	Mini eólica	0,0559	kg	Scrap steel {RoW}  treatment of, inert material landfill   Cut-off, U
<b>D Reutilización/recuperación/ potencial de reciclaje</b>				
EVITADO	Fotovoltaica	47,6564	Kwh	Electricity, low voltage {CO}  electricity voltage transformation from medium to low voltage   Cut-off, U
EVITADO	Mini eólica	3,0622	Kwh	Electricity, low voltage {CO}  electricity voltage transformation from medium to low voltage   Cut-off, U
ENTRADA	Fotovoltaica	47,6564	Kwh	Electricity, low voltage {RoW}  electricity production, photovoltaic, 3kWp flat-roof installation, multi-Si   Cut-off, U
ENTRADA	Mini eólica	3,0622	Kwh	Electricity, low voltage {CO}  electricity production, wind, 5kw mini turbine, onshore   Cut-off, U

Tabla 20. Datasets aplicados por etapa según el caso, Mini eólica o Fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia

Se ha asumido una distancia de 20 km para realizar los cálculos de obtención de materiales y maquinaria que incluye el transporte de los materiales desde su puesto de



venta (almacén o depósito) hasta la obra, el transporte ida y vuelta de la maquinaria necesaria (como excavadora, autobomba de concreto, cargadora, torre grúa, mezcladora de cemento), y el transporte fuera de obra de los RCD generados en obra, y posteriormente, en la demolición hacia el vertedero, cuya distancia asumida es de 40 km, entre los que se encuentran residuos de naturaleza no pétreo, de naturaleza pétreo, potencialmente peligrosos, y tierra excavada<sup>79</sup>.

Para las etapas de uso del edificio se ha calculado el consumo de energía y agua operativa, incluyendo agua caliente, iluminación, zonas comunes internas y renovables, así como el mantenimiento con el lavado de enchapes (agua y jabón), pintura interior, y acciones de remplazo de equipos por el fin de su vida útil como bombillas LED, pisos de madera, equipos de energía renovable, e impermeabilización de fachadas y de cubierta.

El inventario final mostrado en la Tabla 19 hace referencia a los datos calculados de las actividades mencionadas en todo el ciclo de vida del edificio y que son la base para su registro en el software de ACV, con el fin de analizar los diferentes impactos ambientales y consumo de recursos. Vale la pena resaltar que esta información inicia desde la etapa A4 con el transporte hasta la obra de los materiales, ya que las etapas A1, A2 y A3 se componen de los impactos asociados a los materiales del edificio, resaltados en la Tabla 18.

Como se verá más adelante, se definirán dos escenarios posibles adicionales para la incorporación de ER en el prototipo experimental, lo cual requiere que sea modificado, para cada escenario correspondientemente, el inventario de las etapas B4 (al remplazar las tecnologías de ER al finalizar su vida útil), B6 (al incorporar el aporte de generación de electricidad mediante las tecnologías), C4 (al agregar residuos producto de las tecnologías en la demolición del edificio), y D que no aparece en el escenario sin renovables ya que solo tiene en cuenta la electricidad excedente generada que se entrega a la red pública, y que se encuentra fuera de los límites del sistema de estudio (el edificio). En la Tabla 20 se detalla cuáles son los dataset agregados en las mencionadas etapas según el escenario.

En un ejercicio simplificado de impactos para las etapas A1-A3, que implican el suministro de materias primas, transporte y proceso de fabricación de los principales materiales del edificio, se han utilizado promedios de impactos (Tabla 21) a partir de referentes tomados de hasta 3 diferentes declaraciones ambientales de producto, tomadas de diferentes plataformas:

- <https://www.environdec.com>, <https://www.eco-platform.org>
- Ecoinvent 3.5, y datos sobre carbono y energía embebida de autores como Muñoz (2013), Zabalza (2010), Ecoingeniería (2012)
- Base de datos ICE v3.0 (<https://circularecology.com/>) y Bedec del ITeC (<https://itec.es/metabase/productos-sostenibles/14/m/m/#>).

---

<sup>79</sup> Para la estimación de RCD de obra y demolición, se ha utilizado el archivo Excel para gestión de residuos de construcción realizado por el Arquitecto Oscar Redondo Rivera que se puede descargar de la web <https://residuos.webnode.es/residuos/residuos-industriales/residuos-construccion/programa-para-calcular-volu/>, y contrastado con la aplicación web EEH Aurrezten en la web <http://www.ihobe.eus>.

MATERIALES A1 - A3	Calentamiento global	Energía embebida	Agotamiento ozono	Acidificación	Eutrofización	Smog fotoquímico	Agotamiento abiótico	Agotamiento abiótico fósil
Acero refuerzo	765.895,62	9.316.649,90	0,0560	5.185,5491	764,5877	427,7645	0,9536	8.553.845,72
Concreto 3000 psi	658.718,65	3.854.127,10	0,0597	2.260,6848	514,6834	107,6866	0,7761	3.720.350,09
Mampostería	116.462,69	1.347.082,59	0,0072	871,9790	62,5679	43,3216	0,1119	1.196.808,48
Recebo	3.683,71	102.326,45	0,0005	11,5208	6,3851	0,5650	0,0060	44.157,89
<i>Mortero y pañete 1:3</i>								
Cemento	228.308,40	1.176.879,63	0,0075	322,8069	110,2799	16,4689	0,0391	729.480,77
Arena	6.167,08	123.341,66	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
<b>TOTAL Kg SEGÚN UNIDAD</b>	<b>1.779.236,17</b>	<b>15.920.407,32</b>	<b>0,1309</b>	<b>8.652,5406</b>	<b>1.458,5040</b>	<b>595,8065</b>	<b>1,8867</b>	<b>14.244.642,9508</b>

Tabla 21. Emisiones en Kg según unidad por cada categoría de impacto. Fuente: Elaboración propia

Esto se debe a que se trata de un proyecto residencial como prototipo sin una localización específica, y la gran demanda de tiempo que requiere el realizar un ACV completo de cada material.

Importante tener en cuenta, que la diferencia entre el edificio sin energías renovables y los dos escenarios que incluyen equipos fotovoltaicos y minieólica (explicados más adelante), es que se incluyen los equipos de ER y energía generada en la etapa B6, los equipos remplazados al final de su vida útil en la etapa B4 (un remplazo para los equipos fotovoltaicos y dos remplazos en el caso de la turbina minieólica), y en la etapa C4 se agregan los residuos adicionales generados por estos equipos una vez el edificio es demolido (se han tomado los dos materiales más representativos en masa y/o importancia).

## 5.4 INCORPORACION DE SISTEMAS DE ENERGIA RENOVABLE

A continuación, se desarrollan los cálculos de acuerdo con: las metodologías de predimensionado para cada tecnología de ER de pequeña escala explicadas anteriormente; las características climáticas de la ciudad de Bogotá; las posibilidades de la cubierta con su área útil; y teniendo en cuenta que no se hace un análisis económico profundo porque se busca satisfacer la mayor demanda posible entre varias opciones. Para calcular el retorno de la inversión (amortización) se hizo un cálculo de costo total de la inversión incluyendo: gastos de diseño; balance del sistema; e instalación (que suma \$5.000.000 COP o 1.140,8 €); más gastos anuales de mantenimiento (\$600.000 COP año o 137 €) y comercialización de la energía (9,6% del valor de la generación). No se tuvo en cuenta costos de transporte ni de IVA, ya que varias de estas tecnologías están exentas.

La Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, que forma parte de la UPME en Colombia, cuenta con documentos y presentaciones de acceso público sobre el marco regulatorio de la Resolución CREG 30 de 2018 y otros relacionados con autogeneración a pequeña escala y generación distribuida<sup>80</sup>. En ellos se menciona que la autogeneración está compuesta por una parte donde se produce solo lo necesario para satisfacer la demanda, y otra que son excedentes para exportar con posibilidad de venta a la red.

En el marco de esta investigación, al desarrollar los cálculos frente a cada tecnología de ER se pudo evidenciar que era indispensable generar una comprobación, diferenciando los tipos de generación y de consumo, ya que tienen una incidencia definitiva en los cálculos de balance de abastecimiento y viabilidad económica, pues a partir de ellos se generan diferentes tarifas tanto para los kw consumidos, como los kw vendidos a la red. En la literatura consultada, estos tipos no se encuentran referenciados, por tanto, se propone su nombre y rasgos para cada uno de ellos, y se realiza el respectivo cálculo para la evaluación de su factibilidad en la edificación.

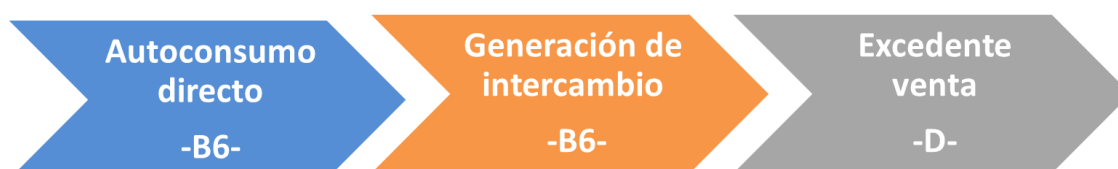


Gráfico 18. Tres tipos de generación / consumo para el balance de la energía por renovables. Fuente: Elaboración propia.

Existen tres tipos de generación/consumo de energía que requieren ser identificados para calcular el balance de los aportes por renovables (Gráfico 18): autoconsumo directo, generación de intercambio, y excedente para venta. El autoconsumo directo se refiere a la energía generada que es prácticamente consumida de inmediato, ya que el momento de generación es simultáneo al de consumo (por ejemplo, en horas de suficiente velocidad de viento para ser aprovechadas con mini turbinas eólicas, y esta se consume en labores domésticas de ese momento); para su cálculo se debe determinar la cantidad de radiación solar o de velocidad de viento durante las horas de demanda, o la demanda durante las horas de generación; si la cantidad de energía generada es menor a la demanda del

<sup>80</sup> <https://www.creg.gov.co/sectores-que-regulamos/energia-electrica/autogeneracion-pequena-escala-y-generacion-distribuida>

momento, toda es consumida y requiere de aportes adicionales de la red pública, sino, la diferencia se convierte en posible excedente.

Cuando en el momento de la generación de energía, esta es mayor que la demanda, esa porción adicional es inyectada en la red pública para un consumo posterior, para lo cual es “re inyectada” en el edificio en un momento diferente al de generación (por ejemplo, cuando la demanda se da en horas de la noche cuando no hay radiación solar que sea aprovechada por paneles fotovoltaicos, por lo que los excedentes generados durante el día son autoconsumidos luego de haber sido entregados a la red); a este tipo de consumo lo llamamos “generación de intercambio”, pues se trata tanto de un autoconsumo que será utilizado por el edificio de acuerdo con su demanda promedio, y al mismo tiempo son excedentes inyectados en la red que son utilizados posteriormente con posibilidad de ser vendidos en caso de no necesitarse por el edificio. Este modelo de crédito de energía llamado balance neto (o medición neta, o Net Metering) fue explicado anteriormente.

Los “excedentes para venta” es energía generada por renovables que superan la demanda estimada, por lo que constituyen una fuente de ingresos para los usuarios del edificio al ser vendida a la red pública a precio horario de bolsa de energía<sup>81</sup> correspondiente (para este ejercicio, se ha asumido en \$312,7 por kWh), teniendo en cuenta el descuento por pago de la tarifa de “Comercialización” de aproximadamente el 9,6%, establecido por el componente tarifario colombiano<sup>82</sup>.

Con base en los costos asociados a los cálculos de predimensionado, se tuvieron en cuenta los tres tipos de generación explicados (autoconsumo directo, generación de intercambio, y excedente para venta si aplica), teniendo en cuenta el incremento del valor de la energía debido a la inflación por año estimada en 3,7% y la reducción anual del desempeño de los equipos que González (2018: 92) estima en 0,5% anual. Finalmente, el aporte mensual recurrente por el servicio junto con los ahorros y/o ganancias de la generación sumaban en \$ hasta recuperar la inversión inicial de los equipos. La inversión contempla el número de aparatos según la tecnología, además de un inversor y un medidor bidireccional<sup>83</sup>, con excepción de los colectores solares. Estos valores son sumados o restados respectivamente a los ahorros anuales.

En el caso de los colectores solares, el ahorro de agua caliente proviene de prescindir del consumo de la ducha eléctrica. En cuanto a geotermia, Karunathilake et al (2019) mencionan que este sistema con bomba de calor es efectivo para calefacción en climas muy fríos; por otro lado, Moreno, López & Blessent (2020) mencionan que este sistema ha sido muy poco explorado en Colombia, al igual que su incorporación en edificaciones, incluyendo la poca documentación de los casos existentes; además, estos autores proporcionan un mapa con zonas de alto potencial en el país, que por lo general están asociados a zonas volcánicas donde se presentan grandes diferencias de temperatura entre

---

<sup>81</sup> No se trata de la misma tarifa por kw establecida por la red pública para el suministro, sino que es un valor variable de acuerdo al mercado energético presente en la bolsa de valores.

<sup>82</sup> El componente tarifario de prestación del servicio de energía al mes está compuesto por: Generación (G), Transmisión (T), Distribución (D), Comercialización (C), Perdidas reconocidas (PR), y Restricciones (R). Es decir, el valor de prestación del servicio público de electricidad está dividido por cada uno de estos componentes.

<sup>83</sup> En lugar de las baterías y regulador, ya que el número de baterías se incrementa más o menos cada 1.200 vatios de potencia instalada, mientras que el medidor bidireccional solo requiere de un aparato. Por tanto, se reducen los costos y complejidad del sistema.

el subsuelo y el exterior, y que no es el caso de Bogotá<sup>84</sup>. Por estos motivos, no se tendrá en cuenta la geotermia para el prototipo estudiado.

Las posibilidades de generación de ER y abastecimiento para los apartamentos y/o para las zonas comunes pone en evidencia la necesidad de identificar (a manera de propuesta) la existencia de diferentes esquemas de instalación (ver Ilustración 31). Según el alcance, que supone distintos impactos en los costos de inversión, las cantidades y dimensionado de los equipos será: Simple, Compartida, Dual, y Autónoma. Gracias al medidor bidireccional (medidor donde se congregan el flujo entrante y saliente), el flujo entrante, que es la electricidad que proviene de la red, y el flujo saliente que es la electricidad generada con ER, logran un mecanismo de apoyo para el abastecimiento energético del edificio. De estos esquemas, se puede inferir que el simple requiere menor cantidad de instalaciones y equipos, contrario al esquema autónomo.

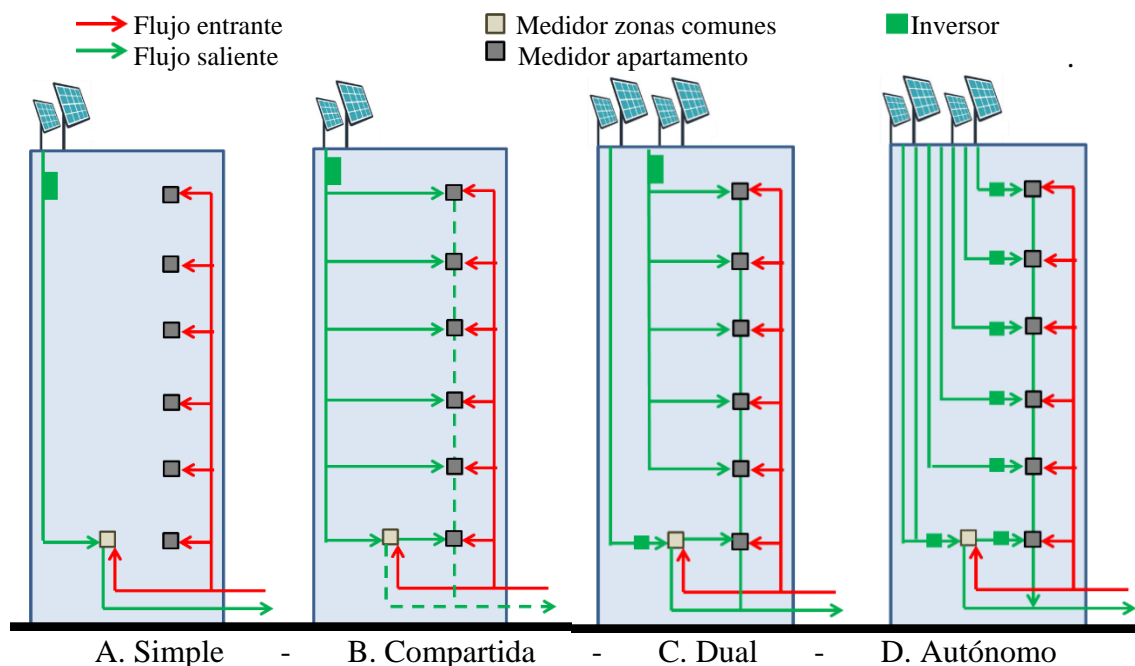


Ilustración 31. Esquemas de instalación para abastecimiento por ER. Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantean las siguientes posibilidades de aplicación por cada tecnología de ER en edificios:

#### 5.4.1. Paneles fotovoltaicos

La radiación solar en Bogotá varía entre los 3,57 kWh/m<sup>2</sup> mensual en mayo hasta 4,65 kWh/m<sup>2</sup> en diciembre; los cálculos realizados se basan en el valor más bajo para asegurar el abastecimiento de la demanda energética. En cuanto al factor de rendimiento del sistema, en la literatura se encuentran valores del 70% y 75%, siendo esta última la más común.

<sup>84</sup> Adicionalmente, se ha empleado la fórmula para el cálculo de la temperatura del terreno propuesta por Murguía (2018), encontrando que esta es 1,4 °C más elevada respecto al promedio de temperatura exterior en Bogotá. Se trata de una diferencia muy pequeña que seguramente no ofrece viabilidad a una instalación de geotermia.

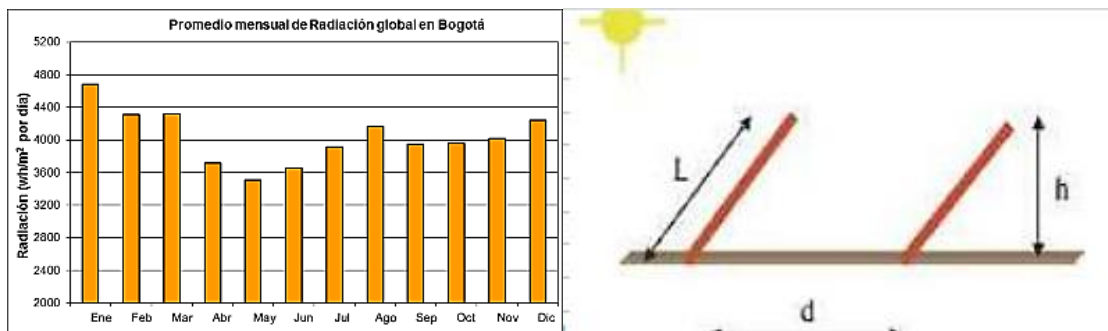


Ilustración 32. Promedio mensual de radiación en Bogotá y distancia entre paneles. Fuente: www.ideam.gov.co - C- Zeggaf, Itimad. 2015. Estudio de la autosuficiencia energética de una vivienda unifamiliar

POTENCIA DEL PANEL	320	Wp
RADIACIÓN GLOBAL (MES MÁS BAJO)	3,57	kWh/m <sup>2</sup>
FACTOR K	0,94	
CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA	1,00	
HSP o HSS	3,36	kWh/m <sup>2</sup>
BRILLO SOLAR	4,0	h/d
# DÍAS AL MES EVALUADOS	30	días
INCLINACIÓN PANELES	10	°
FACTOR DE RENDIMIENTO DEL SISTEMA	75	%

Tabla 22. Parámetros iniciales para el cálculo de paneles fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia

Los paneles deben estar orientados hacia el sur, y su inclinación varía alrededor de 6° a partir del valor de la latitud (Meléndez, 2017), que en Bogotá es de 4° (4°36'34"), sin embargo, los instaladores recomiendan una inclinación mínima de 10° para evitar la acumulación de polvo y agua porque disminuyen la eficiencia del panel. Con base a esta inclinación y a las dimensiones del panel, se puede calcular la distancia mínima entre paneles, ya que cuanto mayor es la inclinación, los módulos pueden reflejar sombra entre ellos y afectar la generación de energía; en este caso esa distancia es 0,14 m, pero se ha alternado con espacios de 0,5 m para permitir la circulación y el mantenimiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantean las siguientes posibilidades:

- Un porcentaje de cobertura de energía del 100% para la demanda de las zonas comunes a través de 16 paneles que generan 394,2 kWh mes, con un esquema de instalación simple. Esta opción deja abierta la posibilidad de ubicar bastantes paneles adicionales para generar excedentes de energía que se puedan vender a la red o al interior del edificio, usar la cubierta para otros propósitos (terraza común, agricultura urbana, etc.), o desarrollar un sistema híbrido con otra tecnología de ER que se ubique en este punto. El retorno de la inversión aproximada es de 7,6 años.
- Un porcentaje de cobertura de energía del 10,5% para la demanda de todos los apartamentos a través de 118 paneles que generan 2.850 kWh al mes, donde cada apartamento cuenta con su panel con un esquema de instalación autónomo. Hay que tener en cuenta que si cada apartamento cuenta con su panel, cada uno debe

tener un inversor y medidor bidireccional, teniendo una considerable repercusión en costos de instalación. El retorno de la inversión aproximada es de 15,8 años.

- c) Una combinación de los dos anteriores, donde existe un porcentaje de cobertura de energía del 10,5% para la demanda de todos los apartamentos a través de 118 paneles que generan 2.841 kWh al mes, donde cada apartamento cuenta con su panel (9,4 años); adicionalmente, se aumentan 16 paneles que generan 394,2 kWh mes para cubrir el 100% de la demanda de zonas comunes, con un total de 134 paneles, con un esquema de instalación dual; igualmente, cada apartamento debe tener un medidor bidireccional, pero solo dos inversores en total. El retorno de la inversión aproximada inicial es de 10,5 años.
- d) Tomando como base la primera opción (a), se logra un porcentaje de cobertura de energía del 100% para la demanda de las zonas comunes a través de 16 paneles que generan 394,2 kWh mes; adicionalmente, se aumentan 32 paneles que generan 773,2 kWh dedicados a vender excedentes a la red, con un total de 48 paneles, y un esquema de instalación simple. El retorno de la inversión aproximada es de 5,5 años.

### 5.4.2. Mini eólica

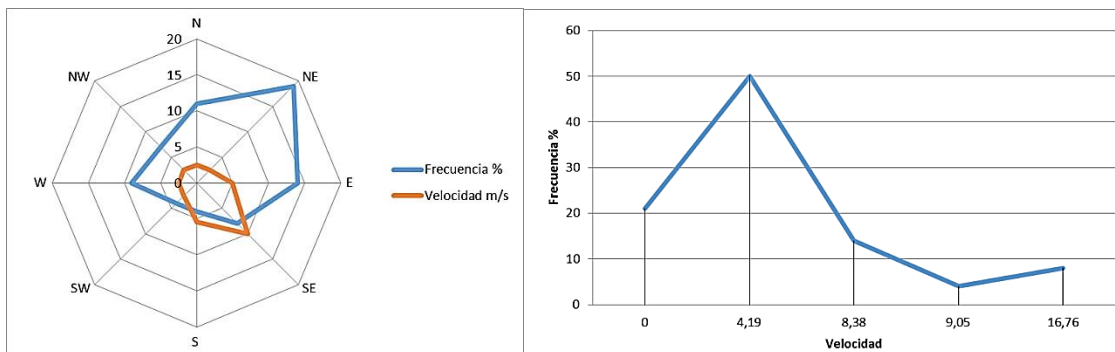


Gráfico 19. Frecuencia y velocidad de vientos en Bogotá. Fuente: Elaboración propia

Según los valores aportados por la rosa de vientos, la mayor frecuencia de vientos predominantes proviene del noreste y el este, pero no coincide con las mayores velocidades, que se registran desde el sureste. Según las velocidades calculadas para la altura (42 m) y una rugosidad del terreno típicamente urbana<sup>85</sup>, las más frecuentes son de 4.1 m/s con un 50%, y velocidades entre 9.05 y 16.7 m/s se encuentran por debajo del 10%. Se plantean las siguientes posibilidades:

ALTURA QUE ESTARÁ LA TURBINA (EN CUBIERTA) h	42	m
ALTURA DE VEL VIENTO METEOROLOGICA	10	m
VELOCIDAD METEOR DEL VIENTO PREDOMINANTE:	2,50	m/s
CONSTANTE DE RUGOSIDAD A <sub>o</sub>	0,36	
AREA BARRIDA POR AEROGENERADOR	12,88	m <sup>2</sup>

<sup>85</sup> La rugosidad del terreno es un factor que determina la velocidad del viento respecto a la conformación de “obstáculos” en el suelo, como árboles, altura de edificios, terreno plano, etc.

COEFICIENTE DE POTENCIA Cp	0,25	
DENSIDAD DEL AIRE EXTERIOR p	0,90	kg/m <sup>3</sup>

Tabla 23. Parámetros iniciales para el cálculo de mini eólica. Fuente: Elaboración propia

- a) Un porcentaje de cobertura de energía del 112% para la demanda de las zonas comunes con una sola turbina que genera 548,5 kWh mes, lo cual significa que casi 1/3 es excedente para venta, con un esquema de instalación simple. Esta opción deja abierta la posibilidad de ubicar más mini turbinas para generar aún más excedentes para la red o al interior del edificio, o usar la cubierta para otros propósitos (terracea común, agricultura urbana, etc.), o desarrollar un sistema híbrido con otra tecnología de ER que se ubique en este punto. El retorno de la inversión aproximada es de 10,9 años, incluyendo gastos de transporte de importación.
- b) Un porcentaje de cobertura de energía del 8% para la demanda de todos los apartamentos a través de 4 mini turbinas que generan 2.193,9 kWh al mes, con un esquema de instalación dual en todos los apartamentos (o simple, pues no aplica para las zonas comunes), lo cual significa, que cada uno debe tener un medidor bidireccional, mientras que se requiere de un solo inversor. El retorno de la inversión aproximada es de 13,6 años.
- c) Una combinación de los dos anteriores, donde existe un porcentaje de cobertura de energía del 139% para la demanda de las zonas comunes a través de una turbina que genera 548,5 kWh al mes; adicionalmente, un porcentaje de cobertura de energía del 6% para la demanda de todos los apartamentos a través de 3 mini turbinas que generan 1.645,4 kWh al mes, con un esquema de instalación dual. En este último caso, el retorno de la inversión aproximada es de 19,2 años.

### 5.4.3. Colectores solares

RADIACION GLOBAL	3,57	kWh/m <sup>2</sup>
BRILLO SOLAR	4,0	h/d
# DIAS AL MES EVALUADOS	30	dias
TEMPERATURA EXTERIOR PROMEDIO	13,7	°C
TEMPERATURA PROMEDIO AGUA RED	13,0	°C
AREA COLECTOR	2,73	m <sup>2</sup>
ENERGIA DEMANDADA PARA ACS x EDIFICIO	578,39	kWh día
CONSUMO DIARIO ACS TOTAL x EDIFICIO	13.216,00	lt/día

Tabla 24. Parámetros iniciales para el cálculo de colectores solares. Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, se parte de los valores de radiación y brillo solar, contemplando también la temperatura exterior, la temperatura del agua en la red pública, temperatura del suministro de agua en 45° C, y un área por cada colector de 2,73 m<sup>2</sup>. Las posibilidades para esta tecnología son:

- a) Debido a que las áreas comunes no requieren de ACS, la única posibilidad es abastecer la demanda de las viviendas según los cálculos del Anexo 6. En ese sentido,



se logra un porcentaje de cobertura de ACS del 100% del edificio para su consumo en los apartamentos a través de 96 colectores gracias a una potencia captada de 7.017,2 kWh al mes y una energía útil de 66,25 kWh/m<sup>2</sup>. Vale la pena mencionar que aquí se plantea un reto en instalaciones al requerirse de un gran tanque acumulador (junto con sus pérdidas) que bombea el ACS a cada apartamento, y estos a su vez deben tener un contador para la misma. El retorno de la inversión aproximada es de 10,9 años.

- b) Como solución al problema anterior, se plantea un porcentaje de cobertura de ACS del 123% de cada apartamento a través de 118 colectores que corresponde uno para cada apartamento, gracias a una potencia captada de 8.625,3 kWh al mes y una energía útil de 66,25 kWh/m<sup>2</sup>. El retorno de la inversión aproximada es de 13,4 años.
- c) Sin embargo, al hacer el ejercicio de ubicar los colectores en la cubierta, caben máximo 59 colectores, pues cada módulo tiene una inclinación de 30° aprox. que al realizar el cálculo de la distancia entre ellos para evitar sombras, da como resultado unas filas bastante separadas. Si se aplicaran estos 59 módulos, se logra un porcentaje de cobertura de ACS del 61% del edificio para su consumo en los apartamentos con una potencia captada de 4.312,6 kWh al mes y una energía útil de 66,25 kWh/m<sup>2</sup>. Al igual que en la primera opción, se requiere de un gran tanque acumulador (junto con sus pérdidas) que bombea el ACS a cada apartamento, y estos deben tener un contador. El retorno de la inversión aproximada es de 12,3 años.

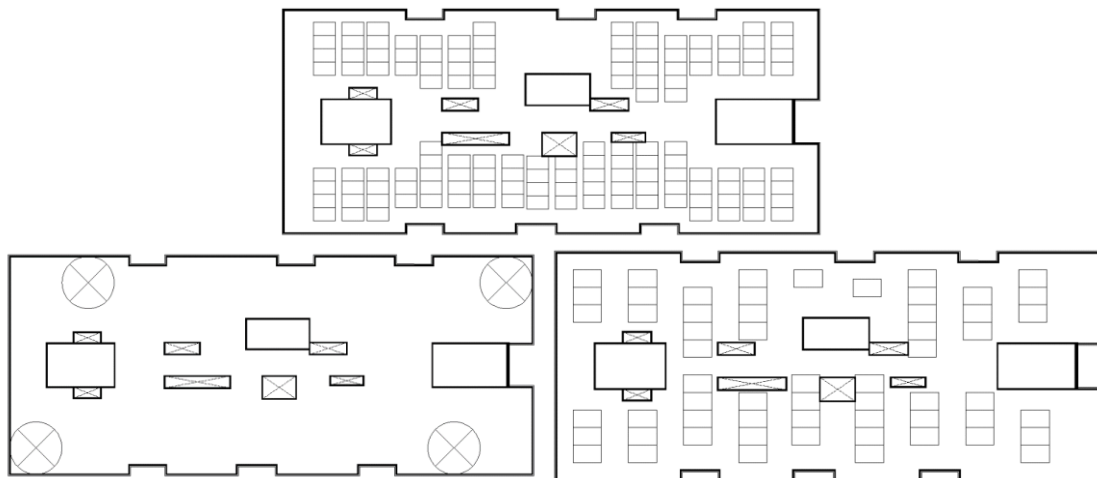


Ilustración 33. Cubierta del edificio explorando las posibilidades con fotovoltaica, mini eólica, y colectores. Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.4. Biomasa

En el mercado europeo existe una gran oferta de calderas de biomasa que funcionan a partir de diversos combustibles como los pellets, astillas, aserrín, pepa de aceituna, pepa de cereza, pepa de melocotón, cascara de arroz, cascara de almendra, etc. Sin embargo, la oferta de tecnología basada en residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU o RSU) es aún incipiente y no fue posible encontrar fichas técnicas que dieran cuenta del nivel de desarrollo y de especificaciones en su aplicación a nivel residencial.

En Colombia, la industria de la biomasa con caldera y sus combustibles esta poco explorada pragmáticamente, a pesar de que existen varios estudios que ven un potencial en el RSOU proveniente de plazas de mercado, centros de acopio, y la poda<sup>86</sup>, más aun a nivel residencial. Esto se debe probablemente, a los precios bajos de la energía respecto a otros países que justifiquen la inversión, la ausencia de estaciones climáticas, y que en casos de altas temperaturas y disconfort permanente se soluciona con aire acondicionado.

Aunque se introdujera una caldera de biomasa en el caso de estudio, falta el soporte de una industria de producción de combustibles que provean sus requerimientos al nivel de un edificio residencial. Tal vez la excepción sea la variedad conocida como biodigestores para la producción de biogás y abono, los cuales tienen alta aplicación en el sector agrícola, pero que por sus requerimientos (instalaciones al aire libre, generación de gases nocivos, entre otros), no son aplicados en zonas urbanas. Vale la pena mencionar que Laleman, Albrecht, & Dewulf (2013) mencionan que esta tecnología aún está sujeta a debate por las cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub> que produce en las fases de recolección y transporte.

COMBUSTIBLE		RSOU	
DENSIDAD APARENTE COMBUSTIBLE p		500,0	kg/m <sup>3</sup>
PODER CALORIFICO INFERIOR PCI		15.792,6	Kj/kg
DIAS FUNCIONAMIENTO MES		30	días
ALTURA DE PISO		2,4	m
POTENCIA DE CALDERA		500	kw
CONSUMO COMBUSTIBLE		0,000161	kg/s
DEMANDA DE COMBUSTIBLE MES		138,79	kg
DEMANDA DE COMBUSTIBLE DIA		4,63	kg
CONSUMO DIARIO COMBUSTIBLE Cd		0,0093	m <sup>3</sup> /día
CONSUMO MES COMBUSTIBLE Cm		0,2776	m <sup>3</sup> /mes
VOLUMEN ALMACENAMIENTO HORIZONTAL 15 DIAS		0,0557	m <sup>3</sup> /kg
VOLUMEN ALMACENAMIENTO INCLINADO 15 DIAS		0,0684	m <sup>3</sup> /kg
VOLUMEN DEL SILO Vs		5,07	m <sup>3</sup>
AREA SILO		2,13	m <sup>2</sup>
ENERGIA ALMACENADA E SUELO HORIZONTAL		30.800.412,55	kj
ENERGIA ALMACENADA E SUELO INCLINADO		24.800.332,18	kj
CALOR MINIMO PRODUCIDO x ENCENDIDA		4.000,0	kwh
CANTIDAD DE CALOR DEMANDAS PUNTA		9.665,5	kwh
CANTIDAD CALOR PARA ACS		1.405,02	kwh

Tabla 25. Parámetros iniciales y cálculo de biomasa. Fuente: Elaboración propia

<sup>86</sup> Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. UPME. Ver también el modelo de cálculo de viabilidad de proyectos de energía a partir de residuos sólidos urbanos de la UPME: <http://www.upme.gov.co/ValoracionEnergeticaRSU/>

Debido a la falta de una oferta de combustibles para biomasa residencial, tampoco hay producción nacional de calderas de baja potencia, y que no es posible usar un biodigestor en el interior del prototipo, la posibilidad de aplicar biomasa como opción para generar electricidad o calor a nivel residencial queda descartada. No obstante, se realizaron los siguientes cálculos teóricos para producción de ACS con el fin de tener una idea de su potencial:

#### 5.4.5. Configuración final del prototipo

Para escoger una o más de las alternativas con diferentes tecnologías de ER mencionadas anteriormente, se realizó una matriz de resumen con cuatro características: el % de cobertura de energía generada respecto a la demanda de todos los apartamentos (apt) y de las zonas comunes (zc) y que cuanto más alto sea el valor, es mejor; la amortización se refiere al retorno de la inversión en años, cuyo valor es mejor cuanto menor sea; los excedentes, que refiere a si existe la posibilidad de generar más energía que la que consume el edificio, ya que si es afirmativo el sistema genera rentas de la venta de energía después de la amortización; y la menor ocupación de la cubierta es otro valor agregado, ya que si esta es baja, los equipos usan menos de la mitad del área útil de la cubierta, permitiendo otros usos.

	<b>% cobertura</b>	<b>Amortización años</b>	<b>Excedentes</b>	<b>Ocupación cubierta</b>
<b>Fotovoltaica a</b>	100 zc - 0 apt	7,6	NO	BAJA
<b>Fotovoltaica b</b>	0 zc - 10 apt	15,8	NO	MEDIA
<b>Fotovoltaica c</b>	100 zc - 10 apt	10,5	NO	ALTA
<b>Fotovoltaica d</b>	100 zc - 0 apt	5,5	SI	MEDIA
<b>Eólica a</b>	100 zc - 0 apt	10,9	SI	BAJA
<b>Eólica b</b>	0 zc - 14 apt	13,6	NO	MEDIA
<b>Eólica c</b>	100 zc - 10 apt	19,2	SI	MEDIA
<b>Colectores c</b>	61 acs	12,3	NO	ALTA

Tabla 26. Matriz de resumen de características entre las alternativas de ER. Fuente: Elaboración propia

Las soluciones con paneles fotovoltaicos que implicaban distribuir la energía generada a cada uno de los apartamentos de manera autónoma tienen una amortización demasiado larga debido a los equipos adicionales como el inversor y medidor. Además, no contemplan excedentes y la ocupación de la cubierta es alta por el número de paneles; si bien estos costos podrían no ser asumidos por el constructor, si tendrían un impacto en el precio de la vivienda. Al contrario, las soluciones enfocadas en abastecer solo las zonas comunes tienen una viabilidad mayor porque la demanda es menor, por tanto, el número de equipos también.

Por su parte, la mini eólica presenta buenos desempeños de generación de energía debido a la altura de la cubierta donde está instalada (42 m de altura) y no tiene mucha ocupación de la misma, contrario a los costos extras de importación que alargan la amortización. De manera similar que con la fotovoltaica, la viabilidad aumenta al contemplar excedentes y al abastecer solo las zonas comunes, a pesar de que ya no es necesario multiplicar el número de inversores. Finalmente, la única opción posible para colectores solares (c), no

posee suficiente viabilidad, pues solo provee ACS sin excedentes posibles, una alta ocupación de la cubierta así como de amortización, que son desventajas similares a las señaladas por Karunathilake et al (2019).

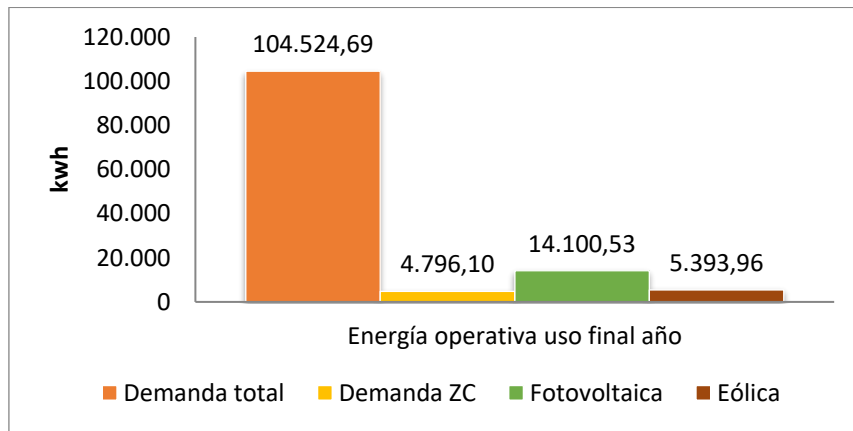


Gráfico 20. Demanda y aporte de ER por las tecnologías seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.

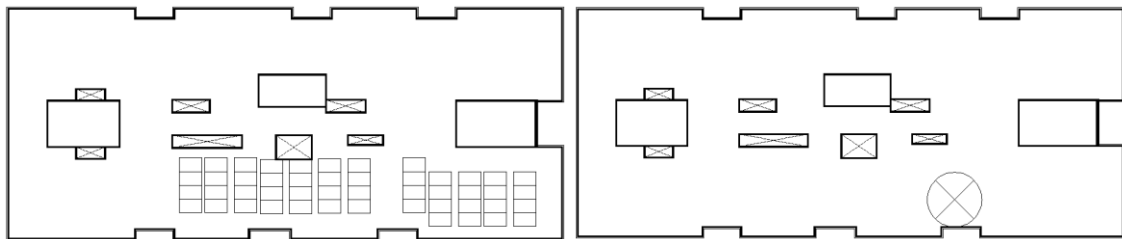


Ilustración 34. Cubierta del edificio aplicando los escenarios con ER escogidos. Fuente: Elaboración propia.

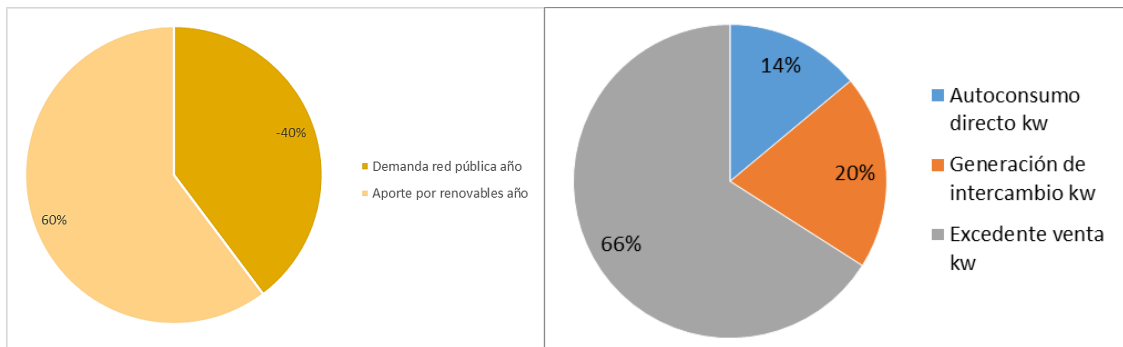


Gráfico 21. Aporte y balance de generación de energía renovable para los paneles fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia.

En ese orden de ideas, y para estudiar los impactos ambientales de dos tecnologías diferentes que lograron la mejor viabilidad, las alternativas a estudiar serán la Fotovoltaica d y la Eólica a. Recordemos que la fotovoltaica consiste en lograr una cobertura de energía del 100% para la demanda de las zonas comunes a través de 16 paneles, y aumentando 32 paneles dedicados a vender excedentes, con un total de 48 paneles y un esquema de instalación simple. La mini eólica logra una cobertura de energía del 112% para la demanda de las zonas comunes, generando excedentes con una sola turbina y un esquema de instalación simple<sup>87</sup>. La proporción de aporte de estas ER al

<sup>87</sup> El catálogo del fabricante no suministra información acerca de la generación de ruido por el funcionamiento de este equipo. Sin embargo, consultando otros catálogos de turbinas similares, estos

edificio se pueden apreciar en el Gráfico 20, su ubicación en la cubierta del edificio en la Ilustración 34, las prestaciones energéticas en la Tabla 27, y las características técnicas de estos sistemas en la Tabla 28.

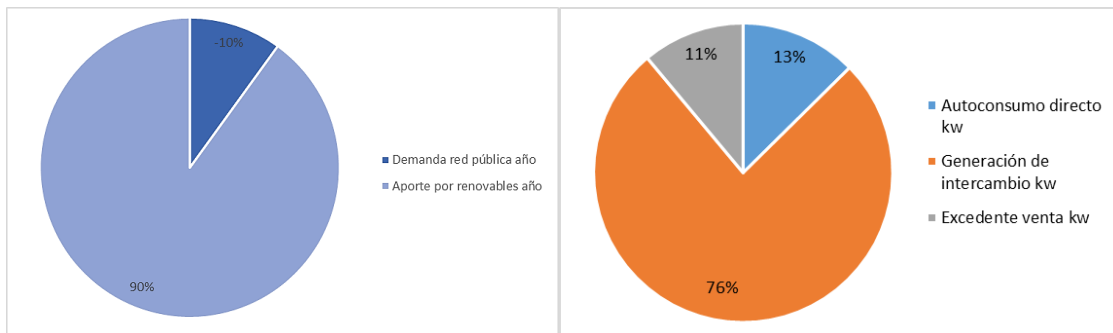


Gráfico 22. Aporte y balance de generación de energía renovable para la turbina minieólica. Fuente: Elaboración propia

<b>Turbina mini eólica</b>		
Área aferente por turbina	164,03	m <sup>2</sup>
Ocupación turbinas en cubierta	27%	%
Energía generada día	14,8	kWh
Energía generada mes	443,3	kWh
Porcentaje de cobertura E	112%	%
E según cobertura mes	394,20	kWh
Potencia instalada sistema	7.461,1	w
	7,46	kw
<b>Paneles fotovoltaicos</b>		
Número de paneles	48	
Área total paneles	89,0	m <sup>2</sup>
Aporte de energía por m <sup>2</sup> día	0,43	kWh/m <sup>2</sup>
Porcentaje de cobertura E	294%	%
Potencia pico total	15.349	wp
Aporte energía paneles	38,63	kWh día
	1.158,95	kWh mes
Potencia instalada sistema	15,35	kw
	0,02	mw

Tabla 27. Prestaciones energéticas de los paneles fotovoltaicos y la turbina mini eólica. Fuente: Elaboración propia

El Gráfico 21 y el Gráfico 22 expresan las proporciones del aporte de las ER en el balance de generación/consumo en sus tres tipos frente a los escenarios seleccionados al año. En el caso del escenario con fotovoltaica, un 14% se destina al autoconsumo directo, un 20% a la generación de intercambio, y un 66% en excedentes para la venta; estos excedentes equivalen a un 40% de la demanda ya cubierta en zonas comunes. En el caso del escenario con minieólica, un 13% se destina al autoconsumo directo, un 76% a la generación de intercambio, y un 11% en excedentes para la venta; estos excedentes equivalen a un 10%

argumentan que el ruido es casi inapreciable, con un nivel de presión sonora a 10 metros de distancia de 32,6 dBA con vientos de 6 m/seg y 47,2 dBA con vientos de 10 m/seg.

de la demanda ya cubierta en zonas comunes. Otra perspectiva de este balance, pero en el periodo de un día nos lo ofrece el Gráfico 23, donde se escogió el día más bajo en radiación solar y de velocidad de viento del mes promedio; esto permite identificar la curva de demanda de energía de las zonas comunes respecto a la generación por fotovoltaica y minieólica, y en sus convergencias y diferencias se identifican los tres tipos de generación/consumo de ER para su balance.

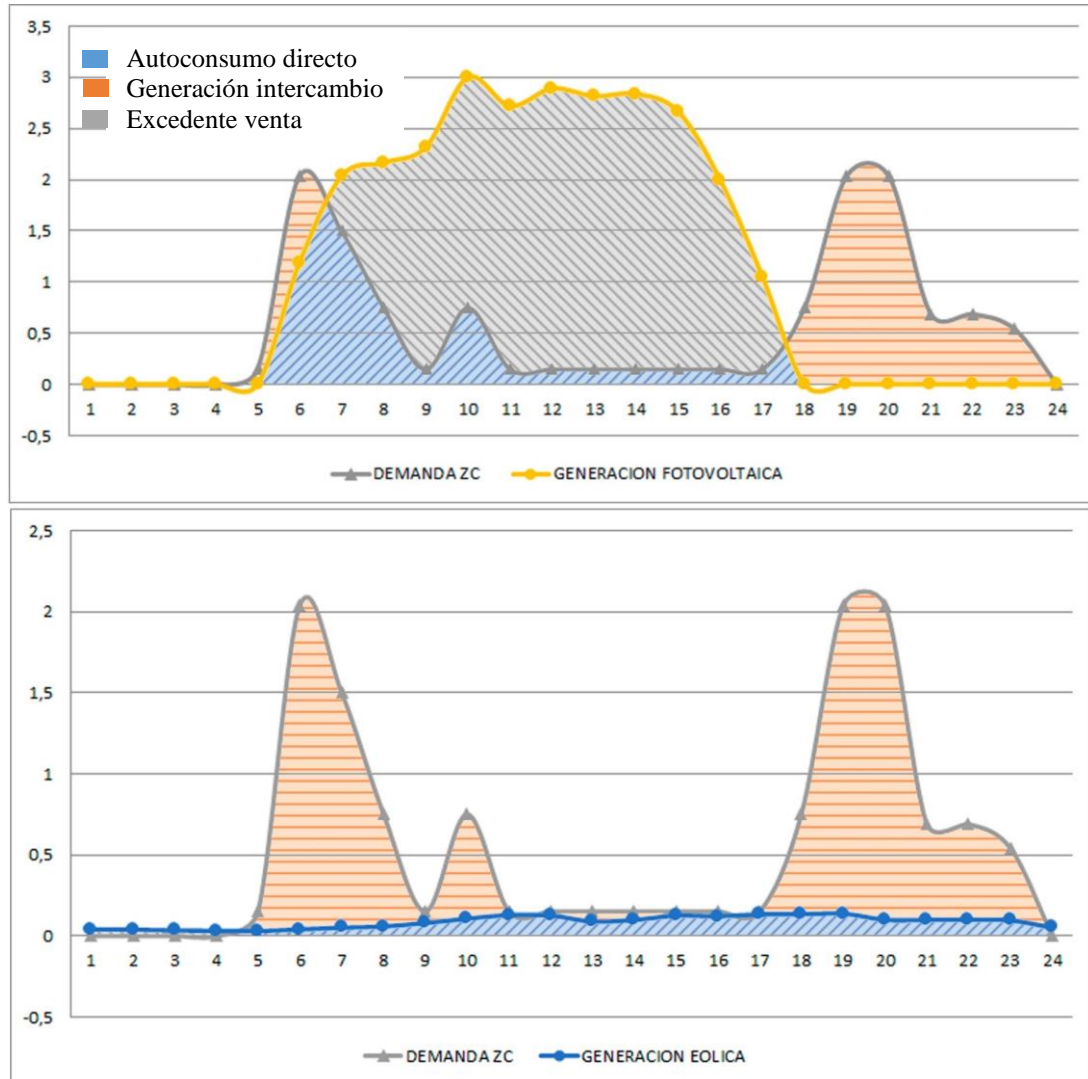


Gráfico 23. Generación de energía respecto demanda de ZC con paneles fotovoltaicos (arriba) y la turbina mini eólica (abajo) en kw día. Fuente: Elaboración propia

Paneles fotovoltaicos		Turbina mini eólica	
Marca	Powest	Marca	Bornay 1500
Potencia x panel	320 Wp	Referencia	Wind 25.3+
Rendimiento (eficiencia)	19,20 %	Diámetro	4,05 m
Tensión nominal sistema	24 v	Potencia nominal	5000 w
Tensión punto max potencia	42,2 v	Voltaje nominal	220 v
Corriente unitaria máxima	7,37 A	Peso	171 kg
Amperaje máximo amperios	9,18	Dimensiones	120x80x80 cm
Área x panel	1,85 m <sup>2</sup>	Velocidad arranque	3,00 m/s

Potencia pico x área Kwp/m <sup>2</sup>	0,17	Corriente unitaria máxima	6,10 A
Vida útil	30 años	Vida útil	20 años
Dataset de Ecoinvent aplicado para ACV: Electricity, low voltage {RoW}  electricity production, photovoltaic, 3kWp flat-roof installation, multi-Si   Cut-off, U		Dataset de Ecoinvent aplicado para ACV:  No existente.	

Tabla 28. Características técnicas de los paneles fotovoltaicos y la turbina mini eólica. Fuente: Elaboración propia

Los escenarios seleccionados concuerdan con las estimaciones de González (2018: 144), quien desde una perspectiva de viabilidad económica para el caso de un edificio NetZero en Lisboa, Portugal, plantea como solución óptima el instalar paneles fotovoltaicos y turbinas mini-eólicas para exportar la energía producida a la red, y al mismo tiempo, comprando la electricidad para satisfacer la demanda. Los sistemas eólicos y fotovoltaicos pueden convertirse en la opción más viable dada su disponibilidad en casi todas las regiones del mundo, pero su desventaja es la intermitencia e imprevisibilidad.

Algo importante para mencionar es que en la base de datos de Ecoinvent 3,5 no existe un dataset específico para mini turbinas eólicas que permita incorporar esta tecnología en el inventario del edificio, al contrario de la presencia de datos para grandes turbinas, con potencias que varían de menos de 1 Mw (con opción de turbinas de 750 Kw) hasta mayores a 3 Mw. Eso significaba que era necesario modelar el dataset de una mini turbina de 5 Kw que corresponde a este caso, para poder realizar el análisis de impactos ambientales bajo esta tecnología.

	<b>Bornay Wind 25,3+</b>		<b>WESPA-750KW</b>	
Diámetro de aspas	4,05	m	47	m
Potencia nominal	5	kw	750	kw
Voltaje nominal	220	v	400	v
Peso	171	kg	38600	kg
Velocidad arranque	3	m/s	3	m/s
Altura total	6	m	65	m

Tabla 29. Comparación de características entre una mini turbina y una turbina de gran escala. Fuente: Elaboración propia

Se observó a través de una comparación de características entre turbinas de pequeña y gran escala (Tabla 29) que las proporciones físicas de diámetro de las aspas y su altura total era entre 10,8 y 11,6 veces, en promedio 11,2 veces mientras que la potencia energética era de 150 veces. A esta información se le sumó la revisión de estudios de inventario de ACV para mini turbinas eólicas como Kouloumpis, Sobolewski, & Yan (2020), Lombardi, Mendelka, Carnevale, & Stanek (2018), y Greening & Azapagic (2013).

Tomando como base los datos de la turbina de 750 Kw, se hicieron las modificaciones según la bibliografía y proporciones señalados anteriormente, teniendo en cuenta que el material principal de la mini turbina es fibra de vidrio y fibra de carbono. De esta manera, se modeló el dataset tanto de la producción de energía a través de esta mini turbina así

como la construcción de la misma, cuyas entradas y salidas válidas para Ecoinvent se referencian en la Tabla 30.

<b>GENERACION DE ELECTRICIDAD 1 KW</b>		
<b>Entradas</b>		
Energy, kinetic (in wind), converted	0,0258	MJ
Lubricating oil {RoW}  market for lubricating oil   Cut-off, U	0,000118577	kg
Wind turbine, 5kW, onshore {RoW}  mini wind turbine construction, 5kW, onshore   Cut-off, U	3,70785E-06 <sup>88</sup>	p
Inverter, 2.5kW {RoW}  production   Cut-off, U	3,70785E-06	p
<b>Salidas</b>		
Waste mineral oil {RoW}  market for waste mineral oil   Cut-off, U	9,48616E-05	kg
<b>CONSTRUCCIÓN DE MINI TURBINA DE 5 KW</b>		
<b>Entradas</b>		
Aluminium, wrought alloy {GLO}  market for   Cut-off, U	35,635	kg
Concrete, normal {CH}  market for   Cut-off, U	6,31648	m3
Copper {GLO}  market for   Cut-off, U	20,3	kg
Electricity, medium voltage {RER}  market group for   Cut-off, U	63,8938355	kWh
Electronics, for control units {GLO}  market for   Cut-off, U	3	kg
Epoxy resin, liquid {RER}  market for epoxy resin, liquid   Cut-off, U	14	kg
Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO}  market for   Cut-off, U	88,17	kg
Polypropylene, granulate {RER}  production   Cut-off, U	7,61	kg
Steel, low-alloyed {GLO}  market for   Cut-off, U	546	kg
Welding, arc, steel {RER}  processing   Cut-off, U	26,5	m
Wire drawing, copper {GLO}  market for   Cut-off, U	18	kg
Zinc coat, pieces {GLO}  market for   Cut-off, U	21,9	m2
Polyvinylchloride, emulsion polymerised {RER}  polyvinylchloride production, emulsion polymerisation   Cut-off, U	3,5	kg
Polyurethane, rigid foam {RER}  production   Cut-off, U	4,8	kg
Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RER}  acrylic varnish production, product in 87.5% solution state   Cut-off, U	2,4	kg
Permanent magnet, for electric motor {GLO}  production   Cut-off, U	14,4	kg
<b>Salidas</b>		
Electronics scrap from control units {GLO}  market for   Cut-off, U	3	kg
Scrap copper {RoW}  market for scrap copper   Cut-off, U	20,3	kg
Waste plastic, mixture {GLO}  treatment of waste plastic, mixture, unsanitary landfill, dry infiltration class (100mm)   Cut-off, U	88,17	kg
Waste polyethylene/polypropylene product {RoW}  market for waste polyethylene/polypropylene product   Cut-off, U	7,61	kg
Waste reinforced concrete {RoW}  market for waste reinforced concrete   Cut-off, U	15791,2	kg

Tabla 30. Entradas y salidas en la modelación de dataset asociado a mini turbina eólica. Fuente: Elaboración propia con base en datos de Ecoinvent

<sup>88</sup> Existe dudas generalizadas acerca del procedimiento para evitar iteraciones en las cantidades, ya que cada entrada/salida es calculada separadamente en cada uno de los dataset donde estén anidados. En este ejercicio se aplicó la unidad funcional y además una proporcionalidad de acuerdo a la generación de energía total (27,6 kwh).



## 5.5 RESULTADOS

Este informe de resultados se basa en un modelo y procedimiento para obtener una Declaración Ambiental de Producto para edificios de acuerdo con la RCP UN CPC 531 del operador EPD System, el cual se desarrolla en el Anexo 8. Declaración ambiental de producto.

A continuación, se presentan los elementos más relevantes para el tema de la presente investigación, donde los procesos e impactos por debajo del 5% no se detallan. Algunos gráficos y tablas originales se han sintetizado en nuevos gráficos presentados en estos resultados, mientras que los primitivos se encuentran en el Anexo 9. Gráficos y tablas de resultados. Hay que tener en cuenta que los valores de generación de energía renovable minieólica y fotovoltaica no son los mismos ya que su producción fue seleccionada según la relación costo beneficio económico, y porque la naturaleza de cada tecnología ofrece potencias y desempeños diferentes.

Se realizó un análisis de ciclo de vida por caracterización para el edificio sin energías renovables, con energía renovable fotovoltaica, y con energía renovable mini eólica según las características vistas anteriormente, para 3 escenarios en total. A cada una de estos escenarios se le aplicó la metodología de cálculos de impacto ReCiPe 2016 v1.1 punto medio método perspectiva Jerarquista (H, que es el predeterminado), CML-IA baseline v4.7, y Cumulative Energy Demand (CED) v1.11; adicionalmente se ha detallado las etapas B6 y D, por tanto, son nueve resultados para los tres escenarios propuestos, más seis resultados para dichas etapas.

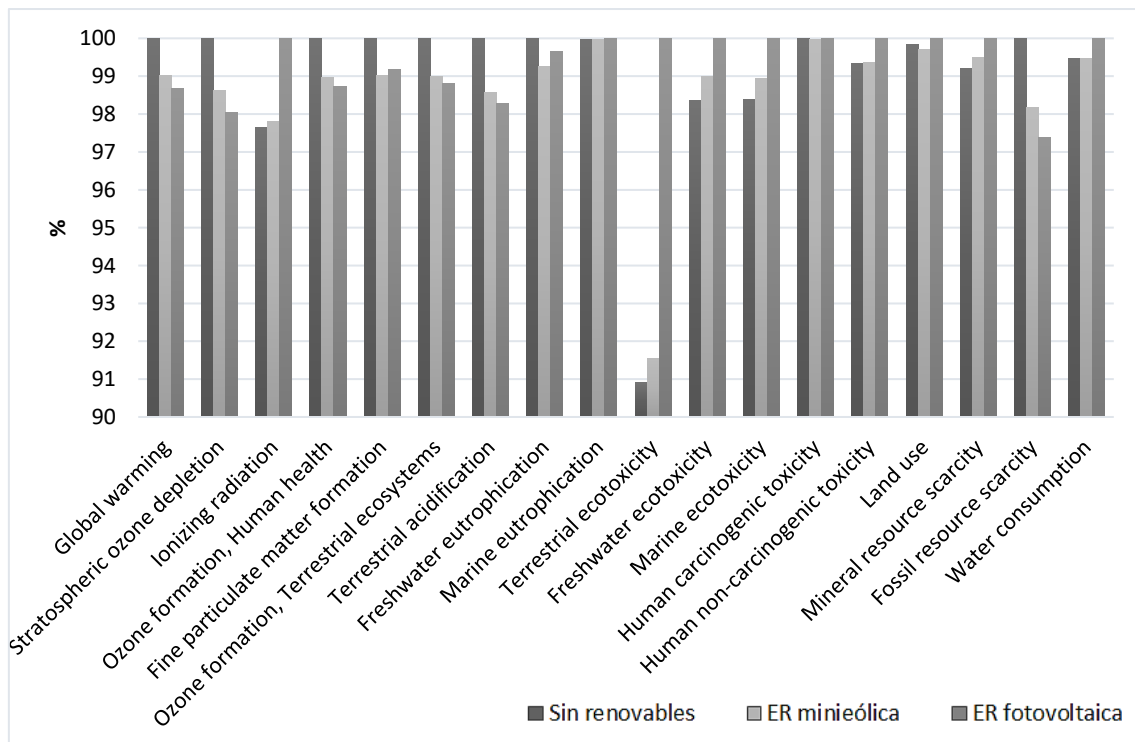


Gráfico 24. Comparación de caracterización en % con metodología ReCiPe de ACV del edificio sin renovables y con renovable minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

Cada una de estas metodologías de cálculo maneja sus indicadores, algoritmos y factores de caracterización para cada categoría de impacto que, al sumarlas todas, ofrecen en total 35 categorías para analizar. Para simplificar la gran cantidad de datos y debido a que el objetivo e indicadores de los edificios NetZero es reducir predominantemente su huella de carbono además del consumo energético, se ha optado por darle énfasis a los resultados de emisiones de CO<sub>2</sub>eq, expresados a través de la categoría de “Potencial de calentamiento global” o “Global warming potential GWP” presentes en las metodologías ReCiPe y CML-IA. La metodología CED tiene categorías propias relacionadas con energía, pero se le ha otorgado énfasis a “Non renewable, fossil” y “Renewable, wind, solar, geothé”.

Según el Gráfico 24, la comparación de impactos asociados a todo el ciclo de vida del edificio en sus 3 escenarios nos muestra que en casi la mitad de las categorías de impacto y de manera esperada, el edificio sin renovables tiene el mayor impacto, seguido del edificio con renovable minieólica, y luego el edificio con renovable fotovoltaica con diferencias de aproximadamente el 1%. Sin embargo, se puede apreciar un comportamiento opuesto en las categorías “Radiación ionizante”, “Ecotoxicidad de agua fresca”, “Ecotoxicidad marina”, “Toxicidad humana no cancerígena”, “Consumo de recursos minerales”, “Consumo de agua”, y de manera muy marcada en “Ecotoxicidad terrestre”.

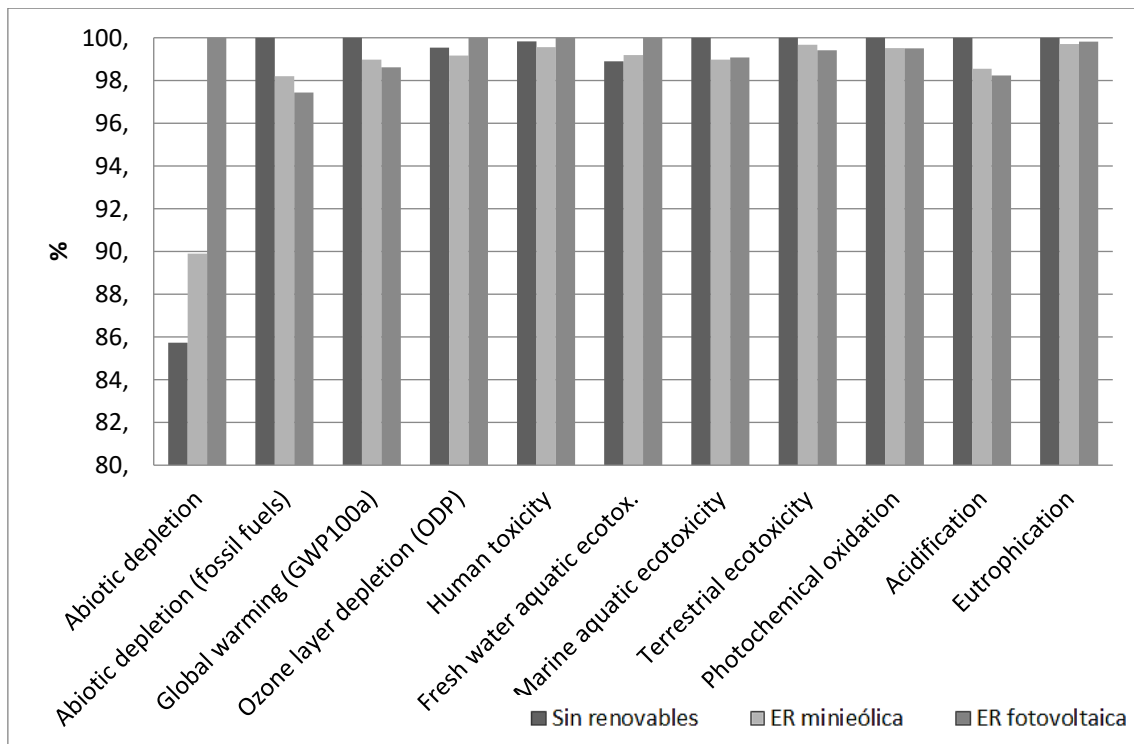


Gráfico 25. Comparación de caracterización en % con metodología CML de ACV del edificio sin renovables y con renovable minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

Por su parte, el cálculo con la metodología CML presentado en el Gráfico 25, muestra que el resultado esperado de un edificio sin renovables con mayores impactos se cumple en las categorías “Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)”, “Calentamiento global”, “Toxicidad humana”, “Ecotoxicidad acuática marina”, “Oxidación fotoquímica”, “Ecotoxicidad terrestre” y “Acidificación”. De manera opuesta, se puede apreciar que las categorías “Ecotoxicidad de agua fresca”, “Agotamiento de la capa de ozono”, y de manera marcada en “Agotamiento abiótico”, el edificio con energía renovable

fotovoltaica presenta mayores impactos y el edificio sin renovables los menores impactos. Vale la pena mencionar que la categoría “Eutrofización” parece no marcar un patrón al verse casi iguales los 3 escenarios.

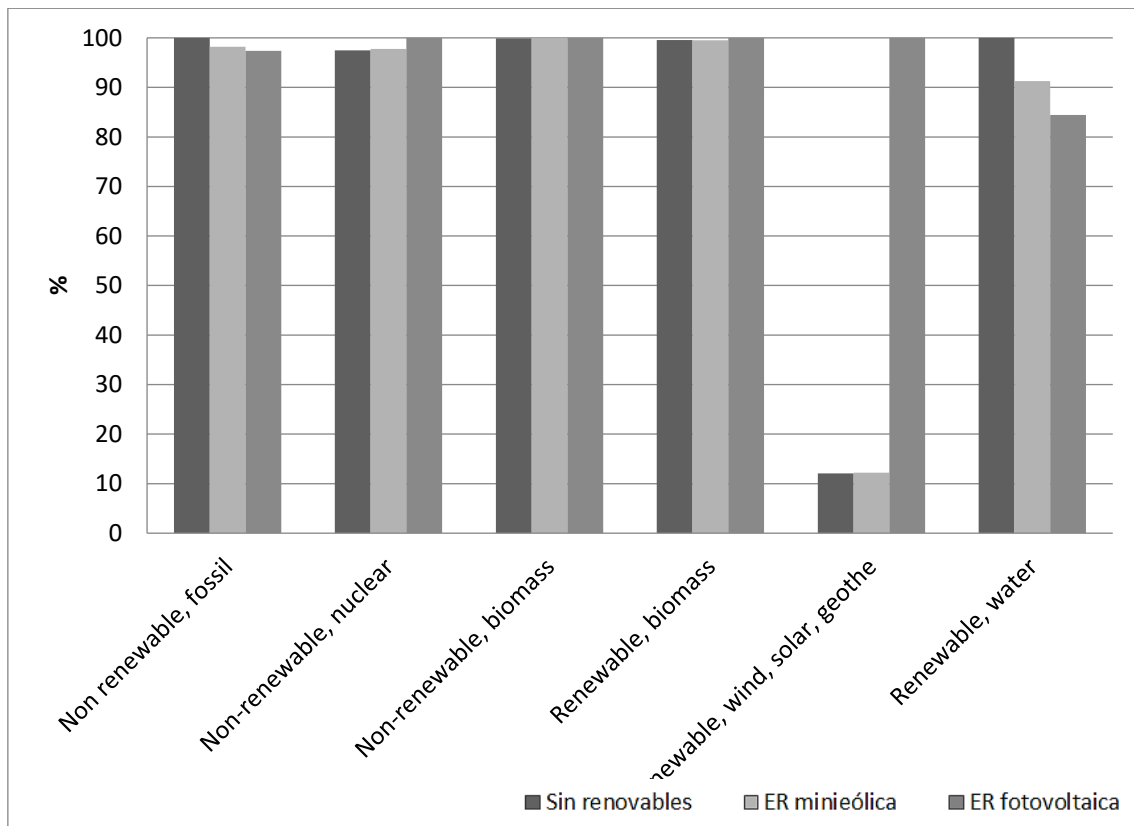


Gráfico 26. Comparación de caracterización en % con metodología CED de ACV del edificio sin renovables y con renovable minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

Frente a la comparación en % con la metodología CED enfocada a consumo de energía por tipo mostrado en el Gráfico 26, las únicas categorías que muestran una marcada diferenciación es “Renovable hidráulica” donde el edificio sin renovables tiene mayor consumo y “Renovable eólica, solar, geotermia” donde el edificio con renovable fotovoltaica tiene mayor representación; las demás categorías muestran muy poca diferencia entre escenarios, pero vale la pena mencionar que el consumo de energía fósil es reducido progresivamente cerca de un 2% y 4% por el edificio con renovable minieólica y fotovoltaica.

El Gráfico 27 calculado bajo un indicador de ponderación, ayuda a entender mejor las magnitudes de cada tipo de energía en los 3 escenarios, donde se observa el protagonismo del consumo de energía no renovable de origen fósil, y luego la renovable hidráulica donde la renovable fotovoltaica tiene el menor consumo, al contrario del consumo de energía renovables con magnitudes muy bajas; existe una representación baja y homogénea del consumo de no renovable nuclear y renovable por biomasa. Esto se explica por la composición de la matriz energética colombiana para el consumo operativo de renovable hidráulica, y los procesos de instalación, transporte y fabricación de materiales que suman al consumo con combustibles fósiles.

Esto quiere decir, que teniendo en cuenta todo el ciclo de vida del edificio, la proporción de energía fósil es muy alta, y al incorporar tecnologías de ER de pequeña escala, estas

aportan cerca un 0,4% y 3,3% respectivamente de la energía total. La renovable hidráulica representa entre 16% y 19% debido a la composición de la matriz energética colombiana.

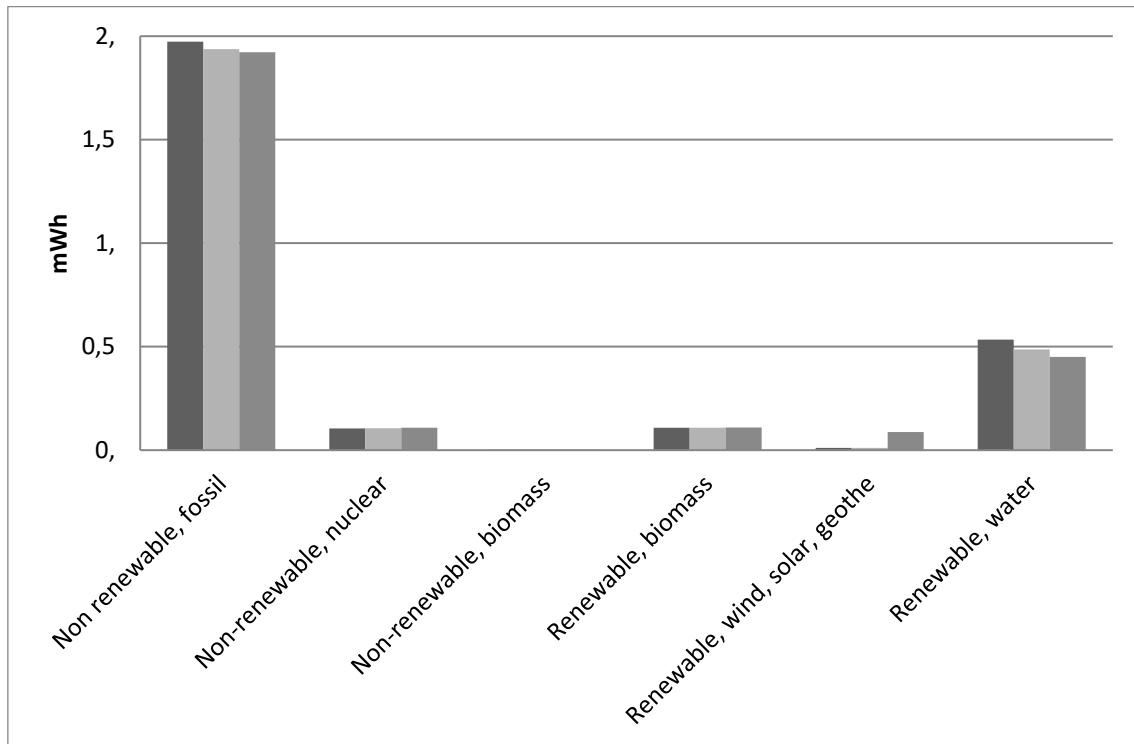


Gráfico 27. Ponderación con metodología CED de ACV del edificio sin renovables y con renovable minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

Categoría de impacto	Unidad	Sin renovables	ER minieólica	%	ER fotovoltaica	%
Global warming (ReCiPe)	kg CO <sub>2</sub> eq	890,28	881,47	99,0	878,42	98,7
Global warming (CML)	kg CO <sub>2</sub> eq	850,69	841,98	99,0	838,91	98,6
Non renewable, fossil	MJ	7.103,92	6.974,39	98,2	6.918,67	97,4
Renewable, wind, solar, geothe	MJ	38,19	38,75	101,5	316,84	829,6

Tabla 31. Comparación de resultados de caracterización entre las categorías de impacto seleccionadas para los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia

Según lo expuesto anteriormente, en la Tabla 31 se ha extraído los valores de solo cuatro categorías de impacto entre todas las metodologías de cálculo aplicadas de acuerdo al enfoque de la presente investigación, dos de ellas son la misma (GWP en CO<sub>2</sub>eq) pero calculada por metodologías diferentes, donde se puede apreciar que los valores de cálculo de CO<sub>2</sub>eq entre las metodologías ReCiPe y CML tienen una diferencia del 4,5%. Respecto al edificio sin energías renovables en todo el ciclo de vida, la opción con energía eólica reduce 1% las emisiones de CO<sub>2</sub>eq, reduce el consumo de combustibles fósiles un 1,8%, y aumenta el consumo de energía renovable un 1,5%. La opción con energía fotovoltaica reduce un 1,3% y 1,4% las emisiones de CO<sub>2</sub>eq, reduce un 2,6% el consumo de combustibles fósiles, y aumenta un 729,6% el consumo de energía renovable.

El Gráfico 28, Gráfico 29, y el Gráfico 31, permiten analizar y comparar las emisiones de CO<sub>2</sub>eq y tipo de energía para los tres escenarios simultáneamente en cada etapa de ciclo de vida, donde se observan las variaciones para cada uno (de izquierda a derecha, la primera barra es el edificio sin renovables, la segunda es el edificio con renovable

minieólica, y la tercera es el edificio con renovable fotovoltaica). El Gráfico 28 muestra las emisiones de CO<sub>2</sub>eq diferenciando entre la metodología ReCiPe y CML, cuya diferencia es proporcionalmente mayor en la etapa C4, y se observan pequeñas diferencias entre los escenarios en la etapa B4 de manera ascendente (la incorporación de ER aumenta las emisiones), y en las etapas B6 y D de manera descendente (la incorporación de ER disminuye las emisiones).

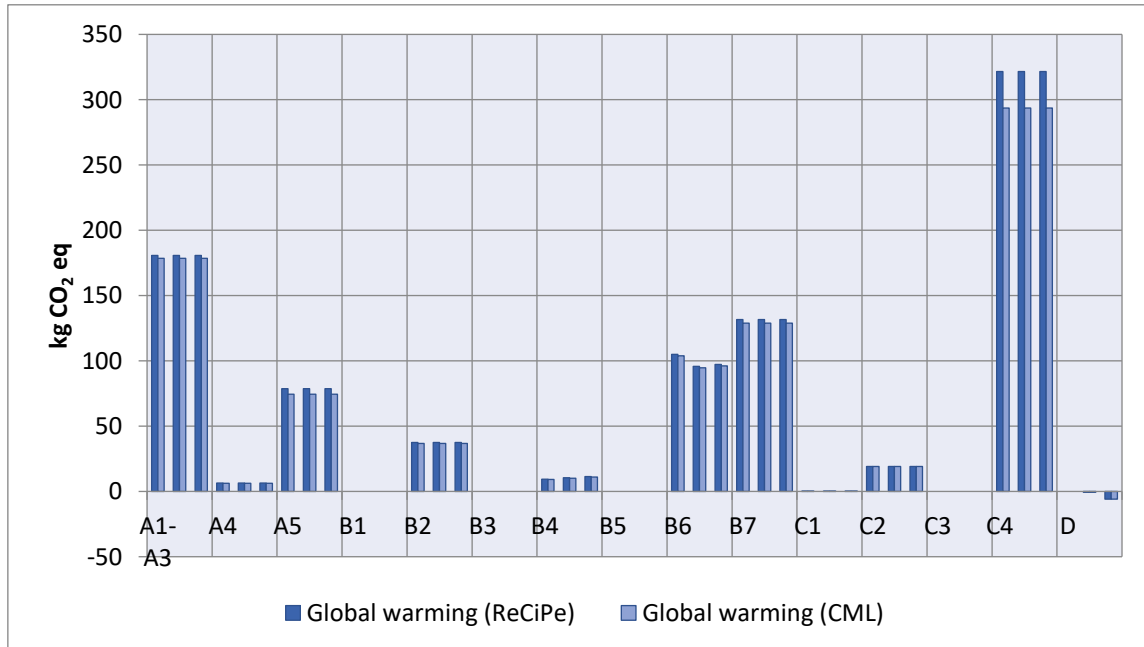


Gráfico 28. Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub>eq entre las metodologías ReCiPe y CML en las etapas de ciclo de vida del edificio y en los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia

De manera similar, en el Gráfico 29 se referencian los consumos de energía de origen fósil y renovable en los tres escenarios, observando que se pierde la proporcionalidad del consumo en la etapa C4 frente a las emisiones de CO<sub>2</sub>eq (es decir, que el tratamiento de residuos de demolición demandan menos energía pero emiten mayores cantidades de CO<sub>2</sub>eq), y de manera similar al anterior gráfico, existe una pequeña diferencia ascendente entre los escenarios en la etapa B4, y variable en la etapa B6 (mayor consumo energía fósil en edificio sin renovables, menor consumo con fotovoltaica y aun menor con minieólica pero con muy poca diferencia), pero que se caracteriza por tener una participación notable de la energía renovable en el escenario del edificio con ER fotovoltaica. De manera similar, la etapa D evidencia una notable participación de la ER renovable y disminución de la energía fósil en el edificio con fotovoltaica, así como en el edificio con minieólica pero en una proporción muy pequeña. Importante mencionar que este gráfico no contempla la energía renovable hidráulica, la cual tiene una importante participación que se detallará más adelante.

Como complemento, el Gráfico 30 muestra las proporciones de los diferentes tipos de origen de la energía para el escenario que incorpora energía renovable minieólica y el escenario con renovable fotovoltaica. A partir del escenario sin renovables que representa el 0%, la proporción de energía renovable (eólica, solar o geotérmica) pasa a 1% para el escenario con minieólica y a un 3% con fotovoltaica. El tipo de origen de energía que se ve reducido o aumentado es la renovable hidráulica, según la proporción de energía renovable, es decir que es inversamente proporcional, pues a mayor energía renovable menor renovable hidráulica, mientras que la energía fósil se mantiene en 72 o 73%.

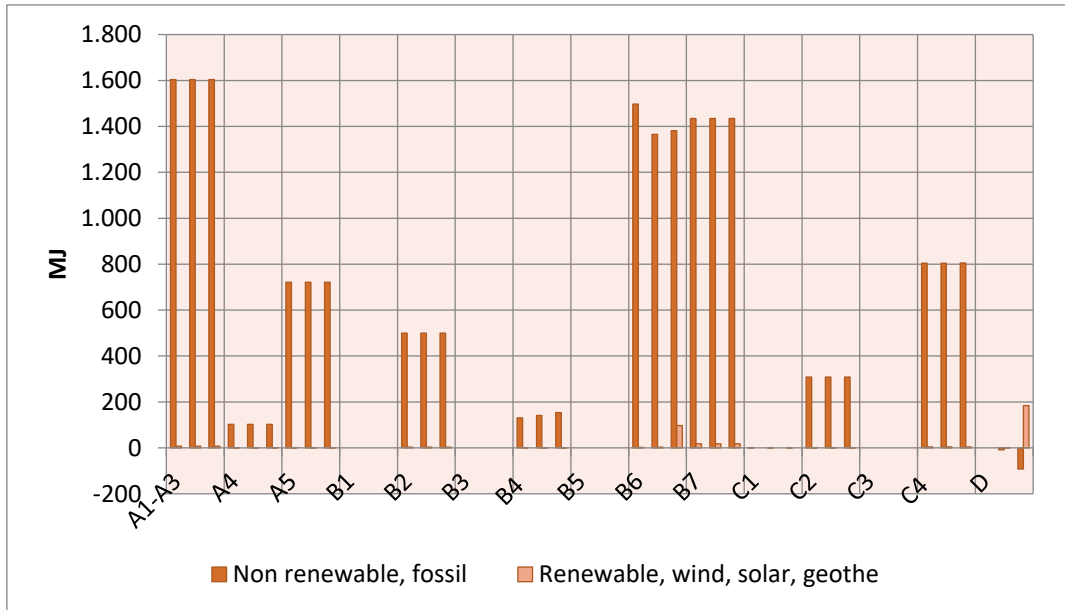


Gráfico 29. Comparación entre tipo de energía de origen fósil y renovables en las etapas de ciclo de vida del edificio y en los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia

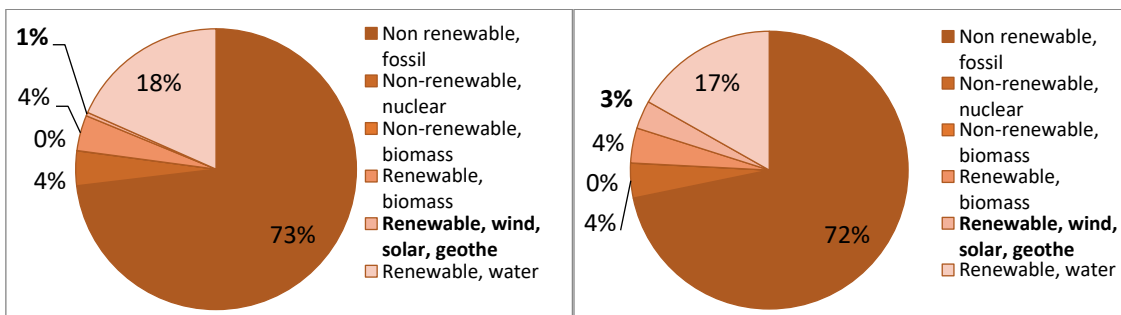


Gráfico 30. Proporción de origen de la energía total consumida por el edificio con minieólica (izquierda) y con fotovoltaica (derecha) en todas sus etapas de ciclo de vida. Fuente: Elaboración propia

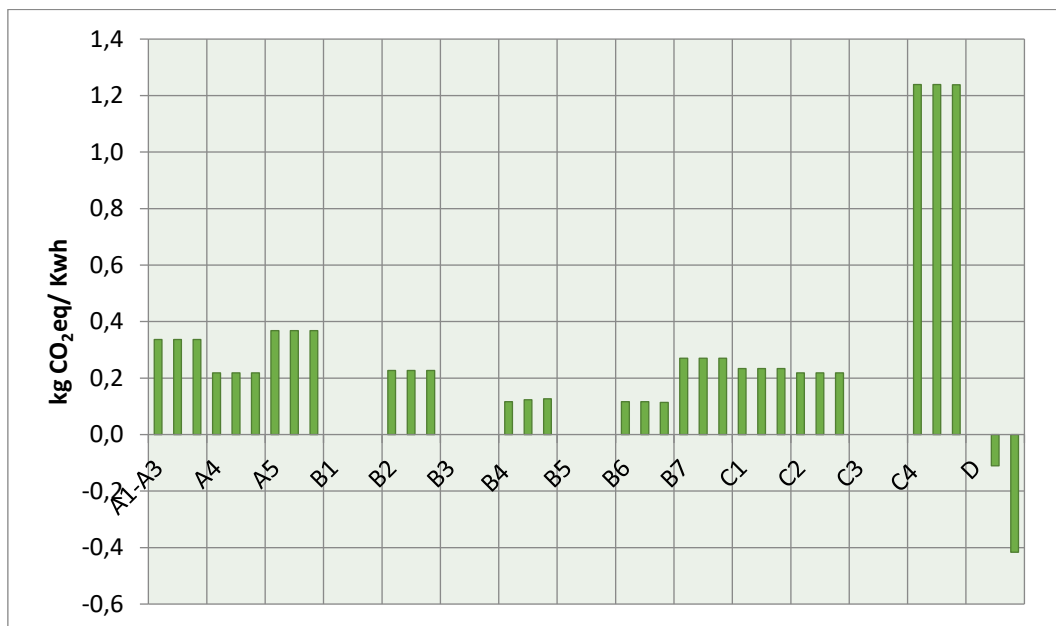


Gráfico 31. Emisiones de CO<sub>2</sub>eq por kWh requerido en las etapas de ciclo de vida del edificio y en los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia

En cuanto al Gráfico 31, este plantea una relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub>eq emitidas respecto a la energía necesaria en cada etapa de ciclo de vida, cuyo promedio es de 0,33 kg CO<sub>2</sub>eq/ kWh (exceptuando la etapa D), y encontrando que las emisiones presentan variaciones menos notables con excepción de la etapa C4 donde se confirma la hipótesis de enormes emisiones respecto a la energía requerida. Las variaciones entre escenarios en las etapas B4 y B6 son poco notables, contrario a la etapa D, donde se presentan grandes variaciones en los tres escenarios con valores negativos.

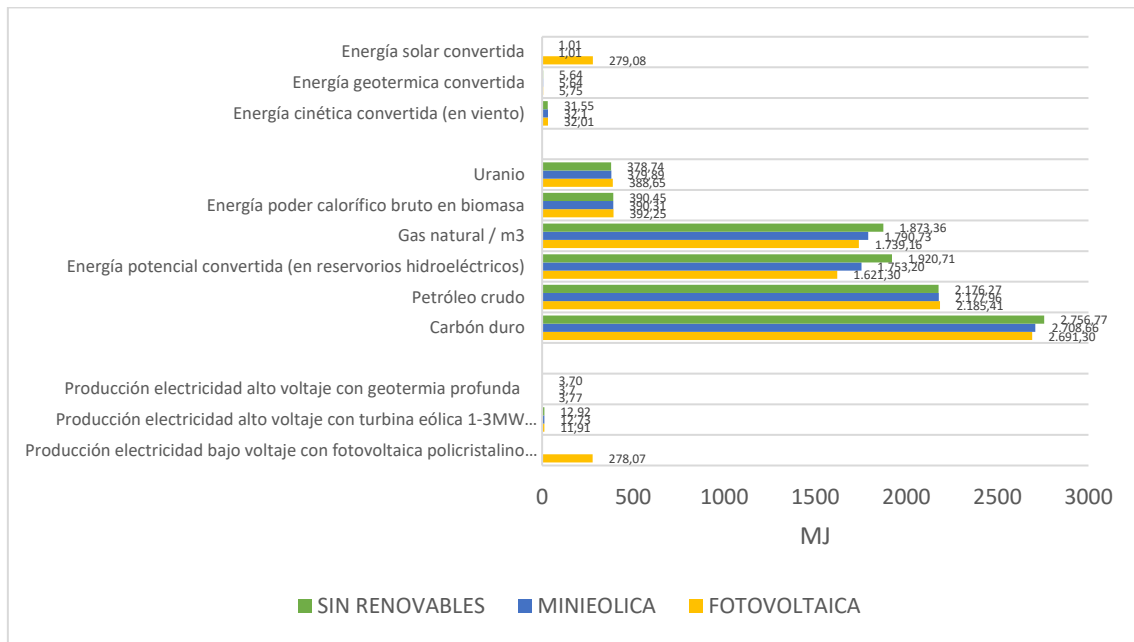


Gráfico 32. Contribución e inventario de caracterización representativos de energías renovables no convencionales según metodología CED para los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia

Frente al edificio sin renovables, al examinar su inventario de puntuación única sobre las fuentes de energía en todo el ciclo de vida del edificio, el Gráfico 32 muestra que los más frecuentes son en orden el carbón duro, el petróleo, la convertida por reservorios hidroeléctricos, y el gas natural con porcentajes del 28% al 19%; la energía convertida por ER no convencional aparece a partir del noveno lugar representando menos del 0,3%. Al detallar la contribución de las ER no convencional como fuente energética, existe una considerable participación de producción de energía eléctrica de alto voltaje por turbinas eólicas de 1 a 3 MW de potencia con procedencia de varios países, confirmado por el inventario de caracterización que valora este tipo de energía convertida en un 82%, seguido de la geotérmica con un 15% y la energía solar con un 3% (dentro del 0,3%).

En cuanto al edificio con minieólica, la puntuación única sobre las fuentes de energía en todo el ciclo de vida del edificio, muestra que las más frecuentes son en orden el carbón duro, el petróleo, el gas natural, y la convertida por reservorios hidroeléctricos, con porcentajes del 28% al 18% (estos dos últimos se invierten respecto al edificio sin renovables); la convertida por ER no convencionales aparecen a partir del noveno lugar representando menos del 0,3% (igual que el caso anterior). Al detallar la contribución de las ER no convencionales como fuente energética, se repiten los mismos porcentajes del caso anterior, el edificio sin energías renovables, donde se presenta una variación muy pequeña (0,2 MJ) y evidenciando la escasa contribución que tiene la turbina minieólica respecto a los flujos energéticos en el ciclo de vida del edificio.

Este inventario de puntuación única para el edificio con fotovoltaica, muestra que las fuentes energéticas más frecuentes son en orden el carbón duro, el petróleo, el gas natural, y la convertida por reservorios hidroeléctricos, con porcentajes del 28% al 17% (estos dos últimos se invierten respecto al edificio sin renovables); la convertida por ER no convencional aparecen en el séptimo lugar representando por un 3%. Al detallar la contribución de estas ER no convencionales como fuente energética, se presenta una notoria diferencia donde la producción de energía eléctrica de bajo voltaje por paneles fotovoltaicos policristalinos en cubierta plana constituye un 88%, valor reafirmado por el inventario frente a la energía solar convertida; en segundo lugar se ubican las turbinas eólicas de 1 a 3 MW de potencia con procedencia de varios países, donde el inventario de caracterización valora este tipo de energía convertida en un 10% (dentro del 3% mencionado).

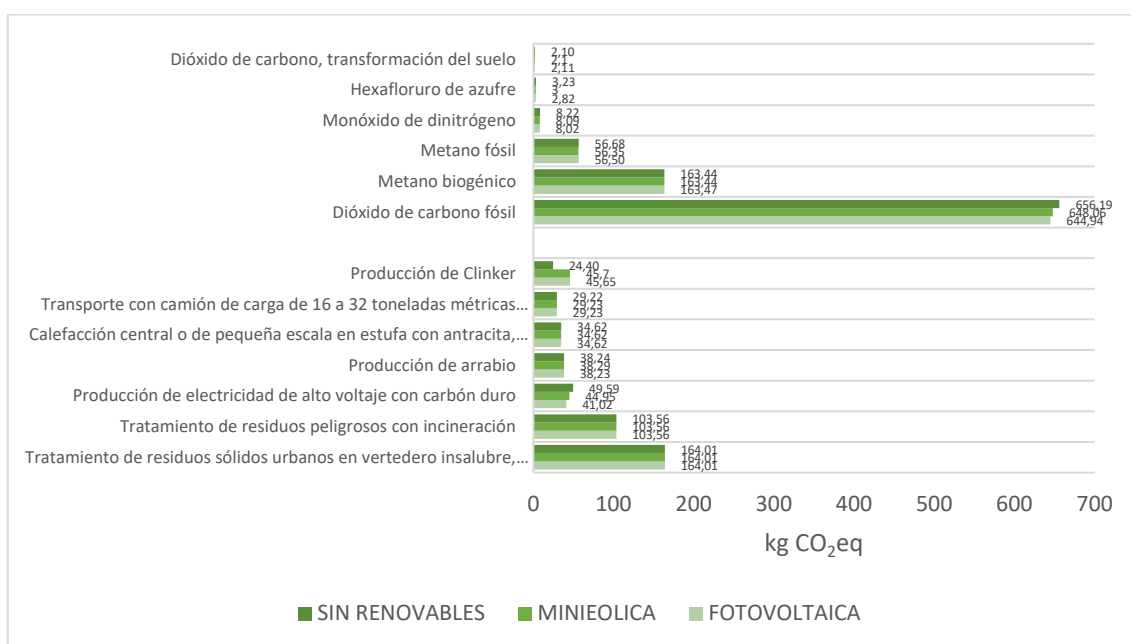


Gráfico 33. Contribución e inventario de caracterización representativos de la categoría “cambio climático” según metodología ReCiPe para los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia

El análisis enfocado en las emisiones de CO<sub>2</sub>eq (categoría calentamiento global, GWP), revela que en el edificio sin renovables, la mayor parte de estas provienen de la etapa C4 (36%), seguido de la A1-A3 (20%), B7 (14%), y B6 (11%) (ver Red de caracterización en Anexo 9). Esta información es confirmada por el inventario de procesos de mayor contribución del Gráfico 33, que es repuntada por el tratamiento de residuos de construcción en vertedero y la incineración de residuos peligrosos (18% y 11%), la electricidad consumida en la etapa de uso (5%), el arrabio (producto del proceso de fundición de las menas del hierro) utilizado en la fabricación de acero y otros procesos de la etapa A1-A3 (4%), entre otros. Las sustancias relacionadas con gases de efecto invernadero emitidas al aire con mayor presencia en todo el ciclo de vida del edificio son el dióxido de carbono de origen fósil (73%), el metano biogénico (18%), y el metano de origen fósil (6%).

En cuanto al edificio con minieólica, este análisis de emisiones de CO<sub>2</sub>eq presenta fuertes similitudes con el escenario de edificio sin renovables, donde la mayor parte de las emisiones provienen de la etapa C4 (36%), seguido de la A1-A3 (20%), B7 (14%), y B6



(11%). El leve cambio en decimas también se observa en los inventarios de procesos de mayor contribución (Gráfico 33) donde se evidencia que frente a GEI la disminución de dióxido de carbono de origen fósil es de 8,13 kg CO<sub>2</sub>eq y de metano de origen fósil 0,33 kg CO<sub>2</sub>eq.

Finalmente, este análisis para el edificio con fotovoltaica, también presenta fuertes similitudes con el escenario de edificio sin renovables y con minieólica, donde la mayor parte de las emisiones provienen de la etapa C4 (36%), seguido de la A1-A3 (20%), B7 (15%), y B6 (11%). El leve cambio en decimas también se observa en los inventarios de procesos de mayor contribución (Gráfico 33) donde se evidencia que frente a GEI la disminución de dióxido de carbono de origen fósil es de 11,25 kg CO<sub>2</sub>eq, 0,18 kg CO<sub>2</sub>eq para el metano de origen fósil, pero el metano biogénico aumenta 0,03 kg CO<sub>2</sub>eq respectivamente.

A continuación, se exponen los resultados por caracterización para cada uno de los 3 escenarios, en cada una de las etapas de ciclo de vida del edificio. Para mayor entendimiento de las etapas de ciclo de vida y sus códigos que son señalados en el presente análisis, cada uno representa:

A1-A3 Suministro de materias primas, Transporte, y Fabricación de materiales

A4 Transporte hasta y dentro de la obra

A5 Instalación en el edificio

B1 Uso

B2 Mantenimiento

B3 Reparación

B4 Reemplazo

B5 Rehabilitación

B6 Uso operativo de energía

B7 Uso operativo de agua

C1 Deconstrucción, demolición

C2 Transporte del producto desechado hasta el lugar de procesado

C3 Procesado de residuos para su reutilización, recuperación y/o reciclaje

C4 Eliminación, pre-tratamiento físico y gestión de residuos de demolición

D Reutilización/ recuperación/ potencial de reciclaje

Para mayor comprensión de los resultados obtenidos, es necesario referenciar las diferentes modalidades de evaluación del impacto de ciclo de vida que fueron implementadas en esta investigación y que se obtienen a partir de las metodologías de cálculo:

- **Caracterización:** resultados calculados mediante factores de caracterización, que pueden ser particulares para cada categoría de impacto y su indicador, con base en el inventario. Por ejemplo, en el caso de la categoría GWP, cada uno de los tipos de GEI tiene un factor de caracterización que al ser sumados proporcionan el resultado final cuyo indicador son las emisiones de CO<sub>2</sub>eq. Esta opción está disponible para las metodologías ReCiPe y CML, pero no para CED.

- **Ponderación:** Consiste en el uso de factores de cuantificación que proporcionan una importancia relativa a cada una de las categorías de impacto, que al sumarlas se obtiene un resultado ponderado manifestado en un único índice ambiental. Esta opción está disponible para la metodología CED, donde se puede apreciar a todas las etapas de ciclo de vida sumadas y agrupadas según el tipo de origen de la energía utilizada.
- **Puntuación única:** El cálculo y datos son similares a Ponderación, sin embargo, se diferencia en que se invierte la forma de representar los resultados, que en el caso de la metodología CED, clasifica los datos de origen de la energía según su representatividad en cada una de las etapas de ciclo de vida. No puede confundirse con versiones anteriores de algunas metodologías de cálculo donde todas las categorías de impacto, con naturaleza y unidades distintas, se representaban bajo una misma unidad de puntaje, permitiendo su comparación; esto se prestaba para discrepancias, que no es el caso de CED, ya que el único indicador cuantificado es la energía.
- **Contribución e inventario:** La contribución se refiere a la porción o cantidad que tienen ciertos elementos, sustancias, o procesos frente al inventario de ciclo de vida o de los resultados de caracterización en cada una de las categorías de impacto. Por su parte, el inventario cuantifica a partir de los resultados de inventario o de caracterización en las categorías de impacto, cuales sustancias caracterizadas tienen mayor representatividad.
- **Energía renovable convencional y no convencional:** Si bien no se trata de modalidades de evaluación de impacto de ciclo de vida, si son mencionadas repetidamente en los resultados, pues la metodología de cálculo CED hace la diferenciación en los resultados. En línea con lo analizado a partir de la Ilustración 7, la energía renovable convencional se refiere a fuentes energéticas como la hidroeléctrica o la biomasa de alta potencia (“renewable water” o “renewable biomass”, en resultados CED); las energías renovables no convencionales (o FNCER) son las tecnologías alternativas analizadas en esta investigación que comprenden la fotovoltaica, eólica y geotermia (“Renewable wind, solar, geothe” en resultados CED).

### 5.5.1. Edificio sin energías renovables

De acuerdo con el Gráfico 34 que calcula los impactos potenciales del edificio en todo su ciclo de vida según la metodología ReCiPe, las etapas que tienen alto porcentaje (>20%) frente a una mayoría de categorías de impacto son la A1-A3, B7, y C4; al reducir el rango (>10%) sobresalen otras etapas adicionales como A5 y B6; las categorías de impacto que están por encima del 10% en las etapas mencionada son “Formación de ozono, salud humana”, “Formación de ozono, ecosistemas terrestres” y “Escasez de recursos fósiles”. La categoría “Calentamiento global” tiene porcentajes mayores al 11% en las etapas ya mencionadas con excepción de A5, y tiene altos porcentajes (>20%) en A1-A3 y C4.

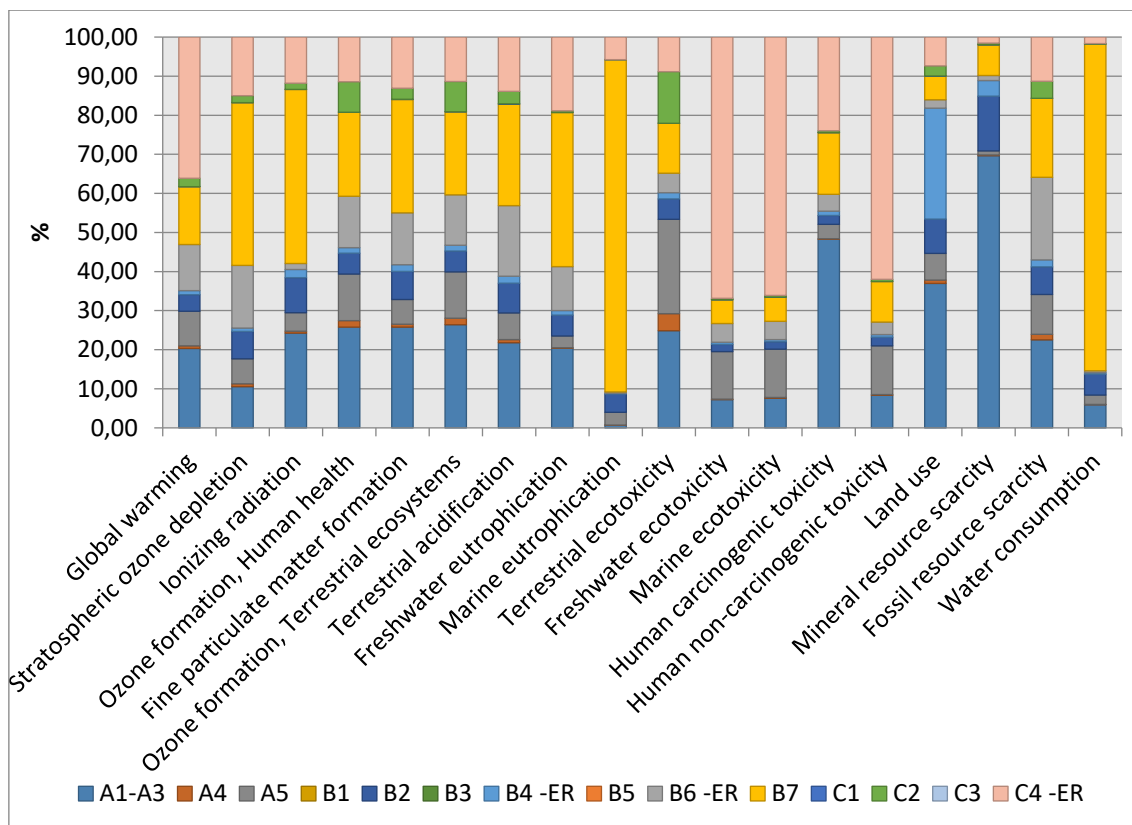


Gráfico 34. Caracterización en % con metodología ReCiPe de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

Estos resultados son reiterativos en el análisis por medio de la metodología CML (Gráfico 35), donde algunas de las etapas mencionadas (B2, B6, y B7) tienen promedios de representatividad por encima del 10%, y A1-A3 y C4 están por encima del 20%, donde la categoría “Agotamiento abiótico, combustibles fósiles” está presente en todas estas etapas. De manera similar, la categoría “Calentamiento global” tiene porcentajes mayores al 10% en las etapas A1-A3, B6, B7, y C4.

En cuanto al análisis con la metodología CED, de la ponderación en mWh (Gráfico 36), nos muestra el consumo energético del edificio por tipo u origen y su participación en cada etapa de ciclo de vida, evidenciando que la energía no renovable de origen fósil tiene un consumo muy notorio con 1,97 mWh sumando todas las etapas, le sigue la energía renovable hidráulica con 0,53 mWh (casi ¼ parte), y de manera muy escasa la energía no renovable nuclear y la renovable por biomasa con 0,1 mWh cada una; como era de esperar, la energía renovable no convencional (solar, eólica, geotérmica) es casi insignificante con 0,01 mWh.

La participación de cada uno de estos tipos de energía según cada etapa de ciclo de vida es más notoria en los resultados de puntuación única (Gráfico 37), donde la energía no renovable de origen fósil tiene la mayor representación (entre un 45% y 98%) en todas las etapas de ciclo de vida con excepción de la etapa B6 (46% vs 53% de la renovable hidráulica); a su vez, las etapas de mayor consumo son A1-A3, B6, B7, con más de 1,7 GJ. Lo sucedido en la etapa B6 donde es notable la participación de la renovable hidráulica se debe a que corresponde con el consumo eléctrico en toda la vida útil del edificio de 50 años, y que la matriz energética colombiana está compuesta en su mayoría por esta clase de energía como se vio anteriormente. Si bien es una fracción muy pequeña,

en la red de caracterización (Anexo 9) se puede visualizar un flujo de energía renovable no convencional en la epata B7 relacionado con la generación y abastecimiento de agua potable (0,02 GJ), seguido de la fabricación del acero reforzado en la etapa A1-A3 (0,01 GJ).

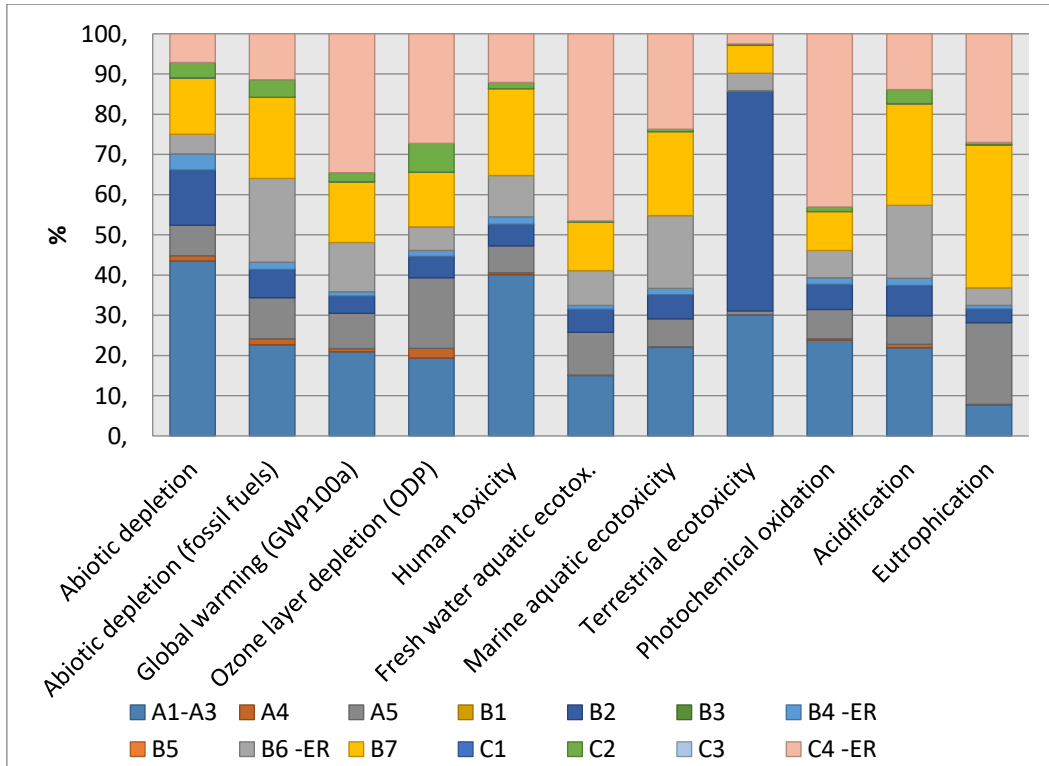


Gráfico 35. Caracterización en % con metodología CML de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

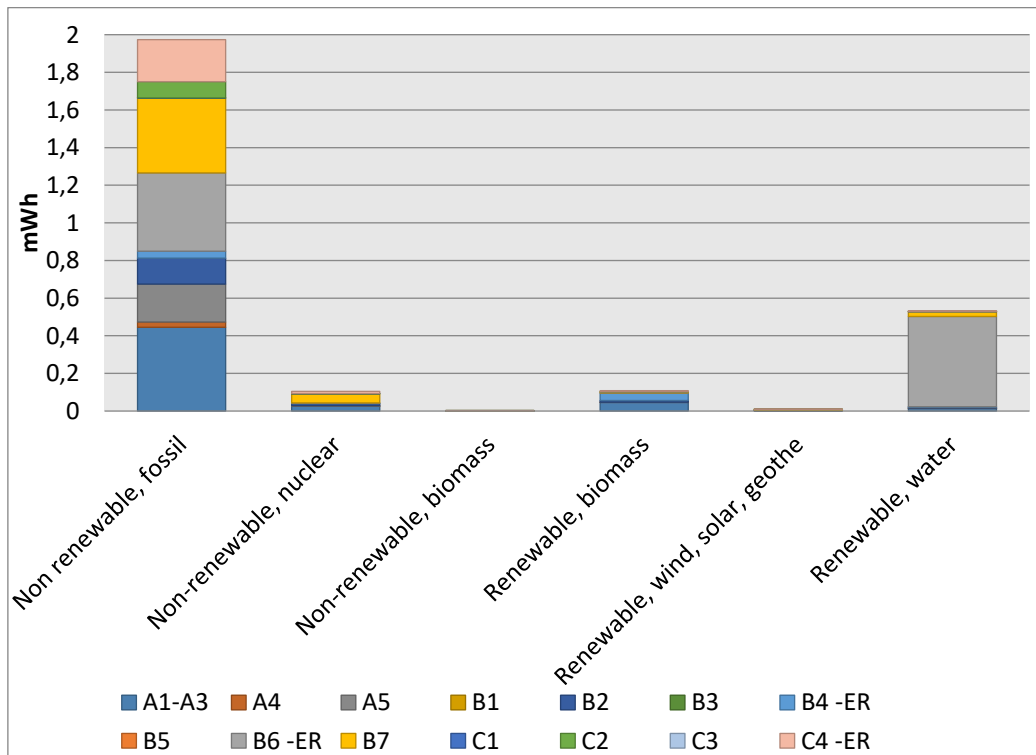


Gráfico 36. Ponderación con metodología CED de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

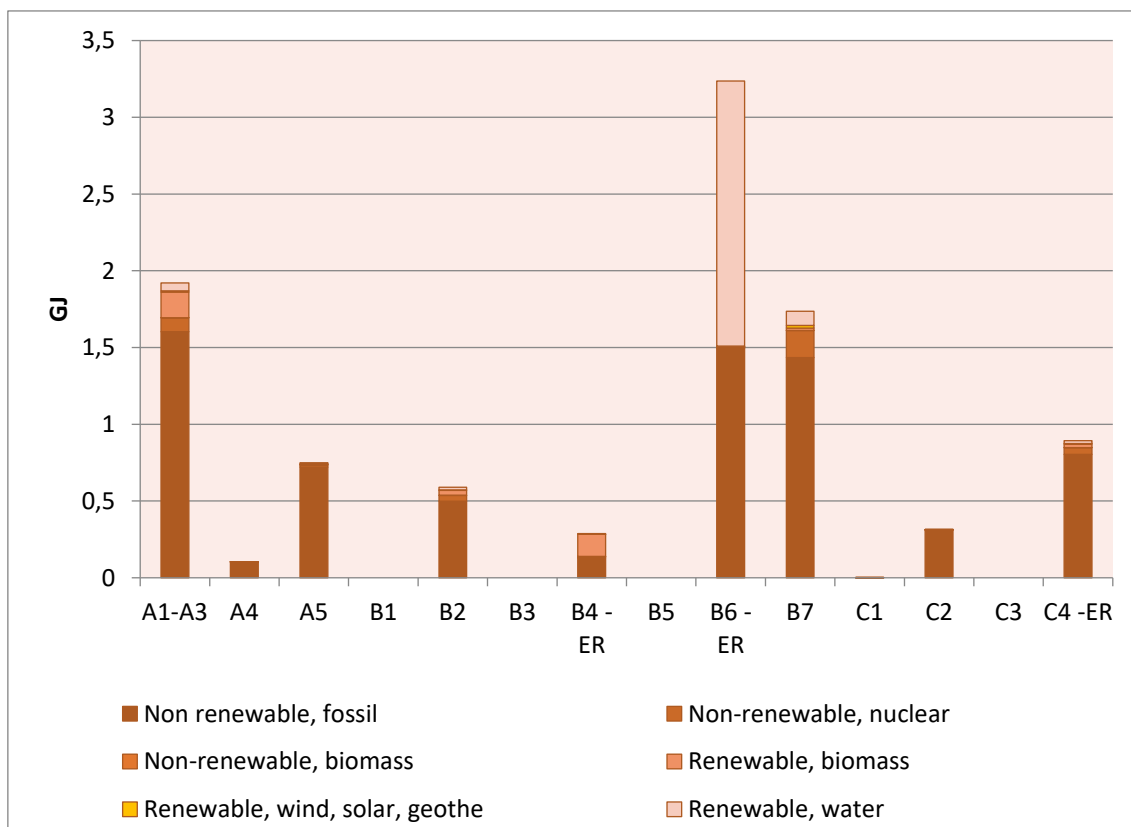


Gráfico 37. Puntuación única con metodología CED de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

A nivel general, los mayores impactos de la edificación provienen del tratamiento final del agua operativa, de los materiales y sus procesos de fabricación (impactos embebidos), del tratamiento de residuos al final de la vida útil del edificio, y en menor medida, al uso de energía operativa. El agua operativa (B7) concentra la mayor parte de sus impactos en los vertimientos, es decir, el agua gris que es expulsada después de su uso, seguido del agua suministrada por la red. Los materiales usados para la construcción del edificio (A1-A3) concentran la mayor parte de sus impactos en el uso del concreto y del acero de refuerzo, los cuales componen indisolublemente el sistema estructural del edificio; esto se debe a la presencia del arrabio y de relaves sulfuradas de la producción minera. El tratamiento de residuos al final de la vida útil del edificio (C4) concentra la mayor parte de sus impactos en los considerados peligrosos posterior a la demolición del edificio, el cual se asume que son incinerados; los demás tipos de residuos son conducidos al vertedero sin ningún tipo de reciclaje.

### 5.5.2. Edificio con energía renovable mini eólica

En términos generales, visualmente los gráficos no presentan diferencias respecto al edificio sin renovables; según el Gráfico 38 que calcula los impactos potenciales del edificio en todo su ciclo de vida según la metodología ReCiPe, las etapas que tienen alto porcentaje (>20%) frente a varias categorías de impacto son la A1-A3, B7, y C4; al reducir el rango (>10%) sobresalen otras etapas adicionales como A5 y B6; las categorías de impacto que están por encima del 10% en las etapas mencionada son “Formación de

ozono, salud humana”, “Formación de ozono, ecosistemas terrestres” y “Escasez de recursos fósiles”. La categoría “Calentamiento global” tiene porcentajes mayores al 11% en las etapas ya mencionadas con excepción de A5, y tiene altos porcentajes (>20%) en A1-A3 y C4.

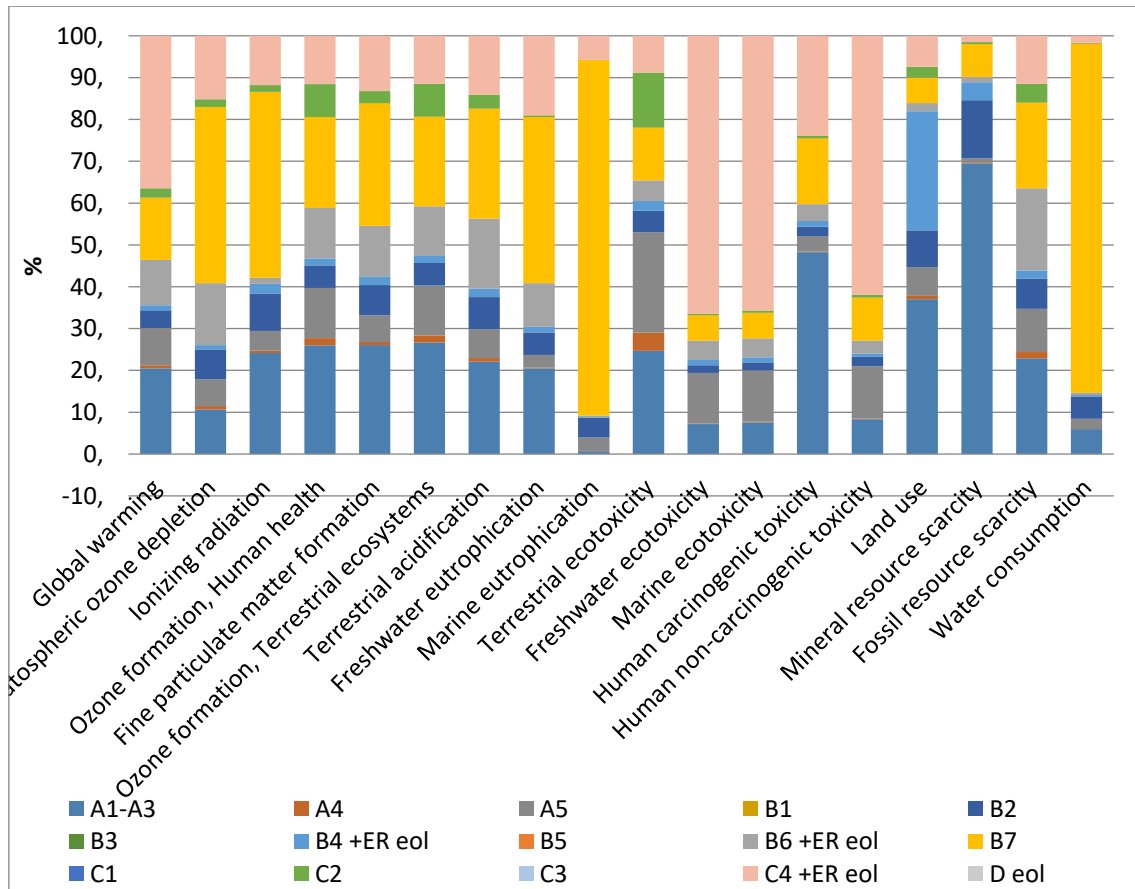


Gráfico 38. Caracterización en % con metodología ReCiPe de ACV del edificio con energía minieólica.  
Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

Igualmente, es reiterativo el análisis por medio de la metodología CML (Gráfico 39), donde algunas de las etapas mencionadas (B2, B6, y B7) tienen promedios de representatividad por encima del 10%, y A1-A3 y C4 están por encima del 20%, donde la categoría “Agotamiento abiótico, combustibles fósiles” está presente en todas estas etapas. De manera similar, la categoría “Calentamiento global” tiene porcentajes mayores al 10% en las etapas A1-A3, B6, B7, y C4.

En cuanto al análisis con la metodología CED, el análisis de ponderación en Mwh (Gráfico 40), evidencia que la energía no renovable de origen fósil tiene un consumo muy notorio con 1,93 Mwh sumando todas las etapas (0,04 Mwh, o 40 kWh menos que el edificio sin renovables), le sigue la energía renovable hidráulica con 0,48 Mwh (0,05 Mwh menos que el edificio sin renovables), y de manera muy escasa la energía no renovable nuclear 0,1 Mwh (igual que sin renovables), y la renovable por biomasa con 0,0008 Mwh; sorprendentemente, la energía renovable no convencional (solar, eólica, geotérmica) es casi insignificante y con el mismo valor que el edificio sin renovables con 0,01 Mwh.

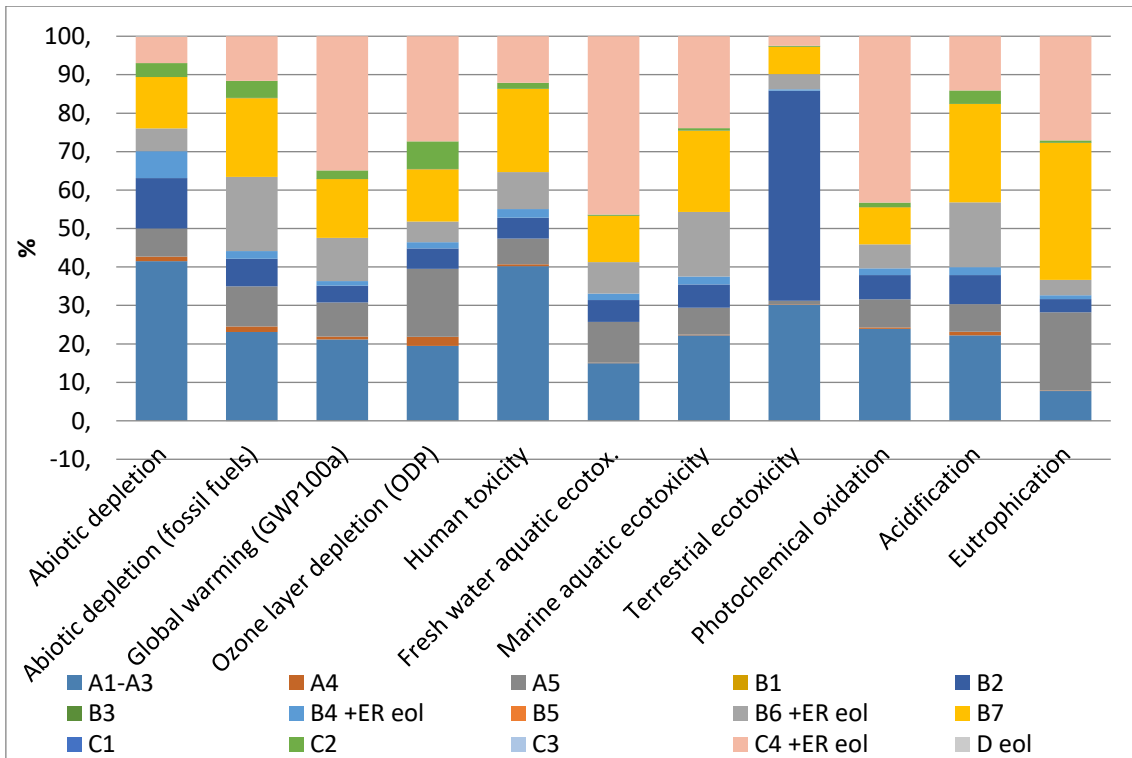


Gráfico 39. Caracterización en % con metodología CML de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

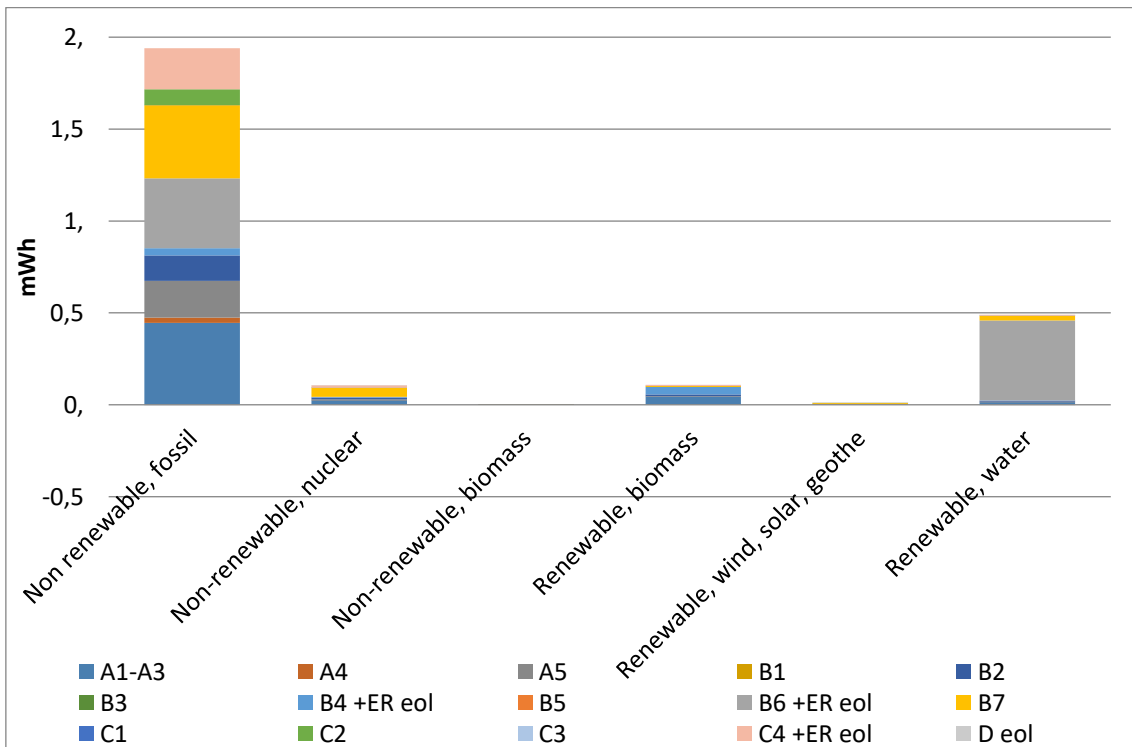


Gráfico 40. Ponderación con metodología CED de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

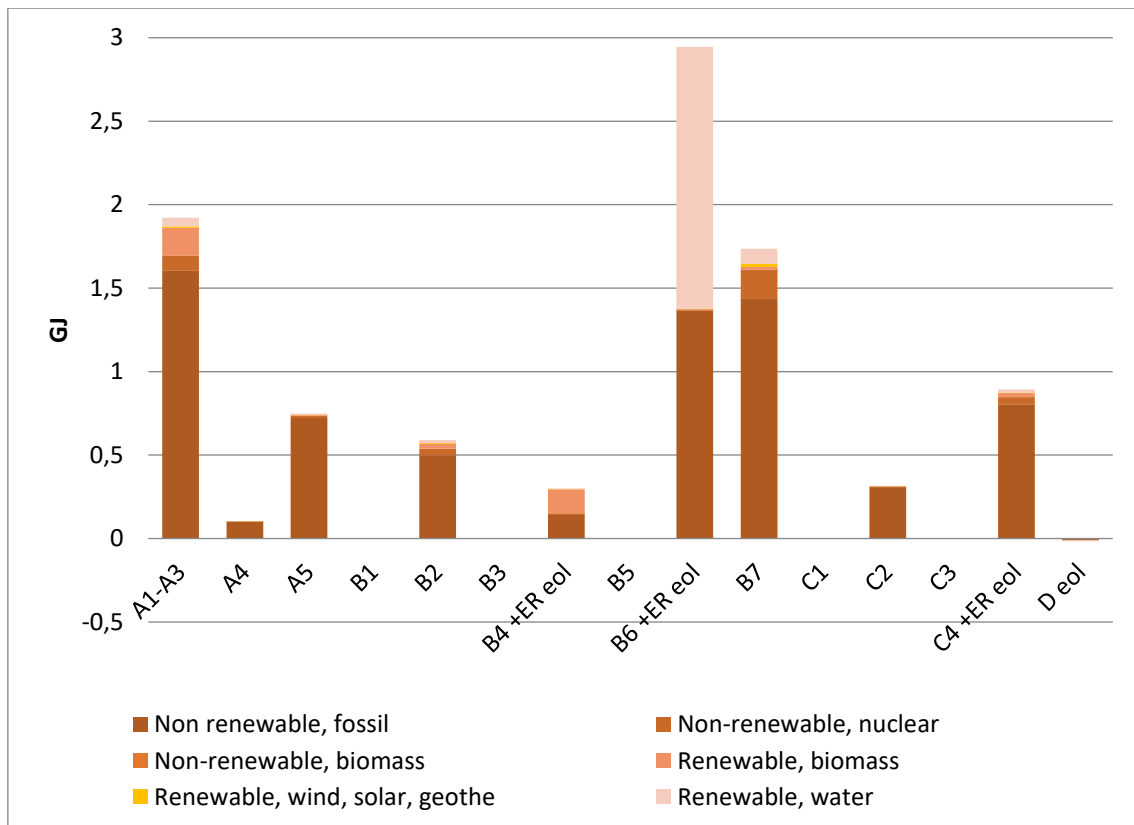


Gráfico 41. Puntuación única con metodología CED de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

En los resultados de puntuación única (Gráfico 41), la energía no renovable de origen fósil tiene la mayor representación (entre un 46% y 98%) en todas las etapas de ciclo de vida, la etapa B6 conserva la misma participación de la renovable hidráulica respecto al edificio sin renovables (53%) debido a lo ya mencionado sobre la matriz energética colombiana; las etapas de mayor consumo siguen siendo A1-A3, B6, B7, con más de 1,7 GJ. Igual que en el caso anterior, en la red de caracterización se puede visualizar un flujo de energía renovable no convencional en la etapa B7 relacionado con la generación y abastecimiento de agua potable y de la fabricación del acero reforzado en la etapa A1-A3, pero no se observa un mayor aporte en la etapa B6 por la generación de energía renovable. La etapa D es casi inapreciable.

Los mayores impactos de la edificación se replican casi idénticamente con el caso del edificio sin energía renovable, donde se observó los altos resultados relacionados con el agua operativa (B7), los materiales usados para la construcción del edificio (A1-A3), y el tratamiento de residuos al final de la vida útil del edificio (C4). Frente a los inventarios y contribuciones de caracterización entre el edificio sin renovables y el que incluye energía minieólica representados por el Gráfico 32 y el Gráfico 33, se observa que algunos procesos y sustancias presentan pequeñas variaciones que hacen variar sus porcentajes de representación en unas cuantas décimas.



### 5.5.3. Edificio con energía renovable fotovoltaica

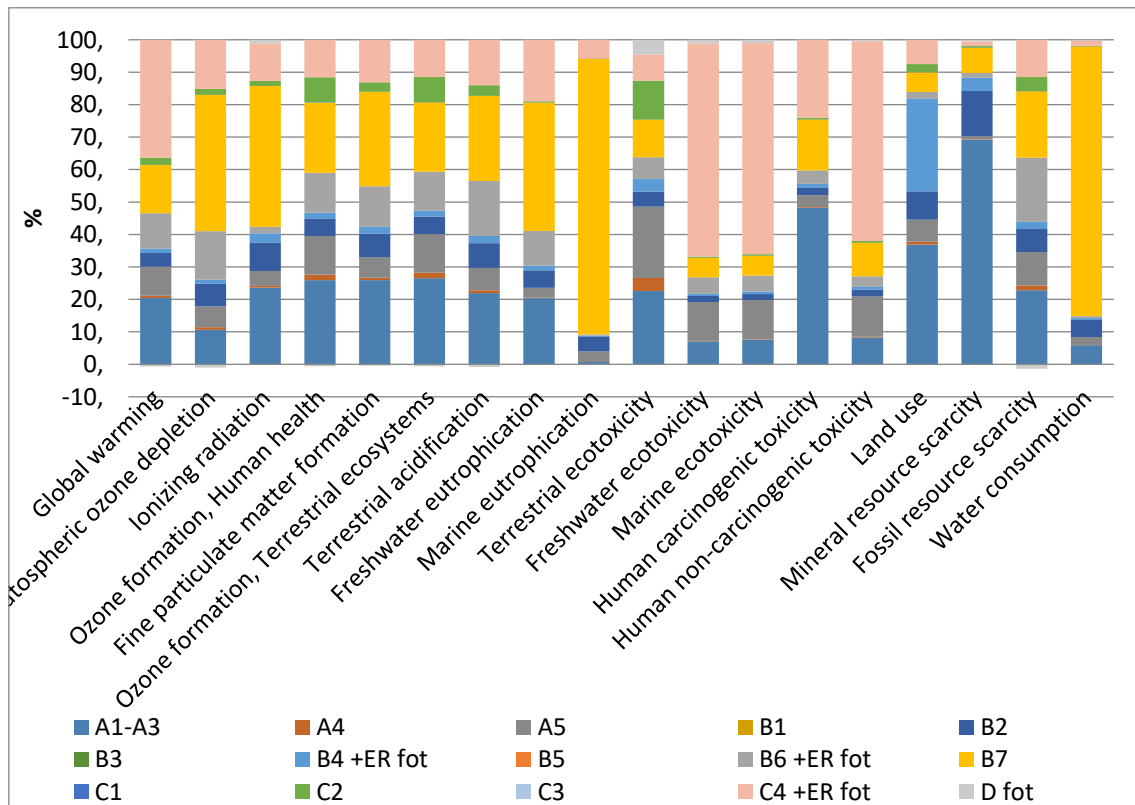
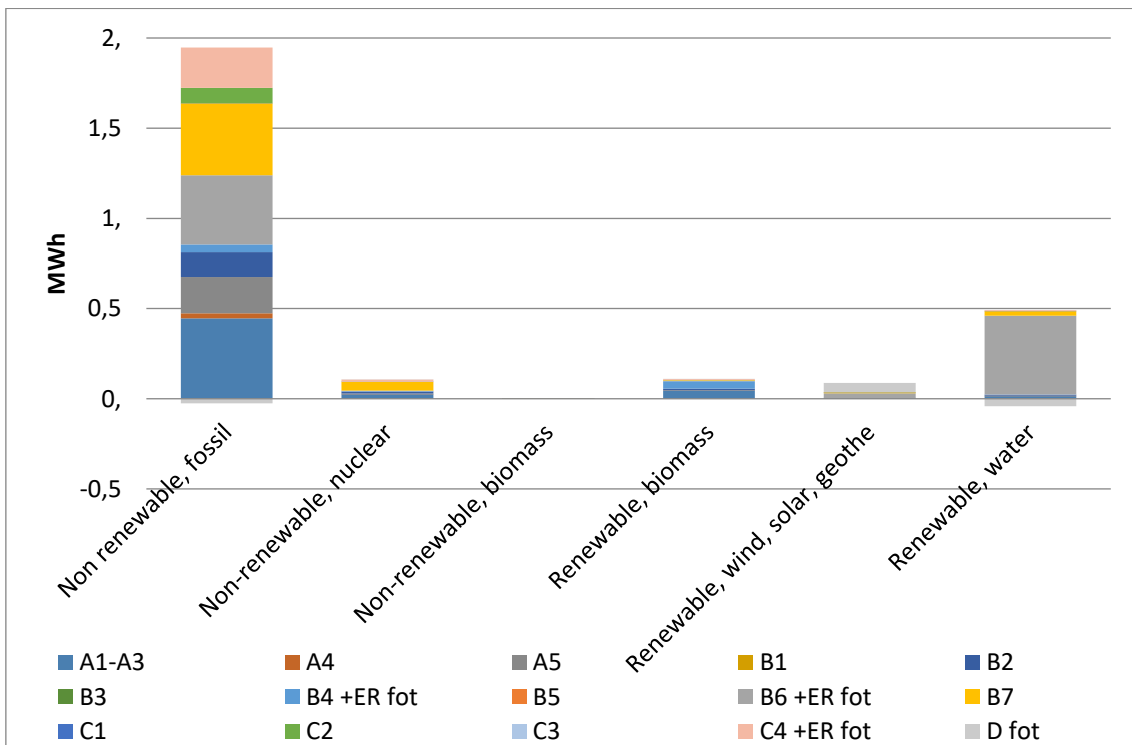
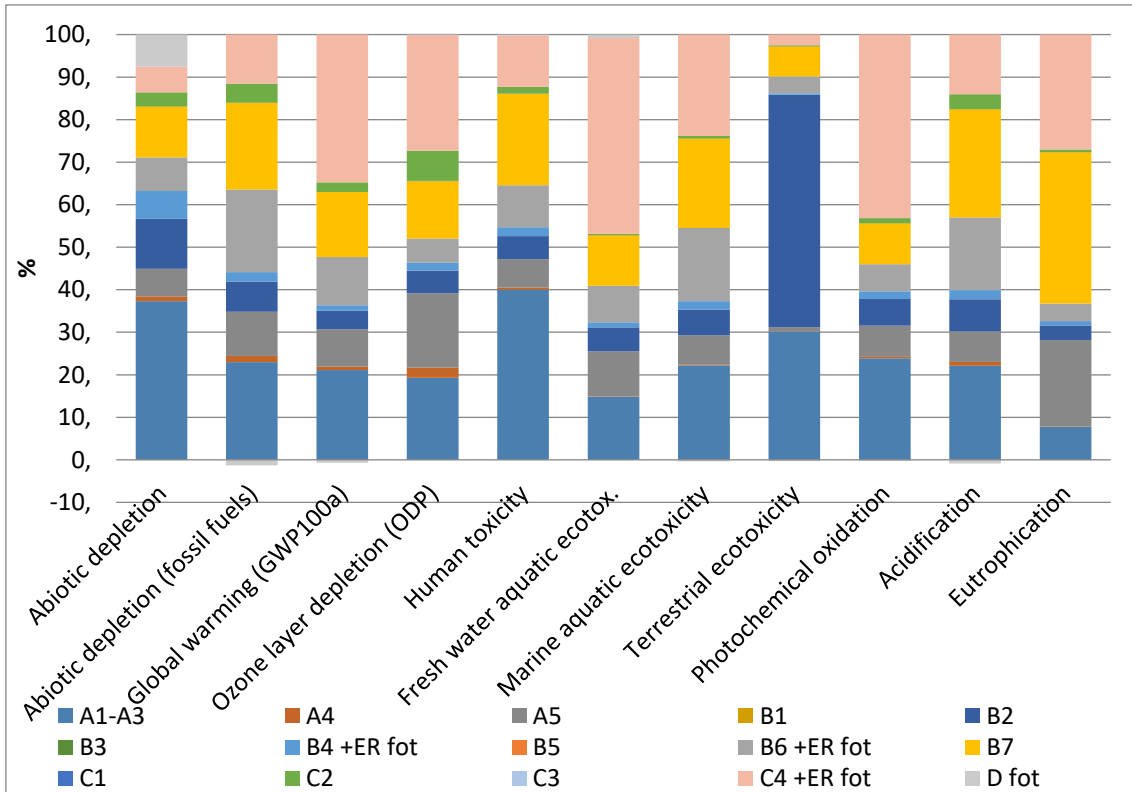


Gráfico 42. Caracterización en % con metodología ReCiPe de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

Al igual que con la tecnología anterior, al evaluar la totalidad del edificio, los cambios en la proporción de categorías de impacto son muy poco notables; sin embargo, se pueden notar pequeñas diferencias en las categorías “Escasez de recursos fósiles” con la etapa D (valores negativos), “Ecotoxicidad terrestre” con las etapas A1-A3 y D, y “radiación ionizante” con la etapa D. Recordemos que las etapas B4, B6, C4 y D son las que presentan diferencias en el inventario modelado respecto al edificio sin renovables. Por tanto, el Gráfico 42 que calcula los impactos potenciales del edificio en todo su ciclo de vida según la metodología ReCiPe, presenta patrones muy similares a los referenciados en los dos casos anteriores.

Así mismo, el análisis por medio de la metodología CML (Gráfico 43), presenta las mismas similitudes, con excepción de la categoría “Agotamiento abiótico”, la cual presenta variaciones en los porcentajes de las etapas A1-A3, B4, B6, B7 y D, y de manera muy sutil en la categoría “Ecotoxicidad de agua fresca” en la etapa D.

En cuanto al análisis con la metodología CED, el análisis de ponderación en Mwh (Gráfico 44), evidencia que la energía de origen fósil tiene un consumo notorio de 1,92 Mwh sumando todas las etapas (0,05 Mwh, o 51,46 kWh menos que el edificio sin renovables), le sigue la energía renovable hidráulica con 0,45 Mwh (0,08 Mwh menos que el edificio sin renovables), y de manera muy escasa la energía no renovable nuclear y la renovable por biomasa con 0,1 Mwh (igual que sin renovables) y 0,0008 Mwh respectivamente; finalmente, la energía renovable no convencional (solar, eólica, geotérmica) tiene un valor de 0,09 Mwh, que son 0,08 Mwh más que los otros dos escenarios.



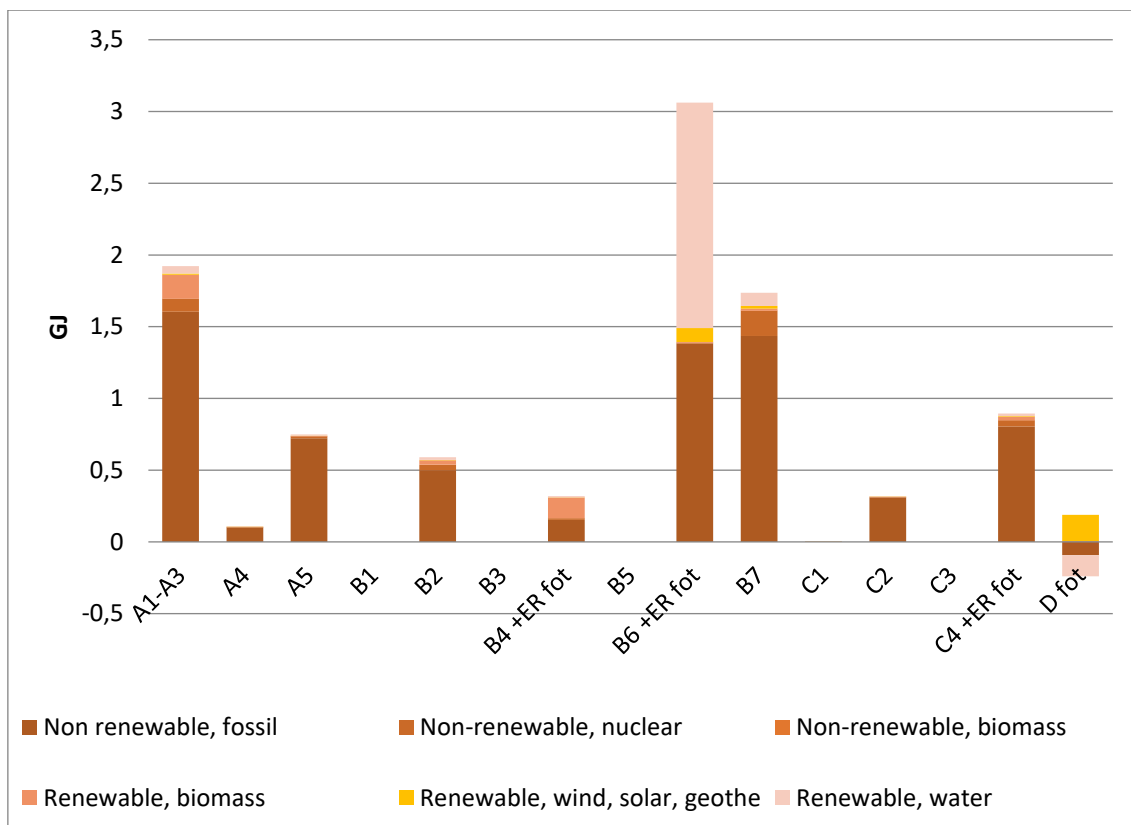


Gráfico 45. Puntuación única con metodología CED de ACV del edificio con energía fotovoltaica.  
Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

En los resultados de puntuación única (Gráfico 45), la energía no renovable de origen fósil tiene la mayor representación (entre un 45% y 98%) en todas las etapas de ciclo de vida, la etapa B6 tiene una participación de la renovable hidráulica de 0,44 mWh, 0,04 mWh menos respecto al edificio sin renovables, y las etapas de mayor consumo siguen siendo A1-A3, B6, B7, con más de 1,7 GJ. La energía renovable no convencional (solar, eólica, geotérmica) total es de 0,09 mWh, 0,08 mWh adicionales respecto al edificio sin renovables.

Si bien los aumentos o reducciones frente a las categorías de impacto son levemente más notorios que el edificio con ER minieólica, en general los mayores impactos y etapas son las mismas que los otros dos escenarios, relacionados con el agua operativa (B7), los materiales usados para la construcción del edificio (A1-A3), y el tratamiento de residuos al final de la vida útil del edificio (C4). Frente a los inventarios y contribuciones de caracterización entre el edificio sin renovables y el que incluye energía fotovoltaica representados por el Gráfico 32 y el Gráfico 33, se observa que algunos procesos cambian de orden y en cantidad un poco más notoria que con minieólica, mientras que las sustancias asociadas y sus cantidades son casi las mismas; así mismo, la etapa B6 tiene un flujo de más del 30% y la etapa D del 58% de esta forma de energía en todo el ciclo de vida.

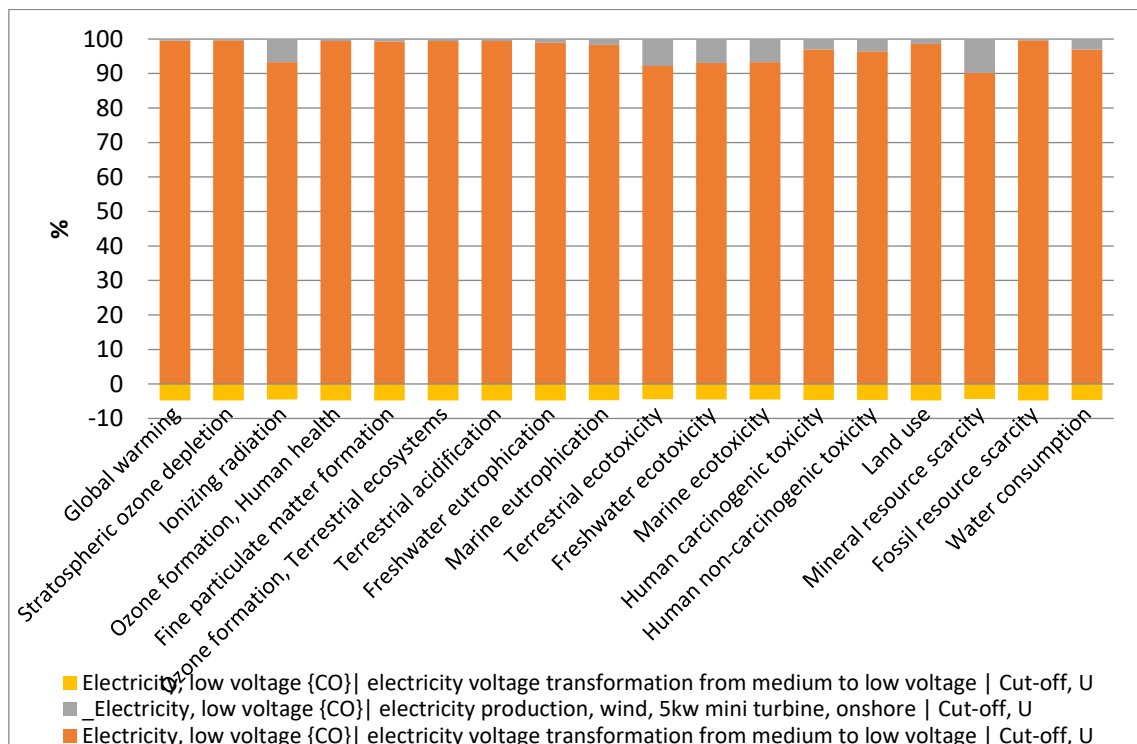
Como se expuso anteriormente, las etapas que han sido modificadas respecto al edificio sin ER son B4, B6, C4 y D con el fin de incorporar las características de las tecnologías de ER minieólica y fotovoltaica al edificio. Los resultados anteriores se abordaron analizando todas las etapas en su conjunto, mostrando pequeñas diferencias entre los tres escenarios dada la escala de análisis, es decir, del edificio completo y todos sus

componentes en su ciclo de vida; así mismo, es posible analizar cada una de las etapas para identificar características particulares ofrecidos por los dataset registrados. Debido a los objetivos y alcances de la presente investigación, se ha considerado relevante analizar en profundidad las etapas B6 y D, ya que están enfocadas al tema de energía y sus variaciones con el uso de tecnologías de ER. Se han omitido los resultados del edificio sin renovables para estas etapas ya que, al contemplar solo la energía de la red, este no muestra ninguna variación.

#### 5.5.4. Etapa B6

El uso de energía operativa (B6) registra sus impactos tomando en cuenta la fracción de consumo de la red pública y la generación de energía por renovables con la turbina minieólica o con paneles fotovoltaicos, que evitan que esa energía generada sea extraída de la red, causando valores negativos de los impactos ambientales, lo cual es benéfico de cara al propósito de estas estrategias. Por tanto, se hace una comparación de beneficios y desventajas ambientales del uso de ER en la edificación.

El Gráfico 46 compara los resultados de los escenarios con minieólica y fotovoltaica en la etapa B6 según la metodología ReCiPe, tomando en cuenta la electricidad tomada de la red, la electricidad generada por cada tecnología de ER, y la electricidad evitada de la red al incorporar ER. Se puede apreciar que la energía generada por las ER también provoca impactos, los cuales son mayores al 10% en las categorías “Escasez de recursos minerales” para el escenario con minieólica; a su vez, “Consumo de agua”, “Toxicidad humana no cancerígena”, “Ecotoxicidad marina”, “Ecotoxicidad de agua fresca”, “Escasez de recursos minerales” para el escenario con fotovoltaica. Los impactos son mayores al 30% en las categorías “Radiación ionizante” y “Ecotoxicidad terrestre” con fotovoltaica. Todas las categorías muestran valores negativos cercanos al 5%.



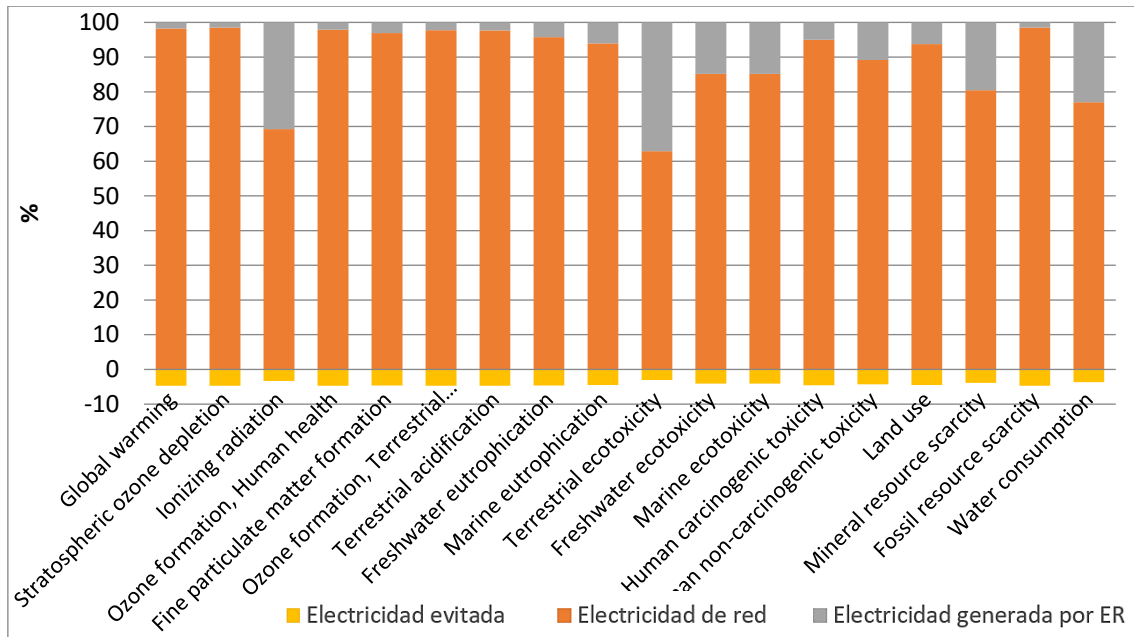


Gráfico 46. Caracterización en % con metodología ReCiPe de etapa B6 del edificio con energía minieólica (arriba) y fotovoltaica (abajo). Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

El mismo análisis realizado bajo la metodología CML (Gráfico 47) identifica como categoría mayor al 25% a “Agotamiento abiótico” para ambos escenarios, y donde el valor negativo por la electricidad evitada es el más pequeño, al ser cercano al 3%. Existen otras categorías por debajo del 10% asignado a la electricidad generada por ER, y las demás categorías evidencian valores negativos cercanos al 5%.

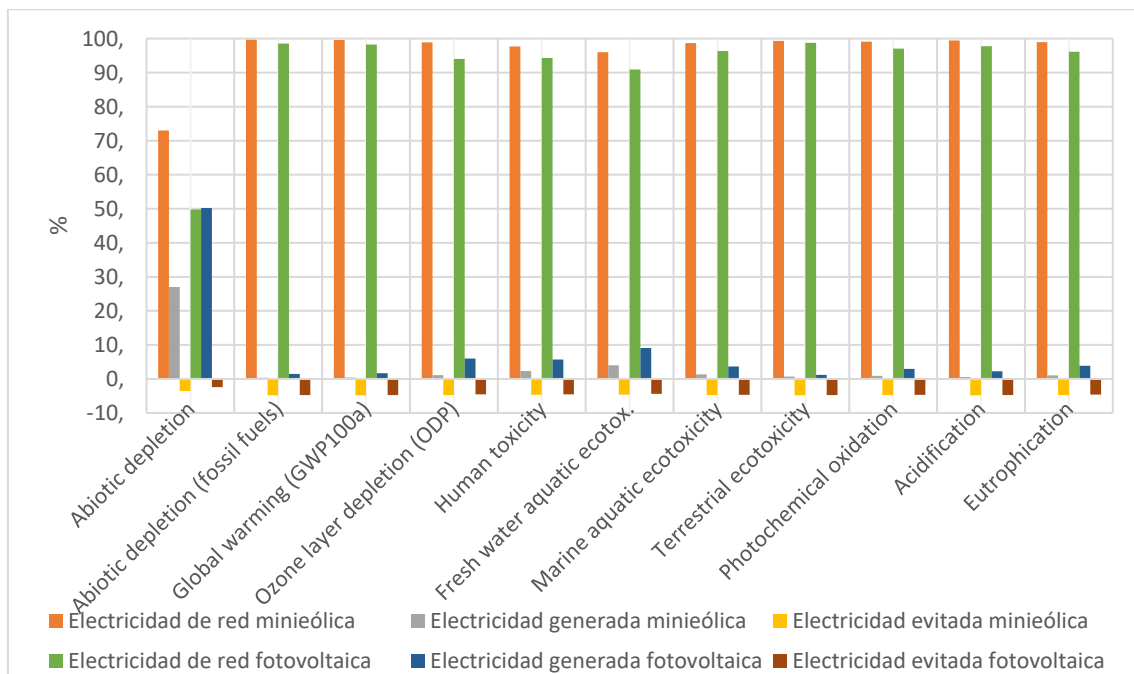


Gráfico 47. Caracterización en % con metodología CML de etapa B6 del edificio con energía minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia

Bajo la metodología CED, el análisis de ponderación para la etapa B6 (Gráfico 48) muestra un comportamiento muy similar en ambos escenarios, donde la electricidad de la red pública consumida está compuesta por energía de origen fósil, por renovable hidráulica incrementada cerca de 0,2 MJ, y ambas cuentan con una pequeña fracción con

valor negativo de aproximadamente 0,05 MJ. La principal diferencia es que el escenario con fotovoltaica muestra de manera más evidente una fracción de energía renovable no convencional cercana a 0,1 MJ.

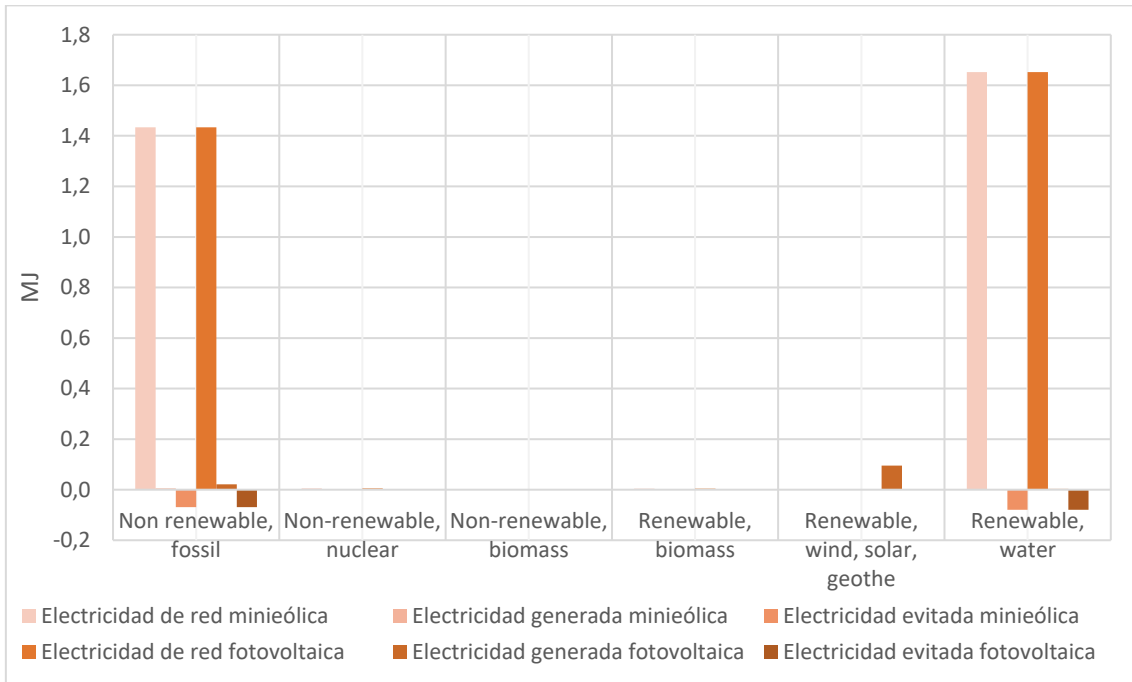


Gráfico 48. Ponderación con metodología CED de etapa B6 del edificio con energía minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia

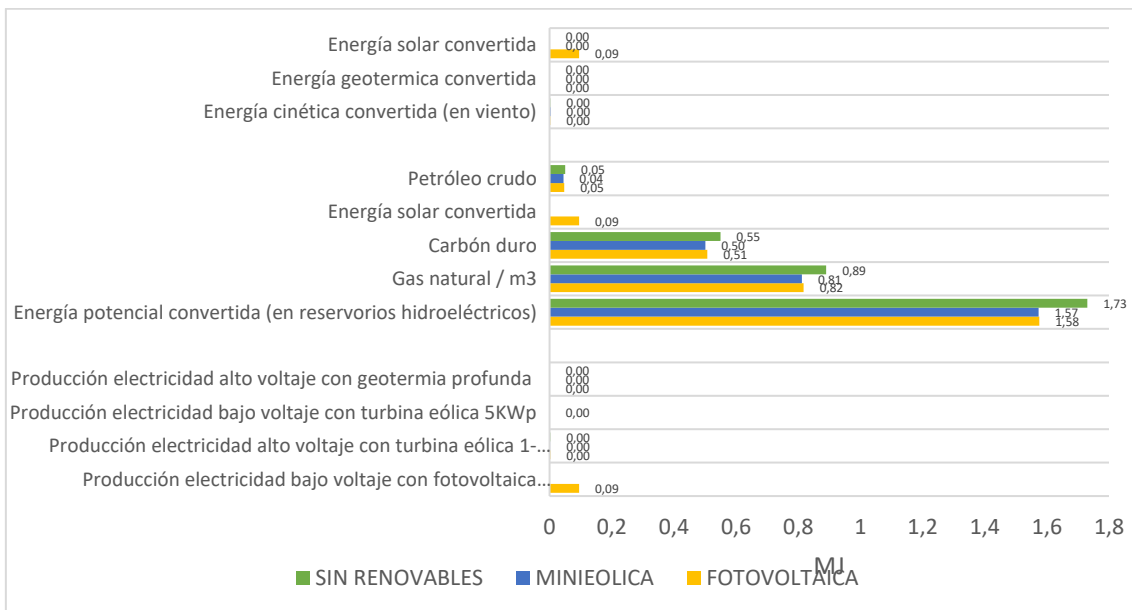


Gráfico 49. Contribución e inventario de caracterización representativos de energías renovables no convencionales según metodología CED para la etapa B6. Fuente: Elaboración propia

El inventario de puntuación única sobre las fuentes de energía en la etapa B6 mostrado por el Gráfico 49 muestra que los más frecuentes son, en orden, la convertida por reservorios hidroeléctricos, el gas natural, carbón duro, la proveniente del sol (solo para el escenario fotovoltaico), y el petróleo crudo, con porcentajes del 53% al 1%. La convertida por ER no convencional (no incluye la hidráulica) aparece en el cuarto lugar representado por un 3% solo para el escenario con fotovoltaica. Al detallar la contribución

de las energías renovables no convencionales como fuente energética, se destaca con un 97% la producción de electricidad de bajo voltaje con fotovoltaica policristalino de 3 kWp para el escenario con fotovoltaica, seguido con 68% de la producción de electricidad de alto voltaje con turbina eólica 1-3 MW, y con 22% la producción de electricidad de bajo voltaje con turbina eólica 5 KWp, las dos últimas para el escenario con minieólica. El inventario de caracterización se divide entre dos casos muy parecidos, el edificio sin renovables y el que incluye minieólica (cinética), y por otro lado, el edificio con fotovoltaica (solar), ambos asumiendo un 97%.

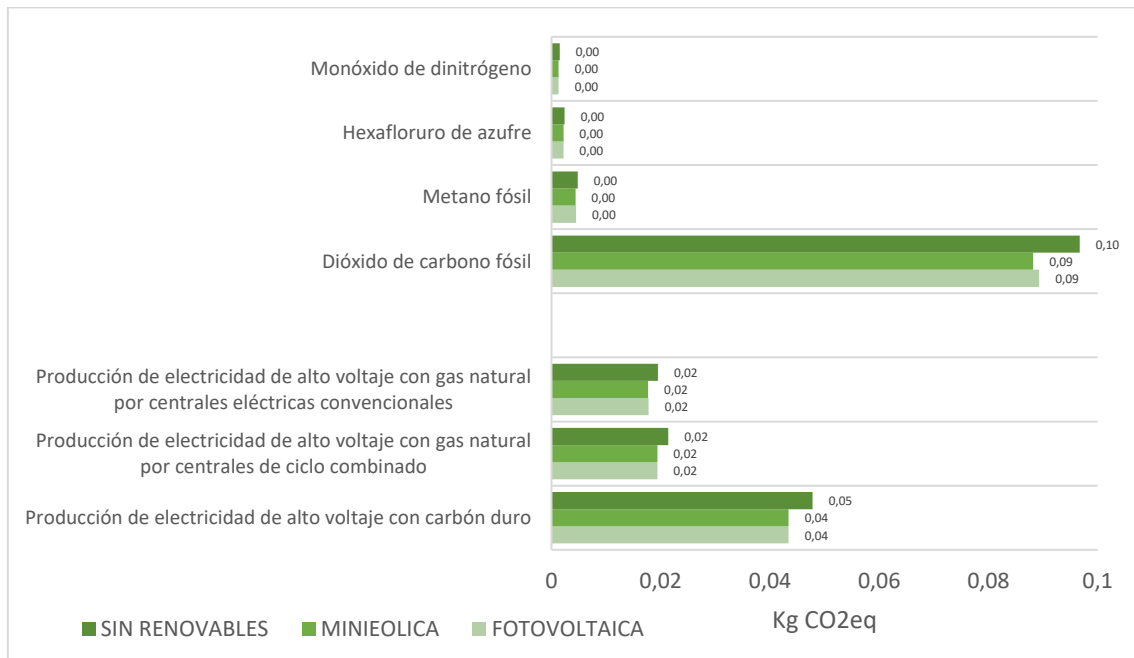


Gráfico 50. Contribución e inventario de caracterización representativos de la categoría “cambio climático” según metodología ReCiPe para la etapa B6. Fuente: Elaboración propia

El análisis enfocado en las emisiones de CO<sub>2</sub>eq para B6 (Gráfico 50), demuestra que la principal contribución viene de la producción de electricidad de alto voltaje con carbón duro, seguido de gas natural por centrales de ciclo combinado, y de manera similar, por gas natural por centrales eléctricas convencionales. En cuanto al inventario de CO<sub>2</sub>eq, la mayor emisión es el dióxido de carbono fósil con un 91%, el cual es reducido por los escenarios con renovables cerca de 0,008 kg CO<sub>2</sub>eq; le sigue las emisiones de metano fósil con 4%, hexafluoruro de azufre con 2%, y monóxido de dinitrógeno con 1%.

Finalmente, un análisis comparativo de la etapa B6 en los 3 escenarios bajo la metodología ReCiPe confirma las proporciones de CO<sub>2</sub>eq, y revela altos impactos con el uso de energías renovables en radiación ionizante, ecotoxicidad terrestre, y consumo de agua. Sin embargo, vale la pena señalar que el edificio con minieólica presenta el menor impacto en todas las categorías (incluso frente al edificio sin renovables), diferenciándose por muy poco del siguiente escenario.

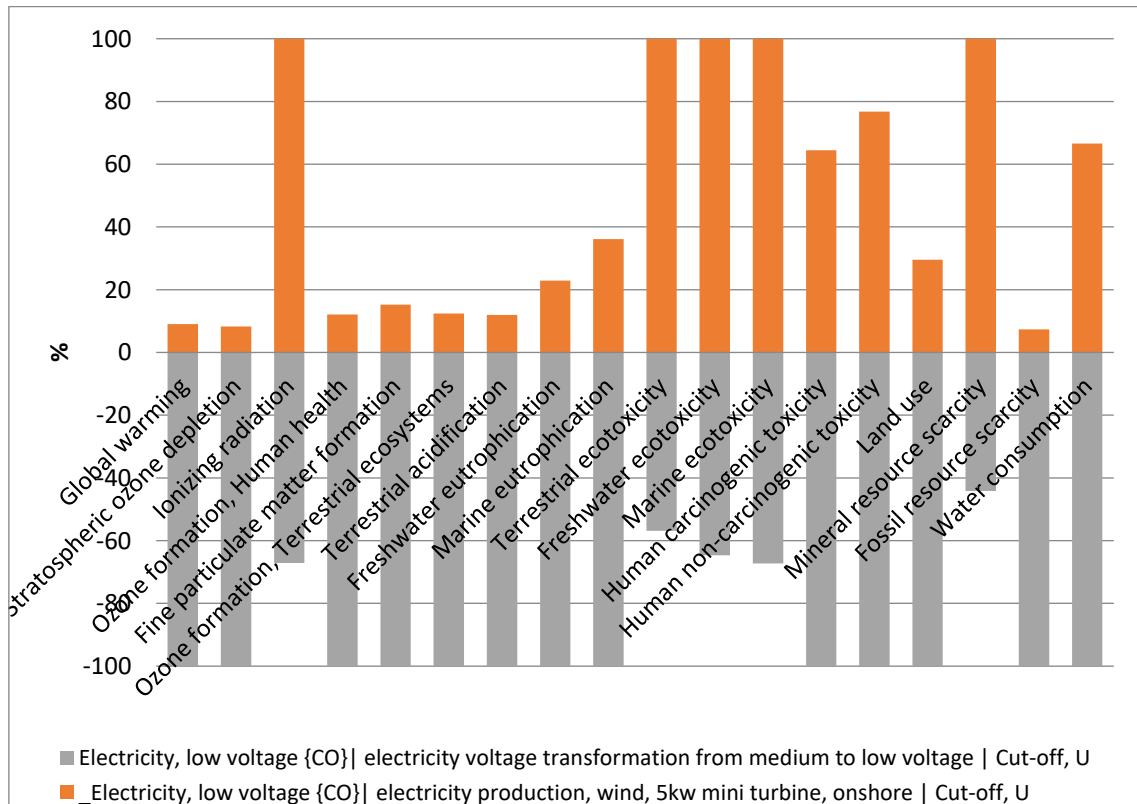
### 5.5.5. Etapa D

La etapa D corresponde con la energía eléctrica excedente generada por las tecnologías de energía renovable que se usa más allá de los límites del sistema del edificio, por tanto,

no se contempla este detalle (etapa D) para el escenario del edificio sin renovables. Algo característico de esta etapa y que se ve reflejado en los resultados, es que la mayor parte de sus valores son notablemente negativos debido a que sustrae la energía eléctrica de la red que se deja de usar, por lo que entran a restar en potencial de impacto cuando se hace el análisis a todas las etapas de ciclo de vida. Se podría decir que el análisis de esta etapa hace una comparación de beneficios y desventajas de los excedentes por ER en la edificación en términos de categorías de impacto.

Esto se da en concordancia con la ISO 21930, que determina que se debe sustituir la combinación de generación típica de energía (matriz energética del SIN) por el producto generado (primario), donde los procesos de recuperación no tienen cargas asignadas ni impactos cuando cruzan el límite del sistema, que es el caso de la energía exportada; por tanto, se trata de información complementaria para demostrar beneficios potenciales.

En el análisis de la etapa D según la metodología ReCiPe (Gráfico 51), se puede apreciar que la energía generada por las ER, tanto fotovoltaica como minieólica, también provoca impactos pero que son compensados por los valores negativos originados por la energía evitada de la red. Sin embargo, existen categorías donde el impacto es más fuerte que lo compensado, como por ejemplo en “Radiación ionizante”, “Ecotoxicidad terrestre”, “Ecotoxicidad de agua fresca”, “Ecotoxicidad marina”, y “Escasez de recursos minerales” para el escenario de minieólica. Para el escenario con fotovoltaica pasa algo similar, pero se agregan las categorías “Eutrofización marina”, “Uso del suelo”, “Consumo de agua”, “Toxicidad humana cancerígena” y “Toxicidad humana no cancerígena”.





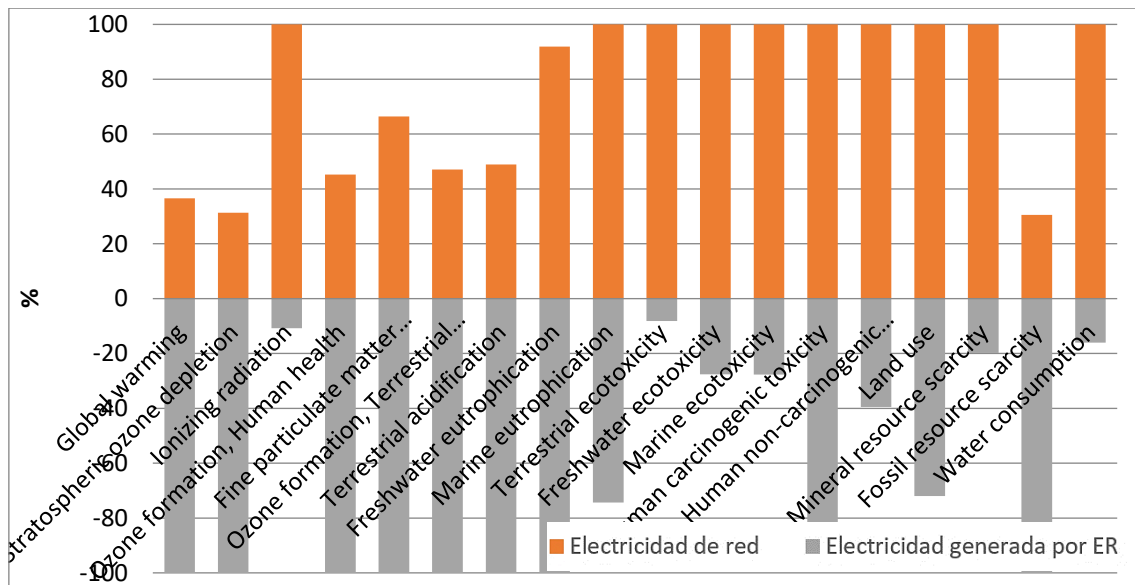


Gráfico 51. Caracterización en % con metodología ReCiPe de etapa D del edificio con energía minieólica (arriba) y fotovoltaica (abajo). Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

El mismo análisis realizado bajo la metodología CML (Gráfico 52), confirma “Agotamiento abiótico” como la categoría presente en ambos escenarios que supone impactos perjudiciales muy por encima de los beneficios (representados por los valores negativos). En el escenario con fotovoltaica, las categorías “Agotamiento de la capa de ozono”, “Toxicidad humana”, y “Ecotoxicidad de agua fresca” presentan altos valores que superan los valores evitados.

La categoría “Calentamiento global” muestra un buen comportamiento tanto en ReCiPe como en CML, con valores negativos altos que confirman que esta categoría presenta un alto beneficio cuando se incorporan energías renovables a la edificación y además generan excedentes; un comportamiento similar la tienen las categorías “Agotamiento abiótico, combustibles fósiles”, “Agotamiento ozono estratosférico”, “Acidificación”, y “escasez de recursos fósiles”. Por otro lado, la categoría “Ecotoxicidad terrestre” que está presente en ambas metodologías, presenta resultados contradictorios, al tener valores muy altos con ReCiPe y muy bajos con CML.

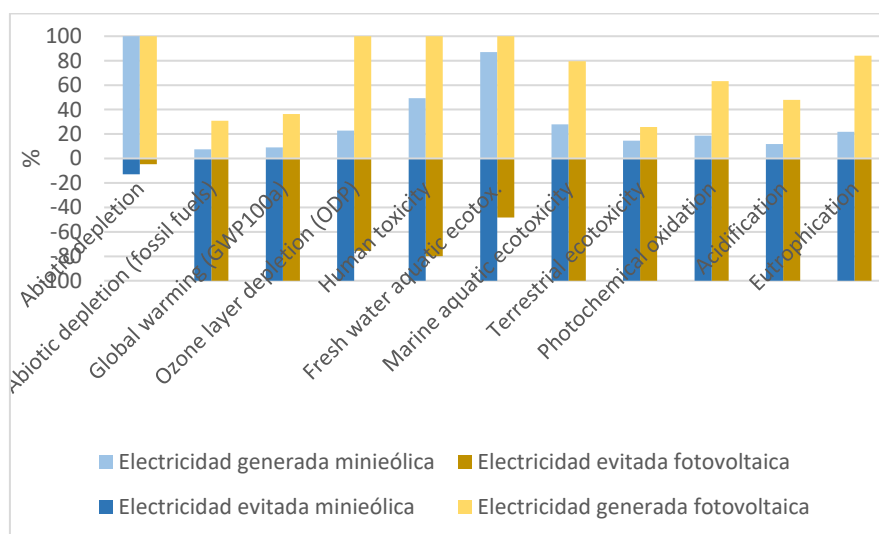


Gráfico 52. Caracterización en % con metodología CML de etapa D del edificio con energía minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia

Bajo la metodología CED, el análisis de ponderación para la etapa D muestra unos valores totalmente diferentes para ambos escenarios, donde la electricidad evitada de la red pública por uso de excedentes está compuesta por energía de origen fósil, por renovable hidráulica, y por renovable no convencional (cerca de 184 kj), la cual es inversamente proporcional a la generación de valores negativos en los dos primeros tipos de energía. Este patrón es bastante claro en el escenario con fotovoltaica, pero dichos valores en el escenario con minieólica son mínimos, al menos comparando los dos gráficos.

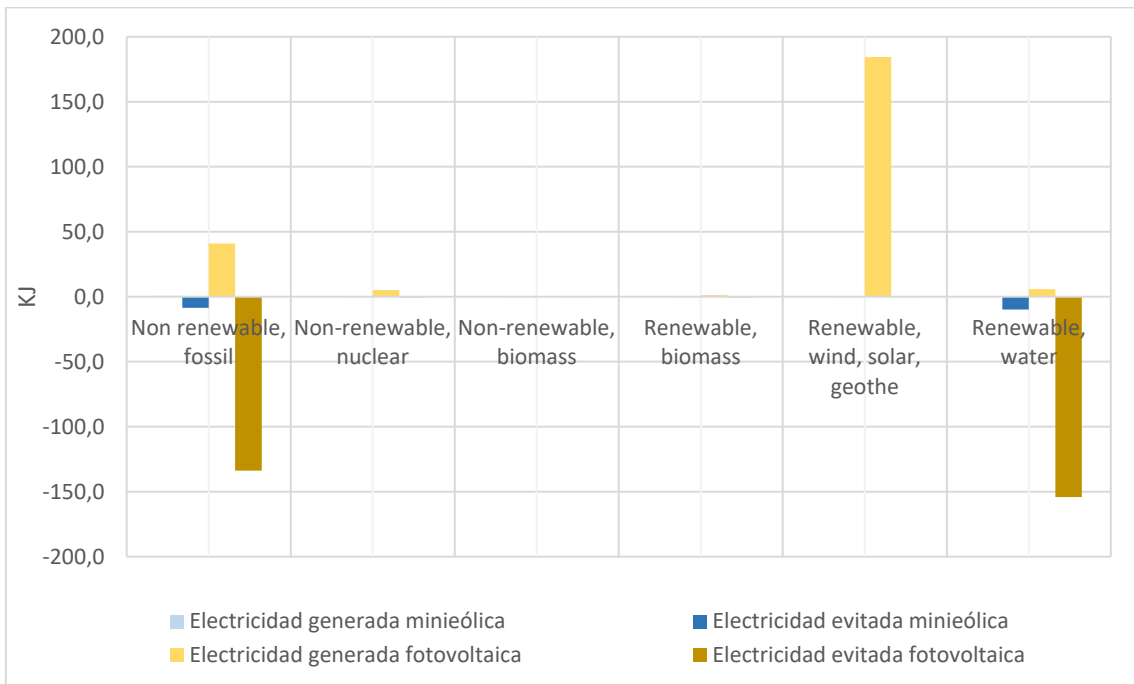


Gráfico 53. Ponderación con metodología CED de etapa D del edificio con energía minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia

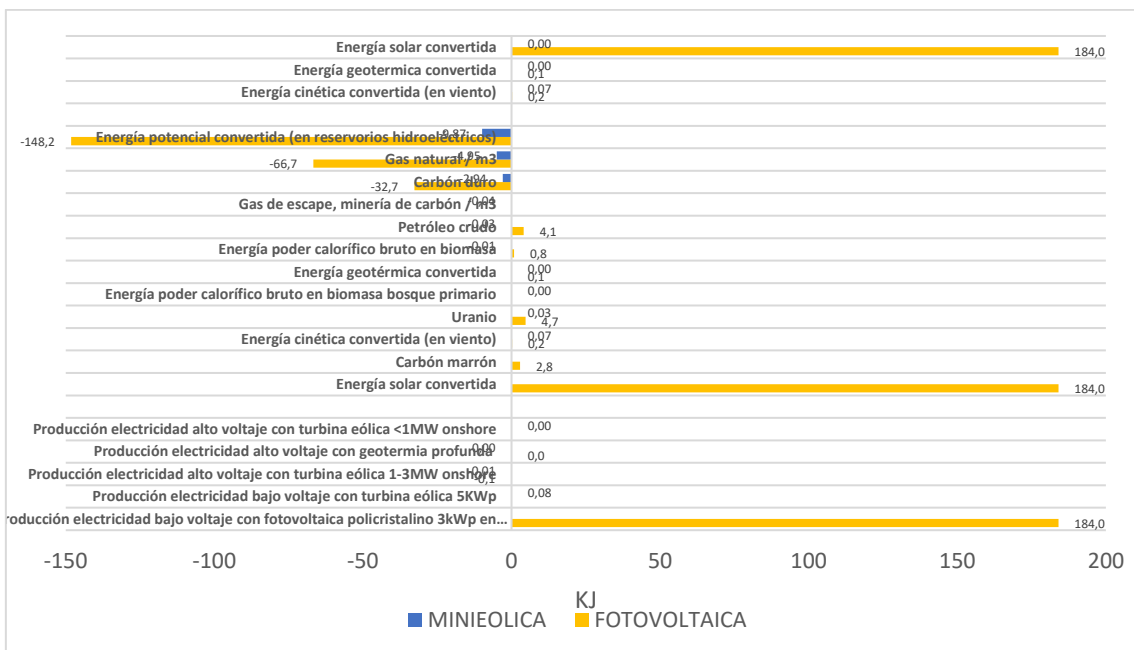


Gráfico 54. Contribución e inventario de caracterización representativos de energías renovables no convencionales según metodología CED para la etapa D. Fuente: Elaboración propia

El inventario de puntuación única sobre las fuentes de energía en la etapa D (Anexo 9) muestra que la más frecuente es la energía solar convertida, y muy por debajo, el carbón marrón y la energía cinética por el viento (solo para el escenario fotovoltaico); al mismo tiempo, en ambos escenarios se generan valores negativos por cuenta de la energía convertida en reservorios hidroeléctricos, seguido de gas natural, y carbón duro. Al detallar la contribución de las energías renovables no convencionales como fuente energética (Gráfico 54), se destaca la participación de la producción de electricidad de bajo voltaje con fotovoltaica policristalino de 3 kWp para el escenario con fotovoltaica, y muy por debajo la producción de electricidad de bajo voltaje con turbina eólica 5KWp en el escenario con minieólica. Otras contribuciones de producción de electricidad como turbina eólica 1-3 MW y con geotermia profunda tienen valores negativos o muy pequeños. El inventario de caracterización confirma estos resultados al otorgar a la energía solar convertida en el escenario con fotovoltaica el valor más representativo con 0,18 MJ.

El análisis enfocado en las emisiones de CO<sub>2</sub>eq para la etapa D (Gráfico 55), demuestra que la principal contribución viene del escenario con fotovoltaica a través del carbón duro por explotación de minas de hulla pero con un valor muy bajo, seguido de la producción de vidrio plano sin revestimiento, producción de calor en horno industrial de carbón duro 1-10MW para calefacción distinta del gas natural, y producción de electricidad de alto voltaje con lignito. Sin embargo, lo que salta a la vista son los valores negativos de la producción de electricidad de alto voltaje con carbón duro (-0,004 kg CO<sub>2</sub>eq), la producción de electricidad de alto voltaje con gas natural por centrales eléctricas y por centrales de ciclo combinado; en todas ellos, son más notables los valores del escenario con fotovoltaica respecto al escenario con minieólica.

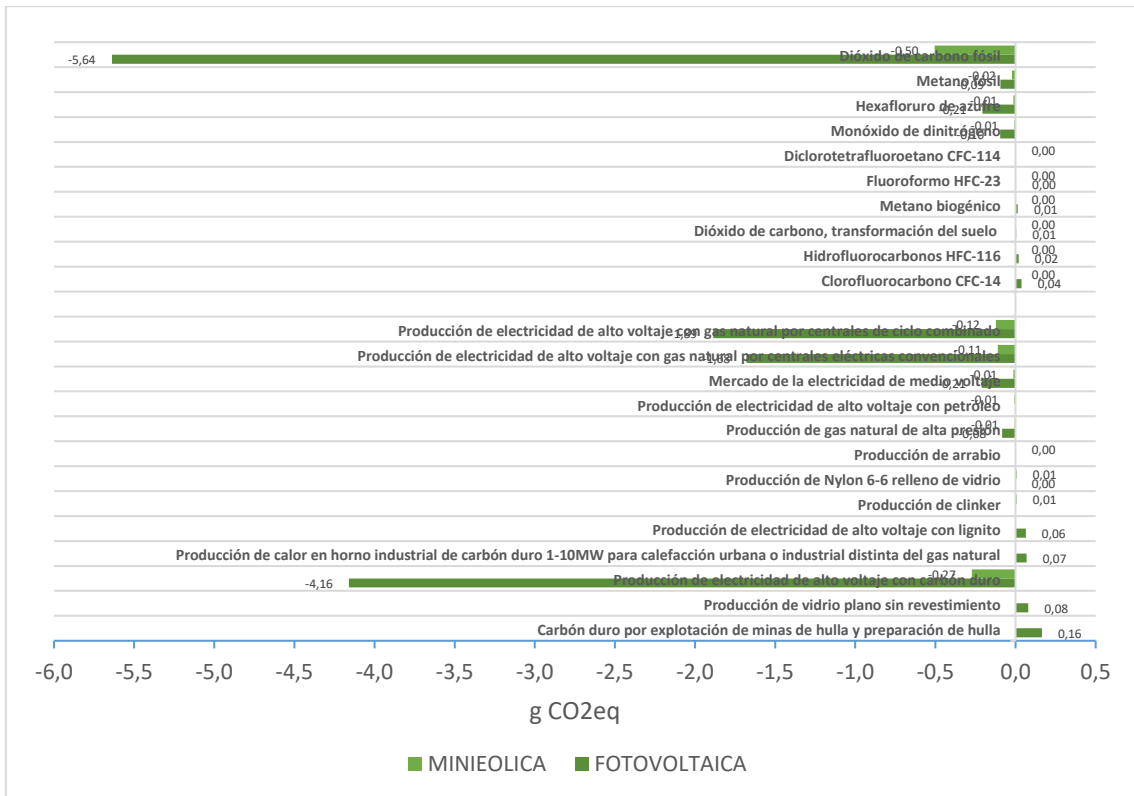


Gráfico 55. Contribución e inventario de caracterización representativos de la categoría “cambio climático” según metodología ReCiPe para la etapa D. Fuente: Elaboración propia

En cuanto al inventario de CO<sub>2</sub>eq, las mayores emisiones (con valores muy bajos) provienen de los clorofluorocarbonos CFC-14, hidrofluorocarbonos HFC-116, el dióxido de carbono por transformación del suelo, y el metano biogénico. Al igual que con el análisis de contribución, son muy notables los valores negativos del dióxido de carbono fósil y el metano fósil.

Finalmente, un análisis comparativo de la etapa D en los 3 escenarios bajo la metodología ReCiPe confirma las proporciones de CO<sub>2</sub>eq, y revela altos impactos con el uso de energías renovables en “radiación ionizante”, “ecotoxicidad terrestre”, “ecotoxicidad de agua fresca”, “ecotoxicidad marina”, “escasez de recursos minerales”, “consumo de agua”, “eutrofización marina”, “toxicidad humana cancerígena”, y “uso del suelo”. En las tres últimas categorías mencionadas, el escenario con minieólica presenta valores negativos, contrario al escenario con fotovoltaica.

### 5.5.6. Paneles fotovoltaicos y turbina minieólica

Dada la importancia y peso que tiene los impactos propios de cada tecnología en los resultados finales, especialmente para obtener los valores de energía y carbono embebidos, se ha realizado un análisis comparativo general de estos equipos como parte de los escenarios seleccionados, teniendo en cuenta que se evalúa un (1) solo equipo para cada tecnología, que el dataset del equipo de minieólica fue creado para el desarrollo de esta investigación según la Tabla 30, y que el dataset del equipo de fotovoltaica forma parte de la base de datos de Ecoinvent 3.5. A su vez, estos dataset hacen parte del inventario del edificio en sus respectivos escenarios para la generación de energía, de acuerdo con los siguientes registros:

- Minieólica: Wind turbine, 5kW, onshore {RoW}| mini wind turbine construction, 5kW, onshore | Cut-off, U
- Fotovoltaica: Photovoltaic flat-roof installation, 3kWp, multi-Si, on roof {GLO}| market for | Cut-off, U

Los resultados con las metodologías de cálculo ReCiPe (Gráfico 56) y CML (Gráfico 57) agrupan 29 categorías de impacto, de las cuales, en 7 de ellas los mayores impactos forman parte del equipo de minieólica, y las 22 restantes señalan al equipo de panel fotovoltaico. Este patrón, donde la fotovoltaica tiene mayores impactos, es mucho más pronunciado en las categorías “Radiación Ionizante”, “Ecotoxicidad terrestre”, “Consumo de agua”, y “Agotamiento de la capa de ozono”. Igualmente, en GEI según la categoría GWP, la minieólica emite aproximadamente 30% menos respecto a la fotovoltaica. La única categoría que impone notoriamente a la minieólica como la más perjudicial es “Toxicidad humana cancerígena”.

El análisis energético con la metodología de cálculo CED (Gráfico 58), mantiene la tendencia que señala a la fotovoltaica como la mayor consumidora de energía embebida en todas sus fuentes, especialmente de origen fósil, y luego le siguen muy por debajo la nuclear y la renovable hidráulica. El consumo de energía de la minieólica tiene presencia de casi dos terceras partes respecto a la fotovoltaica en todas sus fuentes.

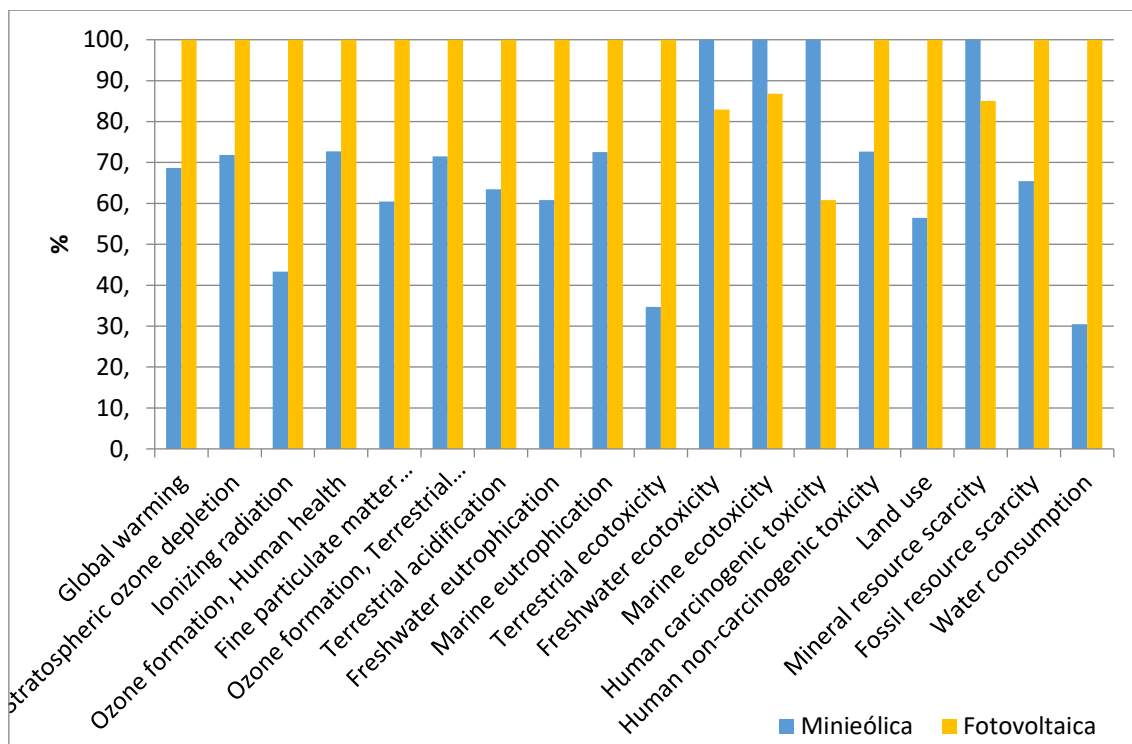


Gráfico 56. Comparación de caracterización en % con metodología ReCiPe de los equipos de minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

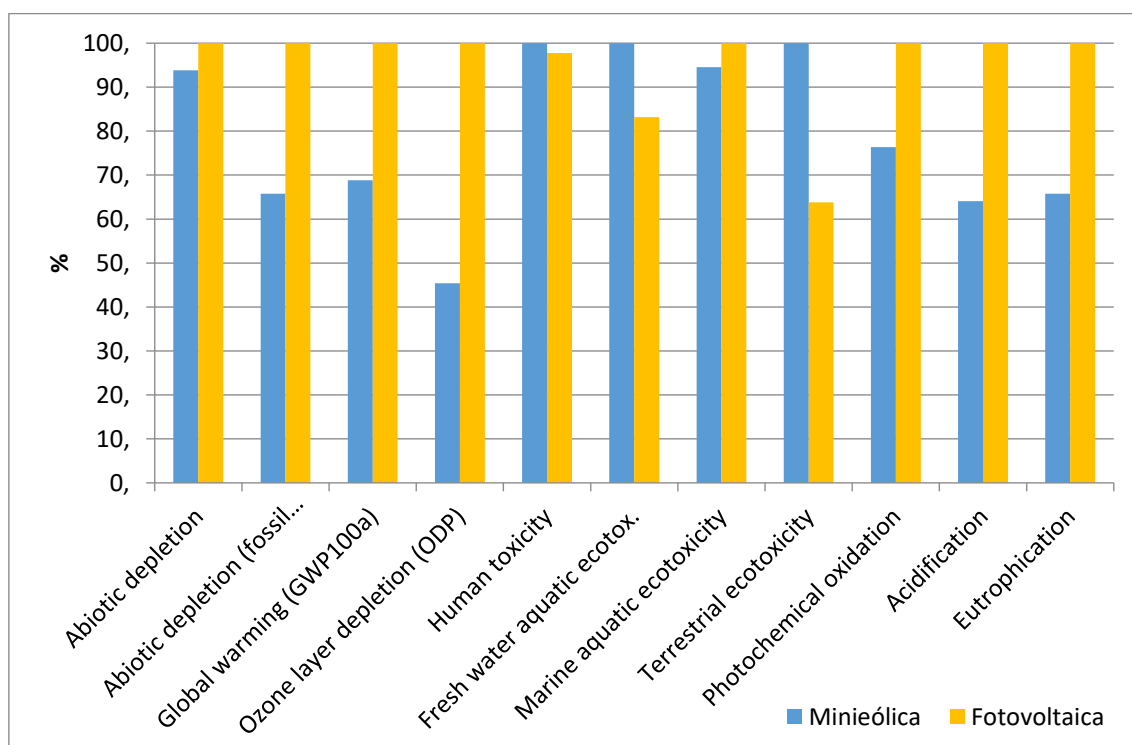


Gráfico 57. Comparación de caracterización en % con metodología CML de los equipos de minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

Es importante señalar que la manera en que están configurados originalmente los dataset en Ecoinvent, parten del desempeño de la tecnología, es decir, registrar las entradas y salidas necesarias para generar 1 kWh de electricidad, y una de ellas es el equipo de ER, cuyo dataset fue evaluado en el párrafo anterior. Este registro tiene toda la información

de entradas, procesos y energía necesarios para su fabricación, que está siendo asignada a la etapa B6 sobre energía operativa. La información relacionada con energía y carbono embebidos puede ser extraída de este registro, por tanto, en los cálculos de las conclusiones finales, se hará esta deducción a la energía y carbono operativos para sumarla a los embebidos en la etapa A1-A3.

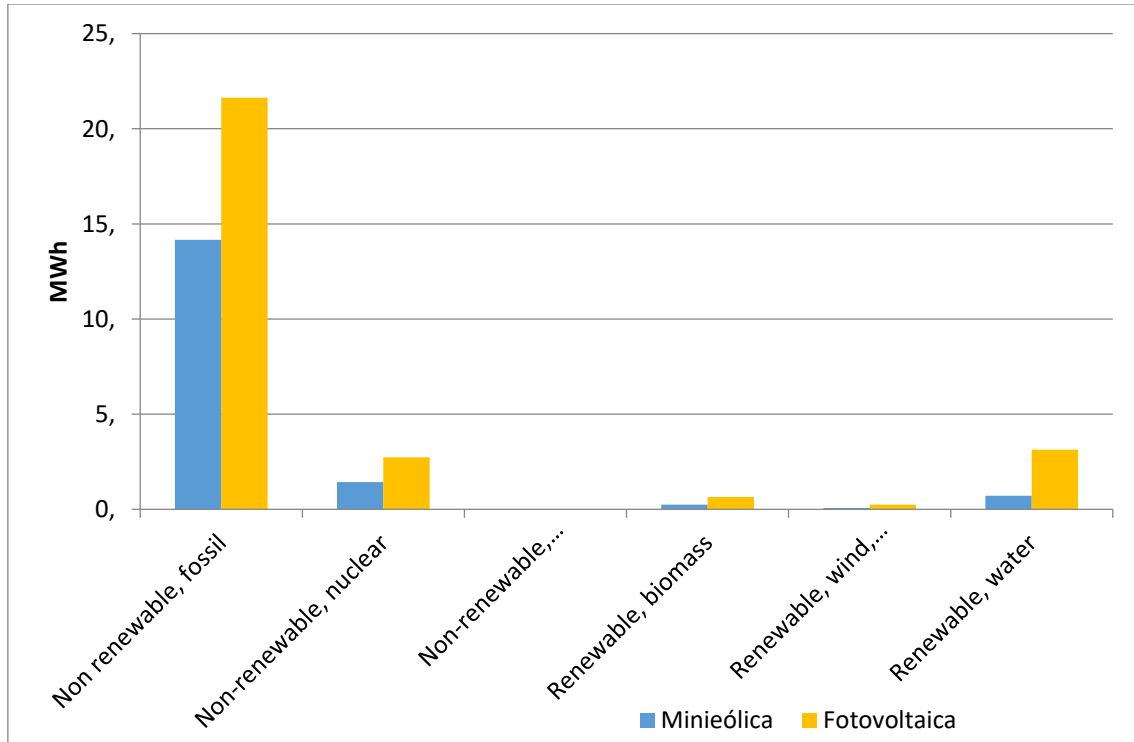


Gráfico 58. Comparación de ponderación con metodología CED de los equipos de minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

Como dato final, la energía embebida total para cada equipo de estas tecnologías es de 16,6 GJ para una turbina minieólica, y de 28,4 GJ para un panel fotovoltaico.

### 5.5.7. Energía y carbono embebido y operativo

Los anteriores resultados del ACV aplicado en el prototipo muestran información relevante relacionada con las categorías de impacto usuales en este tipo de estudios, sin embargo, para poder responder a los objetivos, pregunta e hipótesis planteados en la presente investigación, es necesario realizar un procesamiento de datos adicional para realizar cálculos conducentes a establecer las cantidades precisas de energía y carbono embebidos y operativos en las diferentes etapas de ciclo de vida y en los tres escenarios analizados, tomando como referencia una clasificación conceptual que se detallará en las conclusiones finales (Ilustración 35 e Ilustración 36).

Para empezar, de manera general, las proporciones de energía y carbono embebidos (Gráfico 59) en todas las etapas prácticamente no tienen variaciones entre los tres escenarios conservando el mismo porcentaje en la mayoría de los casos, pero al comparar entre energía y carbono embebidos las mayores variaciones (>8%) se dan en la etapa B7

con alta energía pero bajo carbono embbebidos pasando de 26% a 17%, y la etapa C4 con baja energía embbebida respecto a emisiones muy considerables pasando del 13% al 41%.

Los resultados reflejados en valores y porcentajes para los tres escenarios según la Tabla 32, muestran una variación de energía embbebida entre 1.833 a 1.880 kWh/m<sup>2</sup>, y de carbono embbebido entre 785 a 819 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, donde el escenario sin renovables tiene el menor valor y el escenario con fotovoltaica el mayor. Los porcentajes de energía embbebida ascendente se mantienen entre 42% y 43%, descendente 57% y 58%, donde la energía recurrente (remodelación y mantenimiento) presenta el mayor valor; el carbono embbebido ascendente varía entre el 34% y el 36%, mientras que el descendente el 64% y 66%, donde el carbono proyectado (demolición y gestión de RCD) presenta el mayor valor.

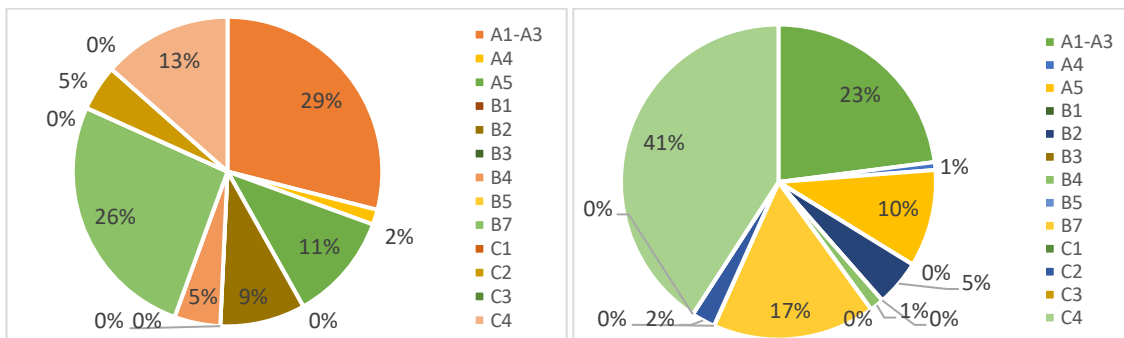


Gráfico 59. Proporción de energía (izquierda) y carbono (derecha) embbebidos en el prototipo en cada etapa de ciclo de vida. Fuente: Elaboración propia.

Energía kWh				Emisiones kg CO <sub>2</sub> eq			
<b>SIN RENOVABLES</b>				<b>SIN RENOVABLES</b>			
1.833,0	kwh/m2	100%	17.893.291,48 kwh	785,2	kg CO2/m2	100%	7.665.257,10 kg CO2
<b>Ascendente (upstream)</b>		<b>Descendente (Downstream)</b>		<b>Ascendente (upstream)</b>		<b>Descendente (Downstream)</b>	
770,9	42%	1.062,0	58%	265,9	34%	519,3	66%
<b>Indirecta</b>	<b>Directa</b>	<b>Recurrente</b>	<b>Proyectada</b>	<b>Indirecta</b>	<b>Directa</b>	<b>Recurrente</b>	<b>Proyectada</b>
533,8	29%	237,1	13%	726,0	40%	336,1	18%
<b>MINIEOLICA</b>				<b>MINIEOLICA</b>			
1.837,4	kwh/m2	100%	17.936.693,77 kwh	787,1	kg CO2/m2	100%	7.683.425,32 kg CO2
<b>Ascendente (upstream)</b>		<b>Descendente (Downstream)</b>		<b>Ascendente (upstream)</b>		<b>Descendente (Downstream)</b>	
771,9	42%	1.065,5	58%	266,8	34%	520,2	66%
<b>Indirecta</b>	<b>Directa</b>	<b>Recurrente</b>	<b>Proyectada</b>	<b>Indirecta</b>	<b>Directa</b>	<b>Recurrente</b>	<b>Proyectada</b>
534,7	29%	237,1	13%	729,5	40%	336,1	18%
<b>FOTOVOLTAICA</b>				<b>FOTOVOLTAICA</b>			
1.880,5	kwh/m2	100%	18.357.430,56 kwh	819,3	kg CO2/m2	100%	7.997.968,11 kg CO2
<b>Ascendente (upstream)</b>		<b>Descendente (Downstream)</b>		<b>Ascendente (upstream)</b>		<b>Descendente (Downstream)</b>	
809,7	43%	1.070,8	57%	298,0	36%	521,3	64%
<b>Indirecta</b>	<b>Directa</b>	<b>Recurrente</b>	<b>Proyectada</b>	<b>Indirecta</b>	<b>Directa</b>	<b>Recurrente</b>	<b>Proyectada</b>
572,5	31%	237,1	13%	734,6	40%	336,3	18%
<b>Indirecta</b>	<b>Directa</b>	<b>Recurrente</b>	<b>Proyectada</b>	<b>Indirecta</b>	<b>Directa</b>	<b>Recurrente</b>	<b>Proyectada</b>
213,0	26%	85,1	10%	180,5	22%	340,8	42%

Tabla 32. Totales de energía (izquierda) y emisiones de CO<sub>2</sub>eq (derecha) embbebidos en el prototipo. Fuente: Elaboración propia.

Dichos valores pueden ser apreciados comparativamente en el Gráfico 60, donde se puede observar un pequeño incremento de energía y carbono indirectos, es decir, en las etapas A1-A3 correspondiente a la fabricación de los materiales del edificio, por cuenta de la inserción de los equipos de ER; hay que tener en cuenta que en el escenario con minieólica se está agregando una turbina minieólica, mientras que en el escenario con fotovoltaica se está agregan 48 paneles. Esto confirma los planteamientos del marco teórico donde se

señala que las tecnologías y materiales que fomentan la eficiencia energética suponen un incremento de la energía y carbono embebidos.

En cuanto a la energía y carbono operativo que se dan en la etapa B6 durante la vida útil, los valores expuestos en la Tabla 33 muestran una variación de energía operativa entre 852 a 901 kWh/m<sup>2</sup>, y de carbono operativo entre 97 a 105 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, donde el escenario sin renovables tiene el mayor valor y el escenario con minieólica el menor. Los porcentajes de energía generada operativa se mantienen entre 0% y 4%, y evitada en un -5%; el carbono operativo generado (por las ER) varía entre el 0% y el 2%, mientras que el evitado en -5%. Es importante mencionar que los datos de energía embebida y operativa se dan en unidades de energía primaria, que se refieren al equivalente de la electricidad según sus fuentes de origen crudos antes de ser transformada, almacenada y transportada para su uso final, por tanto, no coincide con valores como el de energía operativa demandada por el edificio (de uso final) calculada anteriormente.

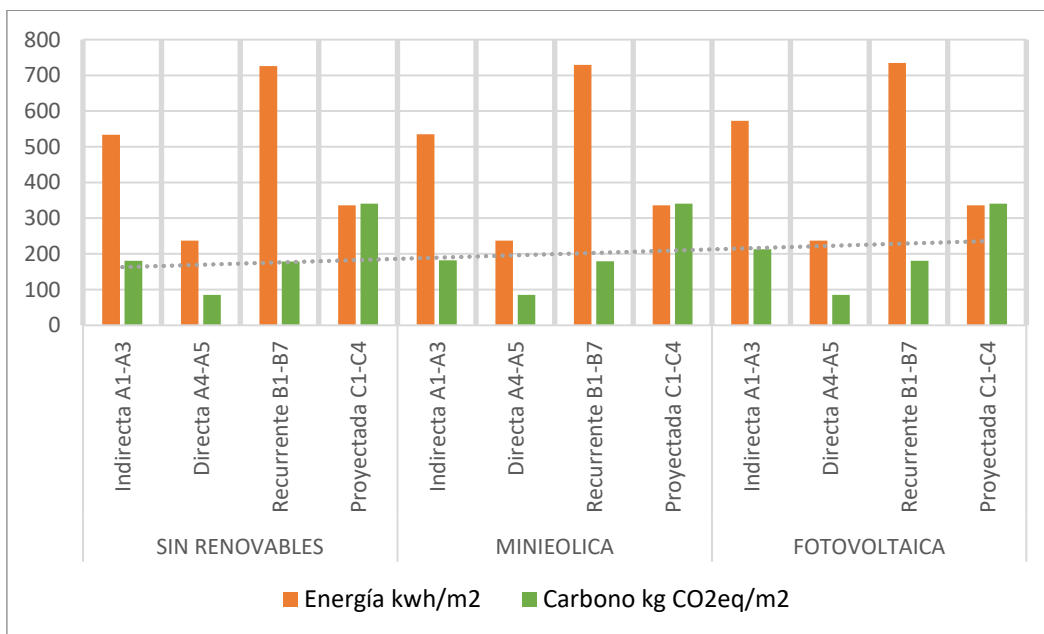


Gráfico 60. Energía y carbono embebidos en el prototipo en los 3 escenarios, no incluye B6. Fuente: Elaboración propia.

Energía kWh				Emisiones kg CO <sub>2</sub> eq			
<b>SIN RENOVABLES</b>				<b>SIN RENOVABLES</b>			
901,6 kwh/m2		8.801.487,7 kwh		105,4 kg CO2/m2		1.028.713,3 CO2	
<b>Entregada</b>	<b>Generada</b>	<b>Evitada</b>		<b>Entregado</b>	<b>Generado</b>	<b>Evitado</b>	
901,6	0,00	0,00		105,38	0,00	0,000	
100%	0%	0%		100%	0%	0%	
<b>MINIEOLICA</b>				<b>MINIEOLICA</b>			
820,7 kwh/m2		8.011.734,8 kwh		96,1 kg CO2/m2		938.578,6 CO2	
<b>Entregada</b>	<b>Generada</b>	<b>Evitada</b>		<b>Entregado</b>	<b>Generado</b>	<b>Evitado</b>	
860,2	1,84	-41,37		100,54	0,44	-4,835	
105%	0%	-5%		105%	0%	-5%	
<b>FOTOVOLTAICA</b>				<b>FOTOVOLTAICA</b>			
852,9 kwh/m2		8.326.070,8 kwh		97,5 kg CO2/m2		951.584,1 CO2	
<b>Entregada</b>	<b>Generada</b>	<b>Evitada</b>		<b>Entregado</b>	<b>Generado</b>	<b>Evitado</b>	
860,2	34,04	-41,37		100,54	1,770	-4,835	
101%	4%	-5%		103%	2%	-5%	

Tabla 33. Totales de energía (izquierda) y emisiones de CO<sub>2</sub>eq (derecha) operativos en el prototipo. Fuente: Elaboración propia.



Los valores de emisiones son muy diferentes respecto a los resultados aportados por el software Design Builder (Gráfico 13 y Gráfico 15), donde el carbono operativo varía entre 10.701.300 y 11.458.897,5 kg CO<sub>2</sub> vida útil, y el embebido entre 1.676.473,2 y 1.771.122 kgCO<sub>2</sub>eq, tomando como referencia los resultados por apartamento y por piso anuales; esto contrasta con los 1.028.713,3 kgCO<sub>2</sub>eq de carbono operativo (bajo), y 7.665.257,1 kgCO<sub>2</sub>eq de carbono embebido (alto) del escenario sin renovables proporcionados por el ACV. Esto probablemente se debe a que los datos de Design Builder además de ser indicativos, provienen principalmente de la base de datos ICE de la Universidad de Bath, Inglaterra, país donde las tecnologías de fabricación de materiales, su matriz energética, y factores de emisión para electricidad son muy diferentes.

Además de lo anterior, hay que agregar que los cálculos de ACV no coinciden con el cálculo del factor de emisión oficial por kWh que es reportado anualmente<sup>89</sup>, puesto que este proporciona valores más elevados. Según el factor de emisión de CO<sub>2</sub> por generación eléctrica operativa del sistema interconectado del año 2020, el escenario sin renovables emite 148,2 kg CO<sub>2</sub>eq, el escenario con minieólica 134,9 kg CO<sub>2</sub>eq, y el escenario con fotovoltaica 140,2 kg CO<sub>2</sub>eq.

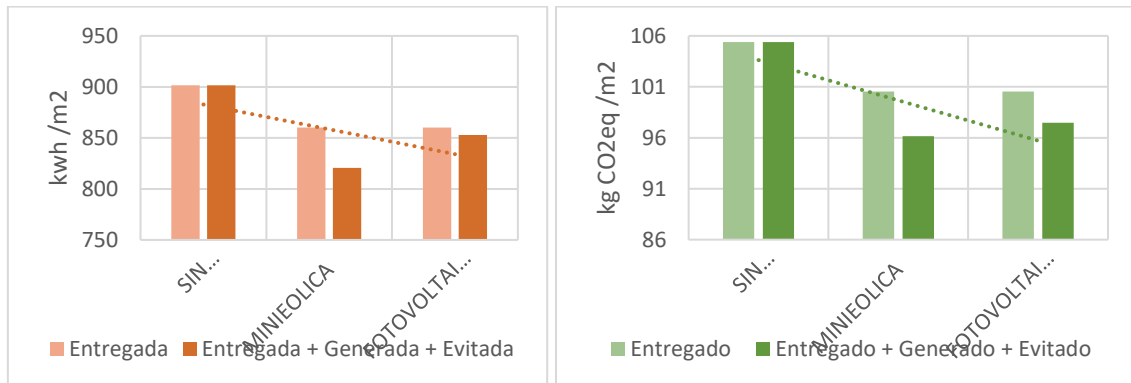


Gráfico 61. Variaciones de energía y carbono operativos en los 3 escenarios. Fuente: Elaboración propia.

El balance realizado de la energía y carbono operativos proviene de sumar o restar los valores proporcionados por la energía entregada (de la red), la generada por la tecnología de ER, y la energía evitada que representa a la no consumida de la red al ser remplazada por la generada. En el Gráfico 61 se puede apreciar como varía la energía operativa al incorporar los escenarios con ER, disminuyendo la energía entregada en 41 kWh/m<sup>2</sup> y consiguiendo mayores reducciones al contemplar los valores de energía generada y evitada (que constituye el valor final); así mismo, las emisiones de carbono operativo se reducen inicialmente 5 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> por la energía entregada, y posteriormente aún más por cuenta del carbono “generado” y “evitado” por las ER. Tanto en energía como en carbono operativos, el escenario con valores más reducidos es el de minieólica, que, a pesar de generar menos energía respecto a la fotovoltaica, es justamente ese factor el que contribuye a reducir su valor final; sin embargo, la diferencia en carbono con el escenario fotovoltaico es de solo 1,3 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

La energía y carbono exportados están comprendidos por su fracción excedente y la evitada fuera de los límites del sistema, es decir, en la etapa D donde pueden beneficiar a

<sup>89</sup> <https://www.xm.com.co/Paginas/detalle-noticias.aspx?identificador=2383>,  
<https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/calculo-factor-de-emision-de-Co2-del-SIN.aspx>

sistemas diferentes (como otro edificio, por ejemplo), ya que dicho excedente fue entregado a la red pública, y por ello, es normal que presente valores negativos. De acuerdo con la Tabla 34 y el Gráfico 62, la energía exportada en el escenario con minieólica y con fotovoltaica es de -4,9 y -14,2 kWh/m<sup>2</sup>, y de carbono “exportado” de -0,5 y -5,9 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, siendo el escenario con fotovoltaica el de mayor valor. Los porcentajes de carbono y energía excedente y evitada son más notorios en el escenario con fotovoltaica, donde se aprecia un valor excedente positivo que es restado por el valor negativo evitado más alto, y cuyo resultado es un total negativo.

Energía kWh				Emisiones kg CO <sub>2</sub> eq			
<b>MINIEOLICA</b>				<b>MINIEOLICA</b>			
-4,9	kwh/m2	-48.104,4	kwh	-0,5	kg CO2/m2	-5.351,8	kg CO2
<b>Excedente</b>		<b>Evitada</b>		<b>Excedente</b>		<b>Evitado</b>	
0,23	-5%	-5,16	105%	0,05	-10%	-0,603	110%
<b>FOTOVOLTAICA</b>				<b>FOTOVOLTAICA</b>			
-14,2	kwh/m2	-138.830,1	kwh	-5,9	kg CO2/m2	-58.057,9	kg CO2
<b>Excedente</b>		<b>Evitada</b>		<b>Excedente</b>		<b>Evitado</b>	
66,04	-464%	-80,26	564%	3,433	-58%	-9,381	158%

Tabla 34. Totales de energía (izquierda) y emisiones de CO<sub>2</sub>eq (derecha) exportados en el prototipo. Fuente: Elaboración propia.

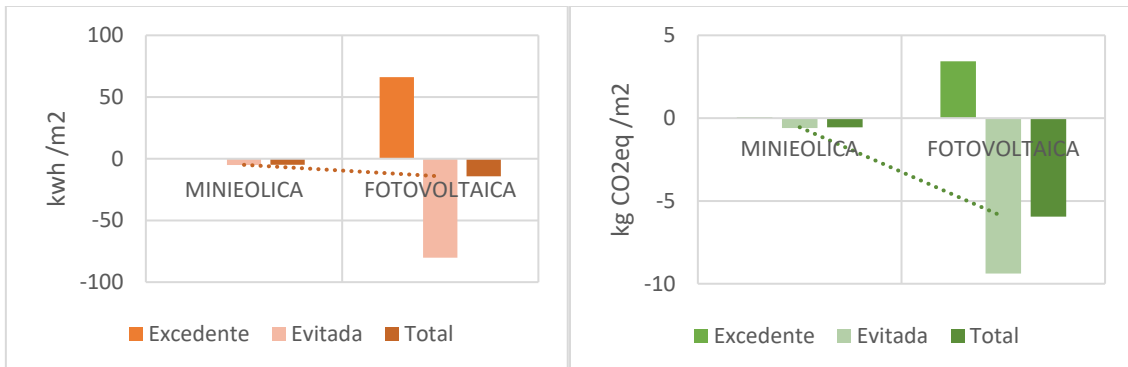


Gráfico 62. Variaciones de energía y carbono exportados en los escenarios con ER. Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior da cumplimiento al Objetivo específico 4 (OE4), que comprende “desarrollar un ACV y recursos argumentativos (conceptos, tablas, gráficos) que faciliten el análisis detallado de la contribución de la energía y carbono a través de la implementación de energías renovables en todo el ciclo de vida del edificio estudiado”.

## 5.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

La ciudad de Bogotá, Colombia, no solo es la capital del país, sino que es altamente densificada respecto a otras homologas en el mundo; con una temperatura anual promedio constante de 13° C, no es necesario instalar sistemas de climatización de espacios. Las velocidades de viento son relativamente bajas con aumento a mitad de año, contrario a la radiación solar, la cual presenta unos valores promedio adecuados para su aprovechamiento.

Según la Resolución 549 de 2015 que establece parámetros nacionales para el ahorro del agua y la energía a través de una línea base y un porcentaje de ahorro, la ciudad está clasificada como clima frío, por lo cual las edificaciones deben buscar maximizar los efectos de la radiación solar, orientar los edificios en sentido norte – sur, renovaciones de aire suficientes, maximizar el aislamiento térmico, tener en cuenta la relación ventana pared (RVP) de menos del 40%, entre otros. Por otro lado, la Resolución 1874 de 2019 adopta optativamente un protocolo de implementación de estrategias, bajo un método de desempeño y otro prescriptivo.

Frente a proyectos de vivienda, además de la vivienda VIS (protegida), los usos y aprovechamiento del suelo, junto con las características espaciales y de materialidad de una vivienda están determinadas indirectamente por una delimitación socio económica llamada “estratificación” desde 1 hasta 6. A pesar de la progresiva disminución de la oferta en general, la vivienda colectiva de estrato 3, con casi el 40%, representa la mayor parte de la producción de viviendas en los últimos años en el país. Por esta razón, junto con el potencial de aprovechamiento de ER, el prototipo hipotético como caso experimental de esta investigación recoge las características de este tipo de vivienda.

Las fuentes de energía más usadas en el sector residencial urbano nacional son, primero, la electricidad y, en segundo lugar, el gas natural, consumidas principalmente en cocción, refrigeración e iluminación. La gran diferencia respecto con datos a nivel mundial, es que en ellos la calefacción de espacios ocupa el primer puesto. En el caso bogotano, datos recopilados con encuestas y simulaciones energéticas para viviendas de estrato 3 y 4, demuestran que los mayores consumos se concentran en agua caliente (ACS), iluminación, y equipos internos; otras fuentes asignan un fuerte consumo al uso de la cocina con gas natural. El promedio de consumo anual para una vivienda estrato 3 con datos de estudios de servicios públicos, se encuentra entre 1.956 kWh/año, y 2.061 kWh/año.

Los sistemas constructivos más utilizados a nivel nacional y más concretamente en zonas urbanas son, en orden: mampostería confinada, sistemas industrializados (principalmente en concreto y de alto crecimiento) y mampostería estructural. A su vez, estos sistemas demandan varios materiales, principalmente agregados triturados, arena de río, cemento gris, tierra de excavación, cerámica cocida, y acero. De estos, según un estudio a partir de bases de datos genéricas, en el sistema industrializado en concreto, los materiales con la mayor energía embebida son el cemento gris, acero, PVC y la cerámica cocida, para alcanzar valores de 699,2 kWh/m<sup>2</sup>.

Dado este contexto, el prototipo experimental como objeto de estudio hipotético de la presente investigación fue concebido para que representara las características más frecuentes de los proyectos de vivienda estrato 3 (de mayor representatividad) en la ciudad de Bogotá, y cuyas características fueron determinadas: en base en una matriz de registros de la oferta actual de vivienda (Anexo 2); y del desempeño energético que adopta el Protocolo de Implementación de la Resolución 1874 de 2019 (Anexo 4). En cuanto a la oferta actual, se encontraron apartamentos que constan de dos o tres habitaciones, dos baños, un área social denominada sala-comedor, cocina, algunos con área de estudio. La tipología de edificio más común es la de predio medianero, seguido del bloque rectangular, con un área social y de recepción, y algunos con zonas verdes, parqueaderos, y salón de juegos.

El resultado es un edificio residencial orientado con las fachadas largas en dirección oriente y occidente según la recomendación de la Resolución 549 de 2015, con 15 pisos, 8 apartamentos por piso de 66,6 m<sup>2</sup> en promedio, dos puntos fijos de escalera a los extremos del bloque, un punto doble de ascensores, un pasillo de distribución de doble crujía, 118 viviendas en total, ocupación de 4 personas en cada una, sumando 472, un área total construida de 9.762 m<sup>2</sup>, y un sistema constructivo industrializado en concreto tipo túnel con muros y placas de bajos espesores.

La demanda de energía por apartamento, según datos basados en consumos tipo realizados por el autor es de 230 kw al mes, 3,45 kWh/m<sup>2</sup> mes, y 42,02 kWh/m<sup>2</sup> año. Según los resultados en el software Design Builder, la demanda es de 2.993,04 kWh año, o 44,94 kWh/m<sup>2</sup> año; las emisiones de carbono operativo anuales son de 1.813,78 kgCO<sub>2</sub>, y carbono embebido de 14.207,4 kgCO<sub>2</sub>eq. Estos resultados fueron comparados con otras fuentes como Corpoema (2012) y datos de 2012 y 2019 del SUI. Al final, se adoptaron los valores basados en datos de consumos para un apartamento tipo realizados por el autor, debido a su trazabilidad y porque son cercanos a los cálculos del software.

Además del perfil energético por vivienda y del edificio (que es la suma de las viviendas), también se realizó el perfil demanda de las zonas comunes internas, con valores de 394,2 kWh mes, 0,63 kWh/m<sup>2</sup>, y 7,67 kWh/m<sup>2</sup> año. En cuanto a materialidad, se calcularon las cantidades y especificaciones de los diferentes materiales y actividades requeridos para el proyecto, donde los componentes con mayor peso en el edificio es la cimentación (33%), el movimiento de tierras y excavación (28%), la estructura (23%), y los revestimientos (11%). Dentro de esos componentes, los materiales que están por encima del criterio de corte son las barras de acero para refuerzo (forjados), la mampostería de arcilla, el recebo (zahorra), el mortero y pañete, y concreto (hormigón), el cual representa casi la mitad del peso total del edificio (49%).

Con base en estas cantidades y especificaciones de materiales se calcularon los diferentes procesos relacionados con actividades de obra, maquinaria, generación de RCD, los trayectos de transporte, energía y agua operativa, reemplazos de componentes, mantenimientos y demolición del edificio al final de su vida útil. Igualmente se hicieron las respectivas modificaciones en las etapas mencionadas y en la etapa D sobre reutilización y reciclaje, frente a dos nuevos escenarios de estudio que incorporan energías renovables en sitio y sus respectivos excedentes generados.

Aunque las estimaciones iniciales para la aplicación de diferentes tecnologías de ER en el prototipo según las características climáticas de Bogotá y la normativa disponible eran

poco alentadoras, conforme se fue avanzando en los cálculos de cada tecnología y sus requerimientos, no solo se halló una buena viabilidad, sino que se hicieron evidentes vacíos técnicos que se resolvieron al proponer una clasificación de tipos en la generación, y unos esquemas de instalación.

Para estimar la incorporación de energías renovables en el edificio, es necesario establecer un balance que pueda incorporarse como registro en el ACV en sus diferentes etapas. Esto se logró al determinar tres tipos de generación/consumo de energía según su interacción con la red pública y como proveedor del edificio: autoconsumo directo, generación de intercambio, y excedente para venta. Su cálculo permitió determinar el balance, los aportes para el retorno de la inversión, y los correspondientes valores en las etapas B6 de energía operativa, y la D sobre Reutilización/ recuperación/ potencial de reciclaje de la energía más allá de los límites del sistema.

Igualmente, en el caso de edificaciones residenciales de alta densidad, también fue necesario proponer la identificación de esquemas técnicos de instalación: Simple, Compartida, Dual, y Autónoma. Estos esquemas siempre están articulados por un medidor bidireccional para cada vivienda, así como un inversor y su cableado de cantidad variable para cada uno. Al variar la cantidad de instalaciones y equipos, estos esquemas tienen impacto definitivo en los costos de inversión, su amortización, y el dimensionamiento de los equipos.

Con base en las anteriores consideraciones, el establecimiento de parámetros técnicos iniciales y los procedimientos de cálculo de predimensionado, se plantearon diferentes posibilidades para la aplicación de paneles fotovoltaicos, minieólica, colectores solares, y biomasa; la geotermia no fue considerada por incompatibilidades técnicas. Estas posibilidades fueron sintetizadas en una tabla resumen, donde variaban en razón al % de cobertura de la demanda de energía (tanto para apartamentos como para zonas comunes); el tiempo de amortización de la inversión en años; si existían excedentes; y la ocupación de la cubierta. En las posibilidades seleccionadas es evidente el peso que tiene la generación de excedentes que incrementan la viabilidad, lo cual coincide con propuestas de nuevos modelos económicos que apuntan a instalaciones que generan electricidad “solo para vender”, conservando el consumo de la red pública.

De esa manera, se determinó que entre las tecnologías y las variaciones que se obtenían, la mejor viabilidad es un escenario con paneles fotovoltaicos y otro con turbina minieólica<sup>90</sup>. El escenario con fotovoltaica contempla 48 paneles logrando una cobertura de energía del 294% para zonas comunes al tiempo que se generan excedentes para la venta con un esquema de instalación simple. El escenario con minieólica logra una cobertura de energía del 112% para zonas comunes, generando excedentes y un esquema de instalación simple. Ambos escenarios tienen casi la misma proporción de energía destinada a autoconsumo directo, pero la relación de generación de intercambio y los excedentes para la venta se invierten, siendo mayores los excedentes en el escenario con fotovoltaica.

Se ingresaron los correspondientes valores de inventario al software de ACV y se ejecutaron los cálculos por medio de las metodologías de cálculo ReCiPe, CML, y CED para los tres escenarios y en las categorías de impactos relacionadas con huella de carbono

---

<sup>90</sup> Dado que no existía el dataset correspondiente para la turbina minieólica, este fue modelado e incorporado en la evaluación de impactos.

(Global warming potential, GWP) y consumo energético (“Non renewable, fossil” y “Renewable, wind, solar, geother”), obteniendo una gama de resultados de evaluación de impactos ambientales.

Inicialmente, el edificio sin energías renovables presenta impactos del tratamiento final del agua operativa, de los materiales, del tratamiento de residuos al final de la vida útil, y de energía operativa. A partir de este escenario, las ER implementadas producen muy pequeñas variaciones por la escala, pero que son más notables en las etapas B6 y D debido a valores negativos. El análisis comparativo de los tres escenarios muestra que el edificio sin renovables genera mayores impactos, seguido del escenario con minieólica (pero con comportamiento casi idéntico con el escenario sin renovables), y luego el escenario con fotovoltaica (diferencias más notables), pero con poca diferencia entre ellos (1% aprox.). Sin embargo, algunas categorías de impacto muestran una tendencia contraria, pero especialmente marcada en “Agotamiento abiótico” y “Ecotoxicidad terrestre”.

La evaluación en energía con CED también muestra ese mismo orden en la disminución de combustibles fósiles (ya muy alta con 70%), pero también de renovable hidráulica (17-18%), y un aumento en los índices de energía renovable en el escenario con fotovoltaica, pero nada notable en el escenario con minieólica. Claramente, la incorporación de renovables en la etapa B6 resta a la energía fósil, y este aumento también reduce valor a la renovable hidráulica, que proviene de la matriz energética nacional porque la reemplaza. Las fuentes energéticas más representativas son, en orden: el carbón duro, el petróleo crudo (aumenta ínfimamente con ER), la hidroeléctrica, el gas natural, el poder calorífico en biomasa, y el uranio.

De manera muy leve, la incorporación de ER aumenta las emisiones y el consumo de energía fósil en la etapa B4 (Reemplazo), en la etapa B6 disminuyen (la fotovoltaica consume una ínfima parte más de fósil, pero aumenta considerablemente la producción renovable), y en la D pasa lo mismo, pero de manera más notoria en el escenario con fotovoltaica, con valores negativos de la energía fósil. El promedio de emisiones por energía es de 0,33 kg CO<sub>2</sub>eq/ kWh.

El tratamiento de residuos de demolición en la etapa C4 es de donde provienen más emisiones (36%, seguido de A1-A3, B7, y B6) pero no es igual con su demanda de energía, es decir, esa etapa emite mayores cantidades de CO<sub>2</sub>eq con menos energía; esto se debe principalmente al tratamiento de residuos sólidos urbanos en vertedero insalubre y de residuos peligrosos con incineración. Existen otros procesos de gran peso vinculados a la fabricación de materiales como la producción de arrabio y de clinker, y el transporte con camión de carga. Los GEI emitidos más representativos, son en primer lugar el dióxido de carbono fósil (73%), el metano biogénico (18%), y el metano fósil (6%).

Respecto a la etapa B6, además de las dos categorías de impacto ya mencionadas y los valores negativos cercanos al 5% en todas ellas, el análisis en esta escala resalta aún más los valores altos en categorías como “Radiación ionizante” y “Escasez de recursos minerales”, especialmente en el escenario con fotovoltaica. Por otro lado, el escenario con minieólica presenta el menor impacto en todas las categorías con una muy pequeña diferencia. La categoría GWP expone que, además de los GEI ya conocidos en análisis previos (dióxido de carbono fósil principalmente con 91%, y el metano fósil), aparecen otros con una representación muy pequeña como el hexafluoruro de azufre (2%) y el monóxido de dinitrógeno (1%), cuyos principales contribuyentes son la producción de

electricidad con carbón duro (45%), gas natural de ciclo combinado (20%), y gas natural por centrales eléctricas (18%). El análisis con CED muestra proporciones casi similares de renovable hidráulica (mayor) y de energía fósil, además de la pequeña fracción adicional de renovable por cuenta del escenario con fotovoltaica, lo cual se ve reflejado en las fuentes energéticas de la etapa, que en orden son: la hidroeléctrica (52%), el gas natural (27%), carbón duro (17%), solar (3% escenario fotovoltaico), y el petróleo crudo (1%).

La etapa D sobre reutilización y reciclaje fuera de los límites del sistema, si bien presenta predominantemente valores negativos, confirma que los impactos con mayor valor son los mismos mencionados en la etapa B6, pero sobresale uno adicional en el escenario con fotovoltaica, que es “Consumo de agua”; la categoría GWP presenta un buen comportamiento con valores negativos altos, donde existen reducciones de GEI, principalmente de dióxido de carbono fósil (93%) y metano fósil (3%) que provenía de la producción de electricidad mencionada en el párrafo anterior, y un aumento muy mínimo de clorofluorocarbonos CFC-14 e hidrofluorocarbonos HFC-116, provenientes de procesos de explotación carbón duro en minas de hulla (3%), producción de vidrio plano (1%), producción de calor en horno industrial de carbón (1%), y producción de electricidad con lignito (1%), seguramente todas relacionadas con la fabricación de paneles fotovoltaicos.

El análisis con CED muestra valores notables solo para el escenario con fotovoltaica, donde la reducción de energías fósiles y de renovable hidráulica es similar, además de presentar valor adicional de renovable y otro ínfimo para energía fósil, lo cual se ve reflejado en las fuentes energéticas que crecieron como el uranio (9%), petróleo (8%), y carbón marrón (5%), y otras que se redujeron hasta llegar a valores negativos como la convertida en hidroeléctricas (-289%), gas natural (-130%), y carbón duro (-63%).

Finalmente, los paneles fotovoltaicos tienen mayor consumo de energía e impactos ambientales respecto a la turbina minieólica, lo cual es notable en categorías como “Radiación Ionizante”, “Ecotoxicidad terrestre”, “Consumo de agua”, y “Agotamiento de la capa de ozono”.

### **5.6.1. Bibliografía del capítulo**

Ballén, Sergio et al. (2016). Metodología para el análisis del ciclo de vida de mampostería de arcilla en Cundinamarca, a partir de la evaluación del consumo de recursos energéticos. Informe de Investigación Acuerdo 81 del 27 de octubre de 2015. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Ballén, Sergio. (2010). Vivienda social en altura: Tipologías urbanas y directrices de producción en Bogotá. Serie de investigación sobre vivienda en Iberoamérica. Infonavit y UAEM: México.

Camacol (2016). Tendencias de la construcción N°8: Diagnostico de la oferta de vivienda. Departamento de Estudios Económicos y Técnicos. Recuperado de:

<https://camacol.co/informacion-economica/tendencias> <Consulta: 06 de octubre de 2018>

Camacol (2019). Informe de actividad edificadora: Julio de 2019. Departamento de Estudios Económicos y Técnicos. Recuperado de: <https://camacol.co/informacion-economica/coyuntura-economica> <Consulta: 12 de julio de 2019>

Corpoema (2012). Caracterización energética del sector residencial urbano y rural en Colombia: Volumen 2, Caracterización por Piso Térmico. UPME. Recuperado de: <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1111> <Consulta: 16 de marzo de 2020>

Construdata (2013). ¿Cómo se construye en Colombia?. 05 de julio de 2013. [http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como\\_se\\_construye\\_en\\_colombia.asp?Id\\_Tarea=\\_IDTAREA\\_&Email={{EMAIL}}](http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como_se_construye_en_colombia.asp?Id_Tarea=_IDTAREA_&Email={{EMAIL}}) <Consulta: 08 de octubre de 2018>

DANE. (2019). Boletín Técnico Licencias de Construcción (ELIC), Abril 2019. Recuperado de: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/licencias/bol\\_lic\\_abr19.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/licencias/bol_lic_abr19.pdf) <Consulta: 12 de julio de 2019>

Ecoingeniería (2012). Determinación de propiedades físicas y estimación del consumo energético en la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones colombianas. Informe Contrato No. 0000013511 para la Unidad de Planeación Minero Energética UPME y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD. Recuperado de: <http://www.si3ea.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=6G1VGDdWfHc%3D&tabid=90&mid=449&language=en-US> <Consulta: 19 de noviembre de 2019>

FincaRaiz.com (2018). <https://www.fincaraiz.com.co/> <Consulta: 19 de abril de 2018>

García, Juan et al (2016). Comparación de los principales sistemas constructivos de VIS en Colombia, desde una perspectiva de sostenibilidad, empleando BIM: caso estudio en Soacha. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/19639> <Consulta: 09 de junio de 2020>

González, Rosa (2018). Designing nearly zero energy buildings: energy efficiency and on-site generation. Tesis de doctorado Programa de Planeamiento Energético. Instituto Alberto Luiz Coimbra para Estudios de Posgrado e Investigación en Ingeniería. Rio de Janeiro. Recuperado de <http://www.ppe.ufri.br/index.php/pt/publicacoes/teses-e-dissertacoes/2018/1467-designing-nearly-zero-energy-buildings-energy-efficiency-and-on-site-generation-2>

Greening, B. & Azapagic, A. (2013). Environmental impacts of micro-wind turbines and their potential to contribute to UK climate change targets. In *Energy* (Vol 59, pp. 454-466. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.037> <Consulta: 14 de septiembre de 2020>



IDEAM (2007). Estudio de la caracterización climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM y FOPAE Fondo de Prevención y Atención de Emergencias. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=18241> <Consulta: 09 de enero de 2021>

Kouloumpis, V., Sobolewski, R. A., & Yan, X. (2020). Performance and life cycle assessment of a small scale vertical axis wind turbine. *Journal of Cleaner Production*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119520> <Consulta: 10 de septiembre de 2020>

Lombardi, L., Mendecka, B., Carnevale, E., & Stanek, W. (2018). Environmental impacts of electricity production of micro wind turbines with vertical axis. *Renewable Energy*, 128, 553–564. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.010> <Consulta: 10 de septiembre de 2020>

Lucon O., D. Ürge-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L. F. Cabeza, N. Eyre, A. Gadgil, L. D. D. Harvey, Y. Jiang, E. Liphoto, S. Mirasgedis, S. Murakami, J. Parikh, C. Pyke, and M. V. Vilariño, 2014: Buildings. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Edenhofer, O. et al (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Martí, Carlos et al. (2000). *Las formas de la residencia en la ciudad moderna: Vivienda y ciudad en la Europa entreguerras*. Segunda edición. Ediciones UPC. Barcelona, España.

Meléndez, Sergio (2017). *Fachadas con energía renovable*. Editorial Trillas. México.

MetroCuadrado (2017). Sabana de Bogotá, una gran opción para comprar vivienda. Junio 28 de 2017. <http://www.metrocuadrado.com/noticias/oikos-construyendo-futuro/sabana-de-bogota-una-gran-opcion-para-comprar-vivienda-3036>. <Consulta: 09 de abril de 2018>

Moreno, David; López, Idalia; & Blessent, Daniela (2020). Geothermal energy in Colombia as of 2018. En: *Ingeniería y Universidad*. vol. 24, 2020. Recuperado de: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu24.geic> <Consulta: 17 de marzo de 2020>

Osma P, G. et al. (2015). Energy considerations of social dwellings in Colombia according to NZEB concept. *DYNA* 82(192): 120. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n192.48587> <Consulta: 31 de mayo de 2019>

Secretaría Distrital de Planeación SDP. (2018). Bases Técnicas para el Desarrollo del Protocolo de Implementación de la Resolución 549 de 2015 en Bogotá. Secretaría de Planeación Distrital y Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, CCCS. Recuperado de: [http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/dts\\_implementac\\_protocolo.pdf](http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/dts_implementac_protocolo.pdf) <Consulta: 25 de noviembre de 2019>

Secretaría Distrital de Planeación SDP. (2019). Protocolo de implementación para el cumplimiento de los porcentajes de ahorro en agua y energía para la ciudad de Bogotá D. C., establecidos en la Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Recuperado de: <http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/protocolo.pdf> <Consulta: 25 de noviembre de 2019>

Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Convenio ATN/FM-12825-CO

Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (2016). Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética PAI PROURE 2017-2022. Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia. Recuperado de: [http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI\\_PROURE\\_2017-2022.pdf](http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf) <Consulta: 02 de julio de 2019>

Wendell Cox Consultancy (2019). Demographia World Urban Areas: Built-Up Urban Areas or Urban Agglomerations. 15th Annual Edition: April 2019. DEMOGRAPHIA Consultancy. Recuperado de: <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf> <Consulta: 17 de julio de 2019>

Zabalza, I. (2011). Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Recuperado de: <https://zaguan.unizar.es/record/5751?ln=es#> <Consulta: 17 de diciembre de 2019>

# 6. CONCLUSIONES Y ANEXOS

## 6.1 CONCLUSIONES

Los edificios NetZero EB, también llamados energía/carbono neto cero o edificios de consumo de energía casi nulo, son edificaciones con altos estándares de eficiencia energética que incorporan energías renovables para satisfacer su demanda. Si bien existen ejemplos de edificios de estas características desde finales de la década de 1930, hoy en día, se está trabajando en diferentes estándares para regularizarlos o crear hojas de ruta de implementación, como es el caso colombiano. Una de las barreras a superar, desde un enfoque de ciclo de vida, es cubrir la falta de información de algunas etapas y estandarizar procedimientos dirigidos a cuantificar los impactos ambientales, teniendo en cuenta la matriz energética nacional y otras particularidades, como la energía embebida y/o la huella de carbono, lo que permitiría establecer medidas de reducción y mitigación.

Se ha comprobado que al reducir la energía operativa se aumenta la embebida a través de los materiales de aislamiento y equipos de ER. A pesar de que los equipos de pequeña escala hacen parte de los NetZero EB ya que aprovechan las variables del clima para generar electricidad o conducir calor, estos poseen una energía embebida que es cedida al edificio y no tenemos certeza sobre su magnitud y si es compensada por la energía que generan, lo cual es solventado por esta investigación. Por tanto, se ha desarrollado un aporte hacia un posible protocolo de cuantificación de EE que permita su comparación entre casos, así como su gestión y disminución.

Entre los diferentes usos edificatorios, se atribuye a la vivienda de alta densidad, el menor consumo de energía embebida y operativa, y dada su proliferación y demanda global, esta tipología edificatoria se convierte en una pieza clave hacia la descarbonización de las ciudades, por tanto, podemos aceptar que la vivienda colectiva en el entorno urbano es la más eficiente energéticamente<sup>91</sup>, al menos en cuanto a demanda por área urbana. Sin embargo, en buena parte de los casos, su demanda energética es muy alta para ser cubierta por equipos de Energías Renovables en sitio. En el caso de Bogotá, Colombia, las particularidades más comunes de esta tipología edificatoria fueron analizadas con base a una matriz de registros de la oferta, las cuales permitieron determinar las características arquitectónicas aplicadas al prototipo experimental de este estudio.

El prototipo experimental hipotético implementado para este estudio es un edificio de vivienda de alta densidad de 15 pisos y 118 apartamentos construido con un sistema industrializado en concreto (hormigón), el cual toma como referencia a la vivienda típica de estrato 3 que consume energía en promedio entre 1.956 y 2.798 kWh/año<sup>92</sup>. Este se

---

<sup>91</sup> De acuerdo con literatura en ecourbanismo, los edificios de alta densidad propenden por el cumplimiento de un objetivo de las ciudades sostenibles: la ciudad compacta. Este modelo de crecimiento urbano evita la ocupación dispersa de nuevas áreas urbanas originalmente naturales, fomenta la proximidad y el reciclaje de edificios e infraestructura existente en las centralidades, aprovecha mejor los recursos energéticos (eficiencia metabólica), genera positivamente una complejidad social y de usos, entre otros. Algunas referencias: <http://urban-e.aq.upm.es/articulos/ver/el-urbanismo-ecol-gico/completo>, <https://doi.org/10.11144/Javeriana.CVU7-14.vccc>

<sup>92</sup> Vale la pena señalar que, en la literatura internacional de este tema, más que los kWh/año, se consideran la proporción por m<sup>2</sup>, que permite hacer comparaciones según el área; sin embargo, según lo expuesto en el capítulo 5.3.3., no existe suficiente información confiable a nivel nacional bajo esta proporción. Los cálculos teniendo en cuenta el área promedio de los apartamentos del prototipo (66,6 m<sup>2</sup>), arrojan valores entre 29 y 42 kWh/m<sup>2</sup>/año.

ubica en la ciudad de Bogotá, la cual es altamente densificada con una temperatura promedio de 13°C (fría) donde no son necesarios sistemas de climatización, con velocidades de viento relativamente bajas y una radiación solar promedio respecto al país.

En el país y en la ciudad se está trabajando en desarrollar manuales o mecanismos que faciliten la aplicación de valores de energía y/o carbono embebido frente a los materiales y sistemas constructivos más aplicados en el país, que son el industrializado, la mampostería estructural, y la mampostería confinada, los cuales implican cantidades considerables de agregados, arena, cemento, roca, cerámica, entre otros. Debido a que estos documentos están en proceso de elaboración, no se ha revelado si se ha empleado análisis de ciclo de vida, sus parámetros, y metodologías de cálculo.

Algunos de los motivos para desarrollar estos mecanismos junto con la promoción de ER, son las políticas de descarbonización multisectorial y los mercados de carbono (bonos, impuestos, etc), cuya implementación global está en crecimiento; no obstante, una dificultad frecuente en la política pública es el no contar con mecanismos monitoreo, reporte y verificación que permitan hacer seguimiento a las estrategias y su retroalimentación. Por otro lado, la aplicación de energías renovables de pequeña escala se ha dado de manera esporádica solo en edificios comerciales y de oficinas, ya que los incentivos económicos son muy recientes.

En esta investigación se ha optado por aplicar la metodología “basada en escenarios” donde se define un número posible de escenarios por tecnología de ER y deducir el más conveniente, haciendo uso de sistemas predimensionados de autoconsumo conectado a la red bajo un modelo de compraventa por “balance neto”, ya que las tecnologías seleccionadas no consiguen cubrir el 100% de la demanda de los apartamentos, pero si lo logran con las zonas comunes que tienen una demanda más baja. Estos escenarios contemplaron inicialmente posibilidades para la aplicación de paneles fotovoltaicos, minieólica, colectores solares, y biomasa. Posteriormente, se seleccionaron los dos escenarios que ofrecían mayor viabilidad, el primero, incorpora una turbina minieólica con una cobertura del 112% para ZC y una pequeña parte de excedentes; el segundo escenario son 48 paneles fotovoltaicos policristalinos con una cobertura del 294% de ZC y generación de excedentes. Estos, junto con el edificio sin renovables, constituyen los tres escenarios de evaluación y comparación de las ER de pequeña escala en sitio respecto a sus impactos ambientales y un Análisis de ciclo de vida (ACV).

Debido a las características de las edificaciones residenciales de alta densidad, las cuales incorporan múltiples apartamentos donde cada uno tiene su respectiva instalación eléctrica y contador, el evaluar las cantidades de equipos y costos de incorporación de ER implicaba identificar los esquemas técnicos de instalación en el edificio que se intuyen, pero no están claramente definidos, por tanto, se propusieron cuatro esquemas de instalación: Simple, Compartida, Dual, y Autónoma (Ilustración 31). Estos esquemas siempre están articulados por un medidor bidireccional para cada vivienda, así como un inversor y cableado de cantidad variable para cada uno (que no fue contabilizado), evidenciando su impacto definitivo en los costos de inversión, su amortización, y el dimensionamiento de los equipos. En los dos escenarios con ER seleccionados por su viabilidad, el esquema implementado fue el Simple.

Para este estudio, se ha realizado el inventario por el método de ACV “análisis de proceso” usando varias metodologías de cálculo como CED, ReCiPe y CML, aplicados

en los tres escenarios y haciendo énfasis en las categorías de impactos relacionadas con huella de carbono (Global warming potential, GWP) y consumo energético primario (“Non renewable, fossil” y “Renewable, wind, solar, geother”), sobre la base de la RCP del operador EPD System, e incorporando la etapa D de acuerdo a cada escenario. Al desarrollar una cuantificación de la energía del ciclo de vida anualizada (ALCE), incluyendo la embebida con la metodología CED en unidades de energía primaria, se ha realizado un “Análisis energético de ciclo de vida” (AECV), el cual fue presentado en un capítulo de esta investigación, acompañado de otras metodologías de cálculo de huella de carbono y otras categorías de impacto.

Los resultados de este AECV aplicado en los tres escenarios, muestran que el edificio sin ER, que es el caso base, presenta los mayores impactos en orden empezando por los materiales (en orden: A1-A3, B7, C4, B6). La aplicación de los dos escenarios con ER produce muy pequeñas variaciones en las categorías de impacto (cercasas al 1%) debido a la escala, donde en casi la mitad de ellas, el edificio sin renovables genera mayores impactos, seguido del escenario con minieólica pero con comportamiento casi idéntico con el escenario sin renovables, y luego, el escenario con fotovoltaica; en la otra mitad de las categorías la relación se invierte.

Sin embargo, en las categorías de impacto “Agotamiento abiótico” y “Ecotoxicidad terrestre” la relación no solo se invierte, sino que además es pronunciada, haciendo suponer que la incorporación de ER en sitio implica un aumento en estas categorías, especialmente la fotovoltaica. El “Agotamiento abiótico” o “Potencial de agotamiento de los recursos abióticos”, se refiere a un indicador sobre la disponibilidad natural de recursos naturales abióticos (componentes naturales no vivos), incluyendo la energía fósil y minerales, en términos de reservas y acumulación en el sistema ambiental, calculado en kg de antimonio equivalente. Por su parte, “Ecotoxicidad terrestre” trata de los impactos que afectan a la superficie terrestre a través de la liberación de sustancias tóxicas, siendo nocivas para distintas especies y que son capaces de cambiar la estructura del ecosistema, calculado en kg de diclorobenceno equivalente.

La evaluación energética con CED confirma la disminución de combustibles fósiles al incorporar ER, así como de renovable hidráulica, y un aumento de la energía renovable no convencional (solar, eólica, geotermia) solo en el escenario con fotovoltaica, pero sin cambios notables en el escenario con minieólica. De manera muy leve, la incorporación de ER aumenta las emisiones y el consumo de energía fósil (entre ellas el petróleo crudo) en la etapa B4, mientras que en la etapa B6 y D disminuyen. La evaluación de la categoría GWP en CO<sub>2</sub>eq, muestra que las etapas de mayores emisiones son la C4 con el tratamiento de residuos de demolición, seguido de la fabricación de materiales (A1-A3), el tratamiento de agua servidas (B7), y la energía operativa (B6). El promedio de emisiones por energía es de 0,33 kg CO<sub>2</sub>eq/ kWh.

Dado que los valores energéticos de las ER se concentran las etapas B6 (energía operativa) y D (reutilización y reciclaje fuera del sistema), se ha encontrado muy pertinente evaluar con detenimiento estas etapas a la luz de evaluar impactos ambientales en el ciclo de vida de los NetZero EB, ya que poseen valores negativos al registrar la energía evitada, y permiten resultados con mayor detalle sobre el balance de generación y consumo de energías renovables de pequeña escala, lo que permitirá una valoración definitiva respecto a criterios y estrategias de sostenibilidad.

En el prototipo, la etapa B6 muestra que el escenario con minieólica presenta el menor impacto en todas las categorías de impacto con una diferencia muy pequeña. En la etapa D, se presentan fuertes valores negativos con reducciones de GEI por cuenta de la energía evitada, disminuyendo especialmente dióxido de carbono fósil que opacan el aumento ínfimo de clorofluorocarbonos. En ambos escenarios, el análisis energético con la metodología de cálculo CED solo mostraba diferencias positivas por el aumento de ER por cuenta del escenario con fotovoltaica, y como se vio anteriormente, el aumento de la fracción renovable también reduce valor a la renovable hidráulica que proviene de la matriz energética nacional porque la reemplaza. Por otro lado, la categoría GWP mostraba en todos los casos que los GEI más representativos son el dióxido de carbono fósil con porcentajes entre el 73% y el 91%, seguido del metano biogénico, y el metano fósil.

La escala de análisis en las etapas B6 y D permite notar dos nuevas categorías con valores altos, que son “Radiación ionizante” (principalmente por la fotovoltaica) y “Escasez de recursos minerales”. La categoría “Radiación ionizante” se refiere a los efectos nocivos sobre la salud humana, por la generación de reacciones y cambios químicos en el entorno debido a descargas radiactivas, y que es calculado en kg de uranio 235. Por su parte, la “Escasez de recursos minerales” cuantifica la reducción de recursos como metales o rocas extraídos de la naturaleza, calculado en kg de hierro equivalente.

### **6.1.1. Aportes al cálculo de energía embebida**

A partir de la literatura consultada sobre conceptos de energía embebida y sintetizada gráficamente en la Ilustración 6, en un esfuerzo por dar mayor uniformidad a los análisis y aportar a un eventual protocolo de cuantificación siguiendo las recomendaciones de estudios previos, se propone una clasificación de conceptos según su naturaleza y como podrían representarse en los resultados basados en ACV, plasmada en la Ilustración 35, donde la energía embebida se divide en Indirecta, Directa, Recurrente, y Proyectada. La Indirecta corresponde con la fabricación de materiales que componen el edificio, por tanto, hace parte de la etapa A1-A3; la Directa tiene que ver el transporte a la obra y el proceso constructivo, que hacen parte de las etapas A4 y A5; la energía Recurrente se refiere a la implicada en el mantenimiento, reparación y reemplazo de componentes, por tanto, hace parte de las etapas B1-B7 pero excluyendo la B6; la Proyectada incorpora la energía de la demolición y gestión de los residuos, por eso corresponde con las etapas C1-C4.

Estos cuatro tipos podrían estar divididos a su vez, en energía embebida ascendente (upstream) que incorpora a la Indirecta y a la Directa, y energía embebida descendente (downstream) que contempla a la Recurrente y a la Proyectada. Esto se logra siguiendo la terminología del ACV para establecer los límites del sistema, y cuya división es necesaria para el análisis, porque la energía en estas dos nuevas clasificaciones se manifiesta en momentos inconexos temporalmente, con responsables diferentes, y el desarrollo del inventario se plantea de manera diferente.

Así mismo, se hace necesario otorgar una clasificación a la energía operativa y a los excedentes que hacen parte de la generación de ER (Ilustración 36). La operativa hace parte de la etapa B6 que a su vez se divide en Entregada, Generada, y Evitada; por su parte, le energía exportada corresponde con la etapa D sobre reutilización y reciclaje fuera

del sistema, por tanto, se divide en Excedente para venta y en Evitada. De acuerdo con parte de los estudios consultados, estas se pueden reportar en unidades de energía primaria para su comparación con otros edificios, incluyendo también a la embebida, lo cual es posible gracias a los resultados de ACV con la metodología de cálculo CED.

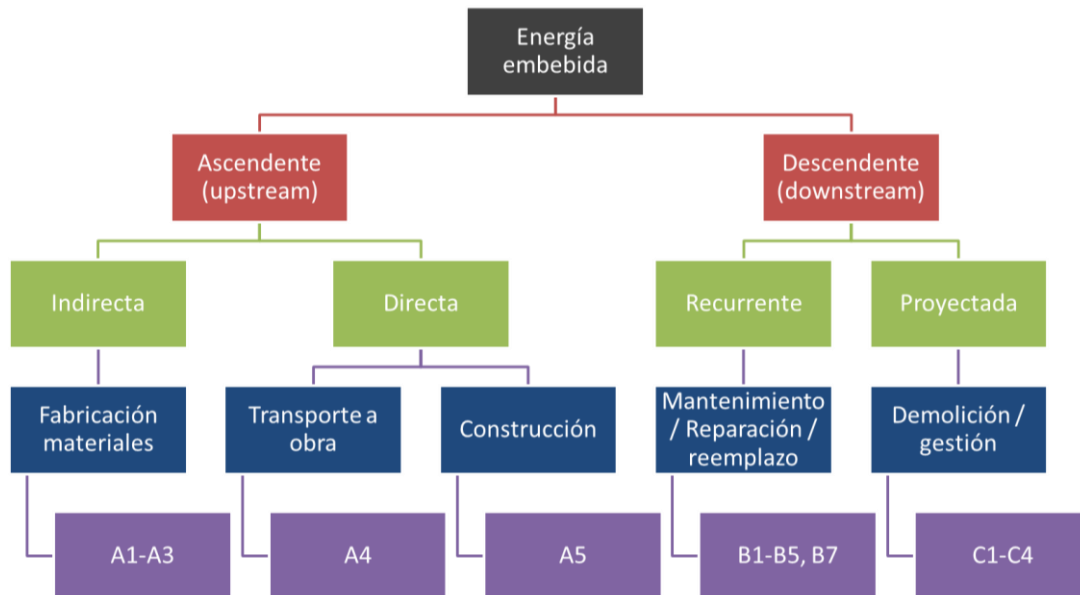


Ilustración 35. Clasificación propuesta de conceptos relacionados con energía embebida. Fuente: Elaboración propia

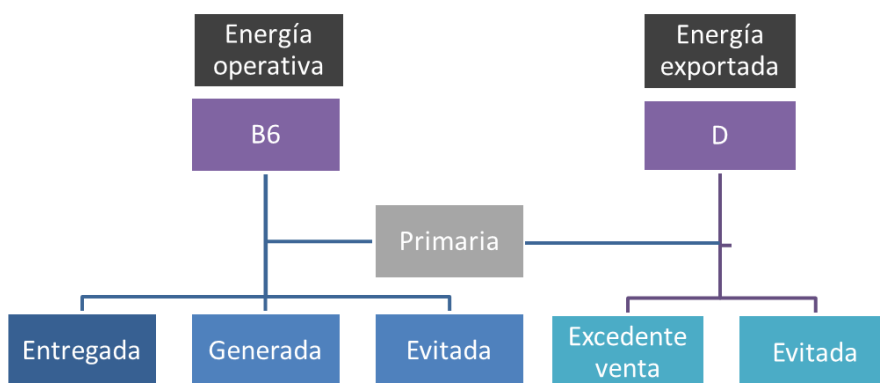


Ilustración 36. Clasificación propuesta de conceptos relacionados con energía operativa y excedente. Fuente: Elaboración propia

Atendiendo las observaciones de Galpin & Moncaster (2017), esta investigación hace contribuciones con un posible método de cuantificación basado en la determinación de valores a reportar sobre una clasificación tipológica de la energía, que acoge tanto a los excedentes exportados a la red que se reportan en la etapa D (Reutilización/ recuperación/ potencial de reciclaje de la energía más allá de los límites del sistema), como lo generado en la etapa B6 (energía operativa), la cual está compuesta por una fracción consumida de inmediato, y otra que se “intercambia” con la red. Esto permite afinar la predicción de las proporciones importadas y exportadas y los momentos en que se dan, determinar un balance que sirve para calcular los aportes económicos frente el retorno de la inversión, y reportar adecuadamente el inventario de ACV en las etapas señaladas.



La clasificación de tipos de generación /consumo que se basa en su interacción con la red pública, y su papel como proveedor del edificio, son el Autoconsumo directo, Generación de intercambio, y Excedente para venta (Gráfico 18). Los dos escenarios con ER seleccionados para su evaluación, tienen casi la misma proporción de energía destinada a Autoconsumo directo, pero la relación de Generación de intercambio y los Excedentes para la venta se invierten, siendo mayores los excedentes en el escenario con fotovoltaica.

El procedimiento “Evaluación de aporte de ER” (ver subcapítulo 5.1) condujo a clarificar los valores que hacen parte del balance por ER y que se deben reportar en el inventario de ACV, de acuerdo con la clasificación de conceptos relacionados con energía operativa y excedente (Ilustración 36). Según el Gráfico 63, existen cuatro valores: V1 es la energía generada que se destina a satisfacer la demanda del edificio, sumando el Autoconsumo directo y la Generación de intercambio, y se reporta en la etapa B6 sobre energía operativa; V2 es la energía generada excedente, es decir, que supera la demanda del edificio y que será vendida a la red pública, reportada en la etapa D sobre reutilización y reciclaje más allá de los límites del sistema; V3 es la energía evitada de la red pública al ser remplazada por la ER consumida por el edificio, la cual, teóricamente tiene el mismo valor que V1 y se reporta en la etapa B6; V4 es la energía evitada de la red pública al ser remplazada por la ER vendida a la red y consumida fuera de los límites del sistema, la cual, teóricamente tiene el mismo valor que V2 y se reporta en la etapa D.

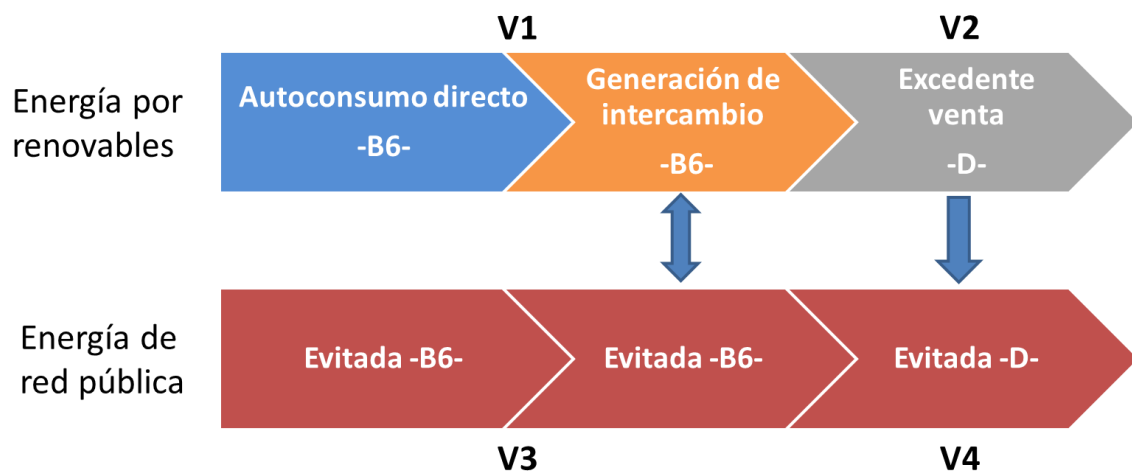


Gráfico 63. Valores a reportar frente a los tipos de generación / consumo para el balance. Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.2. Energía y carbono en el prototipo

Como se mencionó en el capítulo “5.5.7. Energía y carbono embebido y operativo” y en “5.1 OPERACIONES Y PROCEDIMIENTOS DESARROLLADOS”, para el desarrollo del procedimiento “Procesamiento de datos final”, la cuantificación y resultados obtenidos previamente se han catalogado según la clasificación conceptual propuesta para la energía embebida (Ilustración 35) y para la energía operativa (Ilustración 36), donde para efectos prácticos, se han utilizado los mismos nombres para referirse a las emisiones de carbono embebido y operativo. En dichos resultados se evidenció que el ACV normalmente toma los resultados numéricos negativos de la etapa D (reutilización, recuperación, reciclaje) y los descuenta al total del análisis en todas las etapas, mostrando

diferencias muy pequeñas en los casos con ER y haciendo poco evidentes los beneficios ambientales de generar excedentes y venderlos a la red pública.

Debido a que los procesos de la etapa D son una extensión de la etapa de energía operativa (B6) cubierta por los equipos de ER, se propone que para plantear un balance final que evidencie los beneficios ambientales de la generación de energía en NetZero EB a través de tecnologías de ER de pequeña escala, el carbono y la energía embebida, operativa y exportada deberían evaluarse en conjunto, tomando en cuenta sus diferencias respecto a un caso base que sería el escenario sin renovables. Este abordaje respondería a la pregunta de investigación planteada en la Problemática: ¿Existen métodos para calcular el aporte en energía embebida de los equipos de energía renovable a escala residencial y en su ciclo de vida, respecto al consumo total del edificio?

MINIEOLICA					FOTOVOLTAICA					
EE + EO					2.658,11 kwh/m <sup>2</sup>					
CE + CO					883,22 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>					
EE + EO					2.733,41 kwh/m <sup>2</sup>					
CE + CO					916,77 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>					
ENERGIA EMBEBIDA EE / OPERATIVA EO / EXPORTADA EEx										
EE	4,4	kwh/m <sup>2</sup>	-5%	43.402,3	kwh	47,5	kwh/m <sup>2</sup>	-309%	464.139,1	kwh
EO	-80,9		99%	-789.752,9		-48,7		317%	-475.416,9	
EEx	-4,9		6%	-48.104,4		-14,2		92%	-138.830,1	
T	-76,5		-3%	-746.350,6		-1,2		0%	-11.277,8	
<b>Tx</b>	<b>-81,4</b>			<b>-794.455,0</b>		<b>-15,4</b>			<b>-150.108,0</b>	
CARBONO EMBEBIDO CE / OPERATIVO CO / EXPORTADO CEx										
CE	1,9	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	-23%	18.168,2	kgCO <sub>2</sub>	34,1	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	168%	332.711,0	kgCO <sub>2</sub>
CO	-9,2		117%	-90.134,7		-7,9		-39%	-77.129,2	
CEx	-0,5		7%	-5.351,8		-5,9		-29%	-58.057,9	
T	-7,4		-1%	-71.966,4		26,2		3%	255.581,8	
<b>Tx</b>	<b>-7,9</b>			<b>-77.318,2</b>		<b>20,2</b>			<b>197.523,9</b>	

Tabla 35. Diferencia de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>eq embebidos y operativos en el prototipo respecto el escenario sin renovables. Fuente: Elaboración propia.

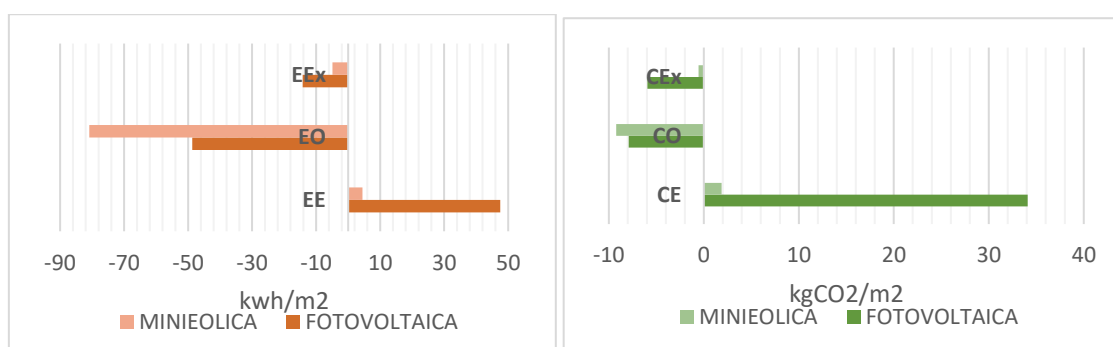


Gráfico 64. Diferencia de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>eq embebidos y operativos en el prototipo respecto el escenario sin renovables. Fuente: Elaboración propia

Para ello, se elaboró la Tabla 35 y el Gráfico 64 usando siglas para identificar cada uno de los tipos de energía y carbono<sup>93</sup>, donde una primera columna registra los resultados de la diferencia respecto al escenario sin renovables por m<sup>2</sup>, y una segunda columna, el total

<sup>93</sup> Las siglas son: EE energía embebida, EO energía operativa, EEx energía exportada, CE carbono embebido, CO carbono operativo, CEx carbono exportado, T total parcial sin exportada, Tx total final incluyendo la exportada.

para el edificio de esa misma diferencia según cada escenario con las energías renovables estudiadas.

Se puede apreciar que efectivamente, con la aplicación de ER se incrementa la energía y el carbono embebidos hasta 47,5 kWh/m<sup>2</sup> y 34,1 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, la energía y carbono operativos disminuyen con una fuerte participación, con excepción del carbono operativo para el escenario fotovoltaico; la energía y carbono exportados disminuyen siendo notable en el escenario con fotovoltaica, donde se puede anotar además que la energía embebida y la operativa casi que se anulan entre sí. Los totales evidencian que en el escenario con minieólica se logra una disminución de 794.455 kWh y 77.318,2 kg CO<sub>2</sub>eq, y en el escenario con fotovoltaica una reducción de 150.108 kWh pero aumento de 197.523,9 kg CO<sub>2</sub>eq, es decir, existe una mayor disminución de energía y de carbono en el escenario con minieólica, mientras que aumenta el carbono en el escenario con fotovoltaica, lo cual se debe al incremento de la energía y carbono embebidos de los equipos fotovoltaicos.

MINEOLICA			FOTOVOLTAICA		
	kwh/m2			kwh/m2	
EE er	4,4	0%	EE er	47,5	2%
EE edificio	1.832,95	69%	EE edificio	1.832,95	67%
EO edificio - EEx	815,78	31%	EO edificio - EEx	838,68	31%
	kg CO2/m2			kg CO2/m2	
CE er	1,9	0%	CE er	34,1	4%
CE edificio	785,21	89%	CE edificio	785,21	86%
CO edificio - CEx	95,60	11%	CO edificio - CEx	91,53	10%

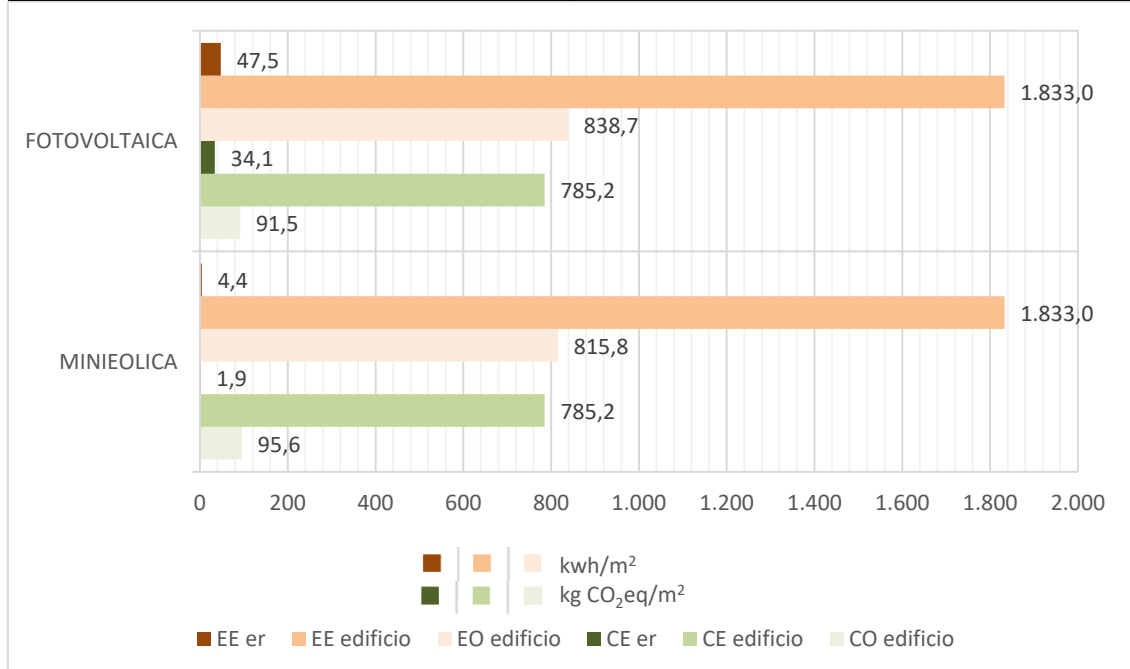


Gráfico 65. Aportes totales de energía y carbono embebidos en los escenarios con ER. Fuente: Elaboración propia

A partir de estos datos precisos de energía y carbono embebidos de las tecnologías de ER aplicadas en cada escenario, solo hace falta compararlos respecto a los valores totales del edificio, lo cual es expuesto en el Gráfico 65 y permitiendo responder a la pregunta de investigación. El aporte en energía embebida de los equipos de energía renovable (EE er) de pequeña escala respecto al consumo total de una edificación residencial en su ciclo de vida es del 0,2% para el escenario con minieólica y del 2% para el escenario con

fotovoltaica, teniendo en cuenta que la energía y carbono exportados fueron restados a la energía y carbono operativos para no desconocer ese aporte en el balance total. De manera similar, el aporte de carbono embebido de los equipos (CE er) representa el mismo 0,2% en el escenario con minieólica y 4% en el escenario con fotovoltaica.

Lo anterior da cumplimiento al Objetivo específico 5 (OE5), que comprende “definir procedimientos de cuantificación y balance energéticos y de emisiones de carbono por ACV, dando cuenta de las ventajas y retos de la aplicación de energías renovables de pequeña escala como característica de los NetZero EB, y específicamente en el caso hipotético, que es un proyecto de vivienda de alta densidad”.

Como dato complementario, el carbono total reducido o aumentado en cada escenario según la Tabla 35 puede ser calculado en equivalencias<sup>94</sup> que permiten comprender mejor sus magnitudes. En el escenario con minieólica se reducen 77.318,2 kg CO<sub>2</sub>eq que equivalen a GEI emitidos por 16 vehículos conducidos por un año, o por 312.722 km recorridos por un vehículo de pasajeros promedio, o el uso energético de 9 viviendas durante un año, o 179 barriles de petróleo consumidos, o 8.700 galones de gasolina consumida, o el carbono absorbido por 1.278 plántulas de árboles creciendo por 10 años. En el escenario con fotovoltaica se aumentan 197.523,9 kg CO<sub>2</sub>eq que equivalen a GEI emitidos por 43 vehículos conducidos por un año, o por 798.907 km recorridos por un vehículo de pasajeros promedio, o el uso energético de 24 viviendas durante un año, o 457 barriles de petróleo consumidos, o 22.226 galones de gasolina consumida, o el carbono absorbido por 3.266 plántulas de árboles creciendo por 10 años.

### **6.1.3. Hacia los NetZero EB del futuro**

Como lo manifestaron los estudios consultados y se comprueba en este, la cubierta del edificio y su orientación se convierte en el elemento arquitectónico que determina el desempeño de tecnologías como la fotovoltaica y la minieólica en el edificio, además de las características climáticas como la radiación solar y la velocidad de los vientos. Sin embargo, a mayor densidad de viviendas es más difícil generar la electricidad necesaria para cubrir la demanda total, además que se vuelve más costoso económicamente (sumado a las cuestiones legales de copropiedad) debido a la multiplicación de equipos como cableado, medidor, e inversor que varía según el esquema de instalación aplicado (Simple, Compartida, Dual, y Autónoma; ver Ilustración 31), por lo que la opción más viable en costos económicos es identificar la demanda de energía en zonas comunes y generar excedentes para la venta a la red pública, o cubrir solo un porcentaje de la demanda en viviendas.

No obstante, el rendimiento de las ER está determinado por las condiciones climáticas de la ciudad donde se implemente, una buena localización de las tecnologías, y la demanda energética del edificio<sup>95</sup>. Por ejemplo, en Colombia, la ciudad de Bogotá no es la más

---

<sup>94</sup> De acuerdo con datos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos EPA, <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references>

<sup>95</sup> Hay que tener en cuenta, que en el presente estudio se tomaron en cuenta condiciones climáticas conservadoras como factor de seguridad (usual en los cálculos de viabilidad), al basarse en los datos por debajo del promedio o el peor mes registrado. Por tanto, se requieren de datos estadísticos para determinar el probable incremento de dichas características climáticas y consecuentemente, del desempeño de las ER.

representativa en cuanto a radiación solar y velocidades del viento, pero si lo es la costa norte del país, donde funcionarían idealmente la fotovoltaica y la eólica; pero, por otro lado, Bogotá y ciudades similares tienen una baja demanda energética al prescindir de climatización o de ventilación mecánica. Otras tecnologías como la biomasa requieren de menores costos, mayor investigación en opciones de combustible y presencia en el mercado para convertirse en una opción viable en viviendas.

Las implicaciones de las ER en las buenas prácticas para el diseño arquitectónico radican justamente en la disposición de la cubierta y los equipos para optimizar la generación de electricidad por las tecnologías estudiadas, procurando una menor ocupación y la no afectación de sombras. Además de esto, se debe tener en cuenta la selección de materiales de menor energía y carbono embebidos (hoy en día es un poco más sencillo a través de las bases de datos genéricas o el modelamiento por ACV), y la reducción de la demanda operativa a través de lineamientos de eficiencia energética por estrategias pasivas (bioclimática) y activas, lo cual ayuda a magnificar la generación de las ER al reducir la demanda y los impactos ambientales asociados. En el caso de las zonas comunes, los sensores de ocupación y una buena iluminación natural podrían ayudar.

Un aspecto a tener en cuenta en la demanda de las viviendas es el impacto del ACS en el consumo, ya que este varía según la fuente de suministro (ducha eléctrica, o gas natural, o renovable) y por supuesto el clima, que en este caso era frío. Si este ejercicio se hubiera realizado en un clima opuesto o más extremo, entraría en juego la demanda de la climatización de las viviendas, aumentando el consumo general pero reduciendo la demanda de ACS; sin embargo, si la generación de energía por renovables se enfoca en las zonas comunes, la demanda energética de las viviendas pierde cierta relevancia.

El Análisis Energético de Ciclo de Vida desarrollado demostró que la incorporación de tecnologías de ER de pequeña escala aumentó ciertas categorías de impacto como “Agotamiento abiótico”, “Ecotoxicidad terrestre”, “Radiación ionizante” y “Escasez de recursos minerales”; por otro lado, también se redujeron categorías, entre ellas “Calentamiento global” que nos proporciona la cuantificación de CO<sub>2</sub>eq. En el campo energético se dieron reducciones obvias de demanda de la red pública, reduciendo a su vez, la dependencia de fuentes energéticas como combustibles fósiles y de renovable convencional hidroeléctrica debido a la composición de la matriz energética colombiana.

La sumatoria y comparación de los diferentes tipos de energía y carbono frente a un caso base que es el edificio sin renovables demostró que se consiguen reducciones totales de energía principalmente en el escenario con minieólica debido a la poca carga de energía embebida de una turbina minieólica. Respecto a carbono total, por la misma razón, el escenario con minieólica logra reducciones (tal vez escasamente), pero el escenario con fotovoltaica muestra que, por el contrario, las emisiones en el ciclo de vida aumentaron debido al carbono embebido de los 48 paneles fotovoltaicos que no pudo ser compensado por las reducciones de carbono operativo y el exportado. Esto es evidencia que la energía y el carbono embebidos si es una variable de fuerte peso en la carga ambiental de un NetZero EB que debe considerarse para su reducción, constituyendo, junto con la elaboración de un protocolo de cuantificación, en los principales retos a afrontar para el desarrollo de edificios de alto desempeño energético en su ciclo de vida.

Esto confirmaría lo acertado de la hipótesis planteada al inicio de la investigación, pero en el campo de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq, donde se manifestaba que la contribución de

energía embebida de los equipos de energía renovable podría ser muy alta, evitando que pueda ser compensada con la energía generada en un tiempo razonable, y más aún, no es posible compensar la energía embebida de un edificio de vivienda de alta densidad porque esta representa una cantidad muy alta frente al aporte de los equipos de ER (entre 0% a 2%). Se descarta la posible responsabilidad del área de la cubierta en la optimización de las renovables, ya que se pensaba que si existiera mayor área para equipos de ER aumentaría la generación y por consiguiente las posibilidades de compensación, pues a mayor número de equipos, mayor energía embebida.

En ese sentido, se podría introducir el concepto de “amortización energética y/o de carbono” como mecanismo de compensación, que se refiere al tiempo necesario para que un equipo de ER genere la energía equivalente a la embebida propia, teniendo en cuenta que esto depende de la potencia del equipo, de la disponibilidad de variables climáticas del lugar como radiación solar o velocidad del viento, y de la composición de la matriz energética para las emisiones de CO<sub>2</sub>eq, ya que esta sirve como parámetro para establecer el carbono evitado.

En un ejercicio rápido, la “amortización energética” aplicada bajo las condiciones y tecnologías desarrolladas en esta investigación, asume que se requieren 9.793 días o 26,8 años para que la energía generada por un panel fotovoltaico compense su propia energía embebida; en el caso de una turbina minieólica se necesitan 313 días o 0,9 años. Tomando como referencia las emisiones evitadas de carbono operativo durante la vida útil del edificio (50 años ÷ # de equipos), para la “amortización de carbono” se requieren 121.289 días o 332,3 años para que el carbono evitado por un panel fotovoltaico compense su propio carbono embebido; en el caso de una turbina minieólica se necesitan 1.735 días o 4,8 años.

#### **6.1.4. Futuros campos de estudio**

Se propone las siguientes líneas de estudio que complementan y dan sustento a las anteriores consideraciones, con el fin de proporcionar un marco teórico que permita llevar a la práctica tecnologías y procedimientos de ER en la edificación, y la configuración de NetZero EB más eficientes y sostenibles teniendo en cuenta sus impactos ambientales en su ciclo de vida:

- Armonización del factor de emisión nacional de carbono operativo aplicado a la electricidad respecto a la metodología ACV. El factor de emisión se replantea anualmente, así que esto también supone posibles imprecisiones a la hora de establecer emisiones futuras en el ciclo de vida de las edificaciones.
- En el marco de los tipos de generación y consumo de energía por renovables (Autoconsumo directo, Generación de intercambio, y Excedente para venta), se podrían desarrollar mejores herramientas para cuantificar con exactitud el Autoconsumo directo según las condiciones climáticas. Por otro lado, es necesario establecer el desempeño y eficiencia en el proceso de la Generación de intercambio, pues no se conocen si existen impactos o pérdidas energéticas en el fluido eléctrico en su paso desde y hacia la red pública; esto podría conducir también a asegurar si el

valor de energía generada y evitada son realmente el mismo, ya que depende del desempeño de cada proceso.

- Desarrollo detallado de un Protocolo de cuantificación de energía embebida teniendo en cuenta los “Aportes al cálculo de energía embebida” presentados en esta investigación. La necesidad de este protocolo es manifestada por varios autores citados en el marco teórico.
- Incorporación de valores de energía y carbono embebido de materiales y equipos implicados en las edificaciones a través de bases de datos de origen colombiano, pues las que se utilizan tradicionalmente son desarrolladas en países con diferentes procesos industriales y matriz energética; esto está relacionado con el desarrollo de un modelo de decisión de evaluación ambiental para proyectos arquitectónicos. Es importante además, incorporar estos datos a las metodologías BIM en proyectos nacionales.
- Ecodiseño y reducción de impactos embebidos en los equipos de ER de pequeña escala, teniendo en cuenta su “amortización energética y de carbono”, concepto que fue planteado en estas conclusiones.
- Definición de aspectos metodológicos y de reporte de resultados de un Análisis Energético de Ciclo de Vida, y su contribución a la evaluación de aspectos de sostenibilidad en las edificaciones.
- Análisis de costos de ciclo de vida en la edificación y especialmente en NetZero EB, con el fin de obtener una perspectiva más amplia de su viabilidad e incidencia económica en la cadena de suministro de materiales, en las estrategias de eficiencia energética, y de las energías renovables en sitio.

## 6.2 ANEXOS

### Anexo 1. Bogotá D.C. y su clima

La ciudad de Bogotá, Distrito Capital, (durante la época de dominio español y desde 1991 hasta 2000 llamada nuevamente Santafé de Bogotá) es la capital de la República de Colombia y del departamento de Cundinamarca. Está administrada como Distrito Capital, y goza de autonomía para la gestión de sus intereses dentro de los límites de la Constitución y la ley. A diferencia de los demás distritos de Colombia, Bogotá es una entidad territorial de primer orden, con las atribuciones administrativas que la ley confiere a los departamentos. Está constituida por 20 localidades y es el epicentro político, económico, administrativo, industrial, artístico, cultural, deportivo y turístico del país.

Es la tercera capital más alta de Sudamérica (después de La Paz y Quito), ya que se encuentra a un promedio de 2.625 metros sobre el nivel del mar. Está ubicada en el centro de Colombia, en la región natural conocida como la sabana de Bogotá, que hace parte del altiplano cundiboyacense, formación ubicada en la cordillera Oriental de los Andes. Tiene una longitud de 33 km de sur a norte, y 16 km de oriente a occidente.



Localización de la ciudad

Según The Economist, en el plano económico, Bogotá se destaca por su fortaleza económica asociada al tamaño de su producción, las facilidades para crear empresas y hacer negocios, la madurez financiera, la atracción de empresas globales y la calidad de su capital humano. Es el principal mercado de Colombia y de la Región Andina, y el primer destino de la inversión extranjera directa que llega a Colombia (70%). Tiene el mayor PIB nominal y per cápita del país, aportando la mayor parte al total nacional (24,5 %), y es la sexta ciudad por tamaño del PIB en Latinoamérica (de unos USD 106 678 millones) con un PIB per cápita nominal de USD 11 594 y un PIB PPA per cápita de USD



20 120, igualmente es la plataforma empresarial más grande de Colombia en donde ocurren la mayoría de los emprendimientos de alto impacto.

El aeropuerto de la ciudad, Aeropuerto Internacional El Dorado, llamado así por el mítico El Dorado, tiene el mayor volumen de carga transportada en América Latina, y es el segundo en cantidad de personas. Es la ciudad de Colombia con el mayor número de universidades (114) y centros de investigación. Cuenta con una amplia oferta cultural representada en una gran cantidad de museos, teatros y bibliotecas, que le ha otorgado el reconocimiento de la "Atenas Suramericana". La ciudad de Bogotá ocupa el lugar 63 en el Global Cities Index 2017, y es considerada una ciudad global tipo "Alpha -" por el GaWC.

Geográficamente, Bogotá está situada en la sabana homónima, sobre el altiplano cundiboyacense, una llanura situada en promedio a 26301 msnm y sus zonas montañosas alcanzan de 2400 m a 32501 msnm, lo que hace de ella la megalópolis más alta del mundo y la tercera capital después de Quito y La Paz. Tiene un área total de 1776 km<sup>2</sup> y un área urbana de 307 km<sup>2</sup>. El territorio donde se asienta la ciudad fue antiguamente un lago. De esto dan evidencia los humedales que cubren algunos sectores no urbanizados de la Sabana y en la localidad de Suba. A la llegada de los primeros conquistadores este territorio estaba cubierto de pantanos. Tiene en su territorio el páramo de Sumapaz, el más grande del mundo, localizado en la localidad de Sumapaz, a la que dio su nombre; ese páramo es parte de la región natural y antigua región administrativa del Sumapaz, del departamento de Cundinamarca.

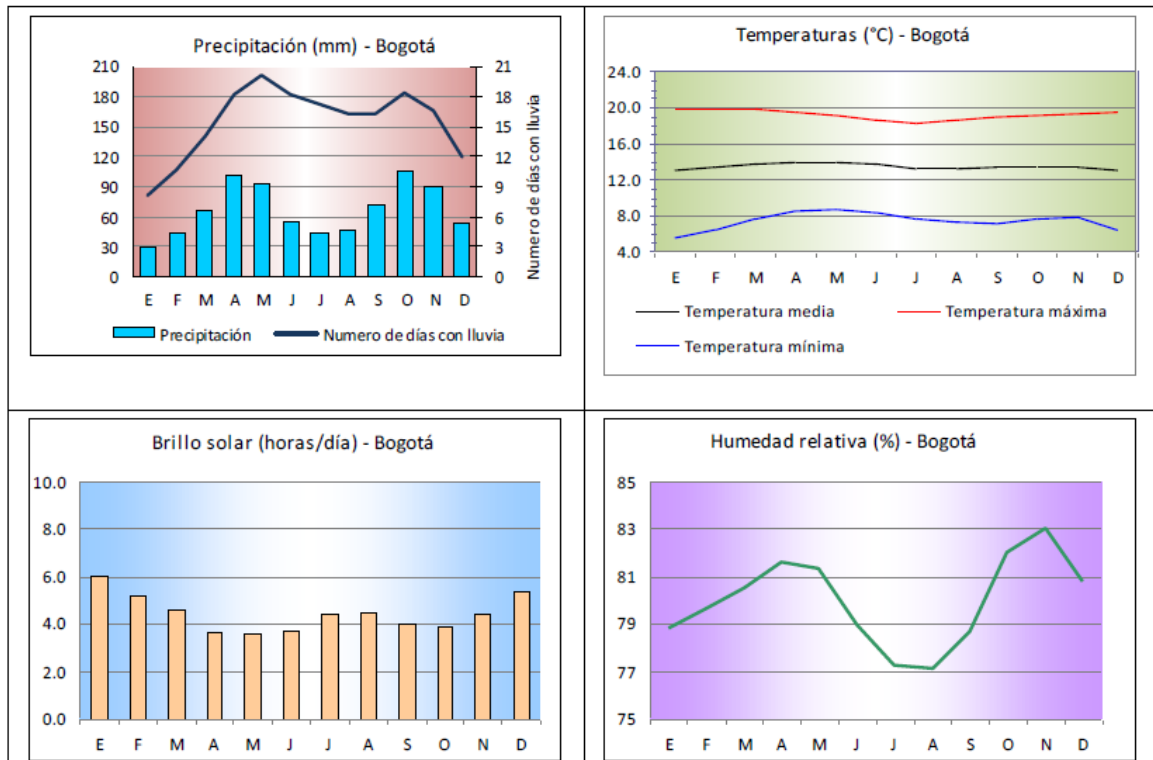
### **Análisis del clima**

Hay que tener en cuenta que el predio del proyecto cuenta con varias estaciones meteorológicas a menos de 10-5 Km., por tanto, sus datos climáticos disponibles son interpolados basados en los datos de la estación sinóptica principal del Ideam ubicada en el Aeropuerto el Dorado a 15 Km. Así mismo, estos datos se han contrastado con promedios de las estaciones climatológicas del Ideam principales de Doña Juana y Universidad Nacional, y las estaciones secundarias Jardín Botánico, Hacienda las Vegas, y Venado Oro Rivero.

Por causa de su gran altitud, Bogotá tiene un clima frío de montaña; por su baja latitud presenta una escasa oscilación térmica a lo largo del año. Las temperaturas regularmente oscilan entre los 6 y 22 °C, con una media anual de 13 °C. Debido a su ubicación cerca del Ecuador, cuenta sólo con dos temporadas: lluvia y sequía, la precipitación es abundante de marzo a mayo y de octubre a noviembre, coincidiendo casi con los equinoccios de primavera y otoño del hemisferio norte, respectivamente, debido a que el sol cruza por la línea ecuatorial y la radiación solar es mayor, aumentando el calor en la selva y favoreciendo la formación de tormentas en la zona cordillerana. En contraste, las temporadas más secas del año son de entre enero a febrero y de julio a agosto. La niebla es el hidrometeoro más común: se tienen 220 días neblinosos por año.

Los vientos predominantes provienen principalmente desde el nororiente, seguido del oriente; una radiación solar alta respecto al promedio en el mes de enero alcanzando 5816 Wh/m<sup>2</sup> y un pico bajo en noviembre de 4457 Wh/m<sup>2</sup> (que corresponde a la energía recibida por un metro cuadrado de superficie durante una hora), y que son datos asociados

a las horas de luminosidad solar global horizontal y nubosidad. La humedad relativa a lo largo del año en horas de la mañana (9:00 am.) varía entre el 73% en agosto y 79% en abril, mientras que en horas de la tarde (3:00 pm.) varía entre el 63 y 68% en los mismos meses.



Síntesis de promedios climáticos para Bogotá.

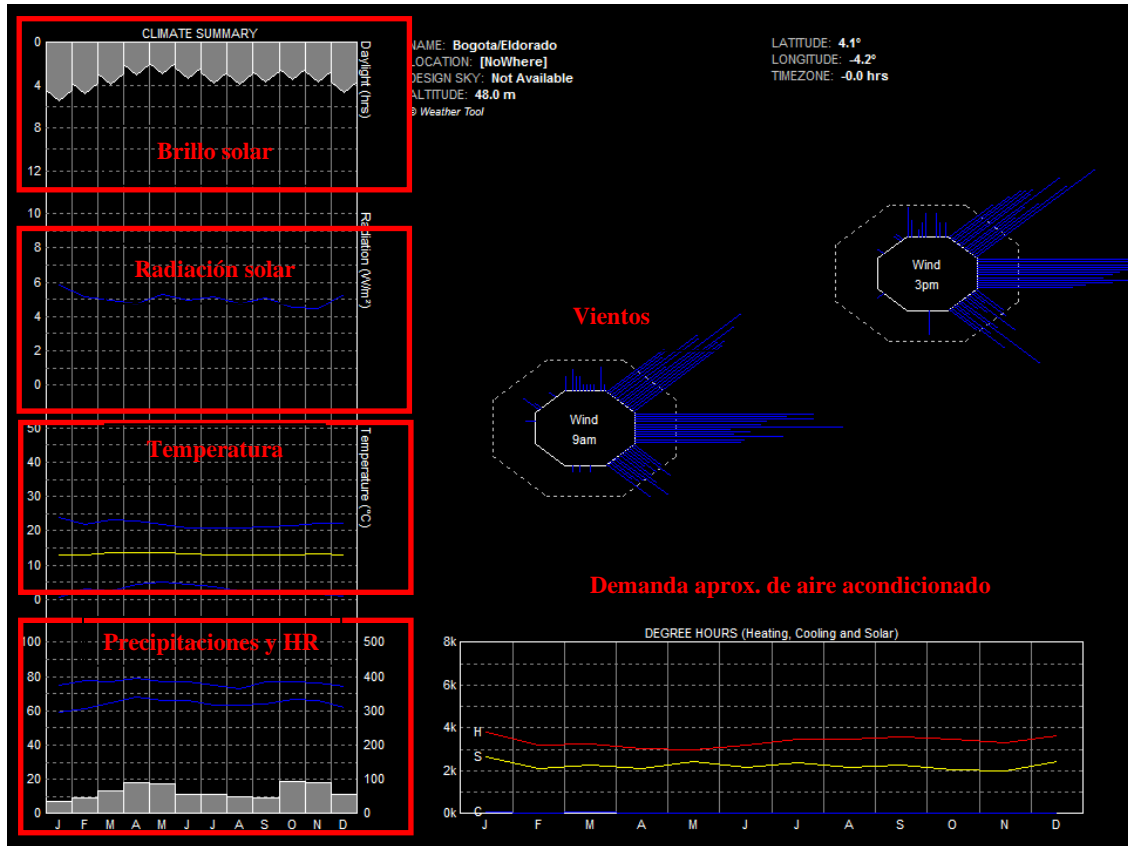
Fuente:

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91bae8c73fc>

Según el Ideam, el clima de Bogotá es frío muy seco. El promedio de lluvia total anual es de 797 mm. Durante el año las lluvias se distribuyen en dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas. Los meses de enero, febrero, julio y agosto son predominantemente secos. Las temporadas de lluvia se extienden desde finales de marzo hasta principios de junio y desde finales de septiembre hasta principios de diciembre. En los meses secos de principios de año, llueve alrededor de 8 días/mes; en los meses de mayores lluvias puede llover alrededor de 18 días/mes. La temperatura promedio es de 13.1 °C. Al medio día la temperatura máxima media oscila entre 18 y 20°C. En la madrugada la temperatura mínima está entre 8 y 10°C, aunque en la temporada seca de inicio de año, las temperaturas pueden bajar a menos de 5°C, en las madrugadas. El sol brilla cerca de 4 horas diarias en los meses lluviosos, pero en los meses secos, la insolación llega a 6 horas diarias/día. La humedad relativa del aire oscila durante el año entre 77 y 83 %, siendo mayor en los meses de abril y noviembre y menor en julio y agosto.

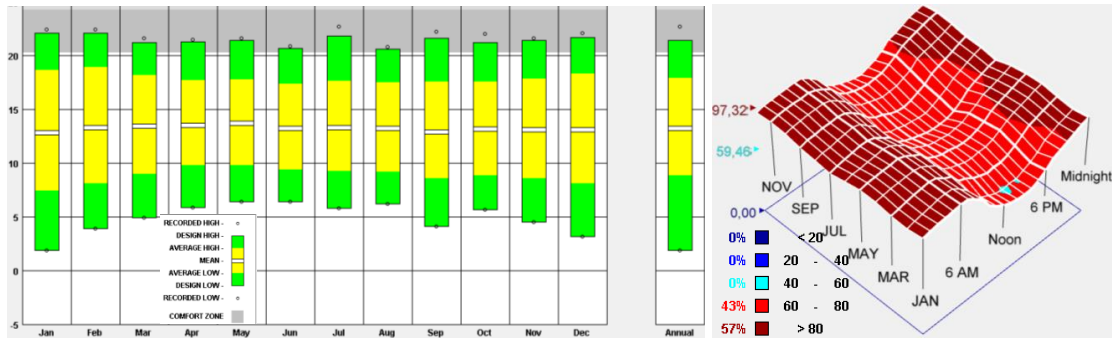
La precipitación media anual es bastante moderada en enero, lo que contrasta con los valores máximos de 93 mm en octubre. Como se mencionó anteriormente, existen dos temporadas de fuertes, donde la frecuencia de días lluviosos puede llegar a 19 días al mes. Por otro lado, el sol brilla cerca de 5 horas diarias en enero y febrero (meses poco lluviosos). La humedad relativa promedio del aire oscila durante el año entre el 79 y 83%

aumentando en horas de la noche, pero con una disminución pico en enero cerca del mediodía.



Resumen de valores meteorológicos

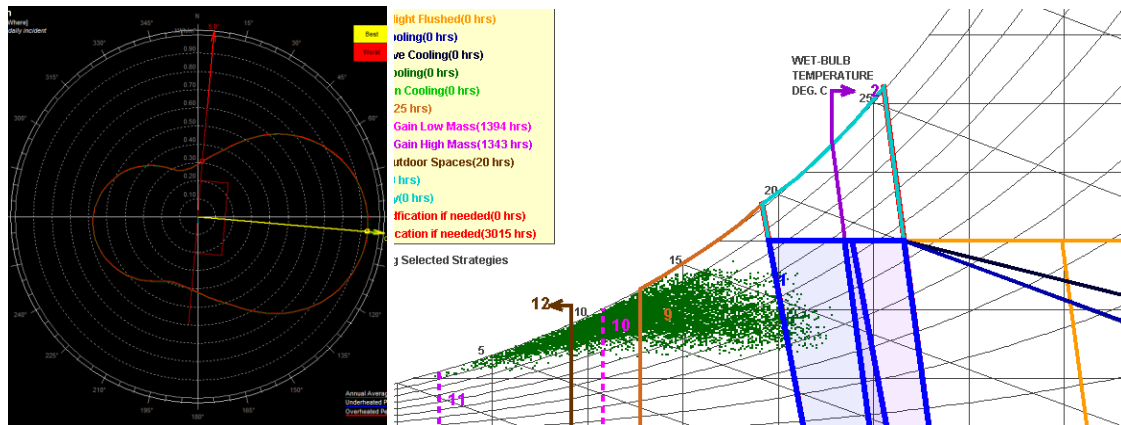
La herramienta “orientación óptima” del software Weather Tool de Autodesk Ecotect recomienda que las edificaciones estén alineadas en sentido norte – sur, donde la fachada más angosta de la edificación se oriente a 5° respecto al norte para evitar buena parte de la radiación solar diaria sobre superficies verticales; no obstante, a 95° (fachada oriente) se presenta un promedio de radiación considerable que queda expuesto. Esto significa que el proyecto sufre de mayor radiación solar en su fachada oriente (un promedio de  $0.93 \text{ kWh/m}^2 = 93 \text{ Wh/m}^2$ ) y la fachada occidente en segundo lugar, lo cual afecta las condiciones de confort internas y su posible demanda de calefacción.



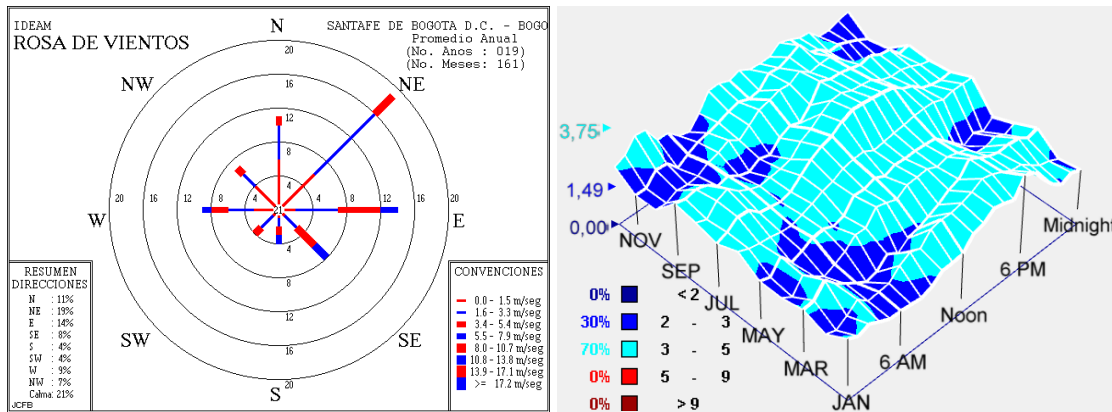
Promedios de temperatura y humedad relativa

No obstante, hay que tomar con precaución la recomendación de orientación óptima ya que se refiere solo a la radiación solar, pero omite elementos importantes como los vientos

predominantes, que son fundamentales para asegurar suficientes renovaciones de aire interior así como para lograr condiciones de confort térmico.



Orientación recomendada y diagrama psicrométrico (carta bioclimática de Givoni)



Vientos predominantes (rosa de vientos) y promedio de velocidad de vientos por año








El diagrama psicrométrico nos permite identificar una o más estrategias en orden de prioridad para lograr confort térmico al interior de la edificación según los fundamentos del estándar Ashrae 55. En este caso, se sugiere que la principal estrategia sea las ganancias térmicas internas para aumentar la temperatura dentro del rango de confort en el 52% del año, seguido por la aplicación de sistemas de calefacción con un 39%; al cambiar el modelo de confort al adaptativo donde no son necesarios equipos de HVAC, se recomienda la ventilación adaptativa con un 4%. El rango de confort térmico establecido es entre 20° y 26° C.

Acerca de la dirección y velocidad de los vientos predominantes, estos provienen del nororiente y oriente, cuya velocidad se encuentra entre los 3 y 5 m/s (70%) prácticamente todos los meses del año, pero disminuyen los tres primeros y los tres últimos meses del año 2 y 3 m/s en horas de la madrugada. Es probable que por la cercanía del proyecto a la parte alta de los cerros orientales se presenten mayores velocidades y frecuencias.










FRÍO	Vivienda no VIS
Relación ventana pared	x
Protección solar	x
Ventilación natural	x
Luz día y control de luz día	
Iluminación de energía eficiente	
Economizadores de aire	
Coefficiente de Desempeño (COP)	
Variadores de velocidad - torres de enfriamiento	
Sensores de monóxido de carbono para parqueaderos (CO)	
Variadores de velocidad - bombas	
Control de iluminación exterior	
Controles: sensores de ocupación	
Sub-medidores de electricidad	
Corrección de Factor de Potencia	x
Agua caliente solar	x
Accesorios de conservación de agua	x
Tratamiento de aguas residuales y reciclaje de agua	
Recolección de aguas lluvia y reutilización	

Medidas recomendadas para viviendas en clima frío según la Resolución.  
Fuente: Guía de ahorro de agua y energía. Resolución 549 de 2015

## Anexo 2. Oferta de vivienda en Bogotá










BOGOTA															
item	Img. Referencia	Nombre del proyecto	Promotor	Ubicación	Tipología	N° pisos	Aptos x piso tipo x torre	Estrato	Área	Precio	Precio por m2	Alcobas	No. Baños	Parqueadero	Link de hallazgo
1		Santa Elena Reservado	Constructora Colpatría	Calle 62D Sur N° 68B - 45	Bloques perpendiculares	20	4	3	68,23	\$ 271.600.000,00	\$ 3.980.653,67	3	2	Sin Especificar	<a href="https://www.construccioncolpatria.com/proyectos/vivienda/santa-elena-reservado/49#!">https://www.construccioncolpatria.com/proyectos/vivienda/santa-elena-reservado/49#!</a>
2		Castilla Imperial	IC Constructora	Carrera 86 7D - 35	Torres	22	4	3	77,38	\$ 332.400.000,00	\$ 4.295.683,64	3	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/castilla-imperial/bogota/proyecto-nuevo-det-3560798.aspx">https://www.fincaraiz.com.co/castilla-imperial/bogota/proyecto-nuevo-det-3560798.aspx</a>
3		Torres de Santa Barbara	Constructora Colpatría	Carrera 80 No. 8 -45	Bloques hileras	16	8	3	64,95	\$ 253.200.000,00	\$ 3.898.383,37	3	2	Sin Especificar	<a href="https://www.construccioncolpatria.com/proyectos/vivienda/torres-de-santa-barbara/51">https://www.construccioncolpatria.com/proyectos/vivienda/torres-de-santa-barbara/51</a>
4		Lares Fontibon II	Constructora Lares	Cra 113 19ª-11	Bloque rectangular	17	6	3	53,58	\$ 167.711.660,00	\$ 3.130.116,83	3	2	Sin Especificar	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/lares-fontibon-ii/bogota/proyecto-nuevo-det-2838455.aspx">https://www.fincaraiz.com.co/lares-fontibon-ii/bogota/proyecto-nuevo-det-2838455.aspx</a>
5		Miramont Park	Construcciones Arrecife S.A.S	Calle 170 No. 7A - 17	Bloques perpendiculares	17	4	3	78,37	\$ 421.365.000	\$ 5.376.611	3	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/miramont-park/bogota/proyecto-nuevo-det-1587448.aspx?itemid=https://www.fincaraiz.com.co/udara-entre-parques/bogota/proyecto-nuevo-det-4033116.aspx?itemid=4">https://www.fincaraiz.com.co/miramont-park/bogota/proyecto-nuevo-det-1587448.aspx?itemid=https://www.fincaraiz.com.co/udara-entre-parques/bogota/proyecto-nuevo-det-4033116.aspx?itemid=4</a>
6		UDARA ENTRE PARQUES	LAB DESARROLLO S.A.S	Cra. 60D 90 - 04	Bloque rectangular	10	7	3	65,7	\$ 442.510.000	\$ 6.735.312	3	2	2	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/valvanera-24/bogota/proyecto-nuevo-det-2432877.aspx?itemid=">https://www.fincaraiz.com.co/valvanera-24/bogota/proyecto-nuevo-det-2432877.aspx?itemid=</a>
7		Valvanera 24	INVERSIONES VALVANERA 24 S.A.S	Calle 13 Sur No. 24 B - 70	Torres	8	7	3	66,44	\$ 268.000.000	\$ 4.033.715	2	2	Sin Especificar	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/valvanera-24/bogota/proyecto-nuevo-det-2432877.aspx?itemid=">https://www.fincaraiz.com.co/valvanera-24/bogota/proyecto-nuevo-det-2432877.aspx?itemid=</a>

## BOGOTA

item	Img. Referencia	Nombre del proyecto	Promotor	Ubicación	Tipología	N° pisos	Aptos x piso tipo x torre	Estrato	Área	Precio	Precio por m2	Alcobas	No. Baños	Parqueadero	Link de hallazgo
8		CASTELÓ NATURA	LONDOÑO GOMEZ PROPIEDAD RAIZ	AV CIUDAD DE CALI CALLE 10B	Bloques perpendiculares	19	5	3	66,8	\$ 310.348.764	\$ 4.645.940	3	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/castelo-natura/bogota/proyecto-nuevo-det-2562814.aspx">https://www.fincaraiz.com.co/castelo-natura/bogota/proyecto-nuevo-det-2562814.aspx</a>
9		Portal de Molinos 3	CONSTRUCTORA LAS GALIAS	Av. Caracas con Cl 50 Sur	Bloques hileras	16	8	3	45,12	\$ 114.429.244	\$ 2.536.109	2	1	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/portal-de-molinos-3/bogota/proyecto-nuevo-det-">https://www.fincaraiz.com.co/portal-de-molinos-3/bogota/proyecto-nuevo-det-</a>
10		FONTINO	GRUPO URBAL	Calle 22K No. 97 - 36/52	Torres	5	12	3	69,65	\$ 288.450.000	\$ 4.141.421	3	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/fontino/bogota/proyecto-nuevo-det-4391955.aspx?itemid=4540375">https://www.fincaraiz.com.co/fontino/bogota/proyecto-nuevo-det-4391955.aspx?itemid=4540375</a>
11		BELGRANO	AREA CUADRADA CONSTRUCTORES	Av. Calle 170 No. 56-45	Bloque rectangular	23	6	3	73	\$ 340.309.739	\$ 4.661.777	3	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/belgrano/bogota/proyecto-nuevo-det-1577611.aspx?itemid=3852920">https://www.fincaraiz.com.co/belgrano/bogota/proyecto-nuevo-det-1577611.aspx?itemid=3852920</a>
12		TOLEDO 163	TOLEDO 163 SAS	CALLE 163 A 7B - 39/41	Predio medianero	5	4	3	59,4	\$ 270.000.000	\$ 4.545.455	3	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/toledo-163/bogota/proyecto-nuevo-det-3957652.aspx">https://www.fincaraiz.com.co/toledo-163/bogota/proyecto-nuevo-det-3957652.aspx</a>
13		FIORI	SOPROTEC S.A.S	Cra 27 No. 24B-45	Predio medianero	8	8	3	72,52	\$ 372.027.600	\$ 5.130.000	3	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/fiori/bogota/proyecto-nuevo-det-4700610.aspx?itemid=4701789">https://www.fincaraiz.com.co/fiori/bogota/proyecto-nuevo-det-4700610.aspx?itemid=4701789</a>
14		Andora 80	INVERSIONES ALCABAMA S.A.	Av. calle 80 frente estación TM Carrera 90	Bloque rectangular	14	10	3	69,83	\$ 338.371.000	\$ 4.845.639	3	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/andora/bogota/proyecto-nuevo-det-3472552.aspx">https://www.fincaraiz.com.co/andora/bogota/proyecto-nuevo-det-3472552.aspx</a>
15		MOREIN APARTAMENTOS	CGR CONSTRUCTORES	CALLE 161A No. 16C-59	Predio medianero	5	6	3	56,7	\$ 239.805.874	\$ 4.229.380	2	2	Opcional	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/morein-apartamentos/bogota/proyecto-nuevo-det-4528732.aspx?itemid=4">https://www.fincaraiz.com.co/morein-apartamentos/bogota/proyecto-nuevo-det-4528732.aspx?itemid=4</a>
16		Balzani	HAUS DESARROLLOS INMOBILIARIOS SAS	Calle 23 A No. 96 J - 19	Predio medianero	5	6	3	69,45	\$ 304.185.688	\$ 4.379.924	3	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/balzani/bogota/proyecto-nuevo-det-3380705.aspx">https://www.fincaraiz.com.co/balzani/bogota/proyecto-nuevo-det-3380705.aspx</a>



## BOGOTA

item	Img. Referencia	Nombre del proyecto	Promotor	Ubicación	Tipología	N° pisos	Aptos x piso tipo x torre	Estrato	Área	Precio	Precio por m2	Alcobas	No. Baños	Parqueadero	Link de hallazgo
17		ARRAYANES DE FONTIBON	CONSORCIO ALIAR SARFI	Carrera 105 No 16 i- 45.	Bloque en L	11	5	3	55,87	\$ 173.511.000	\$ 3.105.620	3	2	Opcional	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/ultimos-apartamentos-arrayanes-de-fontibon/bogota/proyecto-nuevo-det-2694601.aspx?itemid=3">https://www.fincaraiz.com.co/ultimos-apartamentos-arrayanes-de-fontibon/bogota/proyecto-nuevo-det-</a>
18		Kolina de Santa Ines	Consortio Grupo 4 Dicon	Carrera 8 No. 190 – 22	Predio medianero	5	7	3	63,94	\$ 248.316.000	\$ 3.883.578	2	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/kolina-de-santa-ines/bogota/proyecto-nuevo-det-2900132.aspx?itemid=2">https://www.fincaraiz.com.co/kolina-de-santa-ines/bogota/proyecto-nuevo-det-</a>
19		Arándanos Conjunto Residencial	DEEB ASOCIADOS SAS	Carrera 24 No. 31C-09 Sur	Predio medianero	7	8	3	46,87	\$ 172.500.000	\$ 3.680.393	2	1	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/arandanos-conjunto-residencial/bogota/proyecto-nuevo-det-3788692.aspx?itemid=3">https://www.fincaraiz.com.co/arandanos-conjunto-residencial/bogota/proyecto-nuevo-det-</a>
20		TERRAZZE 187	CAMARTH SAS	Calle 187A 8-46	Torres	10	4	3	60	\$ 254.256.012	\$ 4.237.600	3	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/terrazze-187/bogota/proyecto-nuevo-det-3490047.aspx?itemid=4319983">https://www.fincaraiz.com.co/terrazze-187/bogota/proyecto-nuevo-det-</a>
21		Edificio Saloni	SOPROTEC S.A.S	Carrera 29 28-49 Sur	Bloque rectangular	11	10	3	51,82	\$ 201.579.800	\$ 3.890.000	3	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/edificio-saloni/bogota/proyecto-nuevo-det-3490047.aspx?itemid=4319983">https://www.fincaraiz.com.co/edificio-saloni/bogota/proyecto-nuevo-det-</a>
22		Entreverde Gran Reserva	RESIDERE S.A.S.	Cra. 55 159 - 53	Bloque en L	9	10	3	56,62	\$ 282.223.000	\$ 4.984.511	2	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/entreverde-gran-reserva/bogota/proyecto-nuevo-det-3541926.aspx?itemid=3">https://www.fincaraiz.com.co/entreverde-gran-reserva/bogota/proyecto-nuevo-det-</a>
23		Burgos Castilla Reservado	Marval	AV. CIUDAD DE CALI CON CLL 10 ESQ. COSTADO	Bloques hileras	12	4	3	51,93	\$ 202.220.000	\$ 3.894.088	2	2	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/burgos-castilla-reservado/bogota/proyecto-nuevo-det-3788692.aspx?itemid=3">https://www.fincaraiz.com.co/burgos-castilla-reservado/bogota/proyecto-nuevo-det-</a>
24		KEISHA	Faktor Inversiones Y Proyectos	carrera 81 No. 77 A-25	Predio medianero	5	6	3	42,92	\$ 202.684.361	\$ 4.722.376	2	1	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/keisha/bogota/proyecto-nuevo-det-3490047.aspx?itemid=4319983">https://www.fincaraiz.com.co/keisha/bogota/proyecto-nuevo-det-</a>
25		176 Park	Constructora Bolívar S.A.	Calle 134 No. 72 -31	Bloque en L(x2 = 1C)	18	18	3	39	\$ 140.000.000	\$ 3.589.744	1	1	1	<a href="https://www.fincaraiz.com.co/176-park/bogota/proyecto-nuevo-det-4549021.aspx?itemid=4">https://www.fincaraiz.com.co/176-park/bogota/proyecto-nuevo-det-</a>



Tipología	Nº pisos	Aptos x piso tipo x torre	Estrato	Área	Precio	Precio por m2	Alcobas	No. Baños
-----------	----------	---------------------------	---------	------	--------	---------------	---------	-----------

TENDENCIA TOTAL	Predio medianero	16	5	3	72,1	322.574.921	4.411.980	3	2		
<b>PROMEDIO TOTAL</b>		<b>12</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>61,0</b>	<b>264.480.190</b>	<b>4.262.161</b>	<b>3</b>	<b>2</b>		
MODA TOTAL		5	4	3	#N/A	#N/A	#N/A	3	2		
MEDIANA TOTAL		11	6	3	64	268.000.000	4.229.380	3	2		
<b>MEDIA GEOMETRICA TOTAL</b>		<b>10</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>60</b>	<b>251.401.591</b>	<b>4.185.364</b>	<b>3</b>	<b>2</b>		
MEDIA ARMONICA TOTAL		9	6	3	59	237.678.122	4.107.819	2	2		
<b>bloque rectangular</b>											
Lares Fontibon II	Constructora Lares	Cra 113 19-11	Bloque rectangular	17	6	3	53,58	167.711.660,0	3.130.116,8	3	2
UDARA ENTRE PARQUE	LAB DESARROLLO	Cra. 60D 90 - 04	Bloque rectangular	10	7	3	65,7	442.510.000,0	6.735.312,0	3	2
BELGRANO	AREA CUADRADA	Av. Calle 170 No. 56-45	Bloque rectangular	23	6	3	73	340.309.739,0	4.661.777,2	3	2
Andora 80	INVERSIONES ALC	Av. calle 80 frente estación TM	Bloque rectangular	14	10	3	69,83	338.371.000,0	4.845.639,4	3	2
Edificio Saloni	SOPROTEC S.A.S	Carrera 29 28-49 Sur	Bloque rectangular	11	10	3	51,82	201.579.800,0	3.890.000,0	3	2
TENDENCIA BLOQUE RECTANGULAR				17	6	3	62,7	305.376.983,8	4.726.550,4	3	2
<b>PROMEDIO BLOQUE RECTANGULAR</b>				<b>15</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>62,8</b>	<b>298.096.439,8</b>	<b>4.652.569,1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
MODA BLOQUE RECTANGULAR				#N/A	6	3	#N/A	#N/A	#N/A	3	2
MEDIANA BLOQUE RECTANGULAR				14	7	3	65,7	338.371.000,0	4.661.777,2	3	2
<b>MEDIA GEOMETRICA BLOQUE RECTANGULAR</b>				<b>14</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>62</b>	<b>280.052.964</b>	<b>4.503.541</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
MEDIA ARMONICA BLOQUE RECTANGULAR				14	7	3	62	262.094.335	4.363.386	3	2
<b>predio medianero</b>											
TOLEDO 163	TOLEDO 163 SAS	CALLE 163 A 7B - 39/41	Predio medianero	5	4	3	59,4	270.000.000,0	4.545.454,5	3	2
FIORI	SOPROTEC S.A.S	Cra 27 No. 24B-45	Predio medianero	8	8	3	72,52	372.027.600,0	5.130.000,0	3	2
MOREIN APARTAMENT	CGR CONSTRUCTO	CALLE 161A No. 16C-59	Predio medianero	5	6	3	56,7	239.805.874,0	4.229.380,5	2	2
Balzani	HAUS DESARROLLO	Calle 23 A No. 96 J - 19	Predio medianero	5	6	3	69,45	304.185.688,0	4.379.923,5	3	2
Kolina de Santa Ines	Consorcio Grupo 4 Dic	Carrera 8 No. 190 - 22	Predio medianero	5	7	3	63,94	248.316.000,0	3.883.578,4	2	2
Arándanos Conjunto Reside	DEEB ASOCIADOS S	Carrera 24 No. 31C-09 Sur	Predio medianero	7	8	3	46,87	172.500.000,0	3.680.392,6	2	1
KEISHA	Faktor Inversiones Y P	carrera 81 No. 77 A-25	Predio medianero	5	6	3	42,92	202.684.361,0	4.722.375,6	2	1
TENDENCIA PREDIO MEDIANERO				6	6	3	69	321.984.074	4.658.114	3	2
<b>PROMEDIO PREDIO MEDIANERO</b>				<b>6</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>59</b>	<b>258.502.789</b>	<b>4.367.301</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
MODA PREDIO MEDIANERO				5	6	3	#N/A	#N/A	#N/A	2	2
MEDIANA PREDIO MEDIANERO				5	6	3	59,4	248.316.000,0	4.379.923,5	2	2
<b>MEDIA GEOMETRICA PREDIO MEDIANERO</b>				<b>6</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>58</b>	<b>251.482.267</b>	<b>4.343.280</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
MEDIA ARMONICA PREDIO MEDIANERO				6	6	3	57	244.693.733	4.319.255	2	2

### Anexo 3. Tipologías de vivienda colectiva

Aprovechando el insumo bibliográfico sobre agrupaciones, se ha completado unos parámetros sobre tipologías arquitectónicas presentes en las edificaciones de vivienda colectiva, que comúnmente son en altura, ampliándolo con los tipos de circulación vertical que se pueden presentar (punto fijo). Esto con el fin de constituir una referencia en el estudio físico de estas edificaciones.

En cuanto a la forma de la residencia moderna, Carlos Martí Arís argumenta que, bajo una mirada general del conjunto de proyectos y propuestas que componen el periodo entre guerras en Europa, pone en evidencia como la edificación en línea se convierte en una paradigmática forma básica y hasta predeterminada de concebir la vivienda colectiva. Esta forma de edificación posee una variedad de orígenes analógicos implícitos en los asentamientos humanos, entre los cuales están los arrabales de la ciudad antigua, las ciudades fundadas sobre bordes naturales, la ausencia de una jerarquía central e ideas vinculadas con el crecimiento indefinido y el recorrido que trascienden al campo del ordenamiento de la ciudad moderna. Esto constituye además, vínculos con las ciudades antiguas a pesar de ser promocionadas como novedosas y autónomas por la arquitectura moderna.

*"La forma lineal supone la ausencia de jerarquía y propicia la equivalencia de condiciones para todos los elementos que configuran una estructura. Precisamente por ello se convierte en uno de los fundamentos de la arquitectura residencial del Movimiento Moderno. El esquema lineal es el más congruente con el principio de repetición de un elemento y con la búsqueda de una seriación regida por una ley constante." (Martí et al, 2000: 33).*

La forma también estaba determinada por la lógica constructiva y estructural posible de la época (planta regular y simétrica), su flexibilidad de implantación para establecer zonas de vivienda multifamiliar concentrada frente a las áreas libres que las separa y las vitaliza espacialmente (permite una zonificación efectiva, que es uno de los procedimientos preferidos por los arquitectos), las posibilidades de modulación y organización interna de las viviendas al tener dos costados de diferentes propiedades (una cara con acceso y servicios frente a otra dotada de vistas, luz y ventilación) además que aplica con mayor razón en las edificaciones en altura.

De esta manera, los modernistas del CIAM buscaban en el bloque lineal una articulación constante con el espacio libre inmediato gracias a la distribución espacial. Esta relación interior-exterior de los bloques genera una clasificación que los divide en tres: formas cerradas, formas semiabiertas y formas lineales.

*"Las formas cerradas son características de los modelos residenciales basados en la idea de manzana como elemento constructor de la ciudad ...*

*Las formas semiabiertas son empleadas a menudo por la arquitectura moderna como un intento de superar la fórmula de la "rue-corridor", propia de la ciudad ochocentista ...*

*... la forma línea, originariamente ligada al mundo agrícola, es uno de los grandes arquetipos de la arquitectura y como tal influye decisivamente en las formaciones urbanas de diversas épocas..." (Martí et al, 2000: 43-44).*

La forma lineal es la más implementada en edificaciones en altura, reiterado en el trabajo sobre agrupaciones de vivienda realizado por Reinaldo Posada, en el cual hace una clasificación siendo posible distinguir también dos formas finales de agrupaciones que dan lugar a volúmenes: aislada o en hilera (bloque).

Los edificios multifamiliares bajos contemplan alturas de hasta 5 pisos, con lo que no es necesario ascensor y según la forma de la planta y la disposición de los bloques, se pueden lograr agrupaciones como *bloques rectangulares en hileras*, *bloques rectangulares alternos*, *bloques rectangulares oblicuos*, *bloques rectangulares perpendiculares entre sí*, *bloques en cruz* y *bloques en estrella*.

Las edificaciones de vivienda multifamiliar que pueden lograr mayor altura cuyas formas de agrupación pueden ser semejantes a los bloques multifamiliares bajos. Se dividen en dos grupos básicos: *las torres* y *agrupaciones mixtas*.

Elsa Mahecha de Bisscheroux toma como elemento central para una clasificación tipológica física, la circulación en edificios holandeses así como su estructura. Los tipos de edificaciones son aquí interpretadas como clases de organización de los accesos y circulaciones en edificios o bloques de vivienda de varios pisos en los cuales el sistema estructural de un edificio suministra el punto de partida para crear su perfil físico, mientras que el sistema de los accesos constituye la red de distribución a las diferentes tipologías de vivienda existentes mostrando la particularidad de su estructura y las diferentes formas como se reparten sus dependencias.

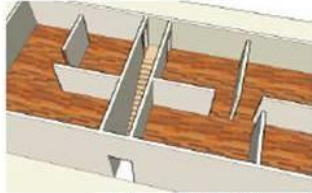
“*Las tipologías son aquí entendidas como modos de organización de los accesos y de las circulaciones en edificios habitacionales de varios pisos*” (Mahecha, 2000: 5). La geometría de un edificio es importante sobre todo a la hora de someterlo en un contexto urbanístico o social de un país que a su vez lo determina, y en el que la forma de los accesos es importante para la determinación “de la estructura de relaciones”.

Estas tipologías tienen variaciones y pueden combinarse con las diferentes formas de agrupación descritas por Reinaldo Posada y así establecer más patrones. Mahecha hace una clasificación teniendo en cuenta el modo como se agrupan los accesos a las diferentes unidades de vivienda y su posición con respecto a los edificios. Esta clasificación se divide básicamente en *circulaciones sencillas* y *circulaciones combinadas*. Dentro de las circulaciones sencillas, las tipologías identificadas son *Pórticos*, *Galería o crujía simple*, *Deck o galería especial* y *Doble crujía*. Para las circulaciones combinadas están la *Galería* y *Pórtico/punto fijo*, *Deck* y *Pórtico/punto fijo*, *Doble crujía* y *pórticos con 2 puntos fijos* y *Crujía simple con doble crujía*.

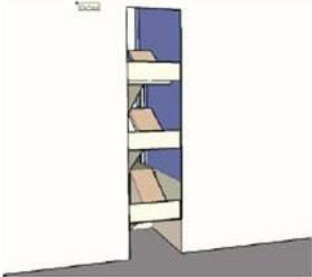
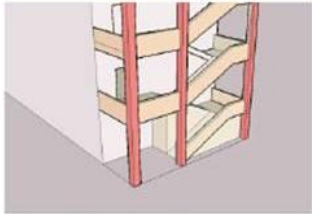
# TIPOLOGIAS DE CIRCULACION.

## Circulaciones sencillas

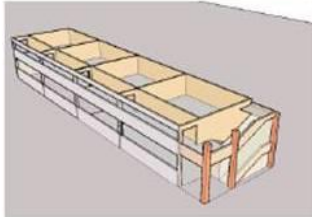
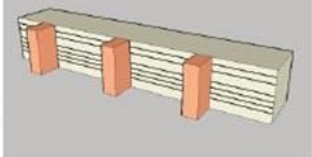
Porticos.



Galería o crujía simple



Deck o galería especial



Doble crujía



## Circulaciones Combinadas

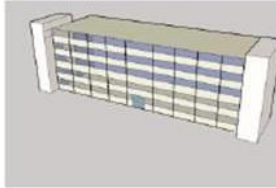
Galería y Pórtico/  
punto fijo



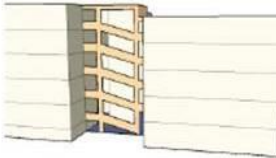
Deck y Pórtico/  
punto fijo



Doble crujía y pórticos con 2  
puntos fijos

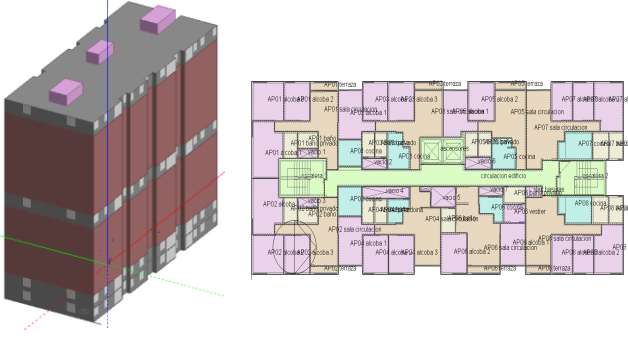


Crujía simple con doble  
crujía



Fuente: Elaboración propia.

#### Anexo 4. Características de desempeño energético de la vivienda estrato 3

Ítem	Descripciones	Fuente de datos
<b>Generalidades</b>		
Nueva o existente	Nueva	
Ubicación	BOGOTA, CLIMA 3 C	Ashrae 90.1
Tipos de combustibles disponibles	Gas, electricidad	
Tipo de Edificio	Vivienda estrato 3 y 4	
<b>Forma</b>		
Área del edificio (m <sup>2</sup> )	10.171,5 m <sup>2</sup> construida	Según ejercicio de demanda actual
	(678,1 m <sup>2</sup> x 15)	
Forma del edificio		
Relación de aspecto	2,38	
Número de pisos	15	Según ejercicio de demanda actual
Relación ventana - pared	Promedio por piso: 42% ventana 58% muro	Según ejercicio de demanda actual
Ubicación de ventanas	Ver imagen	
Geometría de elementos de sombreado	Ninguna	SDP, 2018
Azimuth	No direccional	
Zonificación térmica	Cada piso tiene 8 apartamentos con un corredor central excepto el primer piso que tiene 6 aptos, zona social y un lobby que ocupa el área de 2 apartamentos. El área promedio de apto es de 66,6 m <sup>2</sup>	Según ejercicio de demanda actual
	En total son 118 unidades residenciales	
Altura de piso a piso (m)	2,50	Según ejercicio de demanda actual
Altura de piso a techo	2,38 m (sin cielo raso)	
Altura de la ventana	0,78 m de antepecho, 1,6 m de altura de la ventana	
<b>Arquitectura</b>		
<b>Muros Exteriores</b>		

Construcciones	Bloque de 12 cm + 1 cm de pañete + pintura (sin aislamiento térmico)	Según ejercicio de demanda actual
Factor U	U-factor = 2,765 W/m <sup>2</sup> K	
Dimensiones	Basados en la geometría del edificio	
Inclinación y orientación	Vertical	
<b>Techo</b>		
Construcciones	Placa de concreto de 12 cm (sin aislamiento térmico)	
Factor U	U-factor = 1.599 W/m <sup>2</sup> K	
Dimensiones	Basados en la geometría del edificio	
Inclinación y orientación	Horizontal	
<b>Ventanas</b>		
Dimensiones	Basados en la geometría del edificio	
Tipo de vidrio y marco	Vidrio crudo, marco en aluminio	SDP, 2018
Factor U	U-factor = 5,8 W/m <sup>2</sup> K	
SHGC	SHGC: 0,8	SDP, 2018
Transmisión de luz visible	0,90	SDP, 2018
Área Operable	30%	
<b>Lucernarios</b>		
Dimensiones	No modeladas	SDP, 2018
<b>Cimentación</b>		
Tipo de cimentación	Sin sótano. Dados, vigas y pilotes	
construcciones	Placa de 12 cm	
Aislamiento	Aire	SDP, 2018
Dimensiones	Según predimensionamiento	
<b>Particiones interiores</b>		
Construcciones	concreto de 10 cm para estructurales + 1 cm de pañete + pintura sin aislamiento. Ladrillo de 12 cm para no estructurales	Según ejercicio de demanda actual
Dimensiones	Basados en la geometría	
<b>Barrera de Aire</b>		
Infiltración (ACH)	0.183 ac/h	(Calculada según apéndice G ASHRAE 90.1 2016)
<b>HVAC</b>		
Tipo de sistema	N/A	SDP, 2018
Tipo de calefacción	N/A	
Tipo de enfriamiento	N/A	
Distribución y unidades terminales	N/A	
Aire Acondicionado	N/A	
Calefacción	N/A	

Eficiencia	N/A	
Calefacción		
<b>Control de HVAC</b>		
Set point de calefacción	N/A	SDP, 2018
Señal de termostato	N/A	
Temperatura de aire de ingreso	N/A	
Economizadores	N/A	
Ventilación	N/A	
Control de ventilación por demanda	N/A	
Recuperadores de energía	N/A	
<b>Ventilador de suministro</b>		
Horario de ventilador	Ventilación natural	SDP, 2018
Eficiencia de ventilador (%)	Ventilación natural	
Caída de presión de ventilador	Ventilación natural	
<b>Agua de servicio</b>		
Tipo de sistema de agua caliente	Calentador individual de paso en cada unidad residencial	SDP, 2018
Tipo de combustible	Electricidad (Gas solo para comparar)	SDP, 2018
Eficiencia térmica (%)	Requirements in codes or standards	Estándares y códigos aplicables
Volumen de tanque (m3)	N/A	
Set point de temperatura de agua	60° C	PNNL-23269 Enhancements to ASHRAE Standard 90.1 Prototype Building Models
Consumo de agua m3/año	21.862,3	
<b>Cargas Internas</b>		
<b>Iluminación</b>		
Tipo	Empotrada. Fracción radiante 0,37. Bombillos LED	
Horario	Desde 17:00 hasta 24:00: 100%	Reference: Building America Research Benchmark
Control de luz día	no	SDP, 2018
Sensores de ocupación	si, en circulaciones y puntos fijos	SDP, 2018
<b>Carga de tomas</b>		

Densidad de potencia promedio (W/m <sup>2</sup> )	Simular carga de tomas por building area method 2,69 W/m <sup>2</sup>	ASHRAE 90.1 2010
Horarios	Desde 00:00 hasta 07:00: 100 % Desde 08:00 hasta 16:00: 0 % Desde 17:00 hasta 24:00: 100 %	
<b>Ocupación</b>		
Promedio de ocupación	472 personas	
Horario	De acuerdo con horario establecido para tipología	Reference: Building America Research Benchmark
<b>Elevador</b>		
Cantidad	2	
Tipo de motor	Tracción	DOE Commercial Reference Building Models of the National Building Stock
Pico de potencia de motor	20.370,00	SDP, 2018
Ganancia de calor al edificio	Interior	SDP, 2018
Pico de potencia de iluminación	161,90	90.1 Mechanical Subcommittee, Elevator Working Group
motor de ventilador/horario de ventilador	De acuerdo con horario establecido para tipología	DOE Commercial Reference Building Models of the National Building Stock
<b>Iluminación exterior</b>		
Potencia pico (w)		Estándares y códigos aplicables
Horario	De acuerdo con horario establecido para tipología	Estándares y códigos aplicables
<b>Agua</b>		
<b>Aparatos sanitarios</b>		
Sanitario	6/4,8 lpd	SDP, 2018
Orinal	NA	
Lavamanos	8,3 lpm	
Lavaplatos	8,3 lpm	
Ducha	9,6 lpm	
<b>Otras medidas de ahorro</b>		



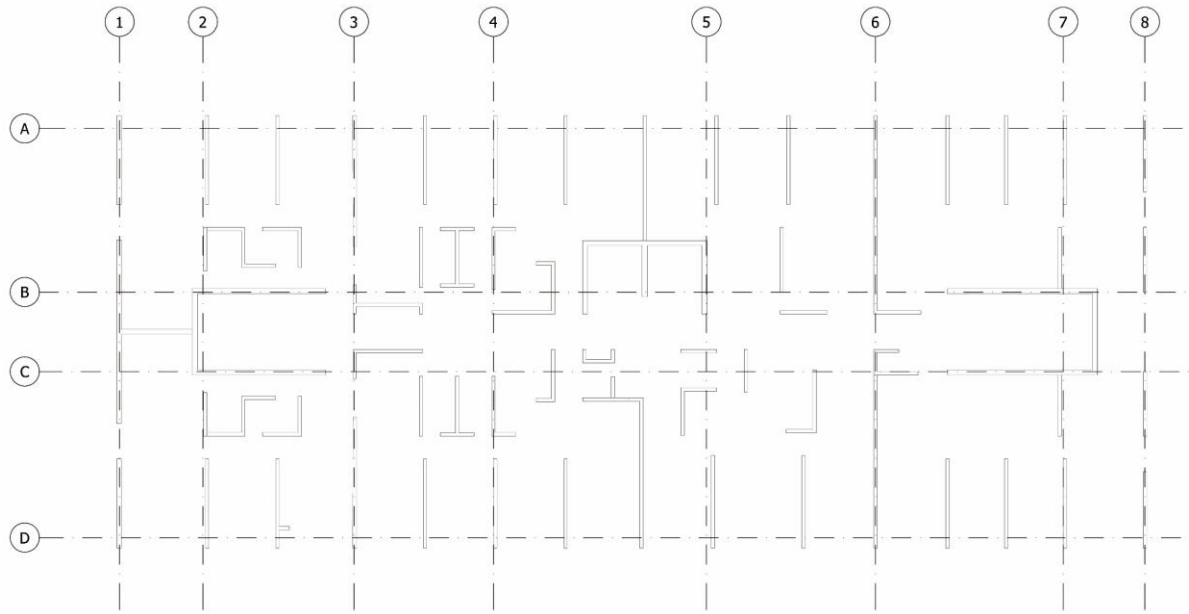
Reúso y recolección aguas lluvias	No	SDP, 2018
Tratamiento y reúso aguas residuales	No	
Riego eficiente	No	
Riego con agua no potable	No	
Submedición	No	

Fuente: Elaboración propia con base en SDP, 2018

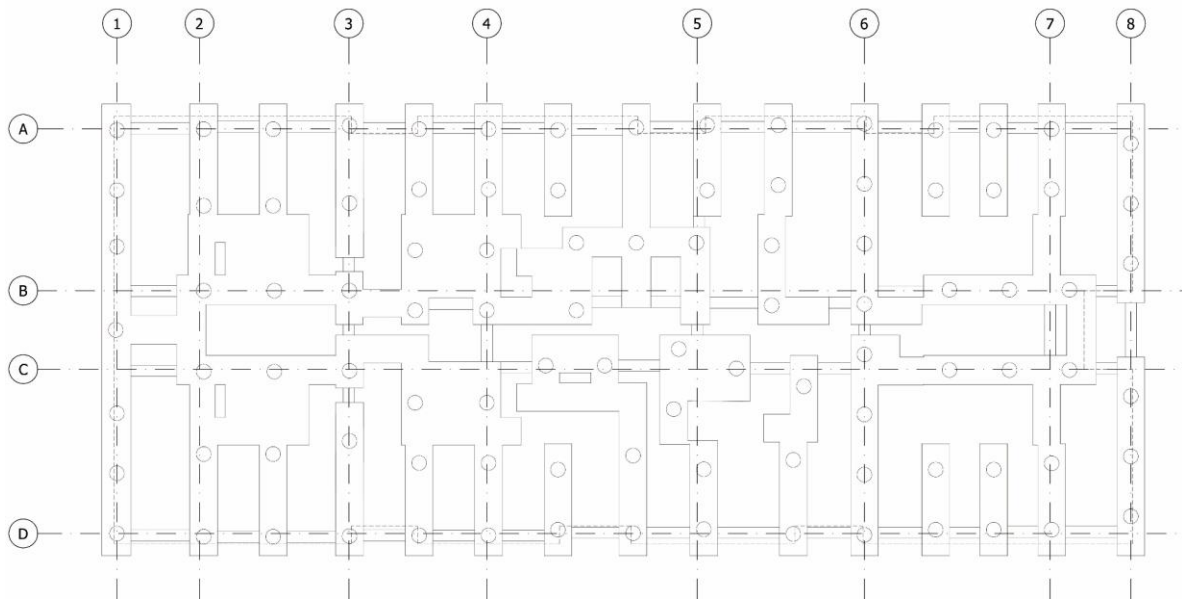
**Anexo 5. Planimetría del prototipo de vivienda como caso de estudio**



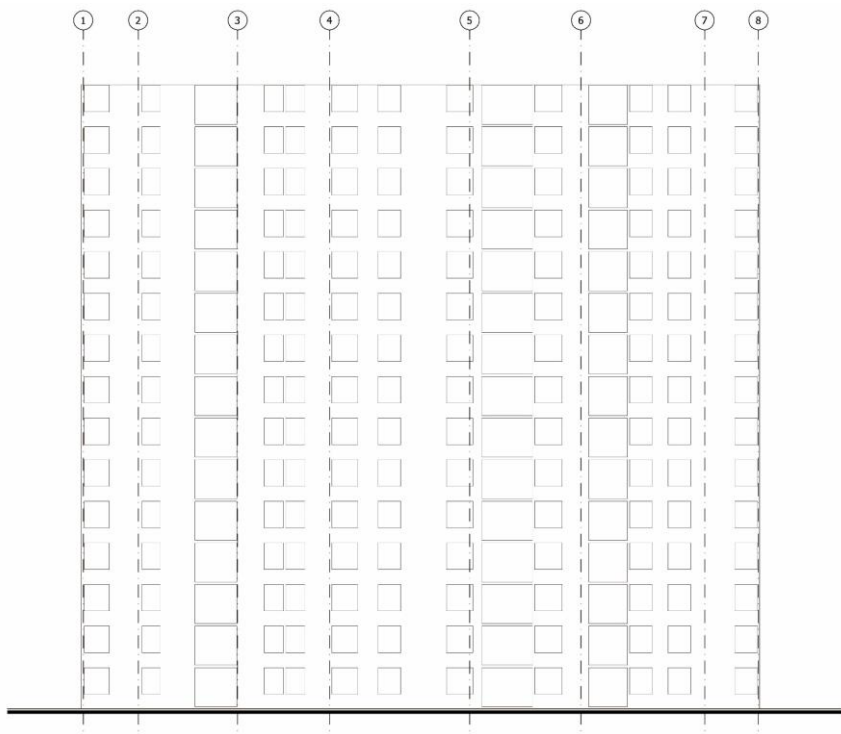
Planta arquitectónica



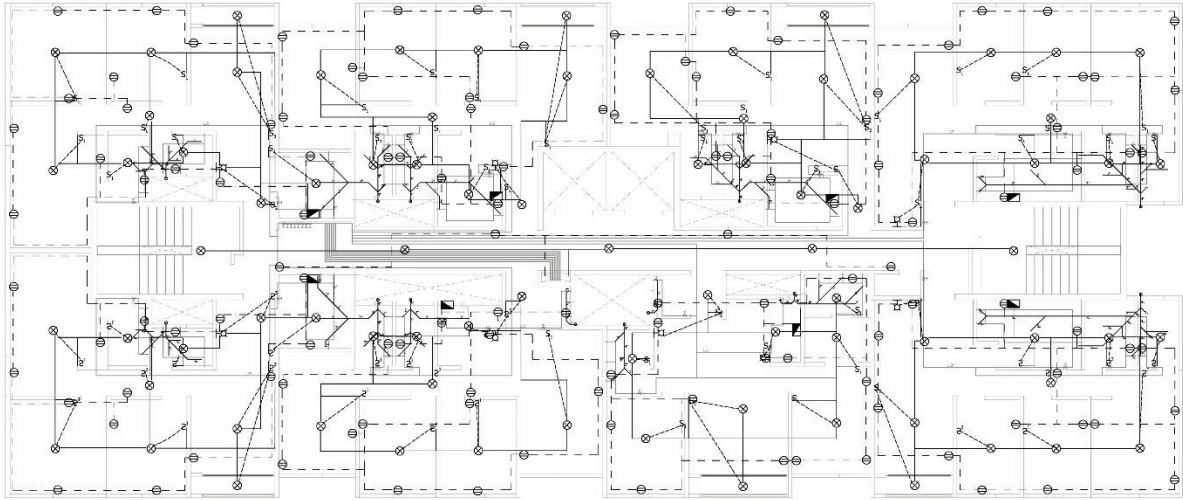
Planta de muros estructurales



Planta de cimentación



Alzado

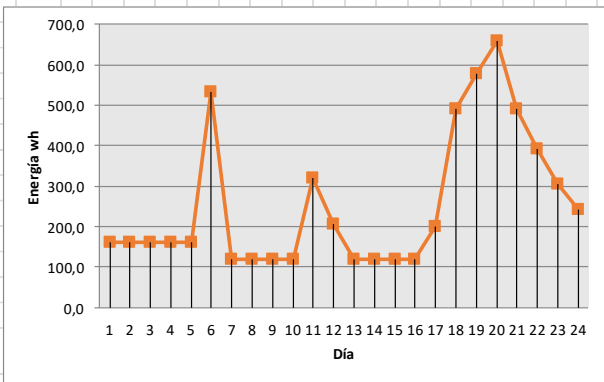


Instalaciones de agua potable, sanitarias, y eléctricas



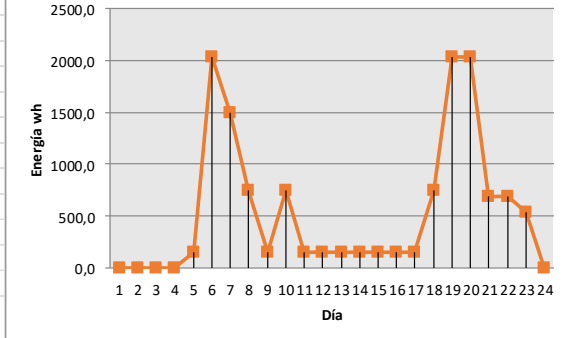
HORAS DE USO / DIA																										
TOTAL	%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
8	10%																	1	1	1	1	1	1	1	1	
0,5	1%																				1					
0,6	1%																		0				1			
0,1	0%																				0					
0,2	0%					0						0														
0,1	0%											0														
0,3	0%					0																				
0,1	0%					0																				
0,1	0%					0																				
5	7%																		1	1	1	1	1			
0,2	0%					0						0														
24	31%	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	5%																		1	1	1	1				
1	1%																				1					
8	10%	1	1	1	1	1																	1	1	1	
24	31%	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0,1	0%																			0						
0,05	0%											0														
	0%											0	0	0												
	0%											0	0	0												
76,4		3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,7	2,0	2,0	2,0	2,0	2,2	2,2	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	5,0	5,2	6,6	5,0	5,0	4,5	4,0

- BOMBILLO LED
- LAMPARA INCRUSTADA
- LAMPARA BOMBILLO M
- PLANCHA ROPA
- ESTUFA
- OLLA ARROCERA
- DUCHA ELECTRICA
- CAFETERA
- SECADOR DE PELO
- TELEVISOR 43" LED
- HORNO MICROHONDA
- ROUTER WIFI
- COMPUTADOR
- CONSOLA VIDEOJUEG
- CARGADOR CELULAR
- NEVERA 447 lts
- LAVADORA
- LICUADORA
- VENTILADOR
- AIRE ACONDICIONADO



HORAS DE USO / DIA																									
TOTAL	%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
6	49%					1															1	1	1	1	1
0,1	1%									0															
6,2	50%				0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	
12,3		0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,0	1,0	0,5	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	2,0	2,0	1,1	1,1	1,0	0,0

- BOMBILLOS PASILLOS
- TOMA MONOFASICA
- ASCENSO



## DEMANDA ACS

TEMPERATURA DE RED		13,0 °C	
TEMPERATURA DE DISTRIBUCION / ACUMULACION		60,0 °C	
TEMPERATURA DE CONSUMO		45,0 °C	
CONSUMO DIARIO ACS x PERSONA		28,0 lt/per/dia	
NUMERO DE PERSONAS EDIFICIO		472	
COEFICIENTE SIMULTANEIDAD		0,26	
TIEMPO MAX DEMANDA EDIFICIO (periodo punta)		3,92 horas	
CONSUMO DIARIO Cd		20.296,0 litros	
CAUDAL MAXIMO HORARIO		1,11 l/s	
CONSUMO PUNTA		3.988,8 lt/per/dia	
VOLUMEN UTIL DEPOSITO ACUMULADOR		17.887,8	
VOLUMEN FISICO DEPOSITO		21.294,9	
POTENCIA UTIL Pu		2.849,16 kw	
PERDIDAS DEL SISTEMA		113,97 kw	
<b>POTENCIA TOTAL DEMANDADA dia</b>		<b>2.963,12 kw</b>	
CONSUMO DIARIO ACS TOTAL x VIVIENDA		112,0 lt/dia	
		40.880,0 lt/año	
CONSUMO DIARIO ACS TOTAL x EDIFICIO		13.216,0 lt/dia	
		4.823.840,0 lt/año	
ENERGIA DEMANDADA PARA ACS x VIVIENDA sin perdidas		4,2 Kwh dia	
<b>ENERGIA DEMANDADA PARA ACS x VIVIENDA</b>		<b>4,9 Kwh dia</b>	
		147,0 Kwh mes	
		1.789,1 Kwh año	
<b>ENERGIA DEMANDADA PARA ACS x EDIFICIO</b>		<b>578,4 Kwh dia</b>	
		17.351,8 Kwh mes	
		211.113,9 Kwh año	

## Anexo 7. Cantidades y especificaciones de materiales

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UND	CANTIDAD
<b>1</b>	<b>PRELIMINARES, PROVISIONALES DE OBRA Y DEMOLICIONES.</b>		
<b>1.1</b>	<b>ACTIVIDADES PRELIMINARES.</b>		
1.1.1	Cerramiento provisional en madera y teja metálica h.=2,50 m, estructura vertical en piezas de madera Vara de clavo (distanciadas cada 2,00 m) y horizontales en perfil repisas de madera ordinaria, recubrimiento con teja trapezoidal de zinc tipo ACESCO o equivalente. Incluye dados de concreto para las varas, base de mampostería acabado visto h.=20 cm en ladrillo tolete macizo 24,5x12x5,5 cm, una (1) puerta de dos naves de 2,00 m cada una con la misma tipología, cadena y candado. El pago por metro lineal será medido en planta.	m	120,00
1.1.2	Campamento provisional en contenedor tipo bodega de 20 pies estándar, a=2,40m l=6,00m y h=2,40m. Incluye transporte, ubicación en la obra con montacargas de 3,5tn y baño sencillo tipo cabina.	mes	24,00
<b>2</b>	<b>MOVIMIENTOS DE TIERRAS, CIMENTACIONES, Y OTROS ENTERRADOS / SUBTERRÁNEOS DE TIPO ESTRUCTURAL.</b>		
<b>2.1</b>	<b>EXCAVACIONES, RELLENOS Y REEMPLAZOS.</b>		
2.1.1	Descapote mecánico de capa vegetal h.prom<=30 cm. Incluye cargue, retiro, disposición de escombros a sitio aprobado por la autoridad ambiental.	m3	81,37
2.1.2	Excavación mecánica en material común. Incluye cargue, retiro, disposición de escombros a sitio aprobado por la autoridad ambiental. <b>Para pilotes</b>	m3	961,33
2.1.3	Excavación manual en material común. Incluye cargue, retiro, disposición de escombros a sitio aprobado por la autoridad ambiental. <b>Para dados</b>	m3	567,44
2.1.4	Excavación manual en material común. Incluye cargue, retiro, disposición de escombros a sitio aprobado por la autoridad ambiental. <b>Para vigas de cimentación</b>	m3	33,70
2.1.5	Excavación mecánica en material común. Incluye cargue, retiro, disposición de escombros a sitio aprobado por la autoridad ambiental. <b>Para placa de contrapiso</b>	m3	216,98
2.1.6	Relleno manual con recebo común compactado. Incluye extendido, humedecimiento y compactación. <b>Para dados</b>	m3	70,93
2.1.7	Relleno manual con recebo común compactado. Incluye extendido, humedecimiento y compactación. <b>Para vigas de cimentación</b>	m3	7,09
2.1.8	Relleno mecánico con recebo común compactado. Incluye extendido, humedecimiento y compactación. <b>Para placa de contrapiso</b>	m3	135,61
<b>2.2</b>	<b>CONCRETOS PARA CIMENTACIÓN.</b>		
<b>2.2.1</b>	<b>CIMENTACIÓN SUPERFICIAL.</b>		
2.2.1.3	Pilotes fundidos en sitio en concreto Tremie f'c=3000 PSI. No incluye formaletería por ser fundidos contra terreno. NO incluye aceros.	m3	961,33
2.2.1.4	Dados en concreto f'c=3000 PSI. Incluye porcentaje de formaletería ordinaria para los sitios donde no se funda contra terreno. NO incluye aceros.	m3	496,51
2.2.1.5	Vigas de cimentación en concreto f'c=3000 PSI. Incluye porcentaje de formaletería ordinaria para los sitios donde no se funda contra terreno. NO incluye aceros.	m3	26,60
2.2.1.6	Placa de contrapiso en concreto e.=15 cm f'c=3000 PSI. Incluye polietileno cal.4 negro en doble capa como aislante e impermeabilizante contra rellenos, ejecución de dilataciones inducidas con listones de madera ubicados según planos de diseño. NO incluye aceros ni mallas electrosoldadas.	m3	81,37
<b>2.3</b>	<b>ACEROS DE REFUERZO PARA ELEMENTOS ESTRUCTURALES ENTERRADOS / SUBTERRÁNEOS.</b>		
2.3.1	Acero de 60.000 PSI 420 MPa. Incluye corte, figurado y fijación. <b>Para pilotes</b>	kg	57.679,64
2.3.2	Acero de 60.000 PSI 420 MPa. Incluye corte, figurado y fijación. <b>Para dados</b>	kg	29.790,60
2.3.3	Acero de 60.000 PSI 420 MPa. Incluye corte, figurado y fijación. <b>Para vigas de cimentación</b>	kg	2.926,19
2.3.4	Acero de 60.000 PSI 420 MPa. Incluye corte, figurado y fijación. <b>Para placa de contrapiso</b>	kg	10.171,05
<b>3</b>	<b>REDES SUBTERRÁNEAS (hidrosanitarias, gas, eléctricas, comunicaciones, calderas, lavandería, ventilación, ambientales, etc.).</b>		
<b>3.1</b>	<b>EXCAVACIONES, RELLENOS Y REEMPLAZOS.</b>		
3.1.1	Excavación manual en material común h.<=2,00m. Incluye entibado en ambos costados, cargue, retiro, disposición de escombros a sitio aprobado por la autoridad ambiental.	m3	67,14



3.1.2	Relleno manual con recebo común compactado. Incluye extendido, humedecimiento y compactación.	m3	80,57
<b>3.2 REDES HÚMEDAS.</b>			
<b>3.2.1 ACOMETIDA AGUA POTABLE.</b>			
3.2.1.1	Tubería PVCP 2" RDE 21, instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, regata y resane, instalación, uniones codos té y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye excavación, ni accesorios especiales como té dobles, bridas de conexión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	70,00
<b>3.2.2 DESAGÜE AGUAS RESIDUALES.</b>			
3.2.2.1	Tubería para alcantarillado de pared estructural 8" o 200 mm PVC, instalada subterránea y/o a nivel, doble extrusión, pared interior lisa y exterior corrugada, sistema de unión mecánico, campana espigo con hidrosello de caucho. Incluye suministro e instalación. NO incluye accesorios especiales como sillas de conexión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	97,86
<b>3.2.3 DESAGÜE AGUAS LLUVIAS.</b>			
<b>3.2.4 RED SUBTERRÁNEA PARA SISTEMA CONTRAINCENDIO</b>			
3.2.4.1	Tubería PVC C-900 4", instalada subterránea. Incluye suministro, instalación, atraque en arena . NO incluye accesorios especiales como té dobles, uniones borrachas, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	70,00
<b>3.2.5 ACOMETIDA DE GAS.</b>			
	Tubería en Polietileno 3/4" para gas, instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m, densidad media PE 80. Incluye suministro, regata y resane, instalación uniones codos té y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales como té dobles u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	70,00
<b>3.2.7 OBRAS CIVILES HIDROSANITARIAS.</b>			
	Caja de inspección en mampostería 100x100x100 cm (a x L x h) medidas internas útiles. Incluye base en concreto f'c=3000 PSI y malla electrosoldada, cañuela, ladrillo tolete recocido común, tapa en concreto f'c=3000 PSI con marco y contramarco reforzado metálico, pañetado liso impermeabilizado 1:4 interno completo. No incluye excavaciones ni rellenos.	u	8,00
	Caja de inspección en mampostería 120x120x100 cm (a x L x h) medidas internas útiles. Incluye base en concreto f'c=3000 PSI y malla electrosoldada, cañuela, ladrillo tolete recocido común, tapa doble en concreto f'c=3000 PSI con marco y contramarco metálico, pañetado liso impermeabilizado 1:4 interno completo. No incluye excavaciones ni rellenos.	u	4,00
	Caja de inspección en mampostería 150x150x100 cm (a x L x h) medidas internas útiles. Incluye base en concreto f'c=3000 PSI y malla electrosoldada, cañuela, ladrillo tolete recocido común, tapa doble en concreto f'c=3000 PSI con marco y contramarco metálico, pañetado liso impermeabilizado 1:4 interno completo. No incluye excavaciones ni rellenos.	u	4,00
<b>3.2.8 MEDIDOR DE AGUA.</b>			
	Medidor de agua Dn.=25 mm (1") de tipo velocidad, cuerpo de bronce, chorro único, esfera seca, (Q3/Q1) R.=80, longitud 160 mm, T. 0°-50°, válvula anti retorno, transmisión magnética, blindaje antimagnético, pre-equipado con emisor de impulsos, incluye tuercas, acoples y empaques; cumpliendo la norma ISO 4064 y la NTC 1063; tipo SJ-SDC(D3)Dn25 de AQUASOFT o equivalente de igual calidad o superior. Incluye certificado de calibración emitido por laboratorio aprobado por la ONAC, niples galvanizados, dos (2) válvulas registro tipo globo 1", una (1) válvula de alivio 1", accesorios galvanizados, tuercas acoples empaques y otros, suministro e instalación de la totalidad de elementos y puesta en funcionamiento. NO incluye caja de mampostería.	u	119,00
<b>3.2.9 MEDIDOR DE GAS.</b>			
	Suministro e instalación de Elevador / tránsito de 3/4" para centro de medición de gas, para transición entre tubo de polietileno y tubo metálico, fabricado en acero de bajo carbono galvanizado por inmersión en caliente.	u	119,00
<b>4 ESTRUCTURAS (Concreto, metal, madera) Y CONCRETOS ARQUITECTÓNICOS.</b>			
<b>4.1 ESTRUCTURAS DE CONCRETO.</b>			
<b>4.1.1 ELEMENTOS VERTICALES ARQUITECTÓNICOS DE CONCRETO.</b>			
	Muros en concreto a la vista f'c=3000 PSI dando alcance a la figuración o diseño establecido en planos (indiferente de si es regular o irregular), acabado logrado con formaleta metálica, según detalle. NO incluye aceros ni mallas electrosoldadas.	m3	898,13

<b>4.1.2</b>	<b>PLACAS ESTRUCTURALES DE CONCRETO.</b>		
	Placas macizas aéreas h.=12 cm en concreto a la vista f'c=3000 PSI, acabado logrado con formaleta metálica. Incluye cortagotera perimetral en la cara inferior según diseño. NO incluye aceros ni mallas electrosoldadas.	m2	1.220,53
<b>4.1.3</b>	<b>OTROS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CONCRETO.</b>		
	Escalera aérea integral en concreto a la vista f'c=3000 PSI, formaleta metálica, según diseño. Incluye cortagotera perimetral en la cara inferior según diseño. NO incluye aceros ni mallas electrosoldadas.	m3	46,16
<b>4.2</b>	<b>FORMALETA PARA ESTRUCTURAS EN CONCRETO Y RELACIONADOS.</b>		
	Formaleta metálica tipo tunel	m2	1.278,88
<b>4.3</b>	<b>ACEROS DE REFUERZO PARA ESTRUCTURAS EN CONCRETO Y RELACIONADOS.</b>		
	Acero de 60.000 PSI 420 MPa. Incluye corte, figurado y fijación. <b>Para muros</b>	kg	116.757,52
	Acero de 60.000 PSI 420 MPa. Incluye corte, figurado y fijación. <b>Para placas aéreas</b>	kg	158.668,38
	Acero de 60.000 PSI 420 MPa. Incluye corte, figurado y fijación. <b>Para escaleras</b>	kg	6.000,93
<b>5</b>	<b>MAMPOSTERÍAS Y RELACIONADOS.</b>		
<b>5.1</b>	<b>MAMPOSTERÍA DE ARCILLA.</b>		
	Muros e.=12 cm en bloque hueco de arcilla No.5 33x11,5x23 cm (L x a x h), superficie estriada. Incluye mortero de pega y emboquille. NO incluye aceros de refuerzos, ni grafiles, ni grouting de dovelado.	m2	5.615,56
<b>5.2</b>	<b>ELEMENTOS ESTRUCTURALES RELACIONADOS CON LA MAMPOSTERÍA.</b>		
<b>5.3</b>	<b>ACEROS DE REFUERZO PARA MAMPOSTERÍA Y RELACIONADOS.</b>		
<b>6</b>	<b>ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES PREFABRICADOS Y/O FUNDIDOS EN SITIO.</b>		
<b>6.1</b>	<b>PREFABRICADOS EN OBRA O FUNDIDOS EN SITIO.</b>		
<b>6.1.1</b>	<b>MESONES EN CONCRETO.</b>		
	Mesones en concreto sin faldón e.<=5,0 cm f'c=3000 PSI, inferior acabado a la vista, formaleta tablero liso aglomerado e.=19 mm tipo Formaleta T de TABLEMAC, con bordes achaflanados. Solo contempla la superficie, no incluye apoyos, ni malla electrosoldada.	m2	140,40
<b>6.1.2</b>	<b>POYOS PARA MUEBLES.</b>		
	Poyo para muebles (indiferente de su uso) en concreto f'c=3000 PSI a.>40<=60 e.<=10 cm, acabado superficial liso. Incluye formaletería ordinaria, desencofrante y curador para el concreto. No incluye malla de refuerzo. El pago por metro lineal será medido en planta en la parte posterior del poyo.	m	140,40
<b>6.2</b>	<b>ACEROS DE REFUERZO PARA ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES.</b>		
	Mallas electrosoldadas. Incluye corte y fijación.	kg	881,71
<b>7</b>	<b>CONSTRUCCIÓN LIVIANA EN SECO (Cielos rasos, divisiones, otros).</b>		
<b>7.1</b>	<b>CIELOS RASOS.</b>		
	Cielo raso en sistema drywall con láminas en fibrocemento e.=6 mm, dando acabado liso, construido con ángulo galvanizado cal.26 perimetral, omegas y viguetas galvanizadas roladas en cal.26, soportado con ángulo galvanizado cal.26, estructura anclada muros y estructura con chazo de expansión o con tiros. Incluye suministro, instalación, implementos para trabajos en altura, tornillería, tratamiento de juntas con cinta de malla, esquineros con cinta filo metálico, masillado lijado y pintado una (1) capa con vinilo tipo 2.	m2	9.492,98
<b>8</b>	<b>INSTALACIONES HIDROSANITARIAS, CONTRAINCENDIO, DE GAS, AIRES COMPRIMIDOS (redes y equipos).</b>		
<b>8.1</b>	<b>INSTALACIONES HIDROSANITARIAS.</b>		
<b>8.1.1</b>	<b>RED GENERAL DE AGUA FRÍA POTABLE.</b>		
	Tubería PVC 1/2" RDE 9, instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, instalación, uniones codos tés y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye regata ni resane, ni accesorios especiales como tés dobles, bridas de conexión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	2.853,00
	Tubería PVC 3/4" RDE 11, instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, instalación, uniones codos tés y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye regata ni resane, ni accesorios especiales como tés dobles, bridas de conexión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	2.655,00

	Tubería PVCP 1" RDE 13,5, instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, instalación, uniones codos té y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye regata ni resane, ni accesorios especiales como té dobles, bridas de conexión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	1.229,00
	Tubería PVCP 1,1/4" RDE 21, instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, instalación, uniones codos té y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye regata ni resane, ni accesorios especiales como té dobles, bridas de conexión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	307,00
	Tubería PVCP 1,1/2" RDE 21, instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, instalación, uniones codos té y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye regata ni resane, ni accesorios especiales como té dobles, bridas de conexión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	369,00
<b>8.1.2</b>	<b>PUNTOS HIDRÁULICOS DE AGUA FRÍA.</b>		
	Punto AF Lavamanos PVCP 1/2", tubular vertical / paral hasta 1,50 m, instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye cámara de aire, tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE CAMBIO DE DIRECCIÓN HORIZONTAL A VERTICAL.	u	238,00
	Punto AF Lavaplatos / poceta / vertedero PVCP 1/2", tubular vertical / paral hasta 1,50 m, instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye cámara de aire, tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE CAMBIO DE DIRECCIÓN HORIZONTAL A VERTICAL.	u	119,00
	Punto AF Lavaderos PVCP 1/2", tubular vertical / paral hasta 1,50 m, instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye cámara de aire, tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE CAMBIO DE DIRECCIÓN HORIZONTAL A VERTICAL.	u	118,00
	Punto AF Sanitario de tanque PVCP 1/2", tubular vertical / paral hasta 1,50 m, instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye cámara de aire, tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE CAMBIO DE DIRECCIÓN HORIZONTAL A VERTICAL.	u	238,00
	Punto AF Duchas PVCP 1/2", tubular vertical / paral hasta 1,50 m, instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye cámara de aire, tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE CAMBIO DE DIRECCIÓN HORIZONTAL A VERTICAL.	u	118,00
	Punto AF Llave Manguera PVCP 1/2", tubular vertical / paral hasta 1,50 m, instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye cámara de aire, tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE CAMBIO DE DIRECCIÓN HORIZONTAL A VERTICAL.	u	118,00
<b>8.1.3</b>	<b>RED GENERAL SANITARIA / AGUAS RESIDUALES, VENTILACIONES Y REVENTILACIONES.</b>		
	Tubería PVCS 2", instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, regata y resane, instalación, uniones codos té y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales como yes dobles, bridas de conexión, juntas de expansión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	836,00
	Tubería PVCS 3", instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, instalación, uniones codos té y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales como yes dobles, bridas de conexión, juntas de expansión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	230,00
	Tubería PVCS 4", instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, instalación, uniones codos té y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales como yes dobles, bridas de conexión, juntas de expansión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	403,00
	Tubería PVCS 6", instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, instalación, uniones codos té y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales como yes dobles, bridas de conexión, juntas de expansión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	276,00

	Tubería PVCL 3", instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, instalación, uniones codos téns y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales como yes dobles, bridas de conexión, juntas de expansión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	276,00
	Tubería PVCL 4", instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, instalación, uniones codos téns y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales como yes dobles, bridas de conexión, juntas de expansión, u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	276,00
<b>8.1.4</b>	<b>PUNTOS SANITARIOS.</b>		
	Punto San. Lavamanos PVCS 2", instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE DERIVACIÓN DEL RAMAL COLECTOR HORIZONTAL.	u	238,00
	Punto San. Lavaplatos / poceta / vertedero PVCS 2", instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE DERIVACIÓN DEL RAMAL COLECTOR HORIZONTAL.	u	119,00
	Punto San. Lavaderos PVCS 2", instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m, instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE DERIVACIÓN DEL RAMAL COLECTOR HORIZONTAL.	u	118,00
	Punto San. Sanitario de tanque PVCS 4", instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m, instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE DERIVACIÓN DEL RAMAL COLECTOR HORIZONTAL.	u	238,00
	Punto San. Sifón de piso PVCS 2", instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m, instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE DERIVACIÓN DEL RAMAL COLECTOR HORIZONTAL.	u	120,00
<b>8.1.3</b>	<b>RED GENERAL DE AGUA CALIENTE.</b>		
8.1.3.1	Tubería Cobre Tipo L 1/2". Incluye suministro, instalación, uniones, codos, téns, y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales.	m	934,80
8.1.3.2	Tubería Cobre Tipo L 3/4". Incluye suministro, instalación, uniones, codos, téns, y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales.	m	1.350,04
8.1.3.3	Tubería Cobre Tipo L 1". Incluye suministro, instalación, uniones, codos, téns, y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales.	m	115,72
<b>8.1.4</b>	<b> AISLAMIENTO DE TUBERÍAS</b>		
8.1.4.1	Aislamiento de tubería de 1/2" con poliuretano rígido tipo cañuela.	m	1.089,68
8.1.4.2	Aislamiento de tubería de 3/4" con poliuretano rígido tipo cañuela.	m	1.350,04
8.1.4.3	Aislamiento de tubería de 1" con poliuretano rígido tipo cañuela.	m	115,72
<b>8.2</b>	<b>INSTALACIONES CONTRA INCENDIO.</b>		
<b>8.2.1</b>	<b>CUARTO DE BOMBAS CONTRA INCENDIO.</b>		
<b>8.2.2</b>	<b>RED GENERAL CONTRA INCENDIO.</b>		
8.2.2.1	Tubería Acero Carbón (AC) SCH-40 sin costura 2" con acabado en pintura roja. Incluye suministro, instalación, codos, téns, yes, y sus respectivos uniones (acople) en sistema ranurado para el correcto tendido de la tubería, todos los accesorios serán de tipo Hierro Dúctil (HD). NO incluye accesorios especiales..	m	21,69
8.2.2.2	Tubería Acero Carbón (AC) SCH-40 sin costura 4" con acabado en pintura roja. Incluye suministro, instalación, codos, téns, yes, y sus respectivos uniones (acople) en sistema ranurado para el correcto tendido de la tubería, todos los accesorios serán de tipo Hierro Dúctil (HD). NO incluye accesorios especiales..	m	35,12
<b>8.2.3</b>	<b>PUNTOS CONTRA INCENDIO.</b>		
<b>8.2.4</b>	<b>ACCESORIOS ESPECIALES</b>		
8.2.4.10	Coupling 2". Incluye suministro, instalación, empaque, tornillos y tuercas.	u	395,00
8.2.4.11	Coupling 3". Incluye suministro, instalación, empaque, tornillos y tuercas.	u	366,00
<b>8.2.5</b>	<b>APARATOS CONTRA INCENDIO.</b>		

8.2.5.1	Suministro, montaje y conexión de Gabinete contraincendio Clase 2 de incrustar, salida bomberos 2.1/2" y salida manguera 2.1/2", según norma NTC 1669; medidas 77x77x24 cm (h x a x f), en lámina Cold Rolled cal.20, acabado en pintura base anticorrosiva roja, con cerradura de llave maestra, vidrio laminado respectivo; con una (1) válvula angular tipo globo en bronce 2.1/2"x2.1/2" NPT x NH; con soporte tipo canastilla para manguera gabinetera en CR.; con una (1) manguera de 2.1/2"x100 pies (30 m) acoplada tejido 100% poliéster y tubo interior en caucho sintético (presión servicio 150 PSI, presión prueba 300 PSI, presión rotura 500 PSI), con boquilla de chorro y niebla 2.1/2" en policarbonato; con un (1) hachapico en acero de 4,5 libras acabado en pintura electrostática roja y cabo curvo en madera acabado con laca catalizada; una (1) llave Spanner de dos servicios, fabricada en hierro y acabada en pintura electrostática color aluminio; con un (1) extintor BC de 10 libras presurizado con válvula de descarga en bronce, boquilla y manómetro de control.	u	30,00
<b>8.2.6</b>	<b>VÁLVULAS Y ACCESORIOS ESPECIALES SISTEMA CONTRAINCENDIO</b>		
<b>8.2.7</b>	<b>EQUIPOS CONTRAINCENDIO.</b>		
<b>8.3</b>	<b>INSTALACIONES DE GAS.</b>		
<b>8.3.1</b>	<b>RED GENERAL DE GAS.</b>		
8.3.1.1	Tubería Cobre rígido tipo L 1/2", instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, regata y resane, instalación uniones codos té y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales como té dobles u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	660,00
8.3.1.2	Tubería Cobre rígido tipo L 3/4", instalada subterránea y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye suministro, regata y resane, instalación uniones codos té y demás accesorios para el correcto tendido y funcionamiento de la tubería. NO incluye accesorios especiales como té dobles u similares que excedan de manera considerable el costos de los accesorios ordinarios.	m	276,00
<b>8.3.2</b>	<b>PUNTOS DE GAS.</b>		
8.3.2.1	Punto de gas en cobre (Cu) 1/2" tipo L, tubular vertical / paral hasta 1,50 m, instalado subterráneo y/o a nivel y/o en alturas hasta 10,00 m. Incluye tubería, accesorios, complementarios, regata y resane. EL PUNTO ESTA CONTEMPLADO DESDE EL PRIMER ACCESORIO DE CAMBIO DE DIRECCIÓN HORIZONTAL A VERTICAL.	u	360,00
<b>9</b>	<b>INSTALACIONES ELÉCTRICAS, DE COMUNICACIONES, SEGURIDAD Y SONIDO (redes y equipos).</b>		
<b>9.1</b>	<b>CANALIZACIONES PARA CABLEADO ELÉCTRICO BT.</b>		
	Suministro e Instalación de Tubería PVC de 1", Incluye Todos los Elementos y Accesorios Necesarios para su Correcto Montaje y Funcionamiento.	m	9.239,00
	Suministro e Instalación de Tubería PVC de 1 1/2", Incluye Todos los Elementos y Accesorios Necesarios para su Correcto Montaje y Funcionamiento.	m	345,00
	Suministro e Instalación de Tubería PVC de 1 1/4", Incluye Todos los Elementos y Accesorios Necesarios para su Correcto Montaje y Funcionamiento.	m	276,00
	Suministro e Instalación de Tubería PVC de 2", Incluye Todos los Elementos y Accesorios Necesarios para su Correcto Montaje y Funcionamiento.	m	172,50
	<b>ACOMETIDAS Y CABLEADOS BT.</b>		
	Red de entrada y salida en Cable Encauchetado 3 x No. 16 LS-HFFR.	m	793,50
	Red de entrada y salida en Cable Encauchetado 3 x No. 12 LS-HFFR.	m	9.239,00
	Red eléctrica Trifásica en Cable de Cu en 4 x N° 10 AWG (3 Fases + 1 Neutro) + 1 x N° 12T AWG LS-HFFR°	m	924,00
	Red eléctrica Trifásica en Cable de Cu en 4 x N° 8 AWG (3 Fases + 1 Neutro) + 1 x N° 10T AWG LS-HFFR°	m	1.386,00
	Red eléctrica Trifásica en Cable de Cu en 4 x N° 6 AWG (3 Fases + 1 Neutro) + 1 x N° 8T AWG THHN/THWN 90°	m	1.848,00
	<b>TABLEROS DE CIRCUITOS</b>		
	Suministro e instalación de cofre metálico de 60x40x30 cm para tablero de distribución general, con espacio para totalizador de 70 amperios en caja moldeada, incluye 5 barrajes (tres fases + neutro y tierra), tapa, aisladores y todos los elementos, accesorios y actividades necesarias para su correcto funcionamiento.	u	1,00
	Suministro e instalacion tablero de distribución monofasico de 4 Circuitos	u	120,00
	Suministro e instalacion tablero de distribución monofasico de 8 Circuitos	u	15,00
	<b>INTERRUPTORES Y PROTECCIONES BT.</b>		
	<b>SALIDAS DE ALUMBRADO.</b>		
	Salida para luminaria en tubería PVC Incluye 12 metros de cableado en 2 No.12 AWG + 1 No.12T, tubería PVC, Codos, Uniones, Terminales, Apliques, toma de 15A y demás accesorios y elementos necesarios para su correcta instalacion y funcionemiento.	u	1.215,00
	Salida interruptor sencillo en 3 No.12 AWG PVC 3/4: Incluye 0,5 m de tubería PVC regateada por pared, resane y acabados, el interruptor, caja 5800 en aluminio, elementos de fijacion y demás accesorios necesarios para la correcta instalacion y funcionamiento	u	1.080,00

	<b>SALIDAS DE TOMAS NORMALES Y REGULADAS.</b>		
	Salida de Tomacorriente normal doble con polo a tierra calidad tipo levinton ó superior en canaleta, se realizan en cable trenzado 3x12 No.12 LS-HFFR, incluye troquel, toma corriente, conector autodesforre 3M, y todos los accesorios y actividades para su correcto funcionamiento.(longitud promedio por salida 0,5 m.)	u	1.845,00
	Salida de Tomacorriente doble con polo a tierra, se realizan en 2 No.12 AWG + 1No. 12, Incluye ductería PVC regateada por pared, resanes,caja rectangular y todos los accesorios y actividades para su correcto funcionamiento.(longitud promedio por salida 0,5 m.)	u	120,00
	<b>APARATOS ELÉCTRICOS.</b>		
	Suministro e Instalación Tomacorriente dobles normales con polo a tierra. Incluye todos los accesorios y actividades para su correcto funcionamiento.	u	1.845,00
	Suministro e Instalación Tomacorriente Regulados con polo a Tierra aislado GH, Grado Hospitalario mas tapa, Incluye todos los accesorios y actividades para su correcto funcionamiento.	u	119,00
<b>10</b>	<b>PAÑETES, REVOQUES Y REPELLOS.</b>		
<b>10.1</b>	<b>SOBRE MUROS Y OTROS ELEMENTOS VERTICALES.</b>		
	Pañete liso común 1:3 e.=2 cm. Incluye filis y dilataciones según diseño.	m2	8.867,02
	Pañete liso impermeabilizado integralmente 1:3 e.=2 cm. Incluye filis y dilataciones según diseño.	m2	2.216,76
<b>11</b>	<b>ALISTADOS Y ACABADOS DE PISOS.</b>		
<b>11.1</b>	<b>BASES DE PISOS Y AFINADOS.</b>		
	Alistado de pisos con mortero 1:3 h.<=4 cm, sin pendiente.	m2	7.013,62
	Alistado de pisos con mortero impermeabilizado integralmente 1:3 h.<=4 cm, sin pendiente.	m2	1.753,40
<b>11.2</b>	<b>ACABADO DE PISOS.</b>		
<b>11.2.1</b>	<b>CERÁMICOS Y PORCELÁNICOS.</b>		
	Acabado de piso con Baldosas de cerámica de 20,5x20,5 cm, tipo Egeo de CORONA o equivalente de igual calidad o superior. Incluye dilatación de aluminio según diseño y emboquille, aparejado según diseño. Pegado con mezcla lista de fábrica.	m2	1.648,85
	Acabado de piso con Baldosa de Cerámica de 33,8x33,8 cm, tipo Duropiso de CORONA o equivalente de igual calidad o superior. Incluye dilatación de aluminio según diseño y emboquille, aparejado según diseño. Pegado con mezcla lista de fábrica.	m2	440,55
<b>11.2.2</b>	<b>MADERA E IMITACIÓN MADERA (Laminados).</b>		
	Acabado de piso en madera laminada. Incluye suministro, instalación, aislante en espuma de polietileno, pegante entre juntas, relacionados y complementarios para su correcta ejecución.	m2	6.677,63
<b>11.3</b>	<b>GUARDAESCOBAS Y MEDIACAÑAS.</b>		
<b>11.3.1</b>	<b>CERAMICA</b>		
	Guardaescoba en baldosa de cerámica de L.pieza=20,5 cm h.=10,0 cm, tipo Egeo de CORONA o equivalente de igual calidad o superior. Incluye mortero de pega.	m	659,55
	Guardaescoba en baldosa de cerámica de L.pieza=33,8 cm h.=10,0 cm, tipo Duropiso de CORONA o equivalente de igual calidad o superior. Incluye mortero de pega.	m	16,00
<b>11.3.2</b>	<b>MADERA</b>		
	Guardaescoba en madera de h.=10,0 cm,	m	10.552,85
<b>12</b>	<b>ALISTADOS, IMPERMEABILIZACIONES, ACABADOS DE CUBIERTAS Y SISTEMAS DE FACHADA.</b>		
<b>12.1</b>	<b>ALISTADOS E IMPERMEABILIZACIONES.</b>		
<b>12.1.1</b>	<b>CUBIERTAS, TERRAZAS, MATERAS.</b>		
	Alistado de superficie con mortero impermeabilizado integralmente para cubiertas y terrazas 1:3 h.=8 cm promedio alistado + pendiente.	m2	678,07
	Impermeabilización capa sencilla, con manto de asfalto modificado con refuerzo de polietileno de alta densidad y autoprotección / acabado en foil de aluminio, rollo de 9,1x1,1 m e.=3 mm, tipo SikaManto 3.0 mm Aluminio de SIKA o equivalente de igual calidad o superior. Incluye la imprimación de la superficie con impermeabilizante asfáltico tipo Sika Techo E de SIKA o equivalente, y detallado de juntas remates y otros con pintura reflectiva de aluminio con base asfáltica de baja viscosidad tipo Alumol de SIKA o equivalente. USO NO TRANSITABLE.	m2	678,07
<b>12.1.2</b>	<b>FACHADAS.</b>		




	Impermeabilización superficial de fachadas con acabado de origen mineral (ladrillo, piedra, mármol, concreto, pañete, barro, etc.) con hidrófugo incoloro con base en siliconas, garantizando una durabilidad del producto aplicado de 7 a 10 años, tipo Sika Transparente 10 de SIKA o equivalente de igual calidad o superior, aplicado en dos (2) capas. Incluye limpieza y preparación de superficie, implementos para trabajos en altura.	m2	2.481,42
<b>13</b>	<b>CARPINTERÍA METÁLICA (Aluminio, acero y otros).</b>		
<b>13.1</b>	<b>CARPINTERÍA EN ALUMINIO.</b>		
<b>13.1.1</b>	<b>VENTANAS EN ALUMINIO.</b>		
	Ventana fija vidrio templado incoloro 6 mm instalado con empaque siliconado y silicona estructural tipo Sikasil SG-20 de SIKA o equivalente de igual calidad o superior. Incluye implementos para trabajos en altura.	m2	120,98
	Ventana compuesta vidrio templado incoloro 6 mm instalado con empaque siliconado y silicona estructural tipo Sikasil SG-20 de SIKA o equivalente de igual calidad o superior. Incluye implementos para trabajos en altura.	m2	1.014,48
	Perfiles ventana fija de aluminio anodizado color natural (combina: fija + proyectante o batiente o pivotante o corrediza + rejilla <=15% o microperforado <=15%), alfajía respectiva en aluminio (si aplica), anclajes respectivos, perfiles según diseño.	m	551,10
	Perfiles ventana compuesta de aluminio anodizado color natural (combina: fija + proyectante o batiente o pivotante o corrediza + rejilla <=15% o microperforado <=15%), alfajía respectiva en aluminio (si aplica), anclajes respectivos, perfiles según diseño.	m	2.630,52
	Puerta ventana con perfiles de aluminio anodizado color natural. Incluye vidrio templado incoloro 6 mm instalado con empaque siliconado y silicona estructural tipo Sikasil SG-20 de SIKA o equivalente de igual calidad o superior, alfajía respectiva en aluminio (si aplica), anclajes respectivos, perfiles según diseño. Incluye implementos para trabajos en altura.	m2	633,77
	Puerta entamborada en lámina figurada CR cal. 18; con marco en lámina, refuerzos internos en perfilera metálica para cerradura, montante y pisavidrios en lámina (si aplican), manija, perfiles según diseño. Incluye suministro, fabricación, montaje, bisagras tipo pistón, soldaduras, cargue del marco con grouting f'c=3000 PSI, anclaje tipo pata de gallina fabricado en ángulo y complementarios, anticorrosivo aplicado en dos (2) capas. NO incluye vidrios (si aplica), ni cerraduras, ni pintura de acabado.	m2	367,43
<b>14</b>	<b>CARPINTERÍA DE MADERA.</b>		
<b>14.1</b>	<b>PUERTAS EN MADERA.</b>		
	Puerta Entamborada en madera, con bastidor en madera maciza, tableros en láminas triplex 4,0 mm, refuerzos internos adicionales de 19,0 mm para el tablero y para la cerradura, inmunizado de fábrica contra plagas, elementos y textura de acabado según diseño. Incluye marco, suministro, fabricación, montaje, tornillos avellanados, tapón de madera, anclajes, bisagras, perforación con broca copa para cerradura, piezas de madera secadas pulidas inmunizadas y selladas, con tintilla a dos (2) capas y lacadas a dos (2) capas, relacionados y complementarios. NO incluye montante ni vidrio (si aplica), ni cerraduras. El pago por m2 será medido en el alzado de la puerta medido SOLAMENTE por una cara y contempla la pintura de todas las caras vistas.	m2	1.169,55
<b>15</b>	<b>ENCHAPES.</b>		
<b>15.1</b>	<b>SOBRE MUROS.</b>		
	Enchape de pared con baldosas de cerámica de 20,5x20,5 cm, tipo Egeo de CORONA o equivalente de igual calidad o superior. Incluye win esquinero plástico, remate de borde en redondel plástico, pegado con mezcla lista de fábrica y emboquilles.	m2	8.645,08
<b>16</b>	<b>ILUMINACIÓN.</b>		
<b>16.1</b>	<b>LUMINARIAS LÁMPARAS.</b>		
	Luminaria empotrada con Bombillos tipo LED. Fracción radiante 0,37.	u	1.180,00
<b>17</b>	<b>APARATOS SANITARIOS Y RELACIONADOS.</b>		
<b>17.1</b>	<b>APARATOS SANITARIOS.</b>		
	Lavamanos cerámico de colgar, con orificio para grifería, tipo Acuario de CORONA o equivalente de igual calidad o superior. Incluye suministro, montaje, sifón tipo botella y conexión completa. NO incluye grifería, ni puntos hidrosanitarios.	u	238,00
	Lavaplatos / vertedero en acero inoxidable 35x50 cm de sobreponer, sin orificios para grifería, con orificio para canastilla de 4", tipo SOCODA o equivalente de igual calidad o superior. Incluye suministro, montaje, canastilla, sifón tipo botella y conexión completa. NO incluye grifería, ni puntos hidrosanitarios.	u	119,00

	Sanitario cerámico de tanque, dos piezas, con asiento redondo, tipo Acuaplus II de CORONA o equivalente de igual calidad o superior. Incluye suministro, asiento plástico redondo color blanco, montaje, contenido completo del tanque, acople y conexión, regulador de caudal (válvula plástica) y complementarios para su puesta en funcionamiento. NO incluye puntos hidrosanitarios.	u	238,00
	Lavadero de ropa sin tanque de almacenamiento de agua, fabricado en cuerpo de concreto reforzado y superficie en granito pulido, medidas 60x60x25 cm (a x L x h). Incluye suministro y montaje. NO incluye mampostería de soporte, ni grifería, ni puntos hidrosanitarios.	u	118,00
<b>17.2</b>	<b>GRIFERÍAS.</b>		
	Grifería monocontrol de sobreponer para lavamanos, plástica cromada, tipo Piscis Roda de GRIVAL o equivalente de igual calidad o superior. Incluye instalación, acople de conexión, regulador de caudal (válvula plástica) y complementarios para su puesta en funcionamiento. NO incluye punto hidráulico.	u	238,00
	Grifería monocontrol de sobreponer para lavaplatos Cuello de ganso llave tipo cruceta, acabado cromado, tipo Athenea de GRIVAL o equivalente de igual calidad o superior. Incluye suministro, instalación, acoples de conexión, regulador de caudal (válvula plástica) y complementarios para su puesta en funcionamiento. NO incluye punto hidráulico.	u	119,00
	Ducha con pomo monocontrol cromado y salida en tubo PVC C-9001/2", pomo tipo Artesa de GRIVAL o equivalente de igual calidad o superior. Incluye el pomo, regata y resane, instalación, tubería desde la llave (pomo) hasta la salida del agua, y todo lo relacionado para su puesta en funcionamiento. NO incluye punto hidráulico.	u	120,00
	Grifería llave terminal para manguera tipo pesado 1/2", metálica cromada, extremo roscado, tipo GRIVAL o equivalente de igual calidad o superior. Incluye suministro e instalación. NO incluye punto hidráulico.	u	120,00
<b>18</b>	<b>PINTURAS Y RECUBRIMIENTOS.</b>		
<b>18.1</b>	<b>SOBRE MUROS Y PANELERÍA LIVIANA.</b>		
	Estuco acrílico, de tipo monocomponente con presentación plástica, producto listo para usar, aplicado en tres (3) capas con llana metálica y lijado para acabado final. Incluye preparación de superficie.	m2	29.046,47
	Pintura vinilo acrílica plástica lavable Tipo 1, aplicado en tres (3) capas. Incluye preparación de superficie.	m2	29.046,47
<b>18.2</b>	<b>SOBRE TECHOS Y/O CIELOS RASOS.</b>		
	Estuco Acrílico monocomponente aplicado en techo / bajo placa, presentación plástica, producto listo para usar, aplicado en tres (3) capas con llana metálica y lijado para acabado final. Incluye implementos para trabajos en altura, preparación de superficie.	m2	9.492,98
	Pintura Vinilo acrílica plástica lavable Tipo 1 sobre cielos rasos, aplicado en tres (3) capas. Incluye implementos para trabajos en altura, preparación de superficie.	m2	9.492,98
<b>19</b>	<b>GENERACION DE ENERGIA POR RENOVABLES</b>		
<b>19.1</b>	<b>PANELES FOTOVOLTAICOS</b>		
	Paneles fotovoltaicos policristalinos de 320 wp, Rendimiento del 19,20 %, Tensión nominal sistema 24 v, Tensión punto max potencia 42,2 v, Corriente unitaria máxima 7,37 A, Amperaje máximo 9,18 y Área x panel 1,85 m2	u	48,00
<b>19.2</b>	<b>TURBINA MINI EOLICA</b>		
	Turbina mini eólica con área de barrida de 12,88 m2, Diámetro 4,05 m, Potencia nominal 5000 w, Voltaje nominal 220 v, Dimensiones 120x80x80 cm, Velocidad arranque 3,00 m/s, Corriente unitaria máxima 6,10 A	u	0,00
<b>20</b>	<b>AREAS COMUNES</b>		
<b>20</b>			
	Luminaria empotrada con Bombillos tipo LED. Fracción radiante 0,37.	u	60,00
	Suministro e Instalación Tomacorriente dobles normales con polo a tierra. Incluye todos los accesorios y actividades para su correcto funcionamiento.	u	15,00
	Ascensor CAP. 6 personas y 15 paradas	u	2,00



## Anexo 8. Declaración ambiental de producto

### ORGANIZACIÓN

Propietario de la DAP	Universidad Politécnica de Cataluña
Persona de contacto	Sergio A. Ballén Zamora +34 934 01 62 00 sergio.ballen@upc.edu
Dirección	Campus Nord, Carrer de Jordi Girona, 1, 3, 08034 Barcelona, España
Web	<a href="https://www.upc.edu/es">https://www.upc.edu/es</a>
Logotipo	
Sistema de gestión ambiental	No

La Universidad Politécnica de Cataluña (Universitat Politècnica de Catalunya en catalán), también conocida como BarcelonaTech y por su acrónimo UPC, es una universidad pública española de la Generalidad de Cataluña, especializada en los ámbitos de ingeniería, arquitectura y ciencias.

### INFORMACIÓN GENERAL SOBRE ESTA DAP

Programa	
Número de registro	XXX
Publicado	XXX
Válido hasta	XXX
Fecha de revisión	XXX
Regla de Categoría de Producto	PCR 2014:02 Buildings, version 2.0
Clasificación de grupo de producto	UN CPC 531 Buildings
Año de referencia de los datos	Los datos específicos de las DAP cubren los últimos cinco años.  Los datos específicos de las declaraciones de productos de construcción (BPD3) cubren hasta 10 años, con la excepción de cinco productos eléctricos para los cuales el conjunto de datos es más antiguo debido a la falta de datos. Esos conjuntos de datos se consideran más confiables que los supuestos y sin impacto en los resultados. Sin embargo, no se han obtenido datos más recientes con una calidad equivalente que sean representativos de Colombia.  Datos genéricos de la base de datos EcoInvent 3.5 (actualizado 20 de mayo de 2020).
Alcance geográfico	Bogotá, Colombia, Suramérica.

Las razones para realizar el estudio de ACV son que el equipo de diseño de este proyecto busca mejorar la eficiencia energética con energías renovables y reducir los impactos ambientales del mismo. Esto con el fin de obtener una DAP del edificio o aplicar a una certificación en construcción sostenible como LEED para obtener beneficios económicos, incrementar las ventas frente a un público objetivo que demanda estas prácticas y difundir el compromiso del equipo de diseño y constructor con el medio ambiente. Por tanto, se busca calcular los impactos ambientales del edificio en su ciclo de vida para reducir mínimo el 10% en al menos 3 categorías de impacto.

Una Declaración ambiental de producto DAP, es un documento emitido por una plataforma o sistema que certifica a través de una revisión por una tercera parte, el potencial de un proyecto para producir diferentes impactos ambientales y que son calculados y cuantificados según una unidad de medida determinada. El objetivo de esta DAP es proporcionar información objetiva y confiable sobre el impacto ambiental de la construcción y operación del edificio conceptual de Prototipo NetZero EB de vivienda de alta densidad. La DAP se basa en un informe de proyecto, realizado de acuerdo con las reglas de categoría de producto para edificios, PCR UN CPC 531 Buildings (PCR 2014: 02 Buildings, Version 2.0), publicado por el sistema EPD Internacional, junto con los siguientes estándares:


SS-EN ISO14040:2006	Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework
SS-EN ISO14044:2006	Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines
SS-EN 15804:2012	Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products
SS-EN 15978:2011	Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method

Este documento parte de un estudio de Análisis de ciclo de vida del edificio objeto, cuya fecha de inicio es mayo de 2020 y término en agosto de 2020. La aplicación prevista es calcular los impactos ambientales por ACV para obtener una DAP o un reporte que valide las reducciones de impactos de ciclo de vida del edificio según la categoría LEED Materiales y recursos, y acorde con la PCR 2014:02 Buildings, versión 2.0.

El público previsto es el equipo de diseño, constructor, y futuros habitantes del edificio. En cuanto a aseveraciones comparativas, se tiene como objetivo determinar los impactos de ciclo de vida del edificio respecto a las prácticas comunes de construcción en Colombia, para luego compararlo con otra versión mejorada del mismo, es decir, aplicando estrategias que reduzcan sus impactos.

Los impactos del ciclo de vida de esta DAP se han evaluado desde la cuna hasta la cuna. El verificador y el operador del programa no hacen ningún reclamo ni son responsables de la legalidad del producto, su proceso de producción o su cadena de suministro.

### Información de contacto

Propietario de la DAP	 Universidad Politécnica de Cataluña +34 934 01 62 00 sergio.ballen@upc.edu Campus Nord, Carrer de Jordi Girona, 1, 3, 08034 Barcelona, España <a href="https://www.upc.edu/es">https://www.upc.edu/es</a>
Autor del ACV	Sergio A. Ballén Zamora sergio.ballen@yahoo.com +57 3132418272 XXX <a href="https://issuu.com/sergioballen">https://issuu.com/sergioballen</a>
Operador del programa	

**CEN standard EN 15804 serves as the Core Product Category Rules (PCR)**

**PCR review was conducted by: < >**

**Independent third-party verification of the declaration and data, according to ISO 14025:2006:**

EPD process certification       EPD verification

**Third party verifier:** <name, organisation and signature of the third party verifier>

**In case of accredited certification bodies:**

**Accredited by:** <name of the accreditation body and accreditation number, where applicable>.

**In case of recognised individual verifiers:**

**Approved by:** The International EPD® System

**Procedure for follow-up of data during EPD validity involves third party verifier:**

Yes  No

El propietario de la DAP tiene la exclusiva propiedad y responsabilidad de la DAP. Las DAP dentro de la misma categoría de producto pero de diferentes programas pueden no ser comparables.

El verificador y el operador del programa no realizan ninguna afirmación ni poseen ninguna responsabilidad acerca de los aspectos legales del producto.

## INFORMACIÓN DEL PRODUCTO EVALUADO

Esta Declaración Ambiental de Producto (DAP) describe el impacto sobre el medio ambiente del ciclo de vida de un prototipo NetZero EB (o EECN) de vivienda de alta densidad de 9.762 m<sup>2</sup> construidos (no se considera área con temperatura controlada, Atemp), y una vida útil de 50 años.

Este prototipo se encuentra localizado en la ciudad de Bogotá (Colombia) sin un lote específico, ha sido desarrollado por el arquitecto Sergio A. Ballén Zamora, especialista en arquitectura sostenible, bioclimática y eficiencia energética. Este proyecto nace de la búsqueda de un prototipo que reúna las características comunes que ofrece el mercado de vivienda multifamiliar en la ciudad, cuya premisa es incorporar sistemas de generación de energía renovable que la conviertan en un NetZero EB y la reducción de sus impactos ambientales a través del ACV y DAP, siendo el primer edificio del país en tener este estudio.

### Unidad funcional

La unidad funcional es el habitar 1 m<sup>2</sup> de construcción residencial multifamiliar incluyendo áreas comunes internas con un periodo de referencia de estudio de 50 años.

Debido a que el proyecto no plantea áreas con aire acondicionado o calefacción, no se contempla el área climatizada (Atemp) como opción de unidad funcional.

Tipo de edificio	PCR UN CPC código: 531 Buildings. Subclase 53112 – Edificación residencial multifamiliar.
Patrón de uso	Edificación residencial multifamiliar
Vida de servicio requerido (ReqSL)	100 años
Periodo de estudio de referencia (RSP)	50 años
Vida útil de referencia, RSL	Vida útil estimada para productos en los que consiste la construcción del concepto, calculada de acuerdo con estimaciones generales de acuerdo al material

### Flujo de referencia

La construcción de 1 m<sup>2</sup> de edificación multifamiliar a través de una serie de materiales (predominantemente concreto).

## Descripción del edificio

El objeto de estudio es un prototipo conceptual conformado por 15 pisos tipo con 8 apartamentos en cada uno conectados mediante una circulación central, dos ascensores, dos puntos fijos en los extremos, sin sótano, sin pendiente del terreno, y con acceso directo desde el exterior en el primer nivel. Dado que está compuesto por una sola planta tipo, no existen plantas con características diferentes, con excepción de la cubierta, donde además, se instalan los equipos de generación de energía renovable.



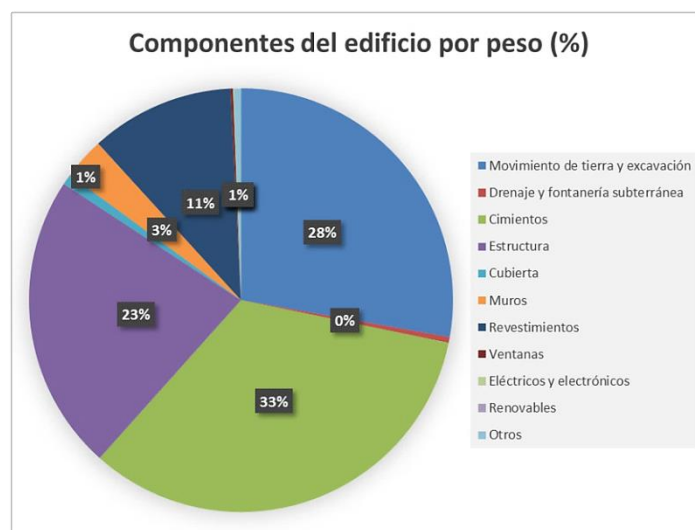
Planta tipo y alzado del edificio

La orientación del edificio está siguiendo la recomendación de la Resolución 549 de 2015 para climas fríos en Colombia. Todas las unidades de vivienda presentan buenos niveles de iluminación y ventilación natural por su exposición al oriente y al occidente. Los materiales implementados obedecen a las prácticas comunes de construcción, donde la mayoría de los muros exteriores están compuestos por muros de mampostería de arcilla con pañete interior, sin aislante térmico y valor U de 2,765 W/m<sup>2</sup>K, mientras que la mayoría de los muros interiores son de concreto de bajos espesores al igual que las placas de entrepiso, debido al sistema constructivo industrializado tipo túnel.

La ventanería se compone de marcos de aluminio con vidrio templado incoloro de 5 mm, valor U de 5,8 W/m<sup>2</sup>K y SHGC de 0,8. La placas de entrepiso y muros estructurales son de concreto estructural, al igual que la cimentación, que está compuesta por viguetas y vigas de contrapiso de concreto armado y pilotes de 40 m de largo y 0.6 m de diámetro. El movimiento de tierras representa 3.796,5 toneladas.

TIPO DE AREA	MEDIDA m <sup>2</sup>	DESCRIPCION
Área construida	9.762,0	Área de construcción cubierta sumando todos los pisos. No incluye áreas de vacíos y sótanos.
Área ocupada	678,1	Área ocupada en el suelo por el edificio

Áreas del proyecto



Descripción del uso de materiales en el edificio en peso (%), por categoría de componentes

GRUPO / COMPONENTE	MATERIALES	CANTIDAD O PESO (%)
Movimientos de tierra y excavación	Consumo de diésel por excavación mecánica y suelo	28% (suelo)
Drenaje y fontanería subterránea	Aparatos de drenaje Tubería de acero carbón redes contra incendio Tubería de cobre ACS Aislamiento para tubería ACS Tubería de cobre para gas Tubería PVC hidrosanitaria Mampostería cajas de inspección	0% Tubería de diferentes materiales principalmente
Cimientos	Concreto, acero y recebo	33%. Concreto y acero de refuerzo para vigas de cimentación y pilotes. Recebo de relleno.
Estructura	Acero de refuerzo Concreto	23%. Concreto, acero de refuerzo y formaleta metálica para muros y placas
Cubierta	Mortero y pañete 1:3 Impermeabilización	1%.
Muros	Muros bloque hueco de arcilla No.5, 12 cm de espesor	3%. Muros divisorios
Revestimientos	Mortero y pañete 1:3 Pisos y enchapes de cerámica o madera Impermeabilización de fachadas Estuco y pintura	11%. Principalmente por el mortero y pañete
Ventanas	Marco de aluminio Acristalamiento sencillo	0%
Eléctricos y electrónicos	Tubería de PVC Cables y aparatos eléctricos	0%
Renovables	Paneles fotovoltaicos y/o Turbinas mini eólicas	0%

Resumen de los materiales del edificio por componente

SUBCATEGORIAS	t	%	kg/m2
<b>Acero refuerzo</b>	<b>382,88</b>	<b>2,8%</b>	<b>39,2</b>
Aluminio	0,71	0,0%	0,1
Aparatos gas	0,08	0,0%	0,0
Aparatos drenaje	23,99	0,2%	2,5
Aparatos eléctricos	1,41	0,0%	0,1
Ascensor	4,60	0,0%	0,5
Cerramiento	0,53	0,0%	0,1
Cielorraso	85,05	0,6%	8,7
<b>Concreto 3000 psi</b>	<b>6.680,03</b>	<b>48,9%</b>	<b>684,3</b>
Contenedor	20,32	0,1%	2,1
Contra incendio gabinete	0,40	0,0%	0,0
Enchape	103,74	0,8%	10,6
Eólica	0,00	0,0%	0,0
Estuco	62,29	0,5%	6,4
<b>Excavación manual</b>	<b>1.309,70</b>	<b>9,6%</b>	<b>134,2</b>
<b>Excavación mecánica</b>	<b>2.486,81</b>	<b>18,2%</b>	<b>254,7</b>
Formaleta	83,13	0,6%	8,5
Fotovoltaica	1,03	0,0%	0,1
Impermeabilización	8,73	0,1%	0,9
<b>Mampostería</b>	<b>458,82</b>	<b>3,4%</b>	<b>47,0</b>
<b>Mortero y pañete 1:3</b>	<b>1.253,20</b>	<b>9,2%</b>	<b>128,4</b>
Pintura	17,34	0,1%	1,8

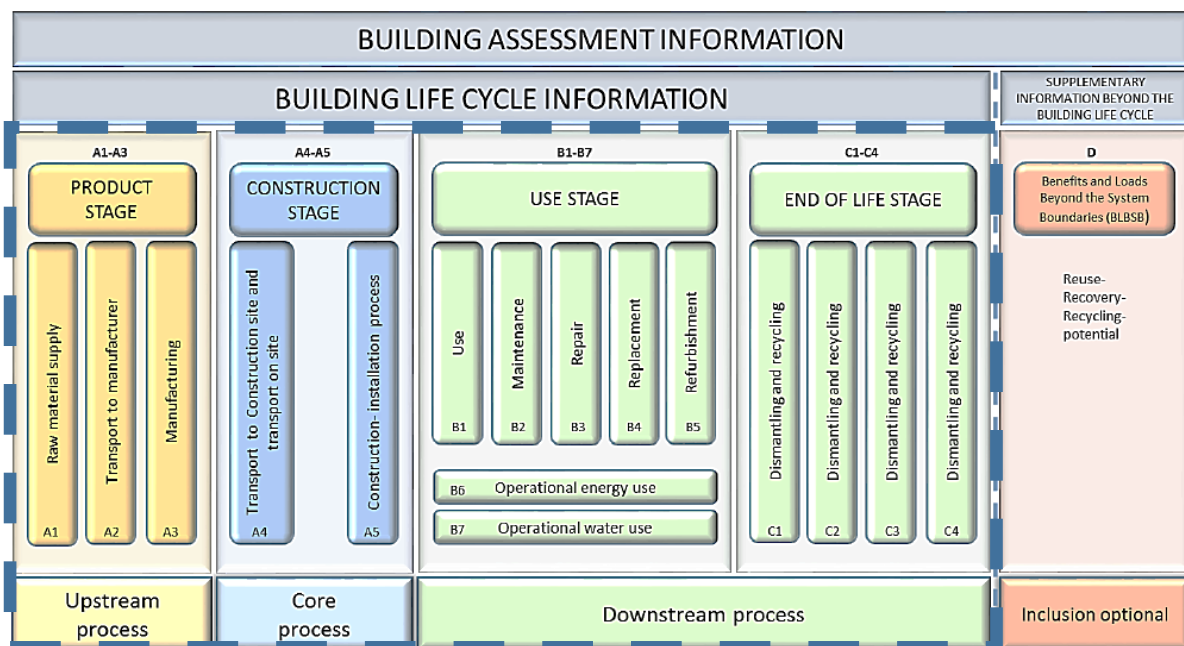
Piso cerámica	26,93	0,2%	2,8
Piso madera	50,10	0,4%	5,1
Puerta madera	4,87	0,0%	0,5
Puerta metálica	3,17	0,0%	0,3
<b>Recebo</b>	<b>544,29</b>	<b>4,0%</b>	<b>55,8</b>
Tubería acero carbón	1,21	0,0%	0,1
Tubería aislamiento	0,92	0,0%	0,1
Tubería cable eléctrico	3,03	0,0%	0,3
Tubería cobre	2,12	0,0%	0,2
Tubería polietileno gas	0,01	0,0%	0,0
Tubería pvc	10,52	0,1%	1,1
Vidrio	26,54	0,2%	2,7

### Límites del sistema

Se realizó una evaluación del ciclo de vida desde la cuna hasta la cuna (Upstream, Core, Downstream y D). La siguiente ilustración muestra las etapas incluidas en este análisis encerradas por la línea punteada. Los primeros módulos (A1-A3 y A4-A5) incluyen todas las actividades de adquisición de materias primas, transportes, fabricación de materiales de construcción (módulo A1-A3), transporte al sitio de construcción y construcción del edificio conceptual en el sitio (A4-A5), es decir, todo el material, energía y agua que se consume hasta que se construye el edificio conceptual.

La segunda parte de la evaluación del ciclo de vida (módulos B1-B7) contiene los aspectos ambientales de la fase de uso. Esto incluye el consumo de energía y agua, mantenimiento, reparaciones, reemplazos y renovaciones. Los reemplazos y renovaciones incluyen la producción, construcción / instalación y transporte de los materiales utilizados, así como el tratamiento de residuos de los productos de construcción e instalación reemplazados / renovados. Las reparaciones no incluyen transportes. El rendimiento ambiental se calcula para la vida útil requerida de 100 años, y en los resultados se ajusta al período de estudio de referencia de 50 años de acuerdo con la PCR para edificios.

El fin de vida y disposición final del edificio es parte de la evaluación (Módulos C1-C4), que incluye la demolición del edificio, el transporte para la eliminación del material y el tratamiento y eliminación de residuos. El módulo D, beneficios y cargas más allá del límite del sistema, no se incluye en el análisis.



Límites del sistema aplicados en este análisis



## ETAPAS DE CICLO DE VIDA

Diagrama de flujo de los procesos unitarios del ciclo de vida

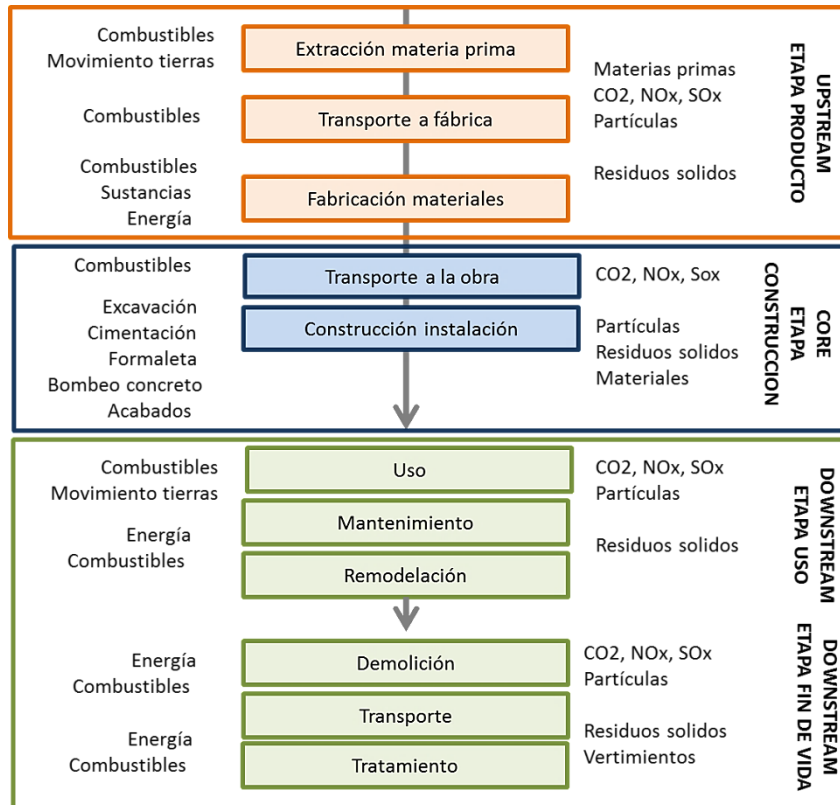


Diagrama de flujo del sistema

## DESCRIPCIÓN DE LOS LÍMITES DEL SISTEMA POR ETAPA

### Procedimiento de recopilación de datos



Aspectos tenidos en cuenta para el desarrollo del inventario

La recopilación de datos se basa en un listado de aproximadamente 250 ítems con las cantidades y pesos de los materiales que componen el edificio, lo cual permitió calcular rendimientos para transportar dichos materiales, la maquinaria necesaria para su puesta en obra hasta su ubicación final, y el cálculo de RCDs. Para el cálculo de

energía y agua operativa, se realizó una simulación energética y determinación de consumo de diferentes electrodomésticos, y cálculo de la demanda de agua con base en el número de personas y aparatos sanitarios.

Así mismo, se determinó la rehabilitación y remplazo de ciertos materiales, y para el cálculo de materiales al final de la vida útil del edificio se utilizaron las mismas cantidades de entrada, y de acuerdo a ellas se calculó el transporte hasta el vertedero y tratamiento final. Vala la pena resaltar que ciertas cantidades pertenecientes a cimentaciones fueron restadas de las cantidades de salida pues es común que estas queden en el lugar del proyecto luego de la demolición. En todas las etapas se aplicó un criterio de corte del 1%.

### **Etapa de producto, A1-A3**

Descripción de la etapa: la etapa de producto se subdivide en 3 módulos, A1, A2 y A3, que representan el “suministro de materias primas”, el “transporte” y la “fabricación” de materiales, respectivamente. La unificación de los módulos A1, A2 y A3 es una posibilidad que contempla la norma estándar EN 15804. En la presente DAP se aplica esta regla. Los escenarios e información técnica adicional comprenden:

#### **A1, Suministro de materias primas**

Este módulo tiene en cuenta la extracción y el procesado de todas las materias primas y la energía provenientes de fuentes primarias para la fabricación de los materiales de construcción utilizados en el prototipo conceptual.

#### **A2, Transporte a fábrica**

Transporte de las materias primas hasta la planta de fabricación.

#### **A3, Fabricación**

Este módulo incluye la fabricación de productos, además de envases/embalajes.

Esta etapa (A1-A3) ha sido calculada a partir de promedios de DAPs disponibles para cada material, y bibliografía especializada. Los materiales incluidos son acero de refuerzo, concreto armado de 3000 psi, mampostería de arcilla, recebo, mortero y pañete 1:3, el cual incluye cemento y arena. Se asume que los aspectos ambientales incluidos en dichas fuentes secundarias son:

Recuperación de materia prima

Transporte a la fábrica y dentro del sitio de la fábrica

Material de procesamiento

Recuperación de materiales secundarios de sistemas de productos anteriores.

Generación de energía (primaria y secundaria) que se utiliza como electricidad, vapor y calor, incluida la recuperación, refinación y transporte de combustibles.

Residuos generados en los procesos de fabricación.

Embalaje y desperdicio de materiales de embalaje

Los aspectos ambientales excluidos son procesos involucrados en la eliminación de productos anteriores al suministro de materias primas, y el posible embalaje reutilizado.

### **Etapa de construcción, A4-A5**

Descripción de la etapa: el proceso de construcción se divide en 2 módulos: “transporte a la obra”, A4, e “instalación”, A5. De acuerdo a lo estipulado en la PCR los resultados de los módulos A4 y A5 se muestran de forma agregada.

#### **A4, Transporte hasta y dentro de la obra**

Este módulo incluye el transporte de materiales y equipos de construcción desde la fábrica donde se han fabricado hasta la obra, en Bogotá, Colombia, incluyendo posibles pérdidas. El transporte se calcula sobre la base de un escenario cuyos parámetros característicos se describen en la siguiente tabla.

<b>A4</b>	
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR / DESCRIPCION</b>



Tipo de combustible y consumo del vehículo o tipo de medio de transporte utilizado, por ejemplo si se trata de un camión de larga distancia, un barco, etc.	Camión con remolque con una carga media de 19-22 t y un consumo diésel de 26 cada 100 km
Distancia	20 km para el suministro de materiales y equipos en obra, 40 km para transporte de residuos a vertedero; la importación de equipos de energía renovable cubre 8600 km. Estos datos son asumidos dado que no existe lote.
Capacidad de uso (incluyendo el retorno del transporte sin carga)	100 % de la capacidad, en volumen % de retornos vacíos asumidos en Ecoinvent 3.5
Densidad aparente del producto transportado	Diferente densidad en función del producto de la construcción
Factor de capacidad de uso, en volumen	No aplicable
Aspectos ambientales excluidos	El transporte del personal hacia / desde el sitio, las pérdidas o desperdicio en la fabricación de materiales y en el transporte, y la eliminación de materiales o productos que se dañan o pierden durante el transporte

### A5, Instalación en el edificio

Este módulo incluye aspectos como trabajos de suelo y paisajismo, almacenamiento de productos, transporte dentro del sitio, obras temporales, producción in situ, provisión de climatización y ventilación activa, instalación de los productos en el edificio, uso de agua para o limpieza, procesos de gestión de residuos, y producción, transporte y gestión de los mismos.

<b>A5</b>	
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR / DESCRIPCION</b>
Materiales auxiliares para la instalación (especificado por material)	Mortero, recebo, arena
Uso de agua	Agua consumida como parte del proceso para ciertos materiales, como de mortero y pañete, como componente imprescindible, para controles o pruebas, y Vertimientos a alcantarillado o cuerpos de agua
Uso de otros recursos	Formaleta metálica y uso temporal de contenedor
Descripción cuantitativa y consumo del tipo de energía (mix regional) durante el proceso de instalación. Diesel para la maquinaria utilizada en la obra	- Electricidad consumida en la obra - Diesel para la maquinaria utilizada y su transporte hacia y fuera de la obra, entre los que se destacan: torre grúa, excavadora, cargadora, autobomba de concreto y mezcladora de cemento
Desperdicio de materiales en el lugar de la obra, antes del procesado de residuos, generados durante la instalación del producto (especificados por tipo)	Varios de los procesos e instalación de materiales contemplan un desperdicio del 5% o 10%
Flujo de salida de materiales (especificados por tipo) resultantes del procesado de residuos en el lugar de la obra, por ejemplo durante la recogida para su reciclaje, recuperación (valorización) energética o vertido (especificando la ruta)	Se ha considerado el transporte interno y externo de RCD de naturaleza no pétreo, de naturaleza pétreo, residuos peligrosos y de tierra de excavación
Emisiones directas al aire, suelo y agua	-
Aspectos ambientales excluidos	- Los residuos derivados de los materiales (mermas), las cuales se envían al vertedero - Procesos de producción adicionales para compensar las pérdidas - Procesado de los residuos derivados de envases y embalajes, que son 100% recogidos y 100% transformados y reducidos a sus componentes elementales (material recuperado)

### **Etapas de uso (excluyendo posibles ahorros), B1-B7**

Una vez que la instalación se ha completado, se requiere las siguientes acciones u operaciones técnicas durante las etapas de uso hasta el fin de vida. La etapa de uso del producto se subdivide en los siguientes módulos:

#### **B1, Uso**

Informa sobre actividades, materiales y emisiones relacionadas con los usos normales del edificio que no están cubiertos por los Módulos B2-B7. Aspectos ambientales excluidos son los Impactos del aire interior de los materiales interiores, ni la descarga de material desde fachadas y techos al aire, suelo o agua.

#### **B2, Mantenimiento**

El módulo B2 incluye el mantenimiento programado que se requiere en el trabajo diario de las operaciones de construcción, incluido el mantenimiento continuo de la propiedad, el mantenimiento preventivo, así como la limpieza o el reemplazo / mantenimiento de piezas desgastadas.

<b>B2</b>	
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR / DESCRIPCION</b>
Proceso de mantenimiento	Limpieza y repintado
Ciclo de mantenimiento	Limpieza semanal de enchapes Repintado cada 5 años
Materiales auxiliares para el mantenimiento, p. ej. productos de limpieza	Jabón: 5ml/l de agua
Producción de residuos durante el mantenimiento	-
Consumo de agua durante el mantenimiento	Uso general: 79 m3/mes Limpieza de enchapes 3.458 m3/mes
Entrada de energía durante el mantenimiento, tipo de energía y cantidad si es aplicable y relevante	Producción y transporte de componentes utilizados para el mantenimiento.
Aspectos ambientales excluidos	Gestión final de los componentes utilizados para el mantenimiento.

#### **B3, Reparación**

Se refiere a medidas que normalmente no se programan durante la vida útil del edificio, como el manejo preventivo de un producto cuando está roto, dañado o fuera de servicio, de modo que se logre la función y el rendimiento requeridos. Si no hay datos disponibles para edificios nuevos, se puede omitir, lo cual debe explicarse y justificarse a fondo.

<b>B3</b>	
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR / DESCRIPCION</b>
Proceso de reparación	-
Proceso de inspección	-
Ciclo de reparación	-
Materiales auxiliares	-
Residuos generados durante la reparación	-
Consumo de agua durante la reparación	-
Entrada de energía durante la reparación, tipo de energía y cantidad si es aplicable y relevante	-
Aspectos ambientales excluidos	- Producción de partes reparadas de un componente - Proceso de reparación - Procesos al final de la vida útil de cualquier desperdicio de reparación - Transporte para conserjes hacia y desde la propiedad

#### B4, Reemplazo

Se refiere cuando un material, parte del edificio o instalación se cambia por un nuevo producto debido al fin de su vida útil.

<b>B4</b>	
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR / DESCRIPCION</b>
Ciclo de reemplazo	Pisos madera 1 reemplazo (v.u. 25 años), impermeabilización de fachadas 4 reemplazos (v.u. 10 años), equipos de energía renovable 1 reemplazo (v.u. 30 años)
Entrada de energía durante el reemplazo, tipo de energía y cantidad si es aplicable y relevante	Transporte de materiales reemplazados hasta el edificio y diesel del transporte
Intercambio de las partes desgastadas durante el ciclo de vida del producto	-
Aspectos ambientales excluidos	- Pérdidas o desperdicio en la fabricación de materiales y en el transporte, y la eliminación de materiales o productos que se dañan o pierden durante el transporte - Escenarios de residuos para los materiales de construcción intercambiados / descartados.

#### B5, Rehabilitación

Este módulo parte de un programa de mantenimiento coordinado y planificado para la renovación, el cual incluye una parte significativa o una sección completa del edificio. Suele incluir datos sobre el sistema HVAC y el transporte para los reemplazos.

<b>B5. REHABILITACION</b>	
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR / DESCRIPCION</b>
Proceso de rehabilitación	-
Ciclo de rehabilitación	-
Entrada de energía durante la rehabilitación, tipo de energía y cantidad si es aplicable y relevante	-
Entrada de materiales para la rehabilitación incluyendo materiales auxiliares	-
Residuos generados durante la rehabilitación	-
Otras hipótesis para el desarrollo del escenario	-
Aspectos ambientales excluidos	Escenarios de residuos para los materiales de construcción intercambiados / descartados.

#### B6, Uso operativo de energía

La energía utilizada en la fase de operación de los sistemas técnicos que están integrados en el edificio, así como equipos instalados que respaldan la operación de un edificio.

<b>B6</b>	
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR / DESCRIPCION</b>
Materiales auxiliares especificados por material	-
Fuente energética	Electricidad 104.524,69 kwh/ año Aporte de renovables 14.110,4 kwh/ año
Potencia de los equipos	-
Características del rendimiento	Climatización: 0,0 kwh/ año Agua caliente 67.189,2 kwh/ año Iluminación 33.721,9 kwh/ año Zonas comunes internas 3.613,5 kwh/ año
Otras hipótesis para el desarrollo del escenario	Cada vivienda está ocupada por 4 personas

Aspectos ambientales excluidos	- Consumo eléctrico doméstico (computadoras, lavavajillas, televisores, etc.) - Posible proporción de calor desde el distrito por recuperación de energía (incineración)
--------------------------------	---

### B7, Uso operativo de agua

Este módulo incluye el consumo de agua dulce (agua potable) durante la operación de los sistemas técnicos integrados del edificio, junto con los aspectos e impactos ambientales asociados considerando el ciclo de vida del agua, incluida la producción, el transporte y el tratamiento de aguas residuales.

B7	
PARAMETRO	VALOR / DESCRIPCION
Materiales auxiliares especificados por material	-
Consumo de agua	59,9 m3/día
Características del rendimiento	2 duchas, 96 lt/uso 2 grifos 8,3 lt/uso 2 sanitarios, 6 lt/uso 3 grifos complementarios, 8,3 lt/uso
Otras hipótesis para el desarrollo del escenario	Cada vivienda está ocupada por 4 personas
Aspectos ambientales excluidos	Agua requerida para el uso o reposición de los rociadores

### Etapa de fin de vida útil, C1-C4

En esta fase se incluyen los diferentes módulos que se detallan a continuación:

#### C1, Deconstrucción, demolición

Deconstrucción, desmantelamiento y/o demolición del edificio, incluida la clasificación de los materiales en el sitio y el consumo de diésel.

C1	
PARAMETRO	VALOR / DESCRIPCION
Consumo de energía	Diesel usado por la maquinaria para demoler, entre las que se encuentran: - Excavadora con martillo hidráulico y pinzas - Movimiento material demolición con cargadora hacia transporte final
Aspectos ambientales excluidos	Desmontaje manual de equipos y su consumo eléctrico

#### C2, Transporte del producto desechado hasta el lugar de procesado

Los residuos de demolición son transportados hasta el gestor de residuos o centro de procesamiento para su reciclaje, eliminación, tratamiento, deposición en vertedero controlado u otra disposición final. En este caso, todo el material se dirige al vertedero de manera controlada.

C2	
PARAMETRO	VALOR / DESCRIPCION
Consumo de agua	-
Consumo de energía	Diesel usado por la maquinaria para el transporte, entre las que se encuentran: - Distancia de transporte ida y vuelta de maquinaria para demoler - Diesel transporte de maquinaria para demoler

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distancia de transporte material demolido</li> <li>- Diesel transporte material demolido</li> </ul>
--	--

### C3, Procesado de residuos para su reutilización, recuperación y/o reciclaje

Tratamiento de residuos destinados a reutilización, reciclaje y/o recuperación de energía hasta que dejen de ser residuos. Se consideran tanto los materiales para la recuperación de energía que han alcanzado su fin de vida, como los residuos que van directamente a vertedero sin reutilizar, recuperar o reciclar.

C3	
PARAMETRO	VALOR / DESCRIPCION
Consumo de energía y/ agua para procesos	-
Aspectos ambientales excluidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pretratamiento de residuos no destinados a reutilización, reciclaje o recuperación de energía.</li> <li>- Cuando los residuos se clasifican como material secundario / combustible para reutilización / reciclaje / recuperación de energía, se asignan al material o edificio que compra / utiliza dicho material secundario de acuerdo con el principio "quien contamina paga".</li> </ul>

### C4, Vertido (eliminación), pre-tratamiento físico y gestión

Cargas ambientales derivadas de la disposición final de residuos de demolición, como neutralización, incineración y/o vertedero, y la gestión de disposición final de residuos, por tanto, incluye el equipo utilizado para estos procesos. En este caso, la totalidad de los residuos surgidos de la demolición son depositados en vertedero.

C4	
PARAMETRO	VALOR / DESCRIPCION
Proceso de recogida de residuo especificado por tipo	14.490,4 tn recolectadas mezcladas con residuos de la construcción
Sistema de recuperación especificado por tipo	0 tn para reutilización, reutilización o reciclaje
Vertido especificado por tipo	14.490,4 tn de residuos de la construcción mezclados a vertedero
Potencia de los equipos	-
Supuestos para el desarrollo del escenario	Camión con remolque con una carga media de 16-32 t y un consumo diésel de 26 litros
Tipo de residuos generados	<ul style="list-style-type: none"> <li>Residuos de naturaleza no pétreo</li> <li>Residuos de naturaleza pétreo</li> <li>Residuos peligrosos</li> </ul>

### Reutilización/recuperación/ potencial de reciclaje, D

No se ha tomado en cuenta esta etapa, en tanto es opcional.

### Límites a otros sistemas

LÍMITE DE SISTEMA	ASPECTOS AMBIENTALES INCLUIDOS
A sistemas naturales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recursos materiales y energéticos que se extraen de la naturaleza a los sistemas del edificio.</li> <li>- <del>Emisiones al aire, agua y suelo de los sistemas de construcción.</del></li> </ul>
En el tiempo	- Las EPD cubren los últimos diez años.

	- El período de tiempo durante el cual las emisiones contribuyen al efecto invernadero se establece en 100 años (GWP100).
Límites geográficos en la modelación	- Los flujos de energía y materiales han sido elegidos para ser representativos del país en el que se llevan a cabo los procesos. - la información sobre dónde se han fabricado los materiales / componentes de construcción se ha tenido en cuenta al utilizar datos genéricos, utilizando datos promedio a nivel global privilegiando los datos de América Latina si existen.
A otros sistemas	- Asignaciones son expuestas más adelante y según el principio de “quien contamina paga”.

## ESCENARIOS GENERALES Y SUPUESTOS

- El uso de materiales reciclados y reutilizados (materiales secundarios) y el uso de combustibles secundarios renovables y no renovables durante la fabricación de materiales se declaran en los módulos A1 – A3 a través de DAP.
- La selección y cantidades de materiales para el edificio conceptual se basan en estimaciones para diferentes materiales según la instalación técnica a ejecutar.
- Debido a la naturaleza conceptual del edificio, no se han seleccionado proveedores específicos de los materiales empleados. La experiencia del realizador de este ACV sirvió como criterio para la selección de los productos integrados que representan las entradas.
- Se consultaron diferentes fuentes para establecer la vida útil estimada de diferentes componentes de la construcción y así mismo su reemplazo, desviándose del estándar ISO 15686. Por ejemplo [https://www.homify.com.mx/libros\\_de\\_ideas/45183/7-grandes-ventajas-de-los-pisos-laminados](https://www.homify.com.mx/libros_de_ideas/45183/7-grandes-ventajas-de-los-pisos-laminados)
- <https://obrasinsignia.com/blog/tutorial-impermeabilizantes/>
- Todas las cantidades de materiales del edificio se basan en cálculos hechos a partir de la planta tipo del edificio y repetida por el número total de pisos (15). Los procedimientos y maquinaria necesaria para la construcción se basan en las prácticas típicas de cada sistema constructivo, que en este caso es industrializado tipo túnel basado en concreto.
- Las estimaciones de materiales e instalaciones fueron compiladas y clasificadas por componente, y peso. Los productos que tenían la menor cantidad y el menor peso se han separado y no se han calculado para que los cálculos sean conservadores.
- No se aplican sistemas de climatización porque el clima frío y continuo durante el año no lo hace necesario. En la ciudad de Bogotá es común no aplicar estas instalaciones.
- Se ha asumido una distancia de 20 km para realizar los cálculos de obtención de materiales y maquinaria que incluye el transporte de los materiales desde su puesto de venta (almacén o depósito) hasta la obra, el transporte ida y vuelta de la maquinaria necesaria (como excavadora, autobomba de concreto, cargadora, torre grúa, mezcladora de cemento), y el transporte fuera de obra de los RCD generados en obra, y posteriormente, en la demolición hacia el vertedero, cuya distancia asumida es de 40 km.
- Para la estimación de RCD de obra y demolición, se ha utilizado el archivo Excel para gestión de residuos de construcción realizado por el Arquitecto Oscar Redondo Rivera que se puede, y contrastado con la aplicación web EEH Aurrezten en la web <http://www.ihobe.eus>.
- El tiempo de construcción se establece en 6 meses.
- Los impactos ambientales del transporte se basan en datos europeos genéricos de EcoInvent, y para el transporte por camión se adoptó la clase ambiental EURO4.

- Durante las etapas de construcción y operación del edificio conceptual, se adoptó el mix eléctrico colombiano.
- No se considera ningún sistema de distrito térmico.
- Para establecer la demanda de energía operativa se contrastaron datos de simulación energética realizada con el software Design Builder y el perfil de consumo realizado con cada equipo de uso cotidiano en una vivienda y que fueron contrastados con viviendas reales. Por esta razón se escogió este último.
- Los datos de generación de energía renovable en sitio se basaron en el mes con radiación solar más bajo y/o la de viento aportado por los servicios meteorológicos (IDEAM).
- A pesar del carácter conceptual del edificio, se ha evitado realizar sobreestimaciones o despreciar procesos o materiales.
- La cimentación del edificio fue pre dimensionada de acuerdo con cálculos de un ingeniero estructural.
- La evaluación ambiental producto del desmantelamiento manual de las instalaciones en el módulo C1 fue desestimada por falta de datos primarios y secundarios (literatura).
- Se supone que toda la demolición se lleva a cabo utilizando una excavadora con martillo hidráulico y pinzas y una cargadora para realizar el movimiento de RCD. Para la demolición de un edificio de estas características, se requeriría de una carga explosiva con dinamita que provoque una implosión capaz de derrumbar los 15 pisos de concreto, sin embargo, esto no se incluye dado que no existen datos confiables para estimar las cantidades.
- La normativa vigente sobre gestión de residuos para la construcción y la demolición es la Resolución 472 de 2017 del Ministerio de Ambiente, que insta a formular, implementar y mantener actualizado un Programa de Manejo Ambiental de RCD o entregar los residuos a un gestor de RCD para que este realice las actividades de recolección y transporte hasta puntos limpios, de aprovechamiento o disposición final. Por tanto no se asume ningún tipo de reuso o reciclaje al final de la vida útil o para el mantenimiento porque dichos procedimientos son ejecutados por terceros y sin certeza.

## **DATOS DE ENTRADA Y CALIDAD DE DATOS**

Para calcular la cantidad de materiales de construcción requeridos, se realizó un ejercicio de cuantificación y especificación a partir de la planimetría digital en CAD (similar para costos y presupuestos) y la elaboración de un “paquete primario” que es un listado con parámetros geométricos, energéticos y de consumo frente a una línea base estandarizada ajustada a las condiciones locales, es decir, las prácticas constructivas típicas para este tipo de edificios.

Igualmente, a partir del predimensionamiento estructural de la cimentación, el sistema constructivo, y el diseño de redes eléctricas, gas, contraincendio, agua potable, hidrosanitarias sobre la planta tipo, se calcularon las cantidades y especificaciones de los diferentes materiales y actividades requeridos para el proyecto, apoyado con memorias de cálculo de los diferentes elementos. Con tal base, se calcularon las actividades de obra como maquinaria, generación de RCD, los trayectos de transporte, y energía y agua consumida. Así mismo, los remplazos de componentes, mantenimientos y consumos de agua y energía durante el uso del edificio (operativos), y finalmente, maquinaria, generación de RCD, trayectos de transporte, y energía consumida en la demolición del edificio al final de su vida útil después de 50 años. Este procedimiento es prácticamente el mismo para planificar los costos y cantidades de un edificio previo a su construcción.

Para las etapas de uso del edificio se ha calculado a partir de matrices en Excel los consumos de energía y agua operativa, incluyendo agua caliente, iluminación, zonas comunes internas y renovables, así como el mantenimiento con el lavado de enchapes (agua y jabón), pintura interior, y acciones de remplazo de equipos por el fin de su vida útil como bombillos LED, pisos de madera, equipos de energía renovable, e impermeabilización de fachadas y de cubierta. El tratamiento de agua caliente se hace con ducha eléctrica, es decir, que este empleo se ve reflejado en el consumo eléctrico.

Al tratarse de un prototipo residencial sin una localización específica, y no contar con información de proveedores de los materiales, los datos de impactos de las etapas A1-A3 fueron asumidos utilizando promedios a partir de hasta 3 diferentes declaraciones ambientales de producto DAP tomados de diferentes plataformas (<https://www.environdec.com>, <https://www.eco-platform.org>), Ecoinvent, y datos sobre carbono y energía embebida de autores como Muñoz, 2013, Zabalza, 2010, Ecoingeniería, 2012, y las base de datos ICE v 3.0 y Bedec del ITeC. Estas DAP utilizadas no mayores a 5 años fueron auditadas por terceros que cumplen con la norma EN 15804 y sus datos se consideran de alta calidad.

En esta caso no fue posible acceder a materiales que cuenten con un Building Product Declaration BPD3, Ecoetiqueta tipo I pública, o una DAP publicada específica para productos fabricados en Colombia, teniendo en cuenta los materiales que fueron estudiados.

No hay datos disponibles para las emisiones biogénicas para su análisis, y sumado a las grandes incertidumbres de los datos genéricos, no se declararon las emisiones biogénicas de dióxido de carbono.

A pesar de que se trata de un edificio conceptual y no existente, y el nivel de incertidumbre aumenta frente a la alta variabilidad de los materiales y los consumos reales, se considera que la brecha de los materiales y componentes faltantes es mínima debido al detalle logrado en el proceso de cuantificación. De esta manera se puede afirmar que las cantidades de materiales faltantes están por debajo del margen de error de <1% de la cantidad total, y el margen de error ponderado para todo el impacto ambiental de los materiales puede ser mayor, sin embargo se mantiene por debajo del 5%.

Todos los datos sobre materiales, equipos y actividades de construcción del edificio conceptual se recopilan en la herramienta de evaluación del ciclo de vida SimaPro versión 9.0.0.49 Analyst.

### **Incertidumbres dentro de los factores de caracterización ambiental**

Hasta aproximadamente el 80% de todos los datos genéricos en EcoInvent 3.5 contienen incertidumbres. El factor de caracterización ambiental de calentamiento global (GWP100a) contiene datos que son los más confiables, con un rango de confianza entre  $\pm 5-10\%$ , llegando a un nivel del 95% para las etapas A1-A5, B1-B7 y C1-C4.

Las incertidumbres para los demás factores de caracterización varían entre  $\pm 5-50\%$  para las etapas A1-A5, B1-B7 y C1-C4. Los datos genéricos cumplen una función importante ya que los proveedores que no están directamente relacionados con el edificio conceptual pueden variar, especialmente con respecto a los productos de las instalaciones técnicas.

Todos los datos específicos de las DAP recopilados para las etapas A1-A3 son más confiables que los datos genéricos, debido a su rigurosidad y el estar auditados por una tercera parte. Normalmente, las DAP se han utilizado para caracterizar los edificios conceptuales que incorporan diferentes clases de materiales.

### **CORTES**

Se estima que las cantidades de materiales faltantes están por debajo del margen de error de <1% de la cantidad total de materiales y actividades. Sin embargo, el margen de error ponderado para todo el impacto ambiental de los materiales se mantiene por debajo del 5%. Los cortes realizados para la modelación del edificio conceptual se describen a continuación.

<b>Módulo</b>	<b>Parte del Inventario ICV</b>	<b>Corte</b>
A4	Perdidas en el transporte	Las pérdidas de material o desperdicio debidas al transporte a la obra se han suprimido, ya que son difíciles de estimar. Se estima que representan menos del 1% de todo el material transportado.
B3	Energía consumida en reparaciones y mantenimiento	La energía utilizada para reparaciones y mantenimiento se han suprimido. Se estima que es inferior al 1%.



B4 - B5	Perdidas en el transporte	Las pérdidas de material o desperdicio debidas al transporte a la obra se han suprimido, ya que son difíciles de estimar. Se estima que representan menos del 1% de todo el material transportado.
C1	Desmantelamiento o demolición manual	No existen suficientes datos de partida para establecer el consumo de energía del desmantelamiento o demolición manual de los materiales. La literatura muestra que el consumo de energía en el desmantelamiento manual es casi inexistente. Se estima que este representa menos del 1% de la carga ambiental total para el módulo C1.

## ASIGNACIÓN

El procedimiento de asignación se divide en dos categorías: la asignación de coproductos y la asignación para reutilización y reciclaje. La asignación para varios datos de entrada es la siguiente:

En general, para todas las entradas se ha aplicado una asignación de contenido de masa y energía.

No se han utilizado datos específicos de un fabricante o proveedor representado por alguna DAP.

Cuando no se cuenta con información específica de algún proveedor relacionado con un material de construcción, se usan los datos genéricos de EcoInvent (3.5) sin modificaciones. La asignación para la coproducción se lleva a cabo de acuerdo con el método de EcoInvent, es decir, la asignación económica.

La asignación para reutilización y reciclaje se realiza utilizando el método de corte.

## CATEGORÍAS DE IMPACTO EVALUADAS

### Calentamiento global

Es el aumento en el tiempo, de la temperatura media de la atmósfera terrestre y de los océanos por actividades humanas, principalmente por las emisiones de CO<sub>2</sub> que incrementaron el efecto invernadero, en el cual, la radiación de calor de la superficie del planeta es absorbida por los gases de la atmósfera, y es emitida de nuevo en todas direcciones, permitiendo el paso de la luz y manteniendo el calor.

### Agotamiento del ozono troposférico

Los gases artificiales como los Cloro Fluoro Carbonos CFC (que contienen cloro), son una descomposición de dos moléculas de ozono en tres moléculas de oxígeno, y es una sustancia que destruye las moléculas de ozono, al atrapar un átomo de la molécula de ozono y la convierten en oxígeno común.

El bromuro de metilo es un gas utilizado en la producción hortícola para esterilizar suelos que reacciona como catalizador en la reacción con el ozono. Entre las consecuencias está el cáncer de piel, afectación del sistema inmunológico humano, y afectación de ecosistemas acuáticos y terrestres.

### Acidificación

Comúnmente conocida como lluvia ácida, engloba cualquier forma de precipitación que presente elevadas concentraciones de ácido sulfúrico y nítrico. Es una de las consecuencias de la contaminación atmosférica, producida cuando emisiones contaminantes como óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y trióxido de azufre, provenientes de las fábricas, automóviles o por procesos unitarios se mezclan con agua y otros compuestos húmedos de la atmósfera y se transforman en ácido sulfuroso, ácido nítrico y ácido sulfúrico.

La acidificación del suelo es el proceso por el cual el suelo absorbe cationes de hidrógeno, reduciendo su pH. Una de sus consecuencias es la alteración de la composición química y pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, afectando lagos, ríos, arroyos, pantanos y otros medios acuáticos.

### **Eutrofización**

Es un proceso de enriquecimiento de nutrientes en un ecosistema acuático, principalmente con nitratos y fosfatos, y es una de las formas de contaminación más importantes en los ecosistemas acuáticos. Entre sus causas se encuentra la contaminación atmosférica por óxidos de azufre y nitrógeno que reaccionan con el agua atmosférica, la contaminación agropecuaria con fertilizantes o excrementos, la contaminación urbana mediante residuos orgánicos e inorgánicos como el fosfato de detergentes.

El proceso contempla el crecimiento desmedido de plantas, algas y fitoplancton, el aumento de turbidez en el agua y el exceso de material orgánico que impide el paso de luz solar, la falta de oxígeno en el agua provoca muerte de peces y plantas, descomposición de materia orgánica, aparición de bacterias, algas tóxicas y mal olor. Entre las consecuencias se puede apreciar la disminución de la calidad del agua, problemas de salubridad, desecación, y reducción de capacidad de carga de cuerpos hídricos.

### **Radiación ionizante**

La radiación ionizante es un tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas (rayos gamma o rayos X) o partículas (partículas alfa y beta o neutrones). La desintegración espontánea de los átomos se denomina radiactividad, y la energía excedente emitida es una forma de radiación ionizante. Los elementos inestables que se desintegran y emiten radiación ionizante se denominan radionúclidos. Por tanto, es un tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas o partículas.

Las personas están expuestas a fuentes naturales de radiación ionizante, como el suelo, el agua o la vegetación, así como a fuentes artificiales, tales como los rayos X y algunos dispositivos médicos. A medida que aumenta el uso de las radiaciones ionizantes también lo hacen los posibles peligros para la salud si no se utilizan o contienen adecuadamente. Cuando las dosis de radiación superan determinados niveles pueden tener efectos agudos en la salud, tales como quemaduras cutáneas o síndrome de irradiación aguda, mientras que las dosis bajas pueden aumentar el riesgo de efectos a largo plazo, tales como el cáncer<sup>96</sup>.

## **DESEMPEÑO AMBIENTAL DEL EDIFICIO**

El modelo de ACV, el registro de datos y el impacto medioambiental se han calculado utilizando el software de ACV Simapro 9.0.0.49 Analyst. Se ha utilizado el modelo de impacto ReCiPe 2016 v1.1 midpoint method, Hierarchist version, junto con la base de datos de ACV Ecoinvent 3.5 y EPDs de materiales registrados y vigentes para la obtención de los datos de inventario de los procesos genéricos. El modelo de Impacto EDIP 2003 ha sido utilizado para el cálculo de los indicadores de residuo. El inventario de las materias primas utilizadas han sido calculados con base en la planimetría, y los residuos de acuerdo a calculadoras que se basan en promedios generados en toneladas y m<sup>3</sup> según los m<sup>2</sup> de construcción. El consumo de agua y energía han sido también calculados con simulación energética y hojas de cálculo según las características comunes en este tipo de edificios en la ciudad. Los resultados se muestran para la totalidad de m<sup>2</sup> construidos del edificio sin considerarse el área climatizada (Atemp), pues este sistema no se aplica.

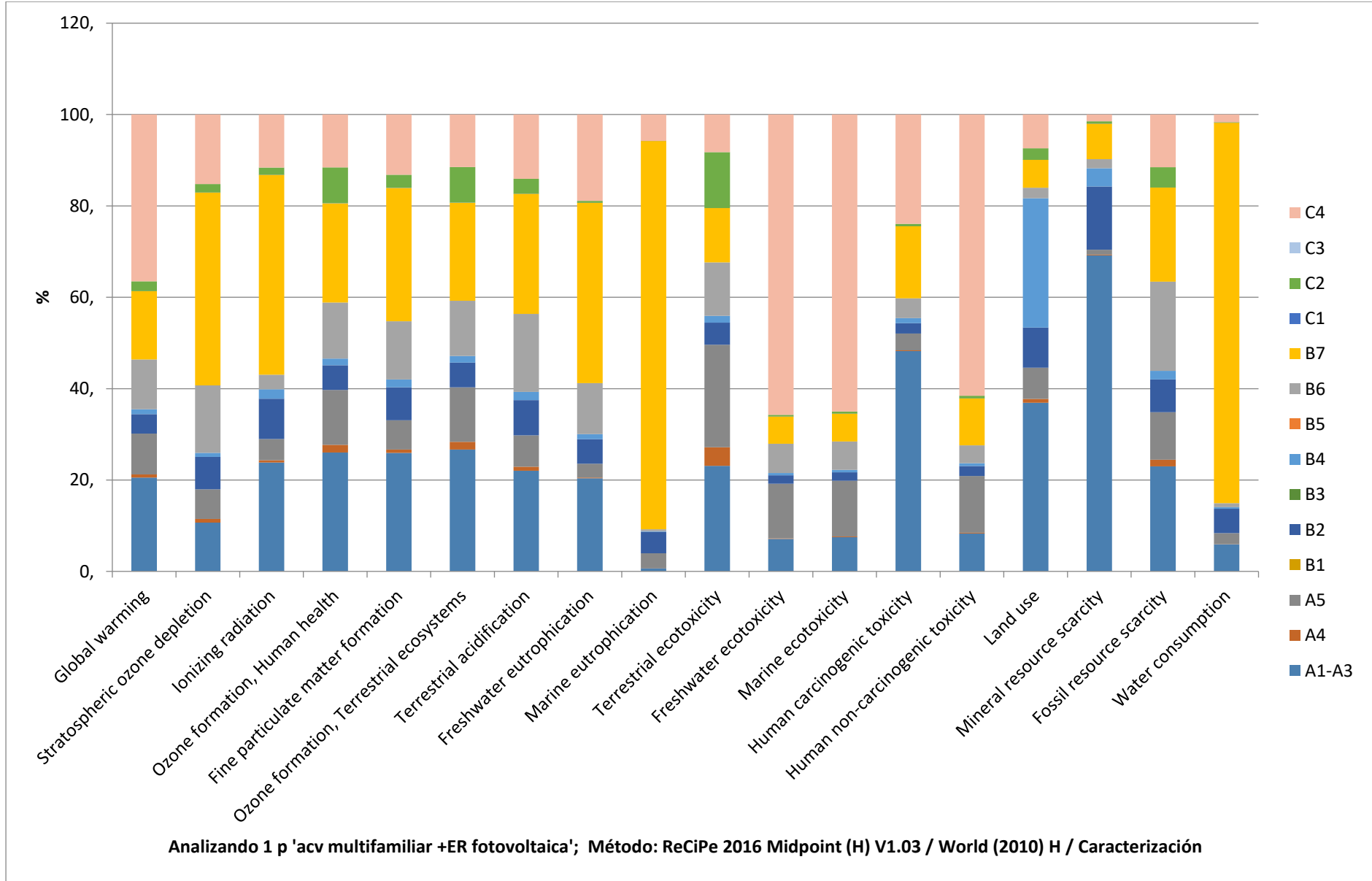
---

<sup>96</sup> <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>

## Impacto ambiental potencial

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDAD	UPSTREAM	CORE	DOWNSTREAM										
		Producto A1-A3	Construcción A4-A5	Uso B1-B7							Fin de vida útil C1-C4			
		A1-A3 Producto	A4-A5 Construcción	B1 Uso	B2 Mantenimiento	B3 Reparación	B4 Reemplazo	B5 Rehabilitación	B6 Uso de energía	B7 Uso de agua	C1 Deconstrucción	C2 Transporte	C3 Tratamiento res	C4 Vertido Residuos
Global warming	kg CO2 eq /UF	1,81E+02	8,51E+01	0,00E+00	3,75E+01	0,0E+00	9,46E+00	0,00E+00	9,61E+01	1,32E+02	6,41E-02	1,91E+01	0,00E+00	3,22E+02
	kg CO2 eq total	1,77E+06	8,31E+05	0,00E+00	3,66E+05	0,00E+00	9,23E+04	0,00E+00	9,38E+05	1,28E+06	6,26E+02	1,87E+05	0,00E+00	3,14E+06
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq /UF	3,79E-05	2,58E-0	0,00E+00	2,52E-05	0,0E+00	3,18E-06	0,00E+00	5,23E-05	1,50E-04	3,71E-08	6,47E-06	0,00E+00	5,40E-05
	kg CFC11 eq total	3,70E-01	2,52E-01	0,00E+00	2,46E-01	0,00E+00	3,10E-02	0,00E+00	5,11E-01	1,46E+00	3,63E-04	6,32E-02	0,00E+00	5,27E-01
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq /UF	5,01E+00	1,09E+00	0,00E+00	1,86E+00	0,0E+00	4,29E-01	0,00E+00	6,76E-01	9,20E+00	8,86E-04	3,31E-01	0,00E+00	2,44E+00
	kBq Co-60 eq /total	4,89E+04	1,06E+04	0,00E+00	1,81E+04	0,00E+00	4,19E+03	0,00E+00	6,59E+03	8,98E+04	8,65E+00	3,23E+03	0,00E+00	2,38E+04
Ozone formation, Human health	kg NOx eq /UF	4,39E-01	2,31E-01	0,00E+00	9,12E-02	0,0E+00	2,48E-02	0,00E+00	2,07E-01	3,66E-01	4,37E-04	1,32E-01	0,00E+00	1,95E-01
	kg NOx eq total	4,28E+03	2,26E+03	0,00E+00	8,90E+02	0,00E+00	2,42E+02	0,00E+00	2,02E+03	3,58E+03	4,27E+00	1,29E+03	0,00E+00	1,90E+03
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq /UF	2,84E-01	7,80E-02	0,00E+00	7,92E-02	0,0E+00	1,91E-02	0,00E+00	1,39E-01	3,20E-01	9,87E-05	3,15E-02	0,00E+00	1,44E-01
	kg PM2.5 eq total	2,77E+03	7,61E+02	0,00E+00	7,73E+02	0,00E+00	1,87E+02	0,00E+00	1,36E+03	3,12E+03	9,64E-01	3,07E+02	0,00E+00	1,41E+03
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq /UF	4,61E-01	2,36E-01	0,00E+00	9,35E-02	0,0E+00	2,55E-02	0,00E+00	2,09E-01	3,71E-01	4,45E-04	1,34E-01	0,00E+00	1,99E-01
	kg NOx eq total	4,50E+03	2,30E+03	0,00E+00	9,13E+02	0,00E+00	2,49E+02	0,00E+00	2,04E+03	3,62E+03	4,35E+00	1,31E+03	0,00E+00	1,94E+03
Terrestrial acidification	kg SO2 eq /UF	4,99E-01	1,75E-01	0,00E+00	1,74E-01	0,0E+00	4,13E-02	0,00E+00	3,86E-01	5,95E-01	2,27E-04	7,39E-02	0,00E+00	3,18E-01
	kg SO2 eq total	4,87E+03	1,71E+03	0,00E+00	1,70E+03	0,00E+00	4,03E+02	0,00E+00	3,76E+03	5,81E+03	2,22E+00	7,22E+02	0,00E+00	3,10E+03
	kg P eq /UF	7,35E-02	1,15E-02	0,00E+00	1,93E-02	0,0E+00	4,03E-03	0,00E+00	4,03E-02	1,42E-01	2,93E-06	1,52E-03	0,00E+00	6,82E-02

<b>Freshwater eutrophication</b>	kg P eq total	7,18E+02	1,12E+02	0,00E+00	1,89E+02	0,00E+00	3,93E+01	0,00E+00	3,93E+02	1,39E+03	2,86E-02	1,49E+01	0,00E+00	6,66E+02
<b>Marine eutrophication</b>	kg N eq /UF	4,34E-03	2,00E-02	0,00E+00	2,89E-02	0,0E+00	9,07E-04	0,00E+00	2,63E-03	5,22E-01	2,23E-07	1,19E-04	0,00E+00	3,54E-02
	kg N eq total	4,24E+01	1,95E+02	0,00E+00	2,82E+02	0,00E+00	8,85E+00	0,00E+00	2,56E+01	5,10E+03	2,17E-03	1,16E+00	0,00E+00	3,46E+02
<b>Terrestrial ecotoxicity</b>	kg 1,4-DCB /UF	4,71E+02	5,41E+02	0,00E+00	9,85E+01	0,0E+00	3,05E+01	0,00E+00	2,39E+02	2,42E+02	5,79E-02	2,50E+02	0,00E+00	1,68E+02
	kg 1,4-DCB total	4,60E+06	5,28E+06	0,00E+00	9,62E+05	0,00E+00	2,98E+05	0,00E+00	2,34E+06	2,36E+06	5,65E+02	2,44E+06	0,00E+00	1,64E+06
<b>Freshwater ecotoxicity</b>	kg 1,4-DCB /UF	5,89E+00	1,01E+01	0,00E+00	1,50E+00	0,0E+00	4,36E-01	0,00E+00	5,30E+00	4,98E+00	2,51E-04	2,90E-01	0,00E+00	5,46E+01
	kg 1,4-DCB total	5,75E+04	9,82E+04	0,00E+00	1,47E+04	0,00E+00	4,26E+03	0,00E+00	5,18E+04	4,86E+04	2,45E+00	2,83E+03	0,00E+00	5,33E+05
<b>Marine ecotoxicity</b>	kg 1,4-DCB /UF	8,34E+00	1,37E+01	0,00E+00	2,06E+00	0,0E+00	6,13E-01	0,00E+00	6,91E+00	6,79E+00	3,98E-04	5,18E-01	0,00E+00	7,23E+01
	kg 1,4-DCB total	8,15E+04	1,34E+05	0,00E+00	2,01E+04	0,00E+00	5,99E+03	0,00E+00	6,74E+04	6,63E+04	3,88E+00	5,05E+03	0,00E+00	7,06E+05
<b>Human carcinogenic toxicity</b>	kg 1,4-DCB /UF	3,75E+01	3,00E+00	0,00E+00	1,75E+00	0,0E+00	8,78E-01	0,00E+00	3,37E+00	1,23E+01	1,46E-03	4,08E-01	0,00E+00	1,86E+01
	kg 1,4-DCB total	3,66E+05	2,93E+04	0,00E+00	1,71E+04	0,00E+00	8,57E+03	0,00E+00	3,29E+04	1,20E+05	1,42E+01	3,99E+03	0,00E+00	1,82E+05
<b>Human non-carcinogenic toxicity</b>	kg 1,4-DCB /UF	1,71E+02	2,61E+02	0,00E+00	4,53E+01	0,0E+00	1,28E+01	0,00E+00	8,05E+01	2,13E+02	8,73E-03	1,17E+01	0,00E+00	1,27E+03
	kg 1,4-DCB total	1,67E+06	2,54E+06	0,00E+00	4,43E+05	0,00E+00	1,25E+05	0,00E+00	7,86E+05	2,08E+06	8,52E+01	1,14E+05	0,00E+00	1,24E+07
<b>Land use</b>	m2a crop eq /UF	1,15E+01	2,38E+00	0,00E+00	2,72E+00	0,0E+00	8,79E+00	0,00E+00	7,05E-01	1,89E+00	1,56E-04	7,88E-01	0,00E+00	2,29E+00
	m2a crop eq total	1,12E+05	2,33E+04	0,00E+00	2,66E+04	0,00E+00	8,58E+04	0,00E+00	6,88E+03	1,85E+04	1,53E+00	7,69E+03	0,00E+00	2,24E+04
<b>Mineral resource scarcity</b>	kg Cu eq /UF	5,37E+00	9,50E-02	0,00E+00	1,08E+00	0,0E+00	3,10E-01	0,00E+00	1,55E-01	6,05E-01	1,04E-04	3,64E-02	0,00E+00	1,16E-01
	kg Cu eq total	5,24E+04	9,28E+02	0,00E+00	1,05E+04	0,00E+00	3,02E+03	0,00E+00	1,51E+03	5,91E+03	1,01E+00	3,55E+02	0,00E+00	1,13E+03
<b>Fossil resource scarcity</b>	kg oil eq /UF	3,49E+01	1,80E+01	0,00E+00	1,09E+01	0,0E+00	2,84E+00	0,00E+00	2,96E+01	3,13E+01	2,12E-02	6,74E+00	0,00E+00	1,75E+01
	kg oil eq total	3,40E+05	1,76E+05	0,00E+00	1,06E+05	0,00E+00	2,78E+04	0,00E+00	2,89E+05	3,05E+05	2,07E+02	6,57E+04	0,00E+00	1,71E+05
<b>Water consumption</b>	m3 /UF	2,28E+00	9,50E-01	0,00E+00	2,05E+00	0,0E+00	1,27E-01	0,00E+00	3,44E-01	3,20E+01	1,27E-04	5,24E-02	0,00E+00	6,37E-01
	m3 total	2,22E+04	9,27E+03	0,00E+00	2,00E+04	0,00E+00	1,24E+03	0,00E+00	3,35E+03	3,13E+05	1,24E+00	5,12E+02	0,00E+00	6,22E+03



## Análisis de calidad de datos e integridad

Requisito de calidad de datos	Cobertura temporal	Cobertura geográfica	Cobertura tecnológica	Precisión	Integridad	Representatividad	Coherencia	Reproducibilidad	Fuentes de la información	Incertidumbre
Dato										
<b>UPSTREAM A1-A3</b>										
Cantidades de materiales	2020	Colombia	Promedio	Buena	Buena	Buena	Buena	Sí	Planimetría	Baja
Densidades de materiales	2020	Reginal	Promedio	Medio	Buena	Buena	Buena	Sí	Web varias	Media
Emisiones e impactos relacionados con el transporte y proceso de fabricación	2020	Colombia	Producción d	Buena	Buena	Buena	Buena	Sí	Ecoinvent 3.	Baja
<b>CORE A4-A5</b>										
Consumo de energía en obra	2007	Europa	Promedio	Buena	Buena	Media	Buena	Sí	Paper	Media
Consumo de agua en obra	2008	Argentina	Promedio	Buena	Buena	Buena	Buena	Sí	Paper	Media
Emisiones de material particulado y otros en obra	2019	Europa	Promedio	Buena	Buena	Media	Buena	Sí	AEMA	Baja
Distancias de transporte	2020	Colombia Bo	NA	Buena	Buena	Buena	Buena	Sí	Estimacione	Baja
Consumos y emisiones relacionados al transporte	2019	Global	Actual	Buena	Buena	Regular	Buena	Sí	Ecoinvent 3.	Baja
<b>DOWNSTREAM B1-B7</b>										
Consumo de energía operativa	2020	Colombia	Promedio	Buena	Buena	Buena	Buena	Sí	Cálculos sob	Baja
Consumo de agua operativa	2020	Colombia	Promedio	Buena	Buena	Buena	Buena	Sí	Cálculos sob	Baja
Cantidades de materiales para mantenimiento y/o rehabilitación	2020	Colombia	Promedio	Buena	Buena	Buena	Buena	Sí	Cálculos sob	Baja
Consumos y emisiones relacionados con la distribución de agua	2014	Colombia	Promedio	Buena	Buena	Buena	Buena	Sí	Ecoinvent 3.	Baja
Emisiones relacionados a la generación de electricidad	2014	Colombia	Mix tecnológico	Buena	Buena	Buena	Buena	Sí	Ecoinvent 3.	Baja
<b>DOWNSTREAM C1-C4</b>										
Cantidades de materiales producto de la demolición	2020	Colombia	Promedio	Buena	Buena	Buena	Buena	Sí	Cálculos sob	Baja
Consumo de energía demolición	2020	Colombia	Promedio	Baja	Regular	Buena	Buena	Sí	Cálculos sob	Alta
Emisiones de material particulado y otros en obra	2019	Europa	Promedio	Buena	Buena	Regular	Buena	Sí	AEMA	Baja
Distancias de transporte	2020	Colombia	Producción d	Buena	Buena	Buena	Buena	Sí	Cálculos sob	Baja
Tratamiento de los RCD de demolición	2020	Colombia	Producción d	Regular	Buena	Buena	Buena	Sí	Cálculos sob	Baja

## INTERPRETACIÓN DEL ACV

Los mayores impactos de la edificación provienen del tratamiento final del agua operativa (B7), de los materiales y sus procesos de fabricación (A1-A3, impactos embebidos), del tratamiento de residuos al final de la vida útil del edificio (C4), y en menor medida, al uso de energía operativa (B6).

Estas etapas tienen una alta representación en categorías de impacto como “Consumo de agua”, “escasez de recursos minerales”, “toxicidad humana no cancerígena”, “ecotoxicidad marina”, “ecotoxicidad agua fresca”, y “eutrofización marina”.

### Análisis de contribución

El análisis de contribución de los resultados de la EICV ayuda a identificar las etapas y procesos del ciclo de vida que aportan en mayor medida al impacto ambiental del producto o servicio. En ese sentido, se ha identificado una alta contribución en la caracterización de las siguientes etapas en cada categoría de impacto.

Los resultados muestran una concentración de porcentajes de impacto en las etapas “B7 Uso de agua”, “A1-A3 Producto”, “C4 vertido de residuos”, y “B6 Uso de energía” (en orden de mayor a menor según promedio).

CATEGORIA DE IMPACTO	Producto A1-A3	Construcción A4-A5	Uso B1-B7							Fin de vida útil C1-C4			
	A1-A3 Producto	A4-A5 Construcción	B1 Uso	B2 Mantenimiento	B3 Reparación	B4 Reemplazo	B5 Rehabilitación	B6 Uso de energía	B7 Uso de agua	C1 Deconstrucción	C2 Transporte	C3 Tratamiento res	C4 Vertido Residuos
<b>Global warming</b>	20.5	8.3						10.9	14.9				36.5
<b>Stratospheric ozone depletion</b>	10.7	6.4		7.1				14.8	42.2				15.2
<b>Ionizing radiation</b>	23.8			8.8					43.7				11.6
<b>Ozone formation, Human health</b>	26	12		5.4				12.3	21.7		7.8		11.6
<b>Fine particulate matter formation</b>	25.9	6.3		7.2				12.7	29.2				13.2
<b>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</b>	26.6	11.9		5.4				12.1	21.5		7.7		11.5
<b>Terrestrial acidification</b>	22	6.8		7.6				17.1	26.3				14
<b>Freshwater eutrophication</b>	20.4			5.3				11.2	39.5				18.9

<b>Marine eutrophication</b>									85				5.7
<b>Terrestrial ecotoxicity</b>	23.1	22.4						11.7	11.9		12.3		8.2
<b>Freshwater ecotoxicity</b>	7	12						6.3	6				65.7
<b>Marine ecotoxicity</b>	7.5	12.2						6.2	6.1				65
<b>Human carcinogenic toxicity</b>	48.2								15.8				23.9
<b>Human non-carcinogenic toxicity</b>	8.2	12.4							10.3				61.5
<b>Land use</b>	36.9	6.8		8.7		28.3			6.1				7.3
<b>Mineral resource scarcity</b>	69.2			13.9									7.7
<b>Fossil resource scarcity</b>	23	10.4		7.1				19.5	20.6		4.4		11.5
<b>Water consumption</b>									83.3				

Contribución de cada etapa por categoría de impacto en %

Los valores por debajo del 5% no fueron referenciados. Los colores en los datos se refieren a:

<b>Convenciones de color</b>	
+ 70%	
50% - 70%	
30% - 50%	
10% - 30%	
- 9%	

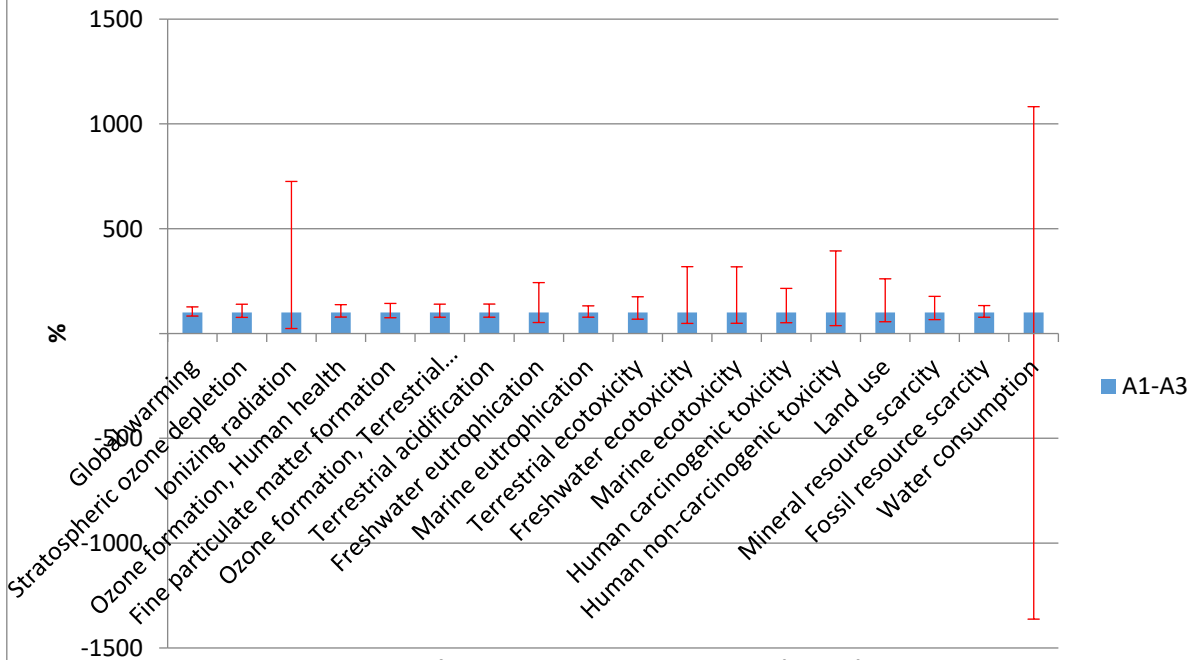
### **Análisis de incertidumbre**

Procedimiento sistemático para encontrar y cuantificar la incertidumbre introducida en los resultados de un análisis de inventario del ciclo de vida, debida a efectos acumulados de la variabilidad de los datos. Es una manera numérica de procesar datos inciertos y de establecer un intervalo de incertidumbre en el resultado del cálculo.

Se aplicó análisis de incertidumbre a las etapas de mayor contribución referenciadas anteriormente. Los resultados muestran una elevada incertidumbre en los resultados de caracterización de las categorías de impacto “Radiación ionizante” y “Consumo de agua” en todas las etapas analizadas.

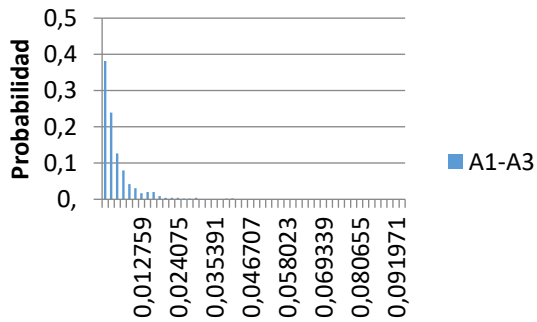


## Incertidumbre A1-A3

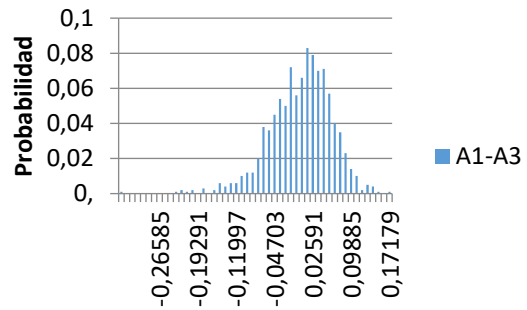


**Análisis de incertidumbre de 1 kg 'A1-A3',  
 método: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H , intervalo de confianza:  
 95 %**

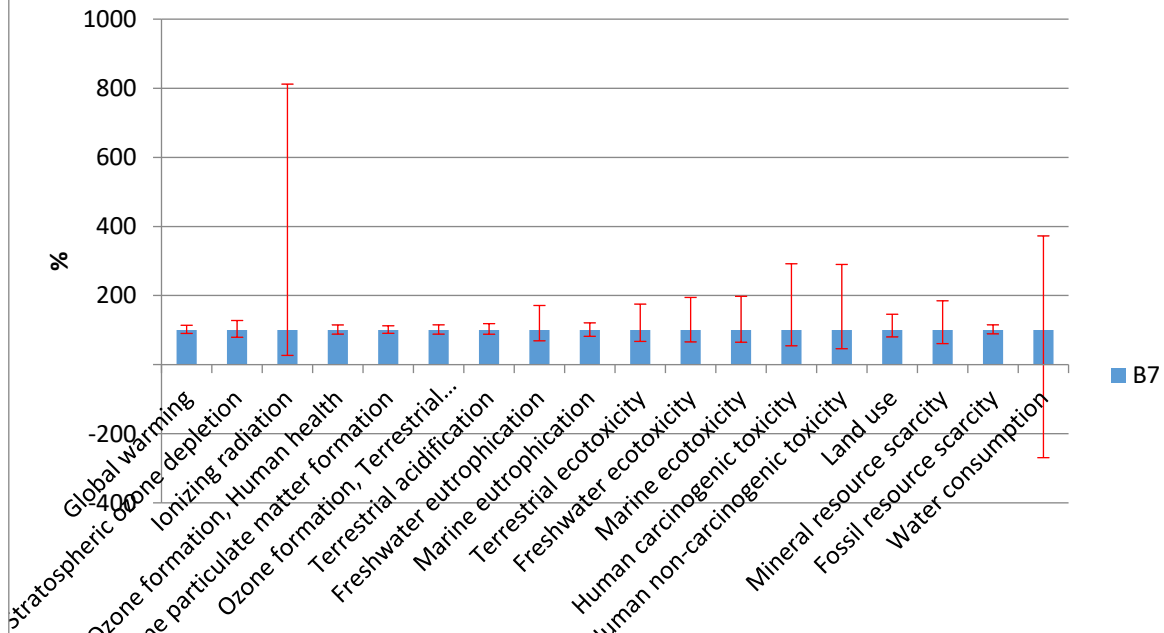
### Ionizing radiation



### Water consumption

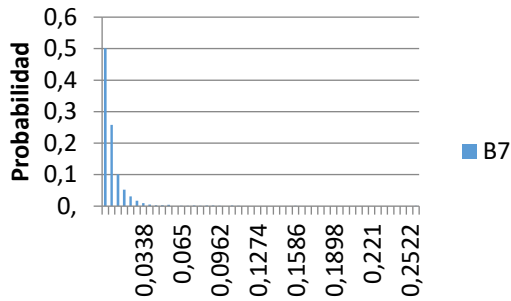


## Incertidumbre B7

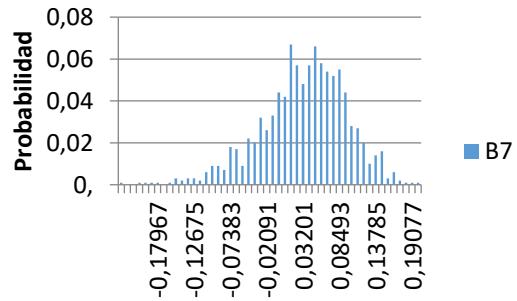


**Análisis de incertidumbre de 1 kg 'B7',  
 método: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H , intervalo de confianza:  
 95 %**

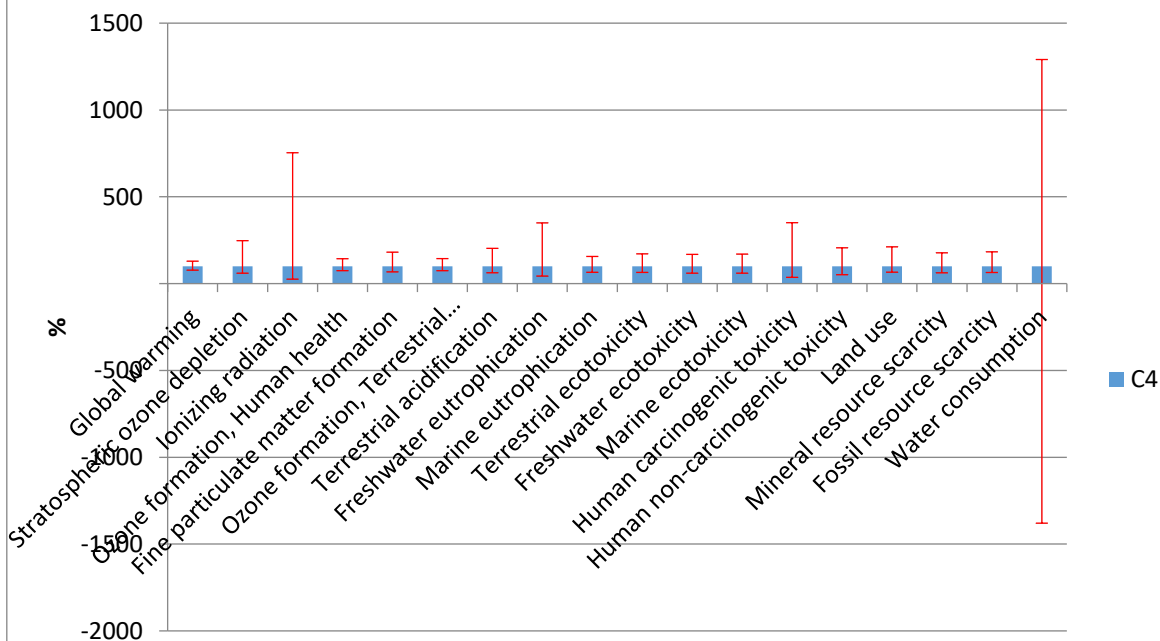
### Ionizing radiation



### Water consumption

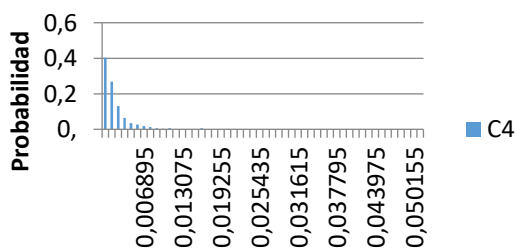


## Incertidumbre C4

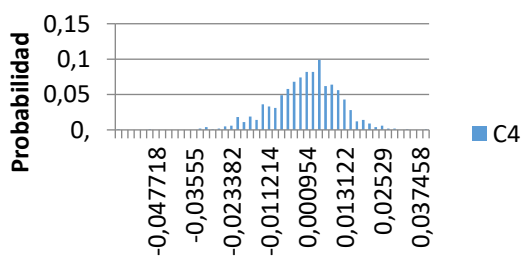


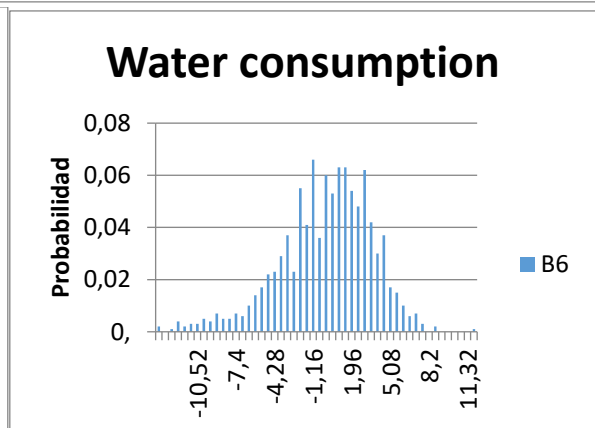
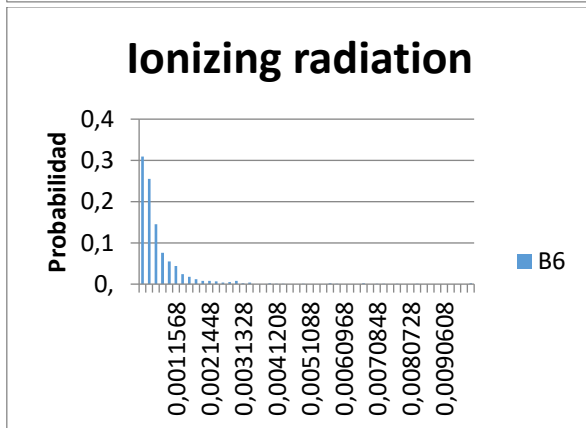
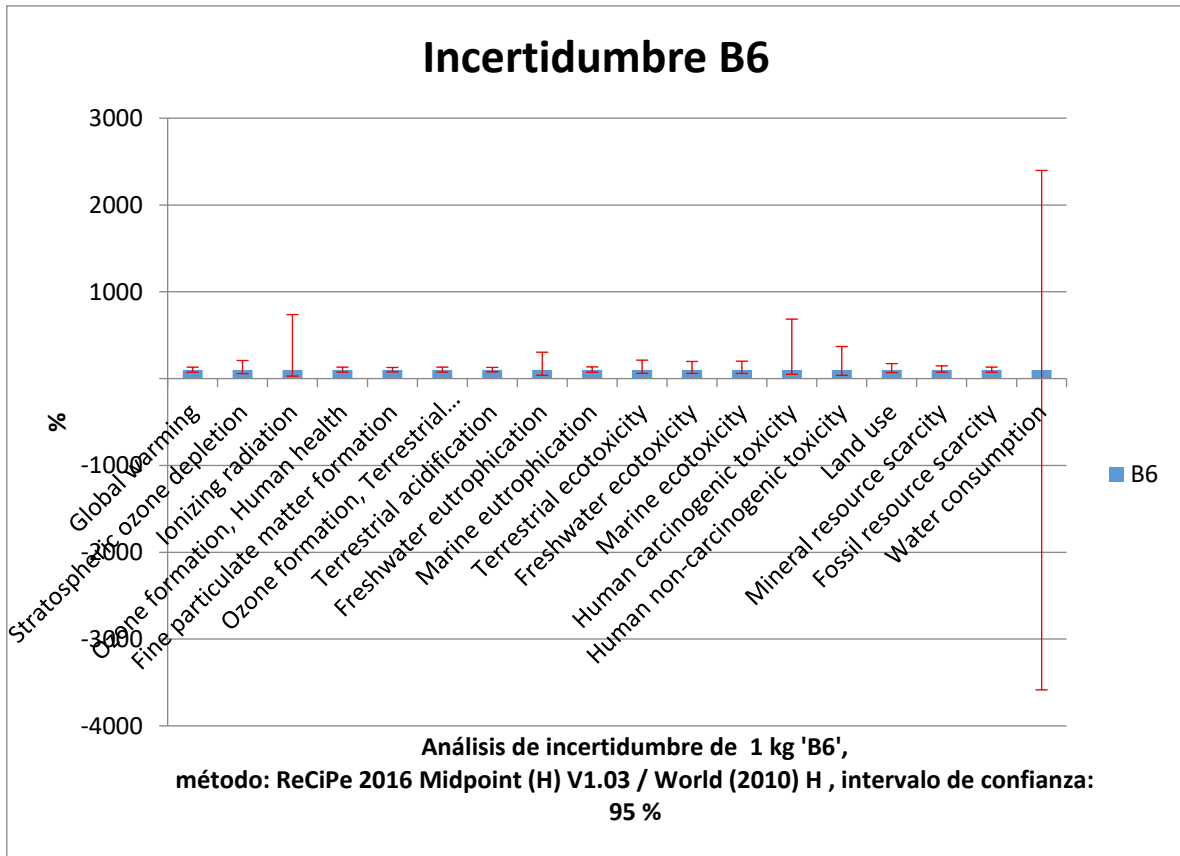
Análisis de incertidumbre de 1 kg 'C4',  
 método: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H , intervalo de confianza:  
 95 %

### Caracterización Ionizing radiation



### Caracterización Water consumption



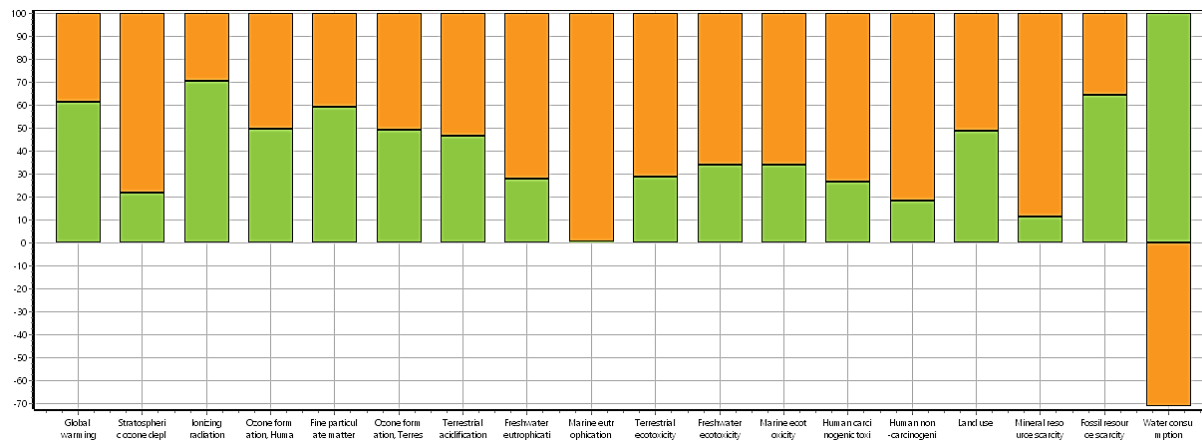


## CONCLUSIONES PARCIALES

Los mayores impactos de la edificación provienen del tratamiento final del agua operativa, de los materiales y sus procesos de fabricación (impactos embebidos), del tratamiento de residuos al final de la vida útil del edificio, y en menor medida, al uso de energía operativa.

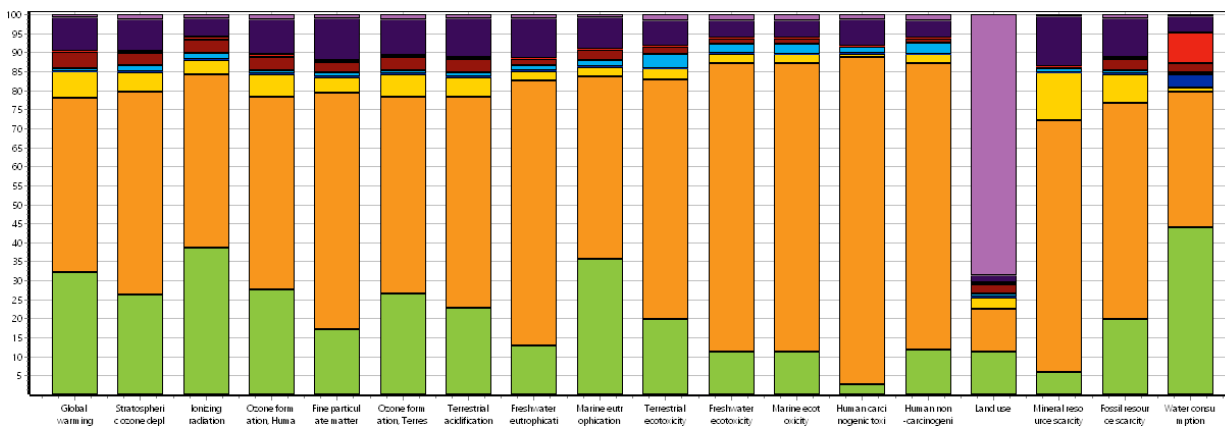
El agua operativa (B7) concentra la mayor parte de sus impactos en los vertimientos, es decir, el agua gris que es expulsada después de su uso (se utilizó el dataset “Wastewater, from residence {RoW} | treatment of, capacity 1.1E10l/year | Cut-off, U”), seguido del agua suministrada por la red. Por tanto, la recomendación para reducir este impacto es disminuir el volumen de agua expulsada para su tratamiento a través del reciclaje de aguas lluvias o grises. Esto se logra captando aguas lluvia para su reutilización en cisternas, y el tratamiento de aguas

negras para las mismas cisternas o para usos externos a las viviendas, teniendo en cuenta que es necesario contar con pozos de tratamiento y acumulación, además de bombas que inyectan el líquido tratado.



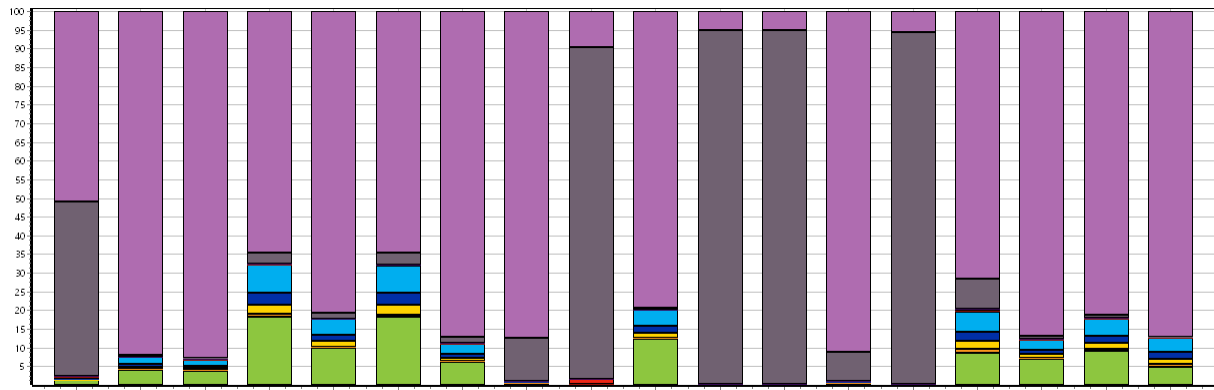
Caracterización etapa B7

Los materiales usados para la construcción del edificio (A1-A3) concentra la mayor parte de sus impactos en el uso del concreto y del acero de refuerzo, los cuales componen indisolublemente el sistema estructural del edificio. Esto se debe a la presencia del arrabio y de relaves sulfuradas de la producción minera. La recomendación para reducir estos impactos es la selección de fabricantes de materiales que incorporen estrategias de sostenibilidad (reciclaje de insumos, EE, equipos eficientes) en sus materias primas y/o en sus procesos, especialmente los materiales mencionados, lo cual permitiría aplicar escenario de residuos específicos (reciclaje, reúso, prolongación vida útil), tanto en la fabricación como en la demolición al final de la vida útil.



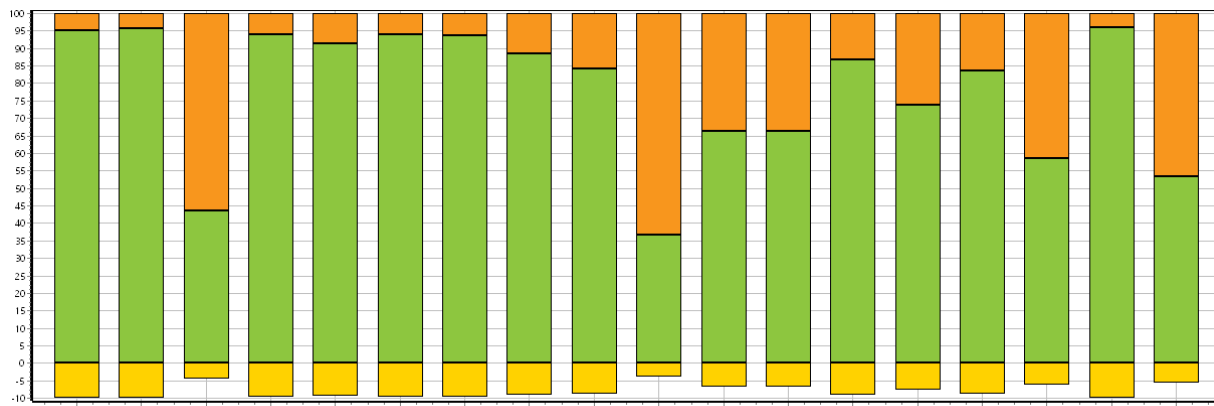
Caracterización etapa A1-A3

El tratamiento de residuos al final de la vida útil del edificio (C4) concentra la mayor parte de sus impactos en el tratamiento de residuos peligrosos posterior a la demolición del edificio, el cual se asume que es incinerada (se utilizó el dataset “Hazardous waste, for incineration {RoW}| treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration | Cut-off, U”), seguido del “Municipal solid waste” con mucha menos presencia. Por tanto, la recomendación para reducir estos impactos es disminuir la cantidad de residuos peligrosos en la demolición (de difícil planificación anticipada) o desarrollar un plan de gestión de residuos que los separe correctamente para reducir el volumen, así como cambiar el tratamiento a uno menos impactante. Esta última consideración se repite para el tratamiento de residuos que van al vertedero (municipal solid waste).



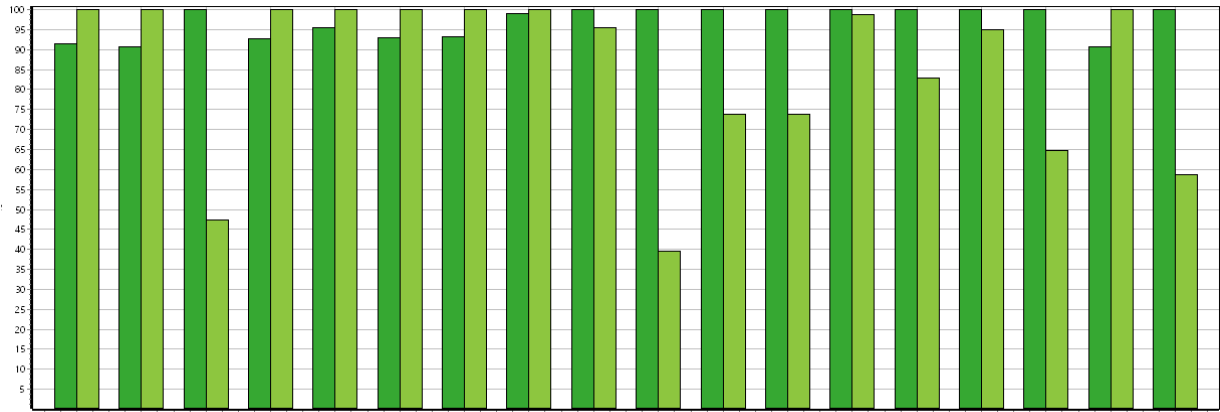
Caracterización etapa C4

Por último, el uso de energía operativa (B6) concentra sus impactos en el balance de consumo de la red y generación de energía por renovables con paneles fotovoltaicos dependiendo de la categoría de impacto, y haciendo que aparezca una fracción “negativa”, usando el mix energético del país. La recomendación para reducir estos impactos, o más bien, ampliar la fracción negativa, es ampliar la generación de energía renovable, tanto para el consumo del edificio, como para la entrega de excedentes a la red. Los paneles fotovoltaicos generan grandes impactos en categorías como “Ecotoxicidad terrestre”, “radiación ionizante”, y “Consumo de agua” por la presencia de cobre y molienda de uranio, por tanto, se recomienda seleccionar paneles que reduzcan este tipo de procesos.



Caracterización etapa B6

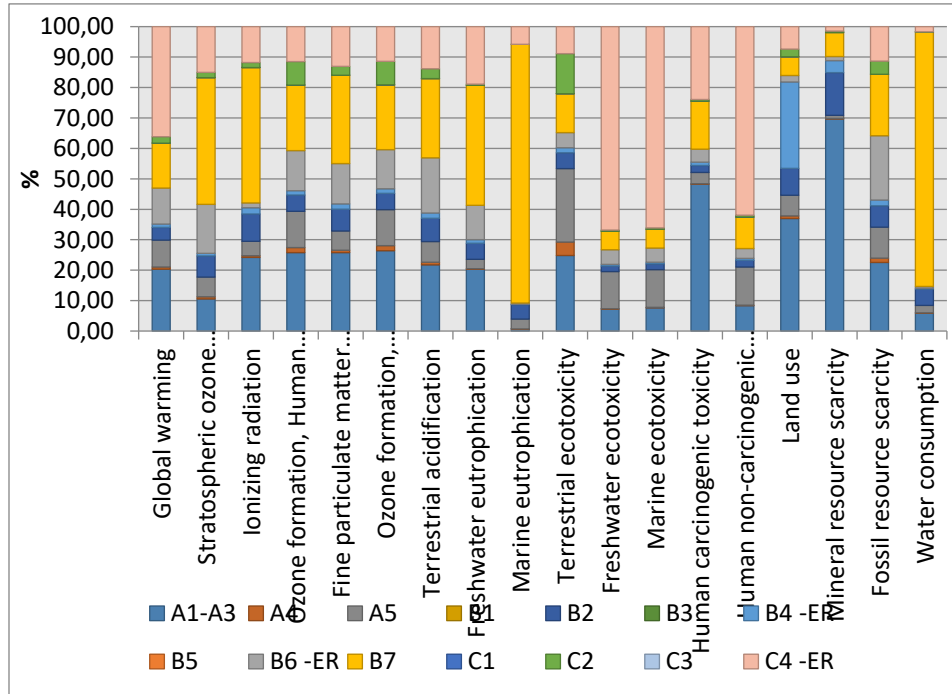
Adicionalmente se comparó la etapa B6 con y sin paneles fotovoltaicos, reafirmando lo visto anteriormente, donde la generación fotovoltaica presenta beneficios en la reducción de casi un 9% en categorías de impacto como “Calentamiento global”, “agotamiento de ozono” y “escases de recursos fósiles”, pero un aumento de casi un 50% en “Radiación ionizante”, “Ecotoxicidad terrestre” y “Consumo de agua”, siendo estas categorías las más representativas.



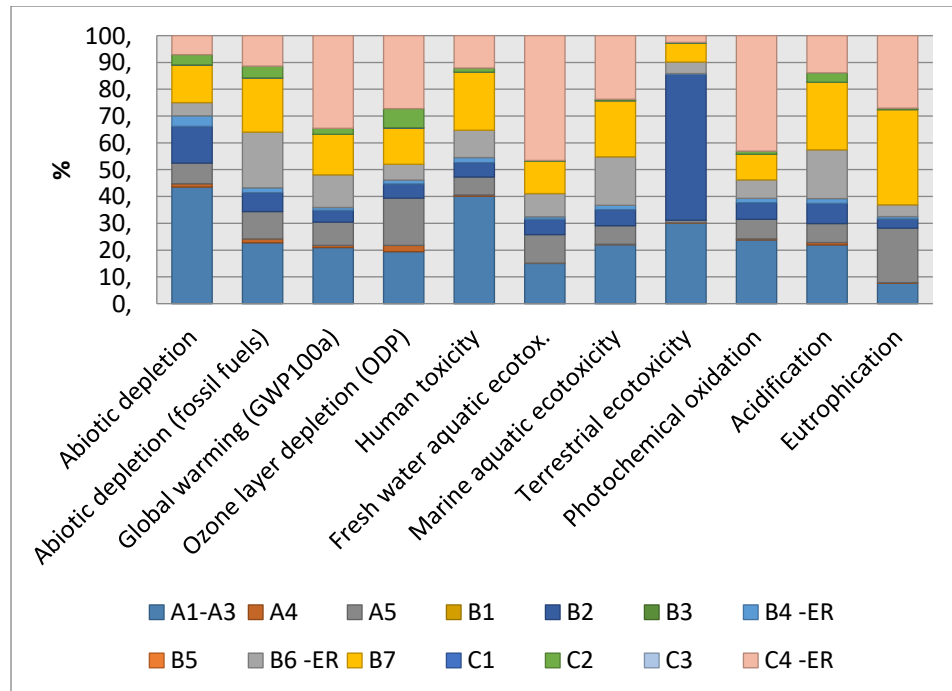
Comparación de caracterización etapa B6 con y sin energías renovables

## Anexo 9. Gráficos y tablas de resultados

### Edificio sin energías renovables

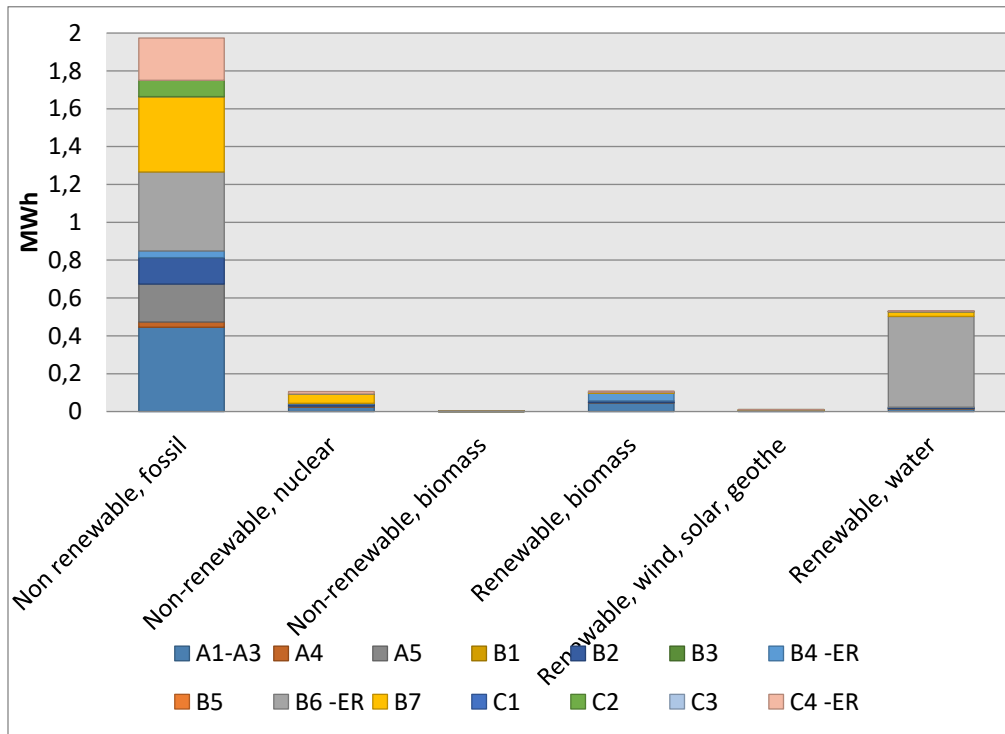


Caracterización en % con metodología ReCiPe de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

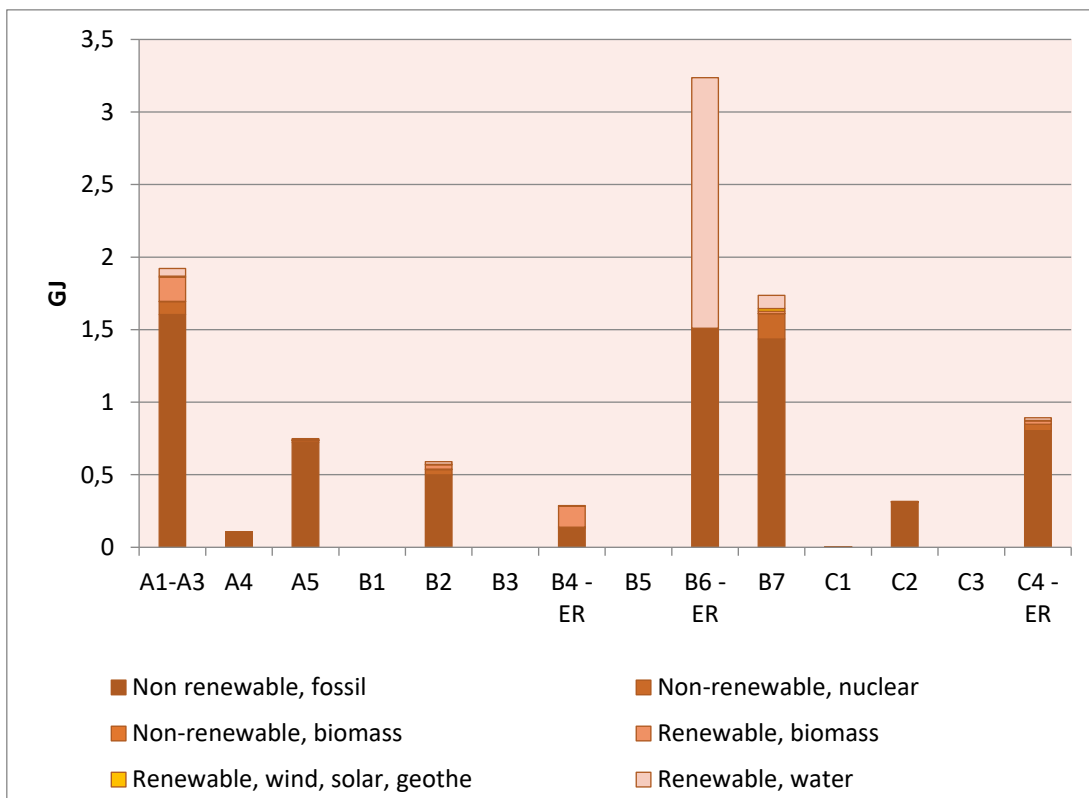


Caracterización en % con metodología CML de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro





Ponderación con metodología CED de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Puntuación única con metodología CED de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

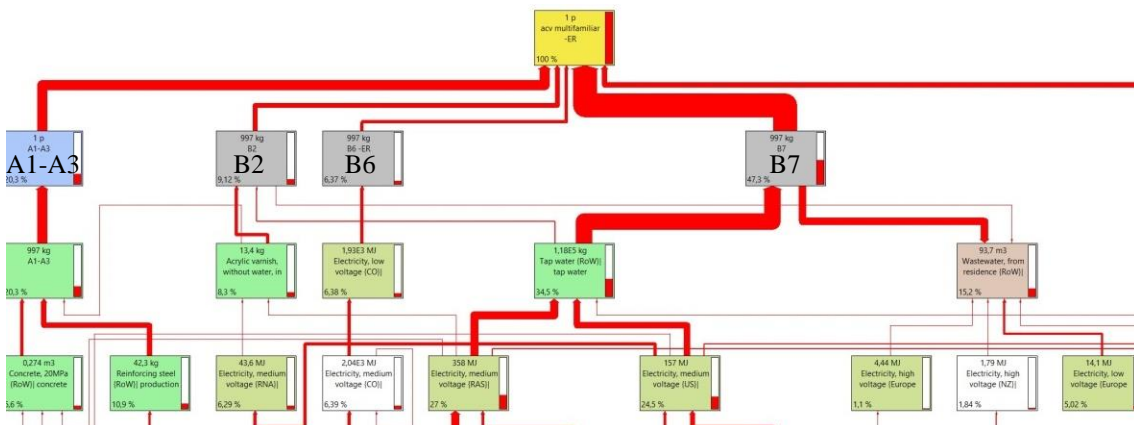
<b>Contribución de caracterización de energía renovable no convencional</b>				
<b>No</b>	<b>Proceso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
1	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	2,62	6,9
2	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	2,24	5,9
3	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	2,23	5,8
4	Electricity, high voltage {TRE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,86	4,9
5	Electricity, high voltage {MRO, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,70	4,5
6	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	1,46	3,8
7	Electricity, high voltage {DE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,41	3,7
8	Electricity, high voltage {RFC}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,11	2,9
9	Electricity, high voltage {SPP}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,06	2,8
10	Electricity, high voltage {ES}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,93	2,4
<b>Inventario de puntuación única</b>				
<b>No</b>	<b>Sustancia</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
1	Coal, hard	MJ	2.756,77	28,0
2	Oil, crude	MJ	2.176,27	22,1
3	Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	1.920,71	19,5
4	Gas, natural/m3	MJ	1.873,36	19,0
5	Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	390,45	4,0
6	Uranium	MJ	378,74	3,9
7	Coal, brown	MJ	250,30	2,5
8	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	MJ	46,51	0,5
9	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	31,55	0,3
10	Energy, geothermal, converted	MJ	5,64	0,1
<b>Inventario de caracterización de energía renovable no convencional</b>				
1	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	31,55	82,6
2	Energy, geothermal, converted	MJ	5,64	14,8
3	Energy, solar, converted	MJ	1,01	2,6

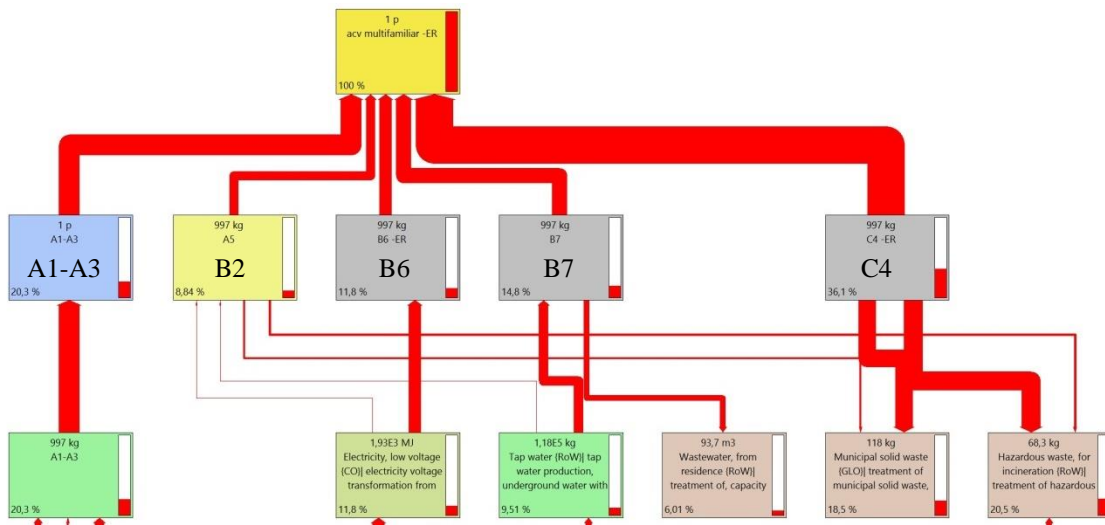
Diez procesos y sustancias más representativos de la caracterización e inventario de energías renovables no convencionales según metodología CED de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

Contribución según caracterización GWP				
No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Municipal solid waste {GLO}  treatment of municipal solid waste, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm)   Cut-off, U	kg CO2 eq	164,01	18,4
2	Hazardous waste, for incineration {RoW}  treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration   Cut-off, U	kg CO2 eq	103,56	11,6
3	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 eq	49,59	5,6
4	Pig iron {GLO}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	38,24	4,3
5	Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW}  heat production, anthracite, at stove 5-15kW   Cut-off, U	kg CO2 eq	34,62	3,9
6	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cut-off, U	kg CO2 eq	29,22	3,3
7	Clinker {US}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	24,40	2,7
8	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, combined cycle power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	22,88	2,6
9	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	22,76	2,6
10	Hard coal {CN}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 eq	21,67	2,4

Inventario GEI según caracterización GWP				
No	Sustancia	Unidad	Total	%
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO2 eq	656,19	73,7
2	Methane, biogenic	kg CO2 eq	163,44	18,4
3	Methane, fossil	kg CO2 eq	56,68	6,4
4	Dinitrogen monoxide	kg CO2 eq	8,22	0,9
5	Sulfur hexafluoride	kg CO2 eq	3,23	0,4
6	Carbon dioxide, land transformation	kg CO2 eq	2,10	0,2
7	Carbon dioxide	kg CO2 eq	0,13	0,0
8	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	kg CO2 eq	0,10	0,0
9	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg CO2 eq	0,07	0,0
10	Methane, tetrachloro-, CFC-10	kg CO2 eq	0,03	0,0

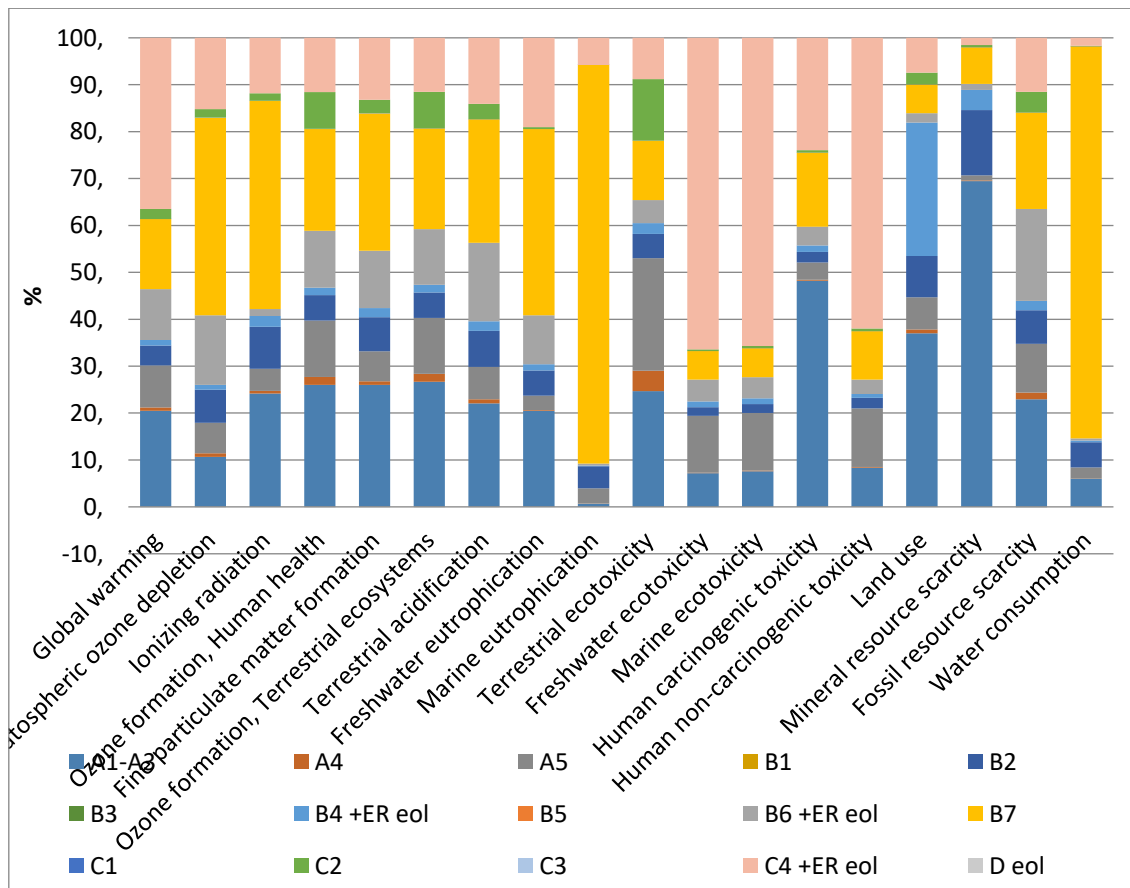
Diez procesos y sustancias más representativos de la caracterización de la categoría “cambio climático” según metodología ReCiPe de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



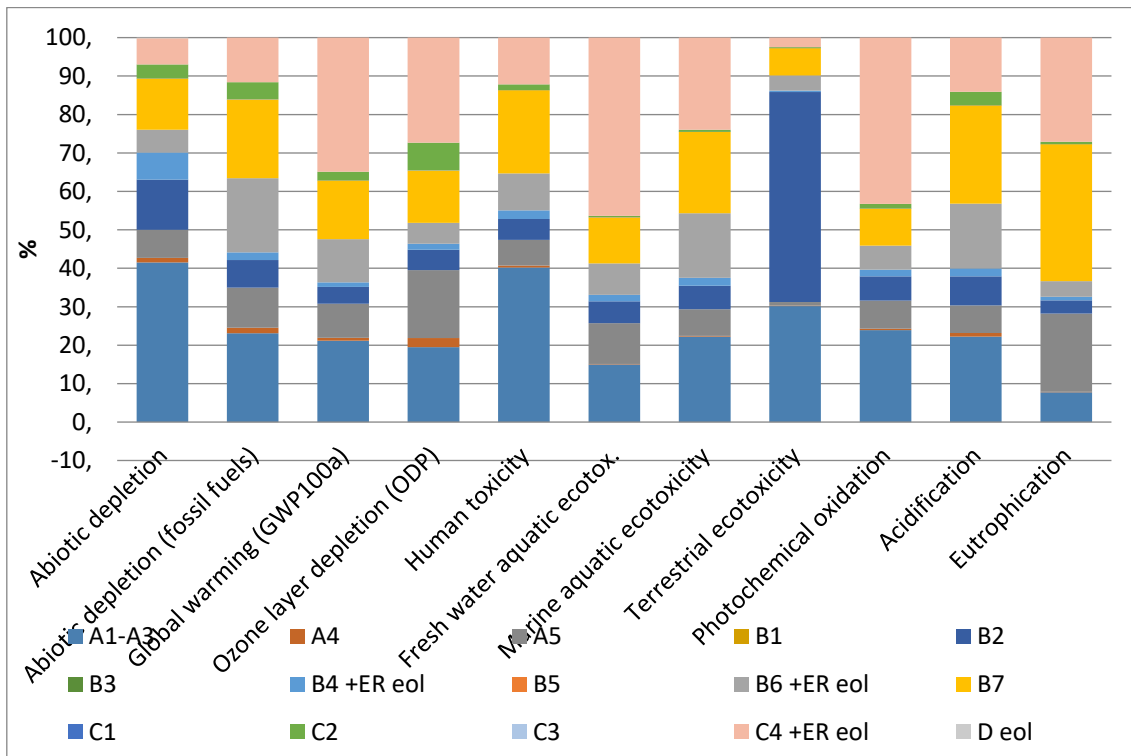


Rede de caracterización energías renovables metodología CED (arriba), y caracterización GWP metodología ReCiPe, de ACV del edificio sin renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

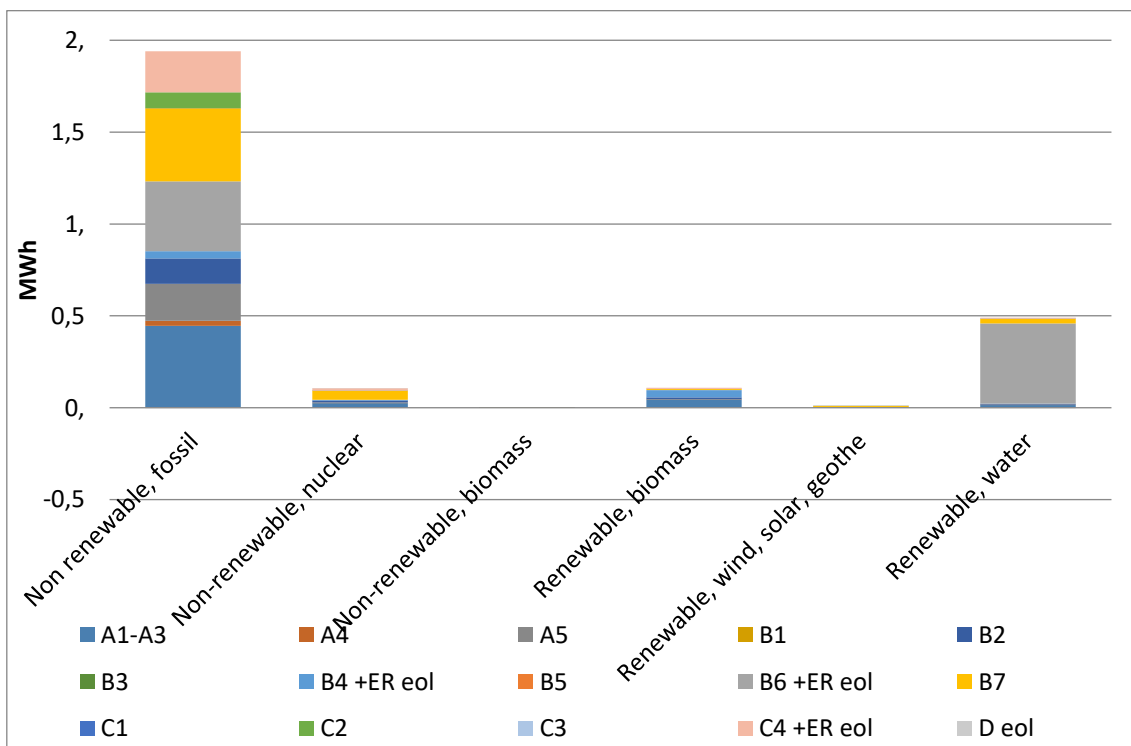
### Edificio con energía renovable mini eólica



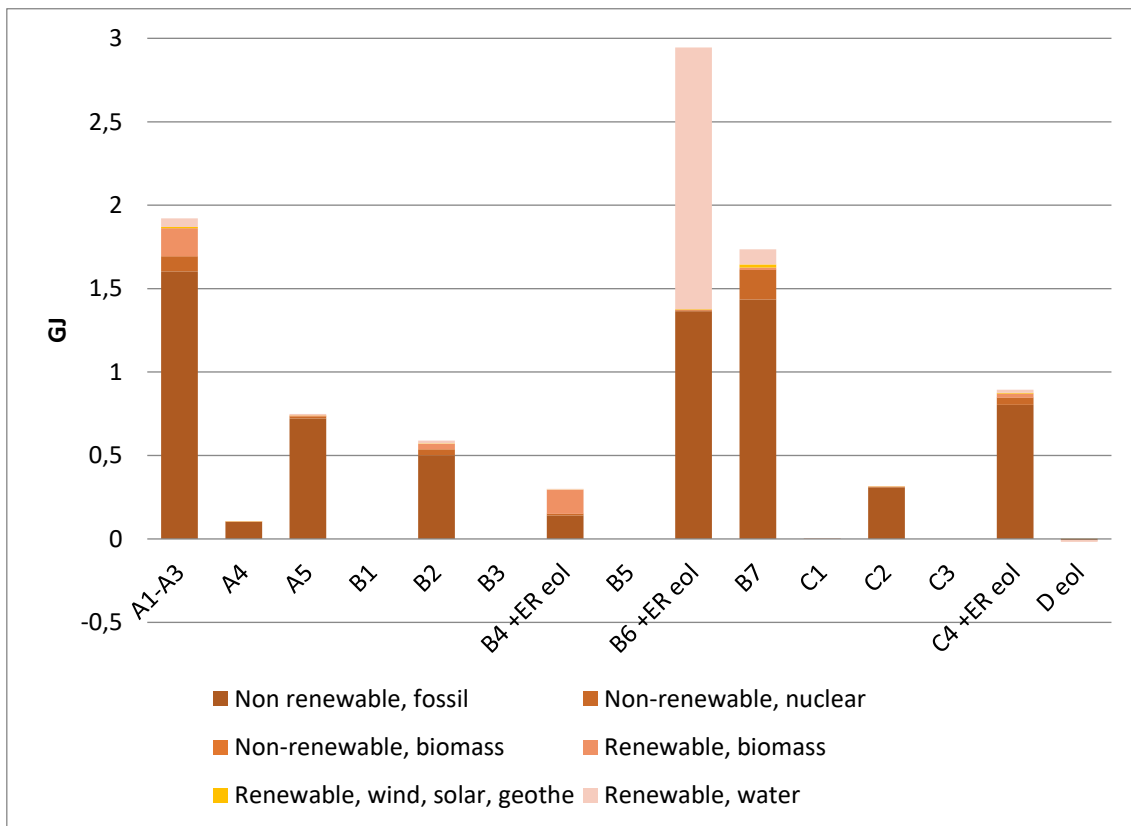
Caracterización en % con metodología ReCiPe de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Caracterización en % con metodología CML de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Ponderación con metodología CED de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Puntuación única con metodología CED de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

Contribución de caracterización de energía renovable no convencional				
No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	2,42	6,2
2	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	2,24	5,8
3	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	2,23	5,8
4	Electricity, high voltage {TRE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,86	4,8
5	Electricity, high voltage {MRO, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,70	4,4
6	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	1,46	3,8
7	Electricity, high voltage {DE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,42	3,7
8	Electricity, high voltage {RFC}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,11	2,9
9	Electricity, high voltage {SPP}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,06	2,7
10	Electricity, high voltage {ES}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,93	2,4

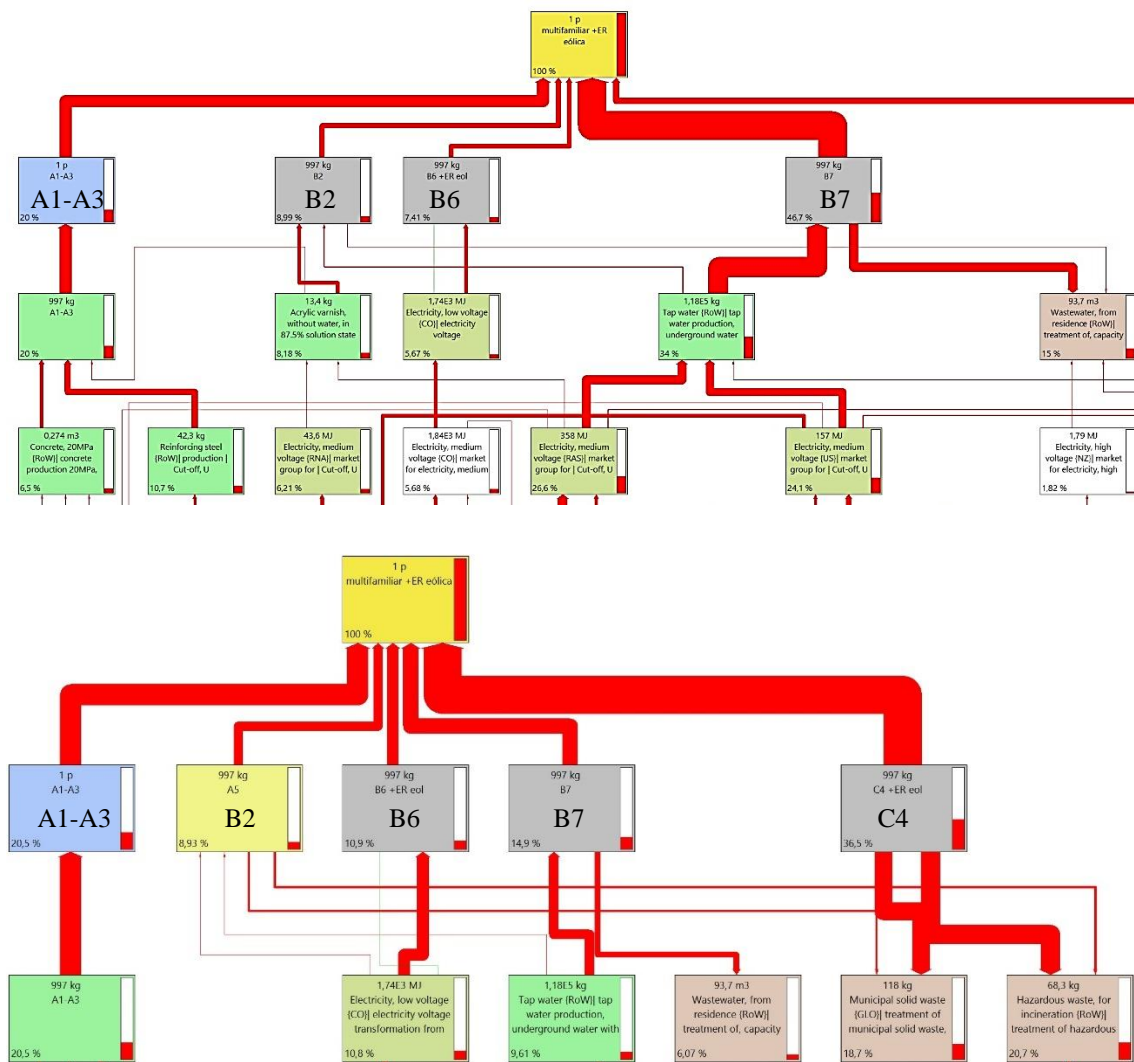
<b>Inventario de puntuación única</b>				
<b>No</b>	<b>Sustancia</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
1	Coal, hard	MJ	2.708,66	28,4
2	Oil, crude	MJ	2.177,96	22,8
3	Gas, natural/m3	MJ	1.790,73	18,8
4	Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	1.753,20	18,4
5	Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	390,31	4,1
6	Uranium	MJ	379,89	4,0
7	Coal, brown	MJ	250,48	2,6
8	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	MJ	45,86	0,5
9	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	32,10	0,3
10	Energy, geothermal, converted	MJ	5,64	0,1
<b>Inventario de caracterización de energía renovable no convencional</b>				
1	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	32,10	82,8
2	Energy, geothermal, converted	MJ	5,64	14,6
3	Energy, solar, converted	MJ	1,01	2,6

Diez procesos y sustancias más representativos de la caracterización e inventario de energías renovables no convencionales según metodología CED de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

<b>Contribución según caracterización GWP</b>				
<b>No</b>	<b>Proceso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
1	Municipal solid waste {GLO}  treatment of municipal solid waste, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm)   Cut-off, U	kg CO2 eq	164,01	18,6
2	Hazardous waste, for incineration {RoW}  treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration   Cut-off, U	kg CO2 eq	103,56	11,7
3	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 eq	44,95	5,1
4	Pig iron {GLO}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	38,29	4,3
5	Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW}  heat production, anthracite, at stove 5-15kW   Cut-off, U	kg CO2 eq	34,62	3,9
6	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cut-off, U	kg CO2 eq	29,23	3,3
7	Clinker {US}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	24,34	2,8
8	Hard coal {CN}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 eq	21,70	2,5
9	Clinker {Europe without Switzerland}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	21,36	2,4
10	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	20,87	2,4
<b>Inventario GEI según caracterización GWP</b>				
<b>No</b>	<b>Sustancia</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO2 eq	648,06	73,5
2	Methane, biogenic	kg CO2 eq	163,44	18,5
3	Methane, fossil	kg CO2 eq	56,35	6,4

4	Dinitrogen monoxide	kg CO2 eq	8,09	0,9
5	Sulfur hexafluoride	kg CO2 eq	3,00	0,3
6	Carbon dioxide, land transformation	kg CO2 eq	2,10	0,2
7	Carbon dioxide	kg CO2 eq	0,13	0,0
8	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	kg CO2 eq	0,10	0,0
9	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg CO2 eq	0,08	0,0
10	Methane, tetrachloro-, CFC-10	kg CO2 eq	0,03	0,0

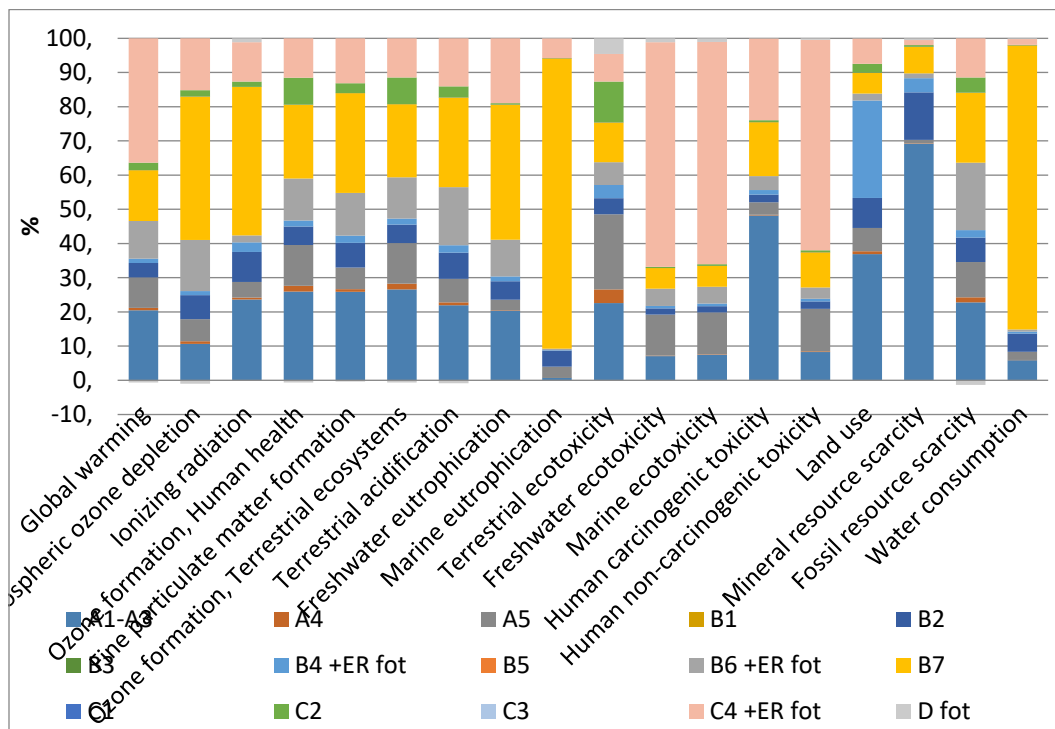
Diez procesos y sustancias más representativos de la caracterización de la categoría “cambio climático” según metodología ReCiPe de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



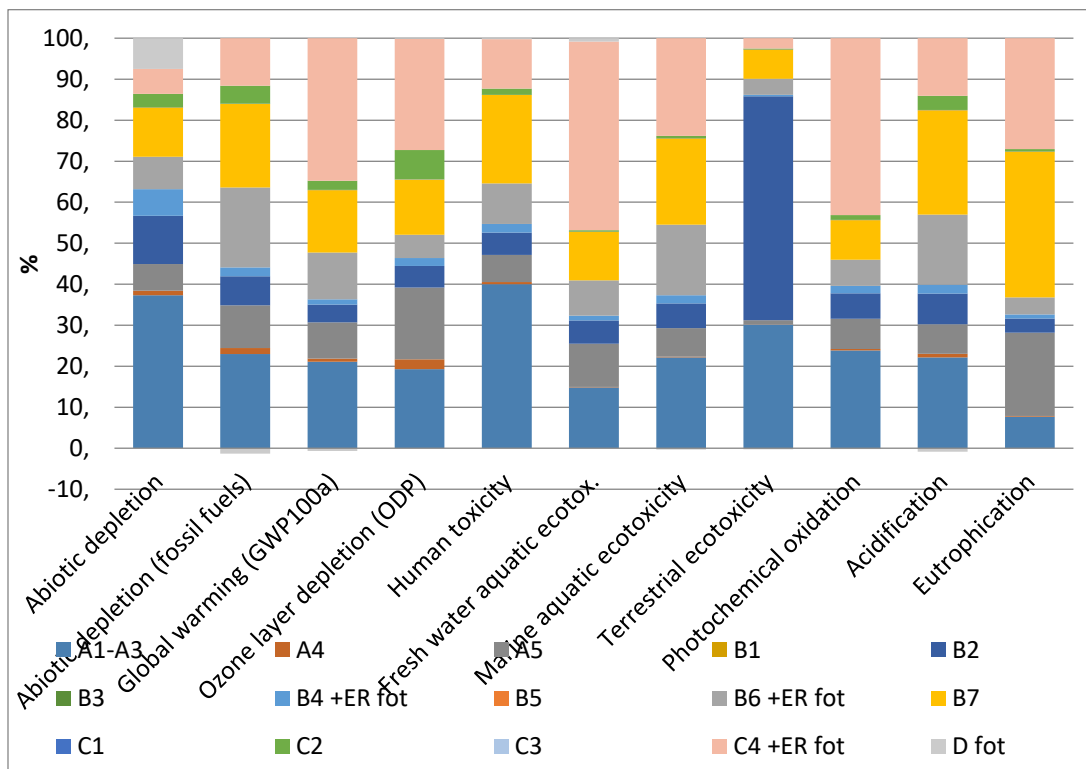
Red de caracterización energías renovables metodología CED (arriba), y caracterización GWP (abajo) metodología ReCiPe, de ACV del edificio con energía minieólica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



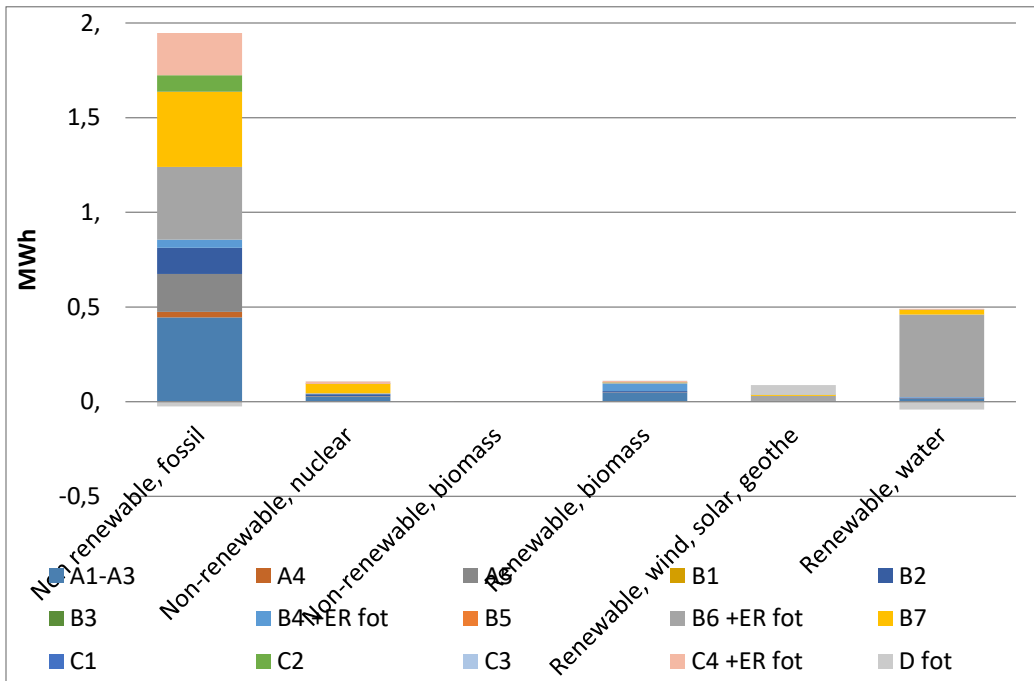
## Edificio con energía renovable fotovoltaica



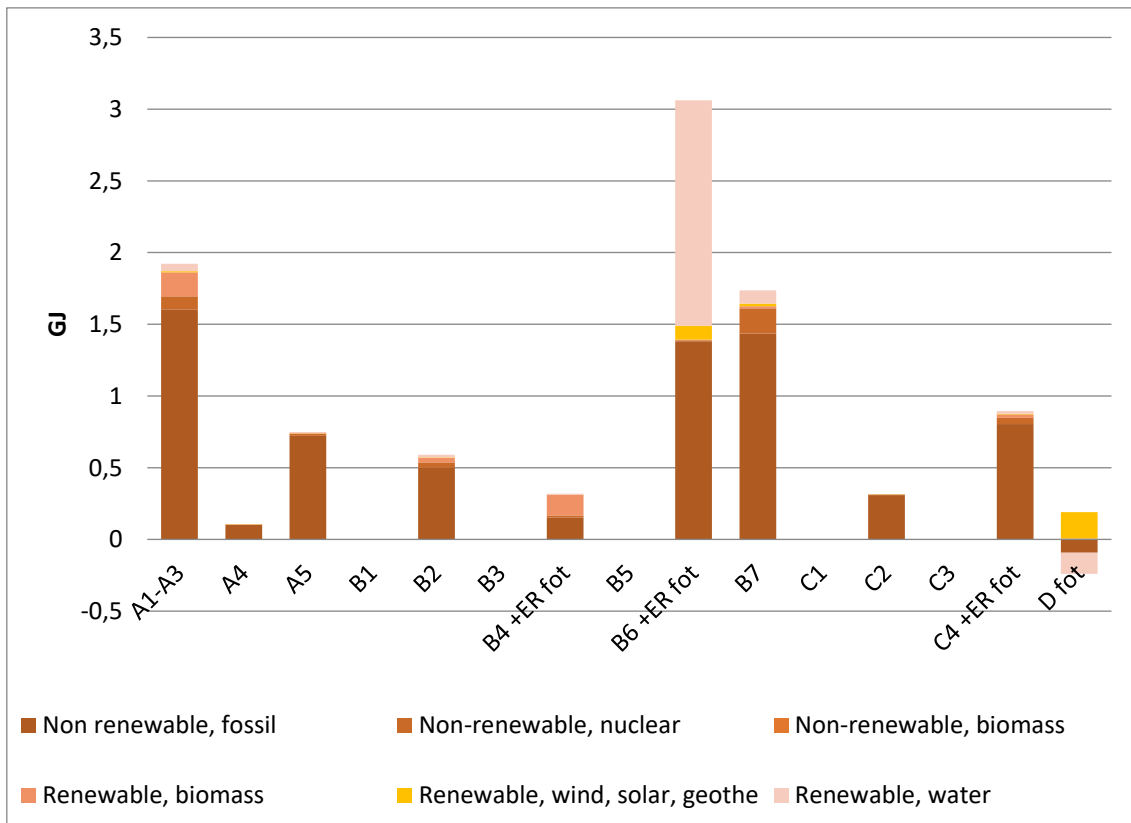
Caracterización en % con metodología ReCiPe de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Caracterización en % con metodología CML de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Ponderación con metodología CED de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



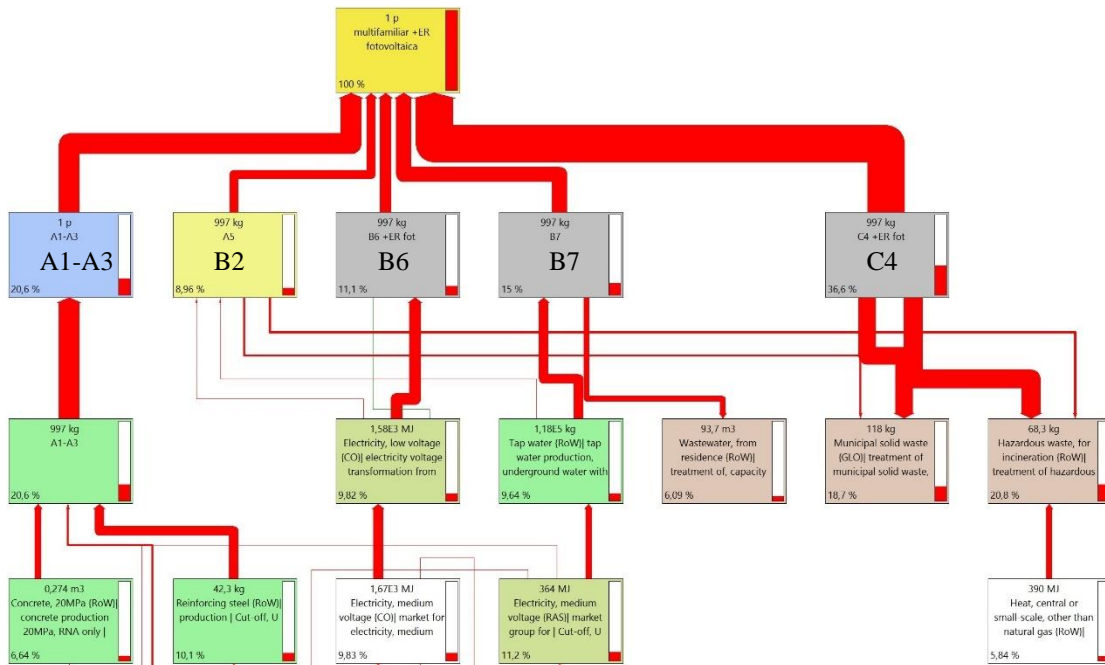
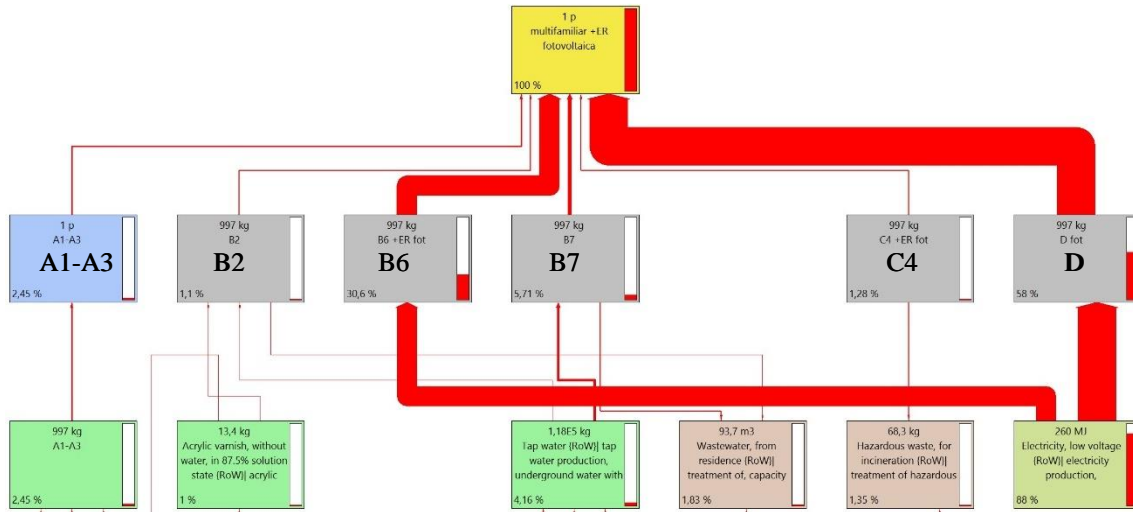
Puntuación única con metodología CED de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

<b>Contribución de caracterización de energía renovable no convencional</b>				
<b>No</b>	<b>Proceso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
1	Electricity, low voltage {RoW}  electricity production, photovoltaic, 3kWp flat-roof installation, multi-Si   Cut-off, U	MJ	278,07	87,8
2	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	2,28	0,7
3	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	2,27	0,7
4	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	2,26	0,7
5	Electricity, high voltage {TRE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,90	0,6
6	Electricity, high voltage {MRO, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,73	0,5
7	Electricity, high voltage {DE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,55	0,5
8	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	1,49	0,5
9	Electricity, high voltage {RFC}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,13	0,4
10	Electricity, high voltage {SPP}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	1,07	0,3
<b>Inventario de puntuación única</b>				
<b>No</b>	<b>Sustancia</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
1	Coal, hard	MJ	2.691,30	27,9
2	Oil, crude	MJ	2.185,41	22,7
3	Gas, natural/m3	MJ	1.739,16	18,0
4	Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	1.621,30	16,8
5	Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	392,25	4,1
6	Uranium	MJ	388,65	4,0
7	Energy, solar, converted	MJ	279,08	2,9
8	Coal, brown	MJ	256,35	2,7
9	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	MJ	45,72	0,5
10	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	32,01	0,3
<b>Inventario de caracterización de energía renovable no convencional</b>				
1	Energy, solar, converted	MJ	279,08	88,1
2	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	32,01	10,1
3	Energy, geothermal, converted	MJ	5,75	1,8

Diez procesos y sustancias más representativos de la caracterización e inventario de energías renovables no convencionales según metodología CED de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

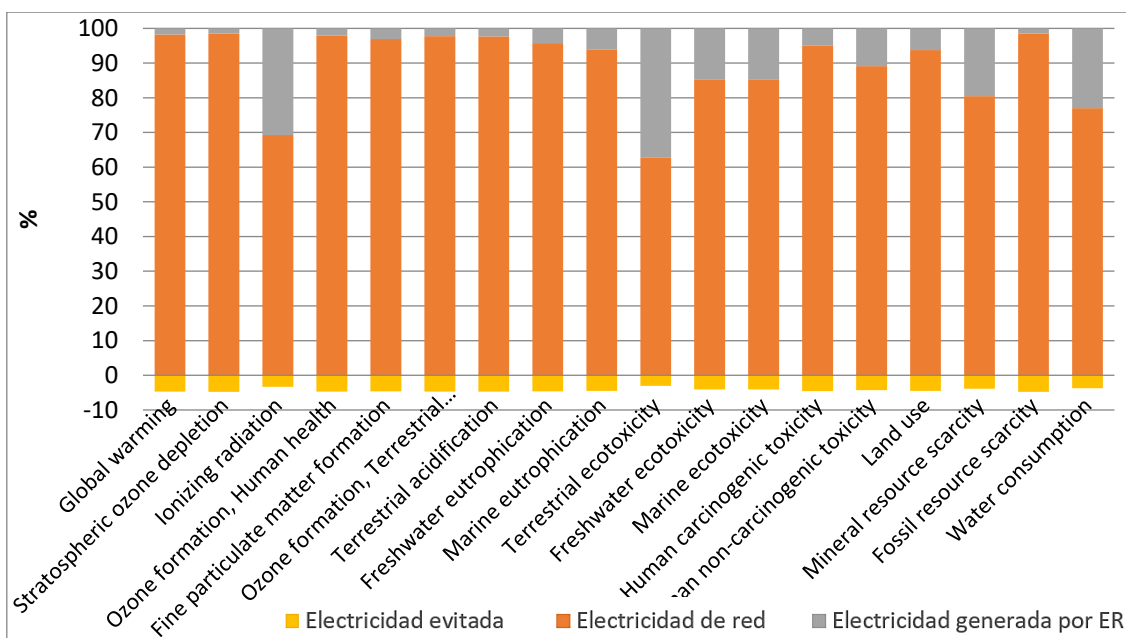
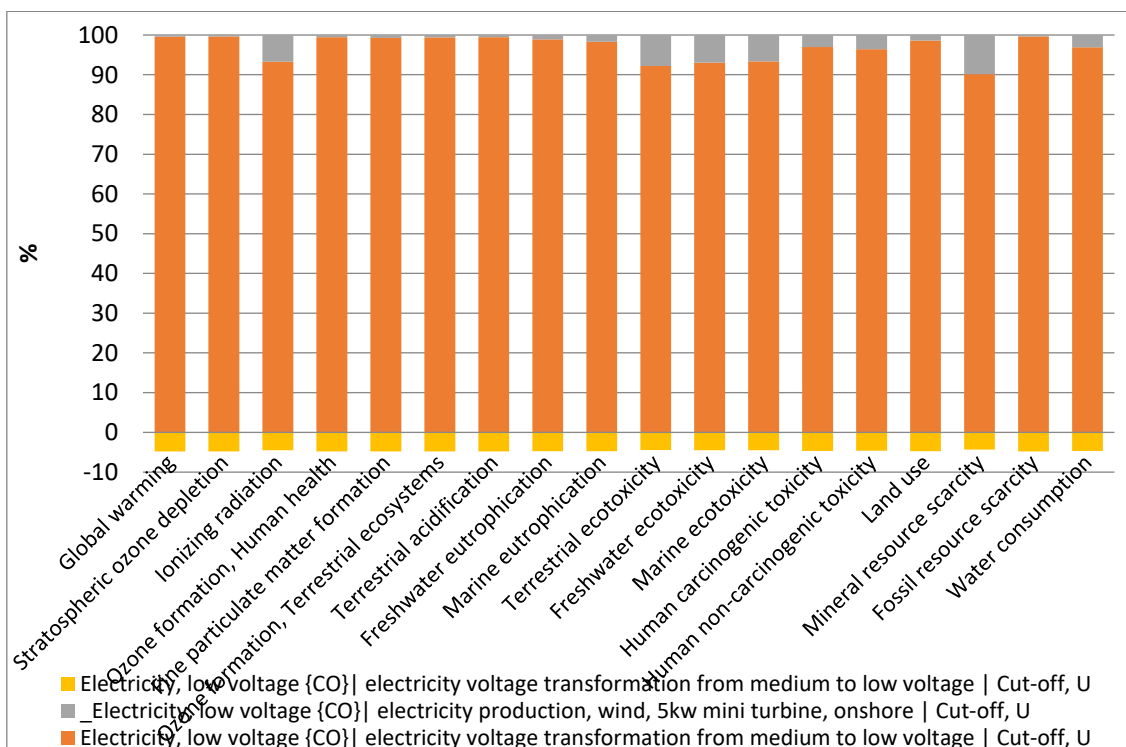
<b>Contribución según caracterización GWP</b>				
<b>No</b>	<b>Proceso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
1	Municipal solid waste {GLO}  treatment of municipal solid waste, unsanitary landfill, wet infiltration class (500mm)   Cut-off, U	kg CO2 eq	164,01	18,7
2	Hazardous waste, for incineration {RoW}  treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration   Cut-off, U	kg CO2 eq	103,56	11,8
3	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 eq	41,02	4,7
4	Pig iron {GLO}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	38,23	4,4
5	Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW}  heat production, anthracite, at stove 5-15kW   Cut-off, U	kg CO2 eq	34,62	3,9
6	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cut-off, U	kg CO2 eq	29,23	3,3
7	Clinker {US}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	24,29	2,8
8	Hard coal {CN}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 eq	22,00	2,5
9	Clinker {Europe without Switzerland}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	21,36	2,4
10	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	19,36	2,2
<b>Inventario GEI según caracterización GWP</b>				
<b>No</b>	<b>Sustancia</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO2 eq	644,94	73,4
2	Methane, biogenic	kg CO2 eq	163,47	18,6
3	Methane, fossil	kg CO2 eq	56,50	6,4
4	Dinitrogen monoxide	kg CO2 eq	8,02	0,9
5	Sulfur hexafluoride	kg CO2 eq	2,82	0,3
6	Carbon dioxide, land transformation	kg CO2 eq	2,11	0,2
7	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg CO2 eq	0,14	0,0
8	Carbon dioxide	kg CO2 eq	0,13	0,0
9	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	kg CO2 eq	0,11	0,0
10	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	kg CO2 eq	0,06	0,0

Diez procesos y sustancias más representativos de la caracterización de la categoría “cambio climático” según metodología ReCiPe de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

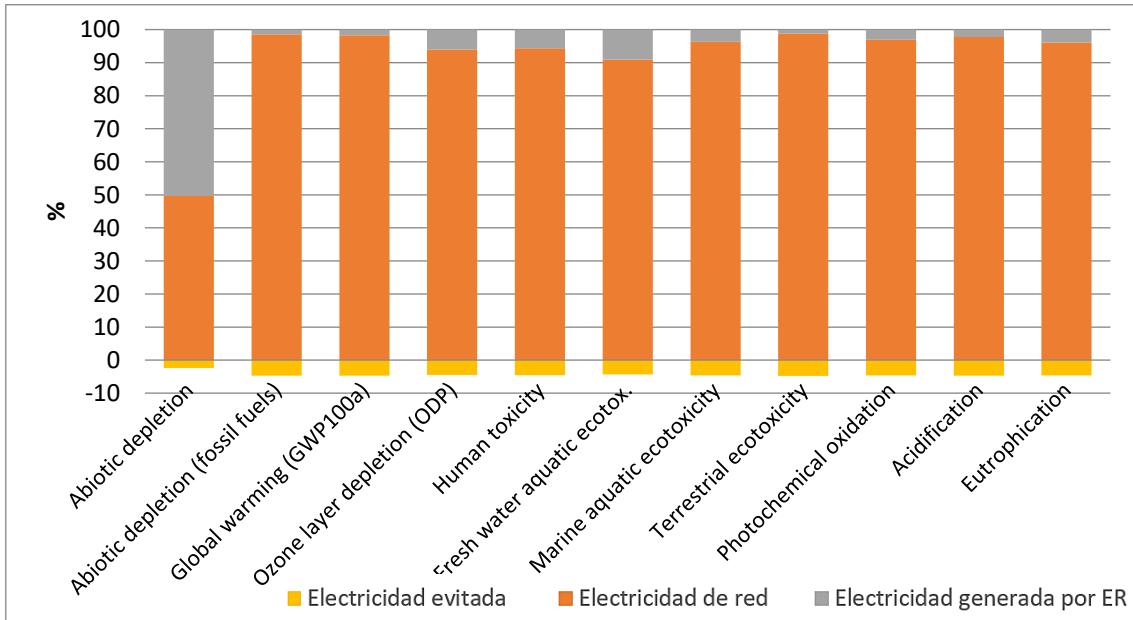
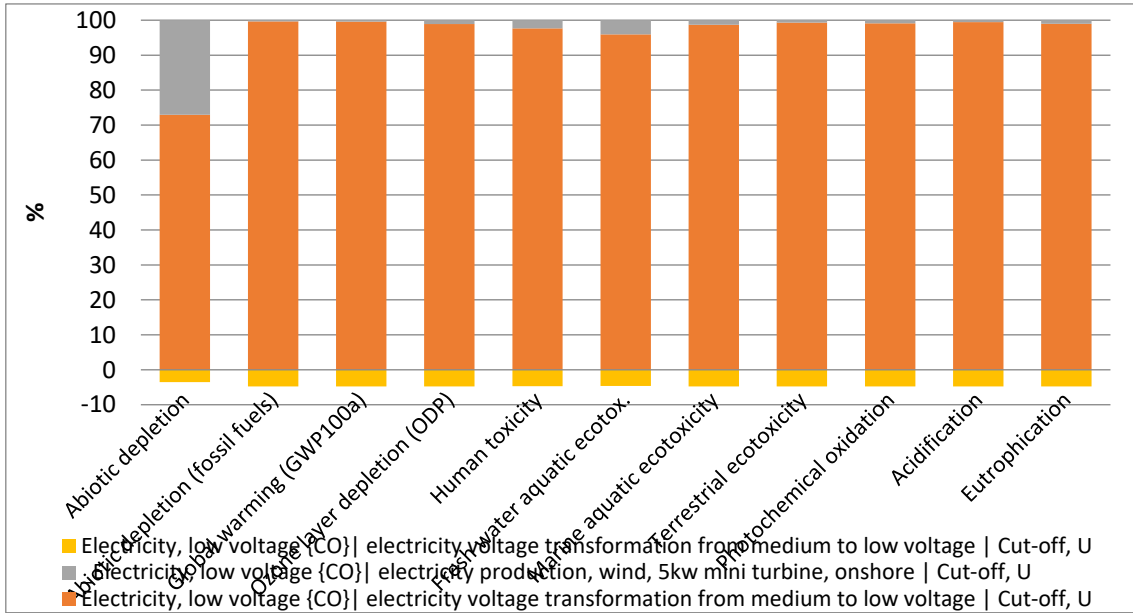


Red de caracterización energías renovables metodología CED (arriba), y caracterización GWP (abajo) metodología ReCiPe, de ACV del edificio con energía fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

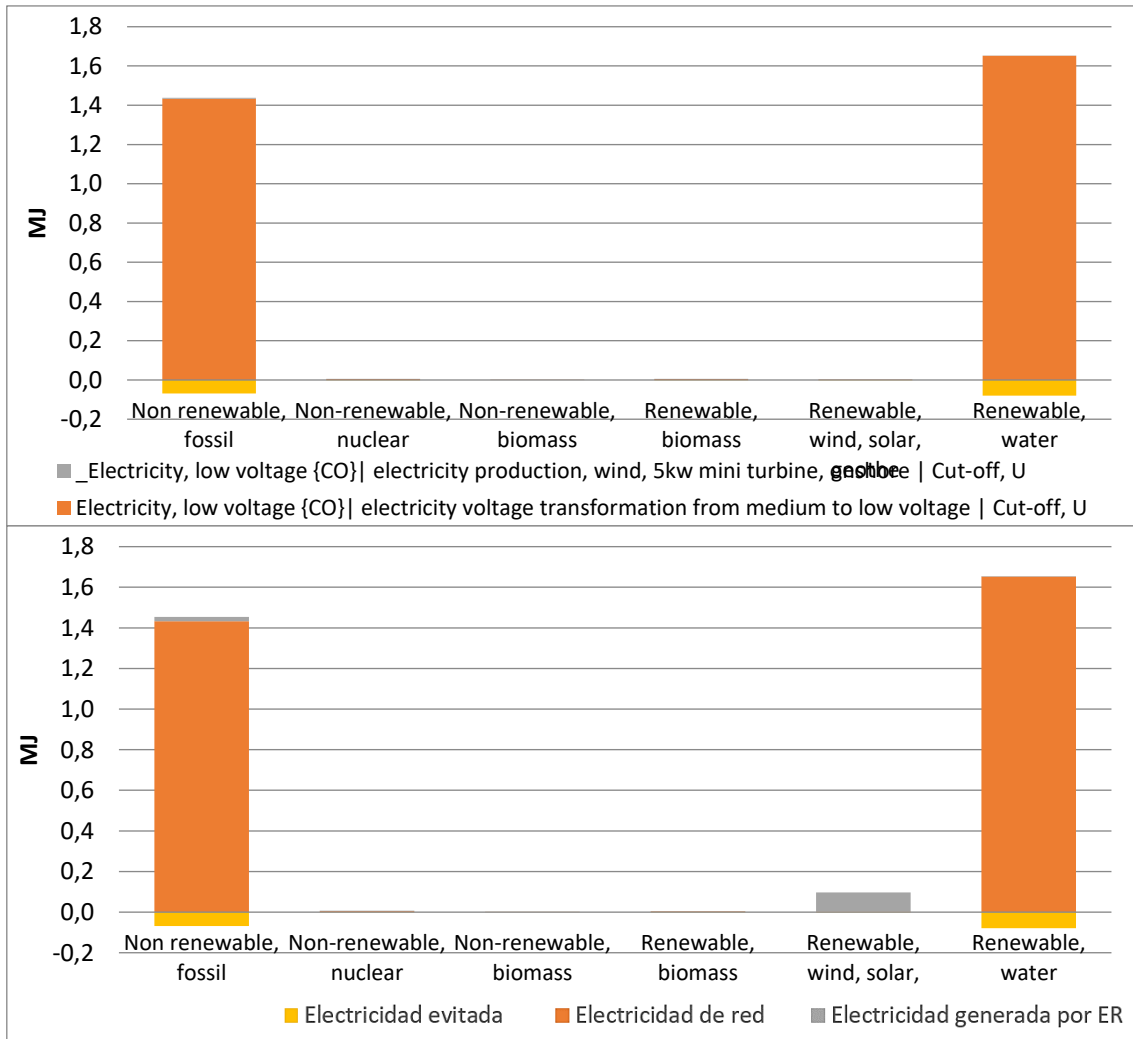
## Etapa B6



Caracterización en % con metodología ReCiPe de etapa B6 del edificio con energía minieólica (arriba) y fotovoltaica (abajo). Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Caracterización en % con metodología CML de etapa B6 del edificio con energía minieólica (arriba) y fotovoltaica (abajo). Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Ponderación con metodología CED de etapa B6 del edificio con energía minieólica (arriba) y fotovoltaica (abajo). Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

B6 Contribución de caracterización de energía renovable no convencional – sin renovables				
No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00205	83,9
2	Electricity, high voltage {AU}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00003	1,4
3	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00003	1,1
4	Electricity, high voltage {TRE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,9
5	Electricity, high voltage {MRO, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,8
6	Electricity, high voltage {ID}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,8
7	Electricity, high voltage {DE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,8
8	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,7



9	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,6
10	Electricity, high voltage {RFC}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00001	0,5
<b>B6 Inventario de puntuación única – sin renovables</b>				
No	Sustancia	Unidad	Total	%
1	Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	1,73	53,4
2	Gas, natural/m3	MJ	0,89	27,5
3	Coal, hard	MJ	0,55	16,9
4	Oil, crude	MJ	0,05	1,5
5	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	MJ	0,01	0,2
6	Uranium	MJ	0,01	0,2
7	Coal, brown	MJ	0,00	0,1
8	Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	0,00	0,1
9	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	0,00	0,1
10	Energy, geothermal, converted	MJ	0,00	0,0
<b>B6 Inventario de caracterización de energía renovable no convencional – sin renovables</b>				
1	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	0,00237	97,2
2	Energy, geothermal, converted	MJ	0,00007	2,7
3	Energy, solar, converted	MJ	0,00000	0,1

<b>B6 Contribución de caracterización de energía renovable no convencional – Minieólica</b>				
No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00186	64,6
2	Electricity, low voltage {CO}  electricity production, wind, 5kw mini turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00064	22,1
3	Electricity, high voltage {AU}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00003	1,1
4	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00003	0,9
5	Electricity, high voltage {TRE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,7
6	Electricity, high voltage {DE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,7
7	Electricity, high voltage {MRO, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,7
8	Electricity, high voltage {ID}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,6
9	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,6
10	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,00001	0,5
<b>B6 Inventario de puntuación única – Minieólica</b>				
No	Sustancia	Unidad	Total	%
1	Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	1,57314	53,2
2	Gas, natural/m3	MJ	0,81212	27,5

3	Coal, hard	MJ	0,50113	17,0
4	Oil, crude	MJ	0,04496	1,5
5	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	MJ	0,00701	0,2
6	Uranium	MJ	0,00522	0,2
7	Coal, brown	MJ	0,00409	0,1
8	Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	0,00397	0,1
9	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	0,00281	0,1
10	Energy, geothermal, converted	MJ	0,00006	0,0
<b>B6 Inventario de caracterización de energía renovable no convencional – Minieólica</b>				
1	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	0,00281	97,7
2	Energy, geothermal, converted	MJ	0,00006	2,2
3	Energy, solar, converted	MJ	0,00000	0,1

<b>B6 Contribución de caracterización de energía renovable no convencional – Fotovoltaica</b>				
No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Electricity, low voltage {RoW}  electricity production, photovoltaic, 3kWp flat-roof installation, multi-Si   Cut-off, U	MJ	0,09486	97,5
2	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00186	1,9
3	Electricity, high voltage {DE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00005	0,1
4	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00004	0,0
5	Electricity, high voltage {AU}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00003	0,0
6	Electricity, high voltage {TRE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00003	0,0
7	Electricity, high voltage {MRO, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00003	0,0
8	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,00003	0,0
9	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,0
10	Electricity, high voltage {ID}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,00002	0,0
<b>B6 Inventario de puntuación única – Fotovoltaica</b>				
No	Sustancia	Unidad	Total	%
1	Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	1,57594	51,3
2	Gas, natural/m3	MJ	0,81741	26,6
3	Coal, hard	MJ	0,50787	16,5
4	Energy, solar, converted	MJ	0,09487	3,1
5	Oil, crude	MJ	0,04732	1,5
6	Uranium	MJ	0,00737	0,2
7	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	MJ	0,00714	0,2
8	Coal, brown	MJ	0,00556	0,2
9	Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	0,00451	0,1

10	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	0,00237	0,1
<b>B6 Inventario de caracterización de energía renovable no convencional – Fotovoltaica</b>				
1	Energy, solar, converted	MJ	0,09487	97,5
2	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	0,00237	2,4
3	Energy, geothermal, converted	MJ	0,00009	0,1

Diez procesos y sustancias más representativos de la caracterización e inventario de energías renovables no convencionales según metodología CED, etapa B6 para los tres escenarios. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

<b>B6 Contribución según caracterización GWP – sin renovables</b>				
No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0478	45,3
2	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, combined cycle power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0214	20,3
3	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0195	18,5
4	Electricity, medium voltage {CO}  market for electricity, medium voltage   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0024	2,2
5	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, oil   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0013	1,2
6	Natural gas, high pressure {DZ}  natural gas production   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0010	0,9
7	Electricity, high voltage {CO}  market for electricity, high voltage   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0009	0,8
8	Hard coal {RNA}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0008	0,8
9	Transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas {DZ}  processing   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0008	0,8
10	Hard coal {RU}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0008	0,8
<b>B6 Inventario GEI según caracterización GWP – sin renovables</b>				
No	Sustancia	Unidad	Total	%
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO2 eq	0,0967	91,7
2	Methane, fossil	kg CO2 eq	0,0048	4,6
3	Sulfur hexafluoride	kg CO2 eq	0,0024	2,3
4	Dinitrogen monoxide	kg CO2 eq	0,0015	1,4
5	Methane, biogenic	kg CO2 eq	0,0000	0,0
6	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg CO2 eq	0,0000	0,0
7	Carbon dioxide, land transformation	kg CO2 eq	0,0000	0,0
8	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	kg CO2 eq	0,0000	0,0
9	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	kg CO2 eq	0,0000	0,0
10	Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	kg CO2 eq	0,0000	0,0

<b>B6 Contribución según caracterización GWP – Minieólica</b>				
No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0434	45,1

2	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, combined cycle power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0194	20,2
3	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0177	18,5
4	Electricity, medium voltage {CO}  market for electricity, medium voltage   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0022	2,2
5	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, oil   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0011	1,2
6	Natural gas, high pressure {DZ}  natural gas production   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0009	0,9
7	Electricity, high voltage {CO}  market for electricity, high voltage   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0008	0,8
8	Hard coal {RNA}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0007	0,8
9	Transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas {DZ}  processing   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0007	0,8
10	Hard coal {RU}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0007	0,8

#### B6 Inventario GEI según caracterización GWP – Minieólica

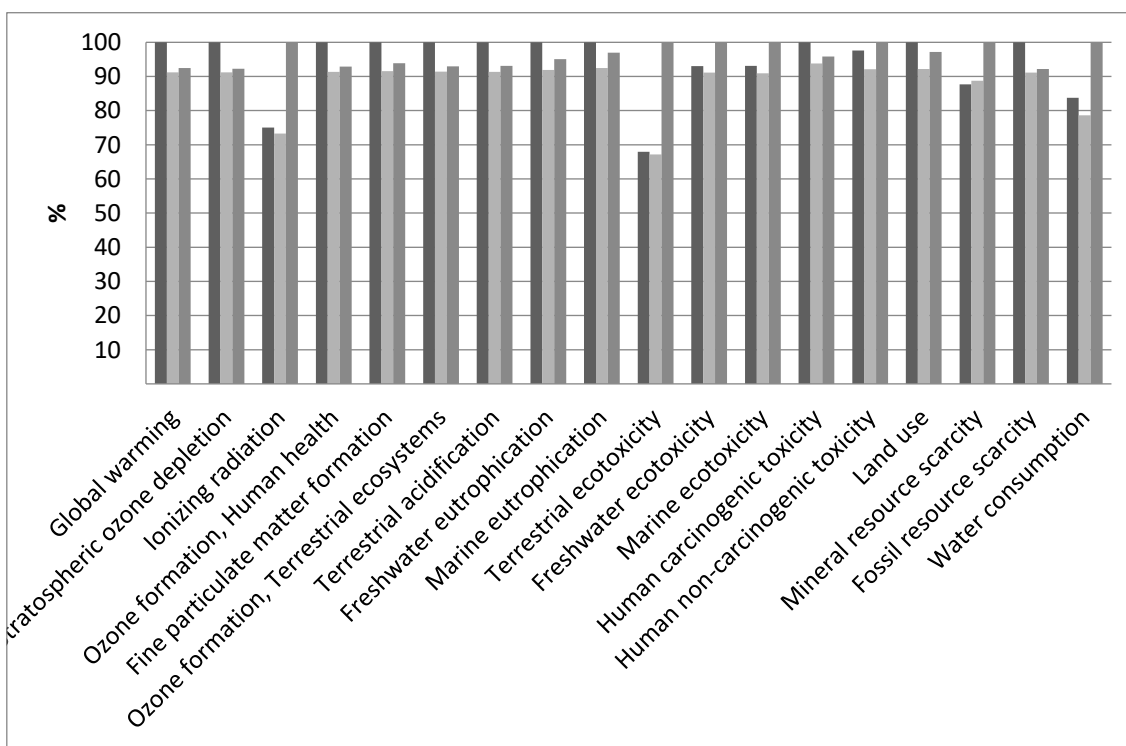
No	Sustancia	Unidad	Total	%
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO2 eq	0,0882	91,7
2	Methane, fossil	kg CO2 eq	0,0044	4,6
3	Sulfur hexafluoride	kg CO2 eq	0,0022	2,3
4	Dinitrogen monoxide	kg CO2 eq	0,0013	1,4
5	Methane, biogenic	kg CO2 eq	0,0000	0,0
6	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg CO2 eq	0,0000	0,0
7	Carbon dioxide, land transformation	kg CO2 eq	0,0000	0,0
8	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	kg CO2 eq	0,0000	0,0
9	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	kg CO2 eq	0,0000	0,0
10	Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	kg CO2 eq	0,0000	0,0

#### B6 Contribución según caracterización GWP – Fotovoltaica

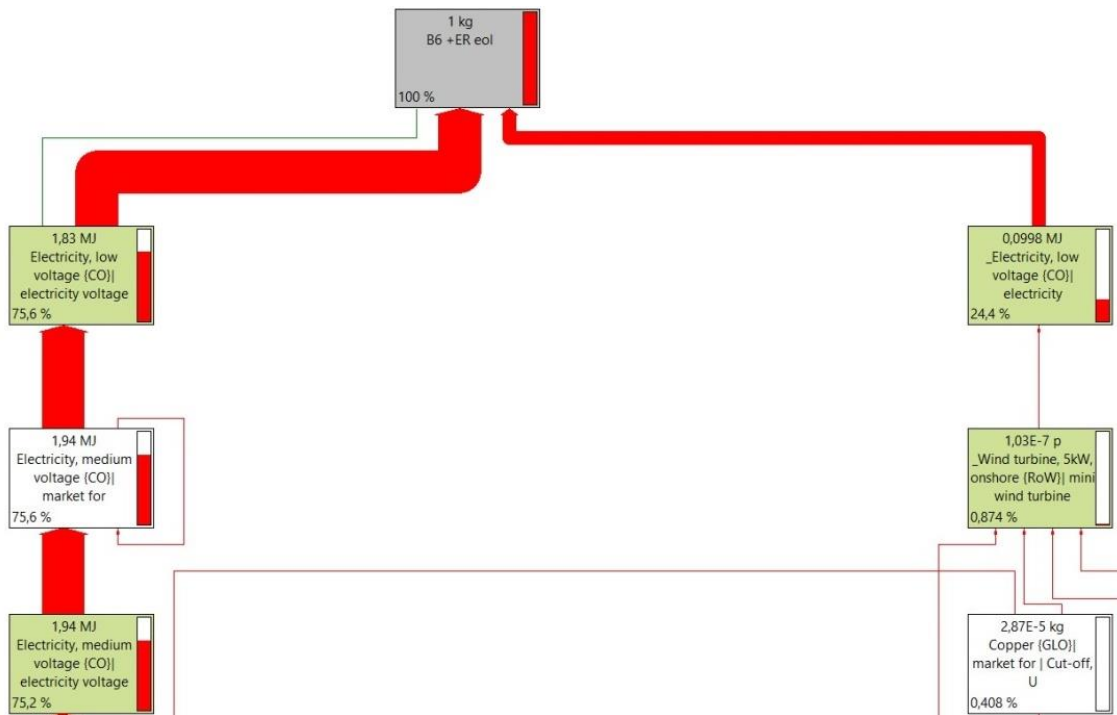
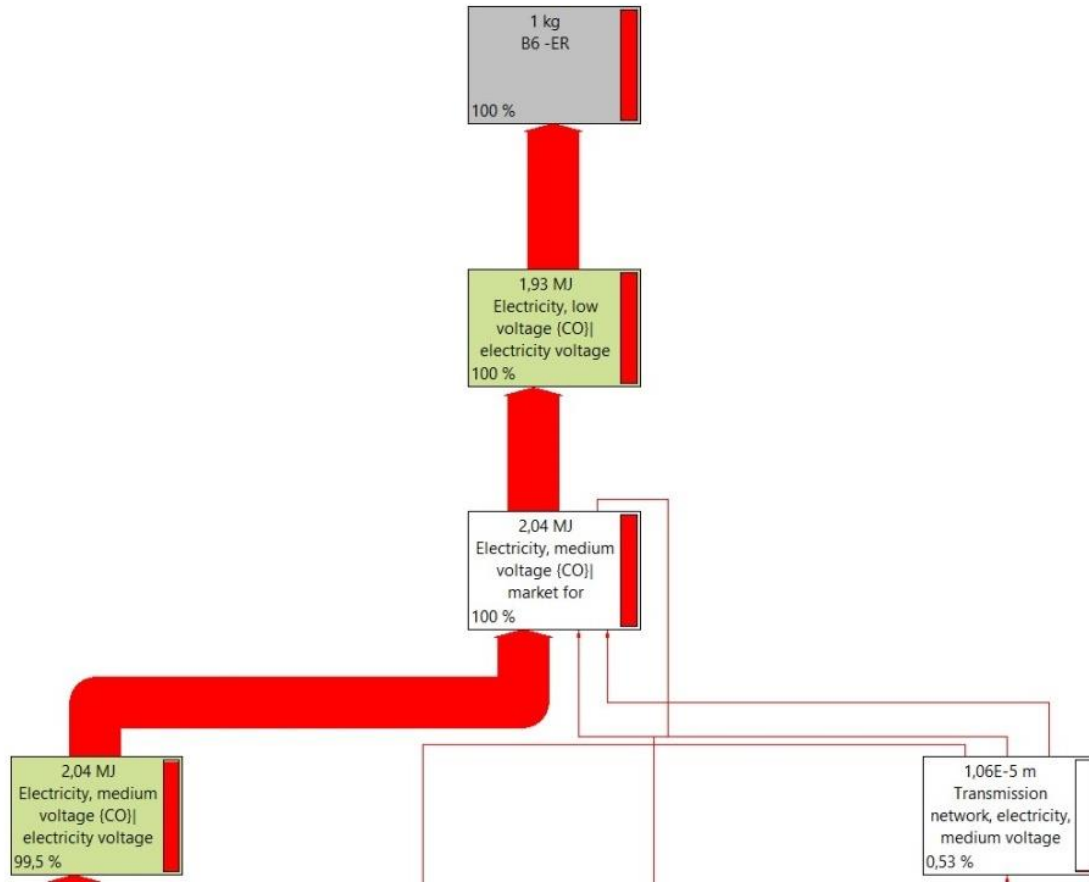
No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0434	44,5
2	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, combined cycle power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0194	19,9
3	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0178	18,2
4	Electricity, medium voltage {CO}  market for electricity, medium voltage   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0022	2,2
5	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, oil   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0012	1,2
6	Natural gas, high pressure {DZ}  natural gas production   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0009	0,9
7	Electricity, high voltage {CO}  market for electricity, high voltage   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0008	0,8
8	Hard coal {RNA}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0008	0,8

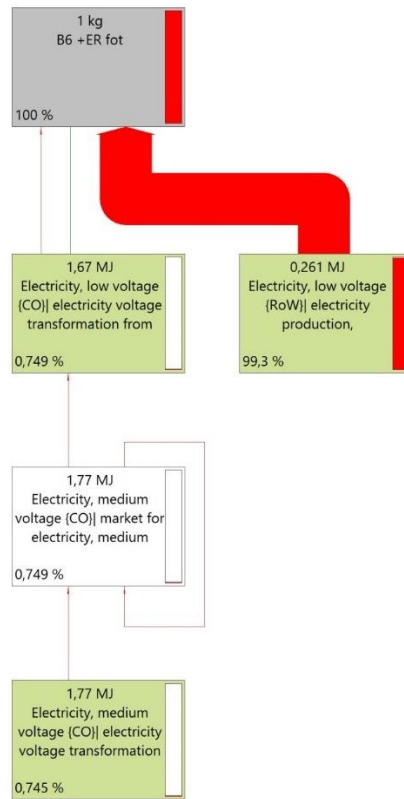
9	Transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas {DZ}  processing   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0007	0,8
10	Hard coal {RU}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0007	0,8
<b>B6 Inventario GEI según caracterización GWP – Fotovoltaica</b>				
No	Sustancia	Unidad	Total	%
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO2 eq	0,0893	91,6
2	Methane, fossil	kg CO2 eq	0,0045	4,6
3	Sulfur hexafluoride	kg CO2 eq	0,0022	2,3
4	Dinitrogen monoxide	kg CO2 eq	0,0013	1,4
5	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg CO2 eq	0,0000	0,0
6	Methane, biogenic	kg CO2 eq	0,0000	0,0
7	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	kg CO2 eq	0,0000	0,0
8	Carbon dioxide, land transformation	kg CO2 eq	0,0000	0,0
9	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	kg CO2 eq	0,0000	0,0
10	Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	kg CO2 eq	0,0000	0,0

Diez procesos y sustancias más representativos de la caracterización de la categoría “cambio climático” según metodología ReCiPe, etapa B6 para los tres escenarios. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

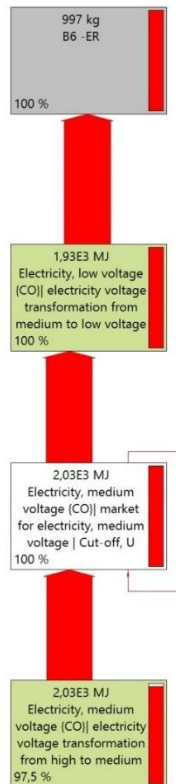


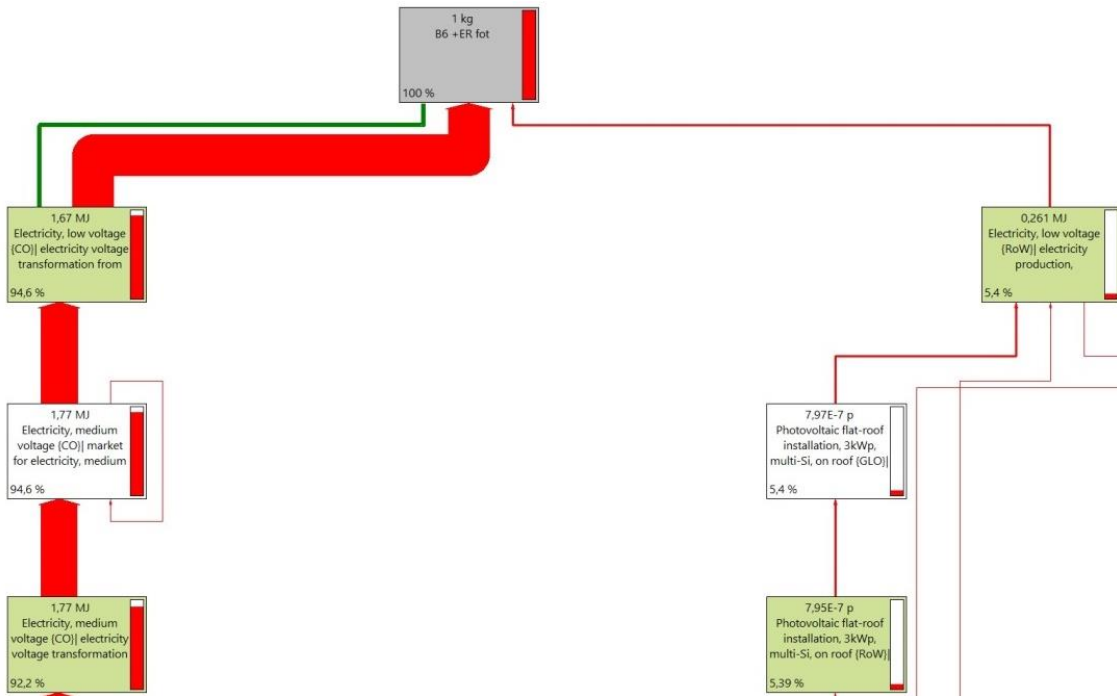
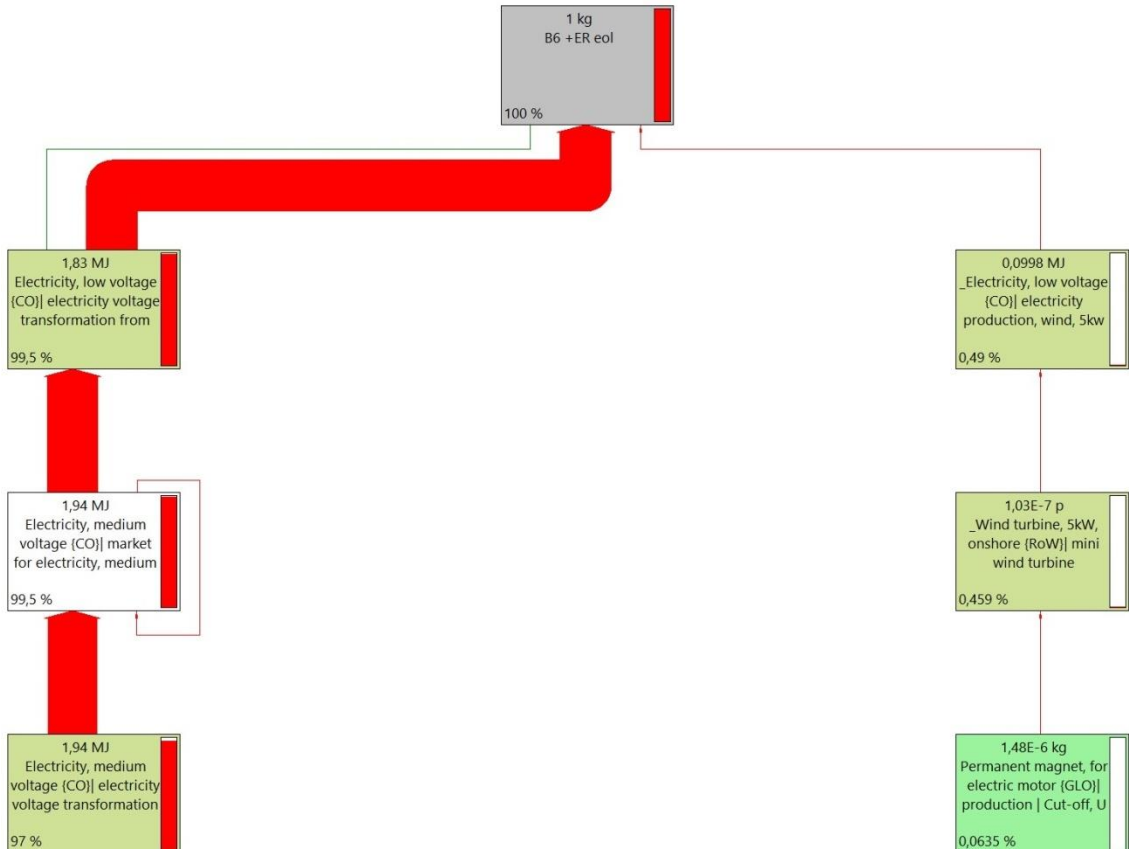
Comparación de caracterización en % con metodología ReCiPe, etapa B6 del edificio sin renovables y con renovable minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro





Red de caracterización energías renovables metodología CED etapa B6 para los tres escenarios. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

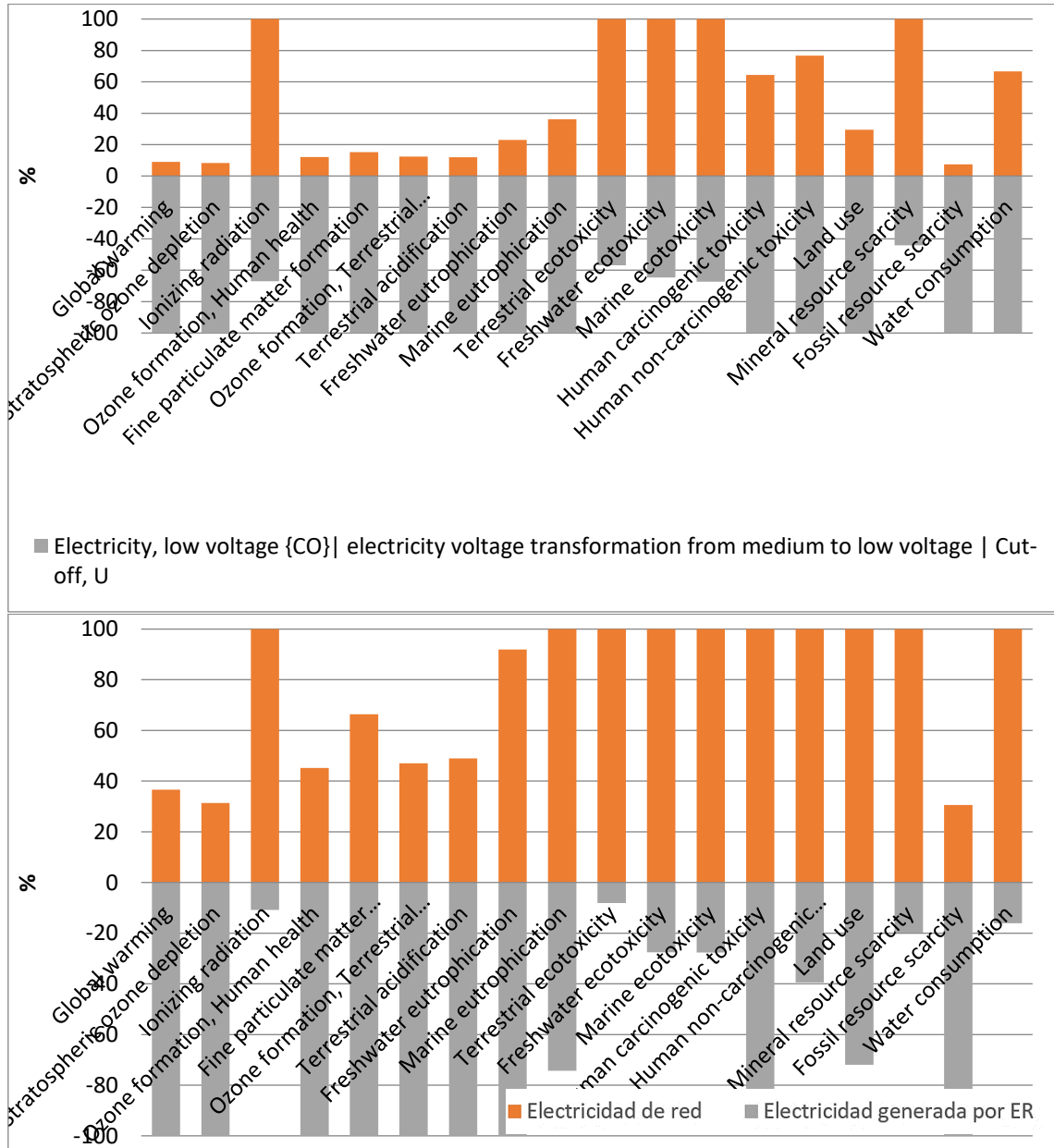




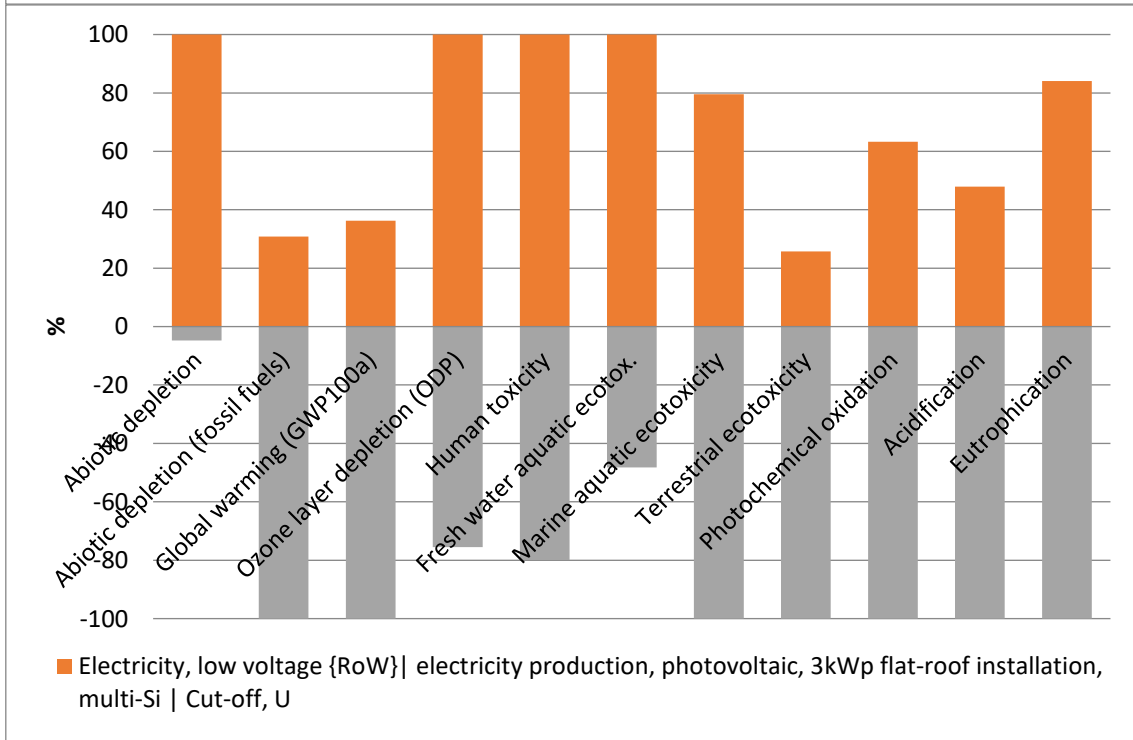
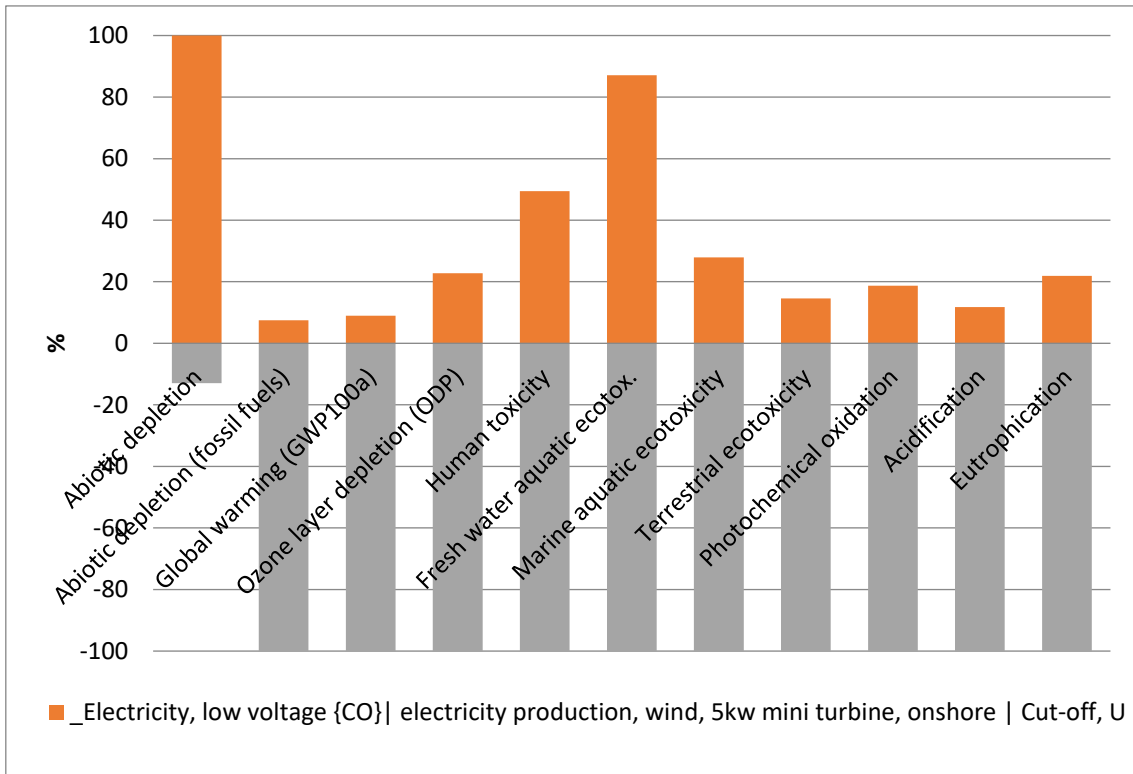
Red de caracterización GWP (abajo) metodología ReCiPe, etapa B6 para los tres escenarios. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



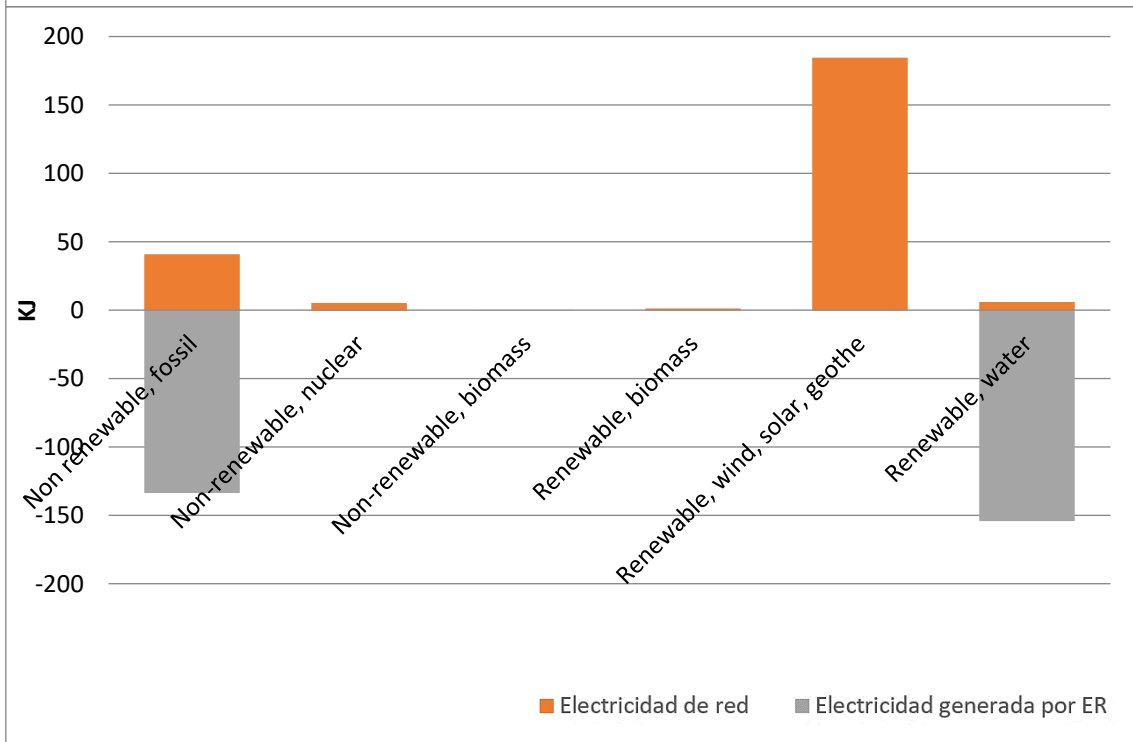
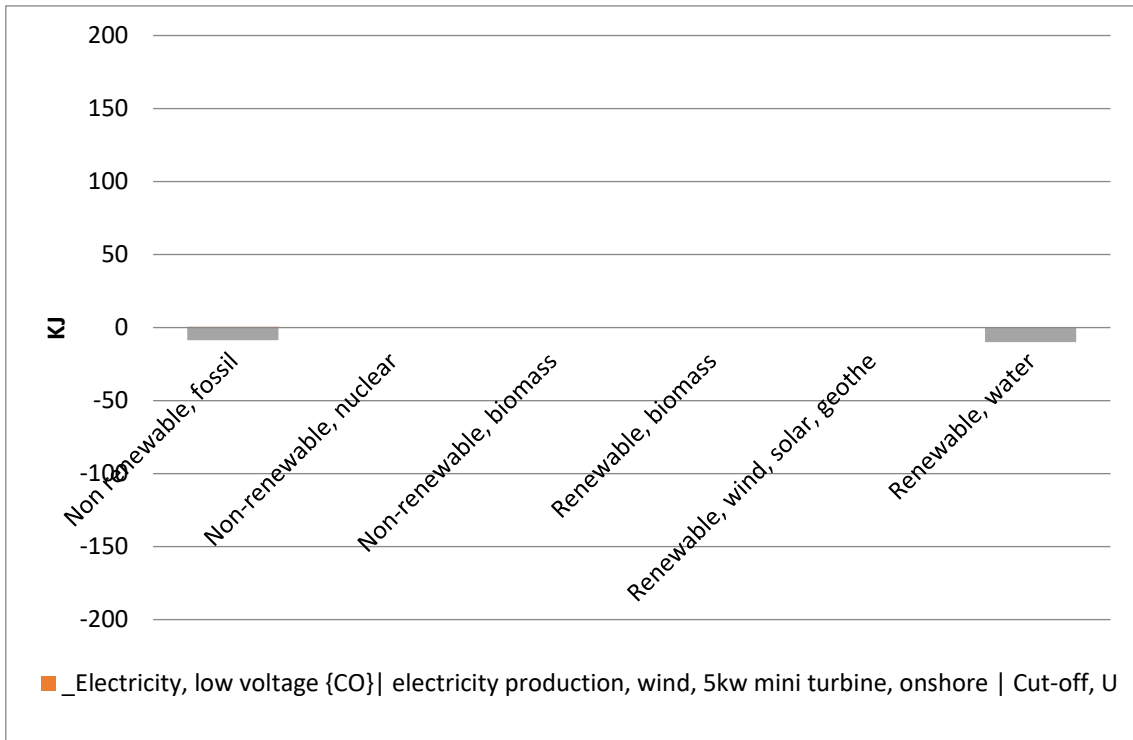
## Etapa D



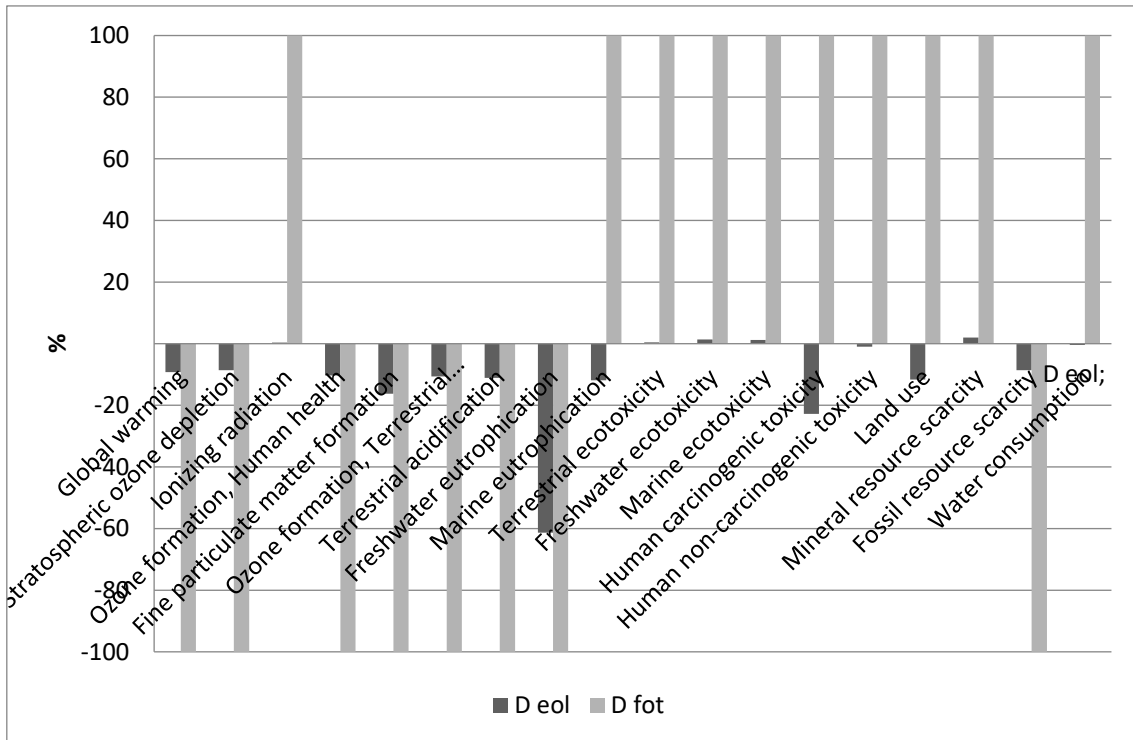
Caracterización en % con metodología ReCiPe de etapa D del edificio con energía minieólica (arriba) y fotovoltaica (abajo). Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



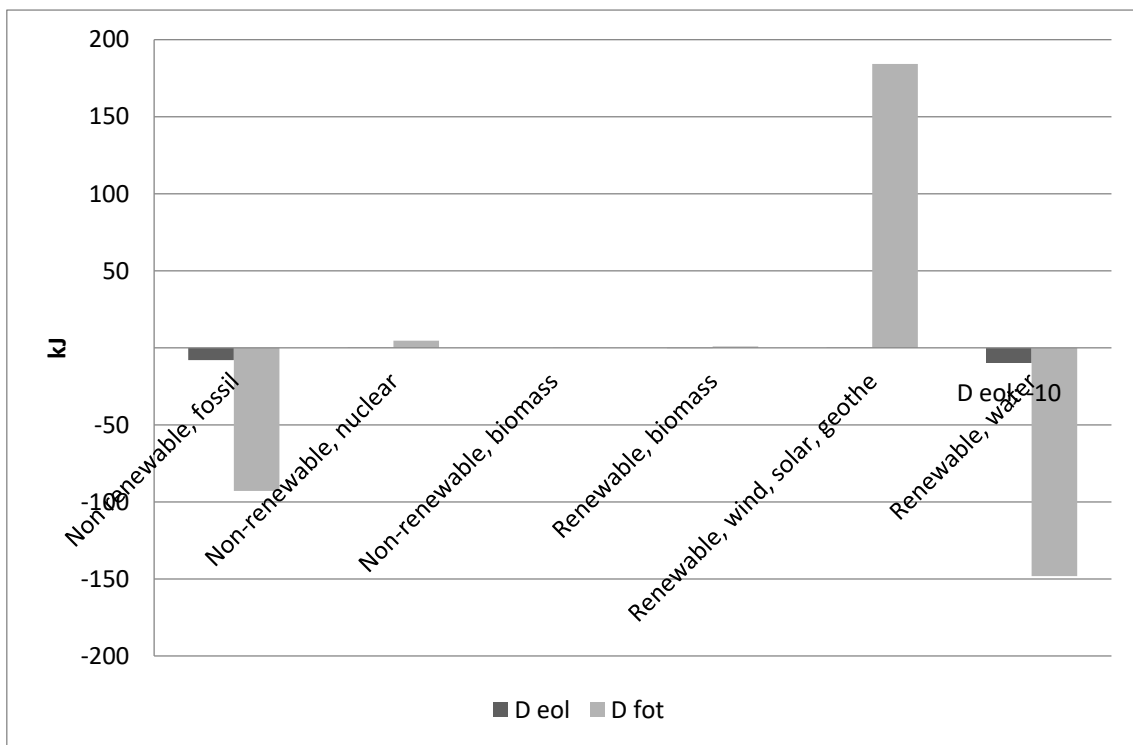
Caracterización en % con metodología CML de etapa D del edificio con energía minieólica (arriba) y fotovoltaica (abajo). Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Ponderación con metodología CED de etapa D del edificio con energía minieólica (arriba) y fotovoltaica (abajo). Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Comparación de caracterización en % con metodología ReCiPe, etapa D del edificio renovable minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Comparación de ponderación en KJ con metodología CED, etapa D del edificio renovable minieólica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

**D Contribución de caracterización de energía renovable no convencional – Minieólica**

No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Electricity, low voltage {CO}  electricity production, wind, 5kw mini turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00008	115,4
2	Electricity, high voltage {DE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00000	0,4
3	Electricity, high voltage {ES}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00000	0,2
4	Electricity, high voltage {FR}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00000	0,1
5	Electricity, high voltage {ES}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00000	0,1
6	Electricity, high voltage {GB}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00000	0,1
7	Electricity, high voltage {PT}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00000	0,1
8	Electricity, high voltage {ID}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,00000	-0,1
9	Electricity, high voltage {AU}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,00000	-0,2
10	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	-0,00001	-17,0

#### D Inventario de puntuación única – Minieólica

No	Sustancia	Unidad	Total	%
1	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	0,00007	-0,4
2	Uranium	MJ	0,00003	-0,2
3	Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest	MJ	0,00000	0,0
4	Energy, geothermal, converted	MJ	0,00000	0,0
5	Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	-0,00001	0,1
6	Oil, crude	MJ	-0,00003	0,2
7	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	MJ	-0,00004	0,2
8	Coal, hard	MJ	-0,00294	16,6
9	Gas, natural/m3	MJ	-0,00495	27,9
10	Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	-0,00987	55,7

#### D Inventario de caracterización de energía renovable no convencional – Minieólica

1	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	0,00007	100,0
2	Energy, geothermal, converted	MJ	0,00000	0,0
3	Energy, solar, converted	MJ	0,00000	0,0

#### D Contribución de caracterización de energía renovable no convencional – Fotovoltaica

No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Electricity, low voltage {RoW}  electricity production, photovoltaic, 3kWp flat-roof installation, multi-Si   Cut-off, U	MJ	0,184036	99,9
2	Electricity, high voltage {DE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,000064	0,0
3	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,000021	0,0
4	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,000019	0,0

5	Electricity, high voltage {ES}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,000016	0,0
6	Electricity, high voltage {TRE}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,000016	0,0
7	Electricity, high voltage {MRO, US only}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	0,000015	0,0
8	Electricity, high voltage {WECC, US only}  electricity production, deep geothermal   Cut-off, U	MJ	0,000012	0,0
9	Heat, central or small-scale, other than natural gas {CH}  operation, solar collector system, evacuated tube collector, one-family house, for combined system   Cut-off, U	MJ	0,000000	0,0
10	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, U	MJ	-0,00018	-0,1

#### D Inventario de puntuación única – Fotovoltaica

No	Sustancia	Unidad	Total	%
1	Energy, solar, converted	MJ	0,18404	-359,5
2	Uranium	MJ	0,00470	-9,2
3	Oil, crude	MJ	0,00411	-8,0
4	Coal, brown	MJ	0,00283	-5,5
5	Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	0,00085	-1,7
6	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	0,00020	-0,4
7	Energy, geothermal, converted	MJ	0,00005	-0,1
8	Coal, hard	MJ	-0,03266	63,8
9	Gas, natural/m3	MJ	-0,06671	130,3
10	Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	-0,14822	289,5

#### D Inventario de caracterización de energía renovable no convencional – Fotovoltaica

1	Energy, solar, converted	MJ	0,18404	99,9%
2	Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	0,00020	0,1%
3	Energy, geothermal, converted	MJ	0,00005	0,0%

Diez procesos y sustancias más representativos de la caracterización e inventario de energías renovables no convencionales según metodología CED, etapa D para los tres escenarios. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

#### D Contribución según caracterización GWP – Minieólica

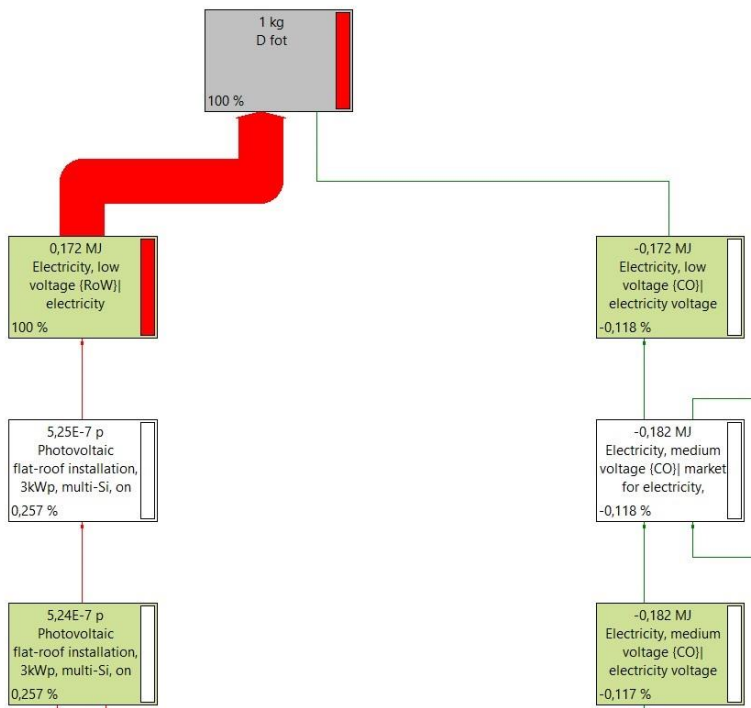
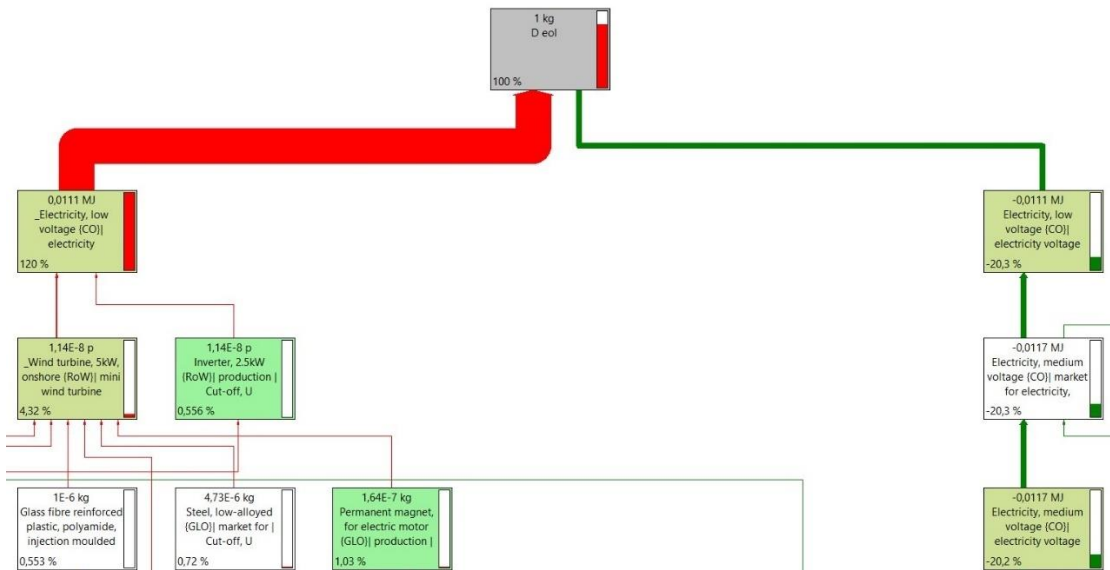
No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Clinker {CH}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,000008	-1,4
2	Nylon 6-6, glass-filled {RoW}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,000005	-0,9
3	Nylon 6-6, glass-filled {RER}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,000003	-0,5
4	Pig iron {GLO}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,000001	-0,2
5	Natural gas, high pressure {DZ}  natural gas production   Cut-off, U	kg CO2 eq	-0,00000	1,0
6	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, oil   Cut-off, U	kg CO2 eq	-0,00000	1,3
7	Electricity, medium voltage {CO}  market for electricity, medium voltage   Cut-off, U	kg CO2 eq	-0,00001	2,5
8	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	-0,00011	20,3

9	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, combined cycle power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	-0,00012	22,3
10	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 eq	-0,00027	49,8
<b>D Inventario GEI según caracterización GWP – Minieólica</b>				
No	Sustancia	Unidad	Total	%
1	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg CO2 eq	0,000000	-0,1
2	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	kg CO2 eq	0,000000	0,0
3	Carbon dioxide, land transformation	kg CO2 eq	0,000000	0,0
4	Methane, biogenic	kg CO2 eq	0,000000	0,0
5	Methane, trifluoro-, HFC-23	kg CO2 eq	0,000000	0,0
6	Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	kg CO2 eq	0,000000	0,0
7	Dinitrogen monoxide	kg CO2 eq	-0,000008	1,4
8	Sulfur hexafluoride	kg CO2 eq	-0,000001	2,5
9	Methane, fossil	kg CO2 eq	-0,000002	4,1
10	Carbon dioxide, fossil	kg CO2 eq	-0,000050	92,1

<b>D Contribución según caracterización GWP – Fotovoltaica</b>				
No	Proceso	Unidad	Total	%
1	Hard coal {CN}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0001	-2,8
2	Flat glass, uncoated {RoW}  production   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0000	-1,3
3	Electricity, high voltage {CN-NM}  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0000	-1,2
4	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0000	-1,2
5	Electricity, high voltage {DE}  electricity production, lignite   Cut-off, U	kg CO2 eq	0,0000	-1,1
6	Natural gas, high pressure {DZ}  natural gas production   Cut-off, U	kg CO2 eq	-0,0000	1,4
7	Electricity, medium voltage {CO}  market for electricity, medium voltage   Cut-off, U	kg CO2 eq	-0,0002	3,5
8	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	-0,0016	28,2
9	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, combined cycle power plant   Cut-off, U	kg CO2 eq	-0,0018	31,7
10	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 eq	-0,0042	71,1
<b>D Inventario GEI según caracterización GWP – Fotovoltaica</b>				
No	Sustancia	Unidad	Total	%
1	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg CO2 eq	0,000003	-0,6
2	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	kg CO2 eq	0,000001	-0,3
3	Methane, biogenic	kg CO2 eq	0,000001	-0,2
4	Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	kg CO2 eq	0,000000	-0,1
5	Carbon dioxide, land transformation	kg CO2 eq	0,000000	-0,1
6	Methane, trifluoro-, HFC-23	kg CO2 eq	0,000000	-0,1

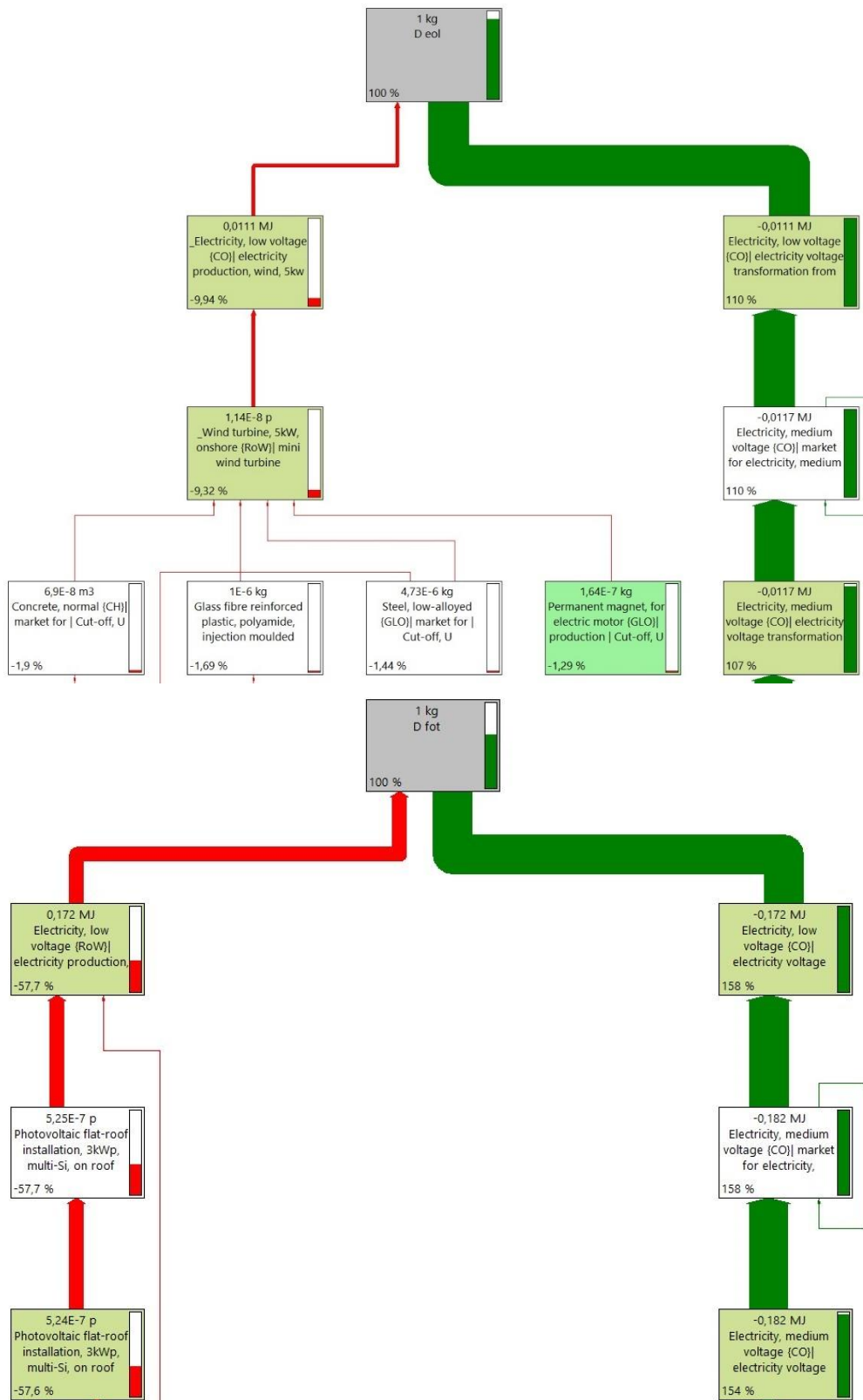
7	Methane, fossil	kg CO2 eq	-0,00009	1,6
8	Dinitrogen monoxide	kg CO2 eq	-0,00009	1,6
9	Sulfur hexafluoride	kg CO2 eq	-0,0002	3,5
10	Carbon dioxide, fossil	kg CO2 eq	-0,0056	94,8

Diez procesos y sustancias más representativos de la caracterización de la categoría “cambio climático” según metodología ReCiPe, etapa D para los tres escenarios. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro



Red de caracterización energías renovables metodología CED etapa D para los dos escenarios con renovables. Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro





Red de caracterización GWP (abajo) metodología ReCiPe, etapa D para los dos escenarios con renovables.

Fuente: Elaboración propia con base en SimaPro

## Anexo 10. Bibliografía completa

Abella, Miguel A. (s.f.). Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos autónomos. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Master en Energías Renovables y Mercado Energético. Tomado de [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45302/componente45301.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45302/componente45301.pdf)

Antón, M. (2004). Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Documento de tesis doctoral. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6827>

Agencia Extremeña de la Energía (s.f.). Biomasa para Proyectistas: Curso Técnico de Sistemas de Biomasa y Sistemas Híbridos. Recuperado de: <https://www.agenex.net/images/stories/deptos/biomasa-para-proyectistas.pdf>

Aguilera, Jorge y Hontoria, Leocadio (s.f.). Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. Departamento de electrónica. Escuela Politécnica Superior Universidad de Jaén. Tomado de <https://manuelberaun.files.wordpress.com/2011/12/dimensionado-de-sfv-autonomos.pdf>

Albizzati, E. (2016). Evaluación de la sustentabilidad de instalaciones solares con colectores de placa plana y tubos evacuados. En *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 32, núm. 3, 2016, pp. 315-322. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/370/37046488006.pdf> <Consulta: 06 de enero de 2021>

Aristizábal, Andrés; Botero, Mónica; y Gordillo, Gerardo. (2010). Evaluación del Desempeño Energético de un Sistema BIPVS de 3,4kW y Dimensionamiento de un Sistema BIPVS para un Usuario Doméstico Típico en Bogotá, Colombia. Segunda Conferencia Iberoamericana de Ingeniería e Innovación Tecnológica, Orlando, USA.

Asociación Solar de la Industria Térmica ASIT (2019). Estudio de la huella de carbono de la energía solar térmica. [en línea] Disponible en: <https://www.interempresas.net/Instaladores/Articulos/260544-Estudio-de-la-huella-de-carbono-energia-solar-termica.html> <Consulta: 06 de enero de 2021>

Ballén, Sergio. (2010). Vivienda social en altura: Tipologías urbanas y directrices de producción en Bogotá. Serie de investigación sobre vivienda en Iberoamérica. Infonavit y UAEM: México.

Ballén, Sergio et al. (2016). Metodología para el análisis del ciclo de vida de mampostería de arcilla en Cundinamarca, a partir de la evaluación del consumo de recursos energéticos. Informe de Investigación Acuerdo 81 del 27 de octubre de 2015. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.03> <Consulta: 15 de junio de 2019>

Camacol (2016). Tendencias de la construcción N°8: Diagnostico de la oferta de vivienda. Departamento de Estudios Económicos y Técnicos. Recuperado de: <https://camacol.co/informacion-economica/tendencias> <Consulta: 06 de octubre de 2018>

Camacol (2019). Informe de actividad edificadora: Julio de 2019. Departamento de Estudios Económicos y Técnicos. Recuperado de: <https://camacol.co/informacion-economica/coyuntura-economica> <Consulta: 12 de julio de 2019>

Corpoema (2012). Caracterización energética del sector residencial urbano y rural en Colombia: Volumen 2, Caracterización por Piso Térmico. UPME. Recuperado de: <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1111> <Consulta: 16 de marzo de 2020>

Chastas, P., Theodosiou, T., & Bikas, D. (2016). Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review. *Building and Environment*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.040> <Consulta: 15 de Abril de 2019>

Chel, A., & Kaushik, G. (2018). Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 655–669. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.027> <Consulta: 09 de julio de 2018>

Chévez, Pedro (2018). Energías renovables y eficiencia energética: Análisis de medidas orientadas al sector residencial. Ediciones de la U.

Comunidad de Madrid (2006). Guía práctica Sistemas Automáticos de Calefacción con Biomasa en Edificios y Viviendas. Gráficas Arias Montano, S.A. Madrid, España. Recuperado de: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-practica-sistemas-automaticos-de-calefaccion-con-biomasa-en-edificios-y-viviendas-fenercom.pdf>

Congreso de la República de Colombia. Ley 697 de 2001 (octubre 3). Diario Oficial No. 44.573 de 05 de octubre de 2001

Congreso de la República de Colombia. Ley 1715 de 2014 (mayo 13). Diario Oficial No. 49.150 de 13 de mayo de 2014

Construdata (2013). ¿Cómo se construye en Colombia?. 05 de julio de 2013. [http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como\\_se\\_construye\\_en\\_colombia.asp?Id\\_Tarea=\\_IDTAREA\\_&Email={{EMAIL}}](http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como_se_construye_en_colombia.asp?Id_Tarea=_IDTAREA_&Email={{EMAIL}}) <Consulta: 08 de octubre de 2018>

DANE. (2019). Boletín Técnico Licencias de Construcción (ELIC), Abril 2019. Recuperado de: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/licencias/bol\\_lic\\_abr19.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/licencias/bol_lic_abr19.pdf) <Consulta: 12 de julio de 2019>

DNP Departamento Nacional de Planeación, 2018a. Documento CONPES 3919, Política Nacional de Edificaciones Sostenibles. Consejo Nacional de Política Económica y Social. República de Colombia

DNP Departamento Nacional de Planeación, 2018b. Documento CONPES 3934, Política de Crecimiento Verde. Consejo Nacional de Política Económica y Social. República de Colombia

Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, DGIEM (2006). Sistemas Automáticos de Calefacción con Biomasa en Edificios y Viviendas: Guía práctica. Madrid, España.

Dixit, M. K. (2017). Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.051> <Consulta: 16 de Abril de 2019>

Ecofys (2014). Overview of Member States information on NZEBs: Working version of the progress report -final report. Por orden de la Comisión Europea. Recuperado de: <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Updated%20progress%20report%20NZEB.pdf> <Consulta: 15 de Abril de 2019>

Ecoingeniería (2012). Determinación de propiedades físicas y estimación del consumo energético en la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones colombianas. Informe Contrato No. 0000013511 para la Unidad de Planeación Minero Energética UPME y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD. Recuperado de: <http://www.si3ea.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=6G1VGDdWfHc%3D&tabid=90&mid=449&language=en-US> <Consulta: 19 de noviembre de 2019>

Eley, C. (2018). Zero Code: Architecture 2030 Building Energy Standard: Energy Efficiency Requirements Based on ASHRAE Standard 90.1-2016. Architecture 2030. Recuperado de: <https://zero-code.org/wp-content/uploads/2018/04/ZERO-Code.pdf> <Consulta: 30 de mayo de 2019>

Fenercom, Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid (2012). Guía sobre tecnología minieólica. Graficas Arias montano S.A. Madrid, España. Recuperado de: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-sobre-tecnologia-minieolica-fenercom-2012.pdf>

FincaRaiz.com (2018). <https://www.fincaraiz.com.co/> <Consulta: 19 de abril de 2018>

Finnegan, S., Jones, C., & Sharples, S. (2018). The embodied CO<sub>2e</sub> of sustainable energy technologies used in buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 181, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.037> <Consulta: 15 de Abril de 2019>

Galpin, C., & Moncaster, A. (2017). Inclusion of on-site renewables in design-stage building life cycle assessments. In *Energy Procedia* (Vol. 134, pp. 452–461). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.603> <Consulta: 10 de febrero de 2020>

García, Juan et al (2016). Comparación de los principales sistemas constructivos de VIS en Colombia, desde una perspectiva de sostenibilidad, empleando BIM: caso estudio en Soacha. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/19639> <Consulta: 09 de junio de 2020>

Global Alliance for Buildings and Construction, GABC (2016). Towards Low-GHG and resilient buildings: Global roadmap. UN Environment. <https://globalabc.org/uploads/media/default/0001/01/0d6a71a346ea7e6841b1b29c77eba6d6ae986103.pdf> <Consulta: 04 de octubre de 2018

González, Rosa (2018). Designing nearly zero energy buildings: energy efficiency and on-site generation. Tesis de doctorado Programa de Planeamiento Energético. Instituto Alberto Luiz Coimbra para Estudios de Posgrado e Investigación en Ingeniería. Rio de Janeiro. Recuperado de <http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/teses-e-dissertacoes/2018/1467-designing-nearly-zero-energy-buildings-energy-efficiency-and-on-site-generation-2>

González-Vallejo, P., Solís-Guzmán, J., Llácer, R., Marrero, M. (2015). La construcción de edificios residenciales en España en el período 2007-2010 y su impacto según el indicador Huella Ecológica. *Informes de la Construcción*, 67(539): e111, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.017>

Greening, B. & Azapagic, A. (2013). Environmental impacts of micro-wind turbines and their potential to contribute to UK climate change targets. In *Energy* (Vol 59, pp. 454-466). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.037> <Consulta: 14 de septiembre de 2020>

Guan, L., Walmsely, M., & Chen, G. (2015). Life Cycle Energy Analysis of Eight Residential Houses in Brisbane, Australia. In *Procedia Engineering* (Vol. 121, pp. 653–661). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1059> <Consulta: 15 de junio de 2019>

Harkouss, F., Fardoun, F., Biwole, P. (2019). Optimal design of renewable energy solution sets for net zero energy buildings. *Energy*, 179, 1155-1175. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.013>. <Consulta: 15 de noviembre de 2019>

Hernández, J. (2013) Metodología basada en ACV para la evaluación de sostenibilidad en edificios. Documento de tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Documento pdf disponible en <<http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/116927/TJHS1de1.pdf?sequence=1>> [Consulta: 12 de febrero de 2016]

Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación. 6ª edición. McGraw-Hill Interamericana Editores, México D.F.

Hernandez, P., & Kenny, P. (2010). From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). *Energy and Buildings*, 42(6), 815–821. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.001> <Consulta: 15 de junio de 2019>

IDEA. (2009). Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios. 84 p. Recuperado de: <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-instalaciones-de-biomasa-termica-en-edificios>

IDEAM (2007). Estudio de la caracterización climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM y FOPAE Fondo de Prevención y Atención de Emergencias. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=18241> <Consulta: 09 de enero de 2021>

Ihobe. (2009). Análisis de ciclo de vida y huella de carbono: dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. Gobierno Vasco. España: Edición Ihobe, Sociedad pública de gestión ambiental.

ISO Organización Internacional de Estandarización. Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia. Ginebra, Suiza: ISO, 2006. (ISO 14040)

ISO Organización Internacional de Estandarización. Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices. Ginebra, Suiza: ISO, 2006. (ISO 14044)

IRENA (2017). Renewable Energy in Cities. International Renewable Energy Agency- (IRENA), Abu Dhabi. [www.irena.org](http://www.irena.org)

Karunathilake, H., Hewage, K., Brinkerhoff, J., & Sadiq, R. (2019). Optimal renewable energy supply choices for net-zero ready buildings: A life cycle thinking approach under uncertainty. *Energy and Buildings*, 201, 70–89. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.030> <Consulta: 10 de febrero de 2020>

Koezjakov, A., Urge-Vorsatz, D., Crijns-Graus, W., & van den Broek, M. (2018). The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings. *Energy and Buildings*, 165, 233–245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.036> <Consulta: 16 de Abril de 2019>

Kouloumpis, V., Sobolewski, R. A., & Yan, X. (2020). Performance and life cycle assessment of a small scale vertical axis wind turbine. *Journal of Cleaner Production*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119520> <Consulta: 10 de septiembre de 2020>

Laleman, R., Albrecht, J., & Dewulf, J. (2013). Comparing various indicators for the LCA of residential photovoltaic systems. In *Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources* (pp. 211–239). Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5364-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5364-1_10)

Lombardi, L., Mendecka, B., Carnevale, E., & Stanek, W. (2018). Environmental impacts of electricity production of micro wind turbines with vertical axis. *Renewable Energy*, 128, 553–564. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.010> <Consulta: 10 de septiembre de 2020>

Lucon O., D. Ürge-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L. F. Cabeza, N. Eyre, A. Gadgil, L. D. D. Harvey, Y. Jiang, E. Liphoto, S. Mirasgedis, S. Murakami, J. Parikh, C. Pyke, and M. V. Vilariño, 2014: Buildings. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Edenhofer, O. et al (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Macías, J., Iturburu, L., Rodriguez, C., Agdas, D., Boero, A., & Soriano, G. (2017). Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador. *Energy and Buildings*, 151, 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.016> <Consulta: 29 de mayo de 2019>

Manchado, Rebeca (2017). Evaluación de la implantación de energía minieólica en plantas de tratamiento de residuos municipales. Trabajo fin de grado para la obtención del título de graduado en ingeniería química. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: [http://oa.upm.es/47643/1/TFG\\_REBECA\\_MANCHADO\\_PERERO.pdf](http://oa.upm.es/47643/1/TFG_REBECA_MANCHADO_PERERO.pdf)

Martí, Carlos et al. (2000). *Las formas de la residencia en la ciudad moderna: Vivienda y ciudad en la Europa entreguerras*. Segunda edición. Ediciones UPC. Barcelona, España.

Meléndez, Sergio (2017). *Fachadas con energía renovable*. Editorial Trillas. México.

MetroCuadrado (2017). Sabana de Bogotá, una gran opción para comprar vivienda. Junio 28 de 2017. <http://www.metrocuadrado.com/noticias/oikos-construyendo-futuro/sabana-de-bogota-una-gran-opcion-para-comprar-vivienda-3036>. <Consulta: 09 de abril de 2018>

Ministerio de Fomento (2019). Documento Básico HE: Ahorro de energía. Código Técnico de la Edificación (CTE). Gobierno de España

Ministerio de Minas y Energía (2016). Plan de acción indicativo de eficiencia energética – PAI PROURE 2017 - 2022. República de Colombia. Recuperado de: [http://www1.upme.gov.co/Documents/PAI\\_PROURE\\_2017\\_2022.pdf](http://www1.upme.gov.co/Documents/PAI_PROURE_2017_2022.pdf)

Ministerio de Minas y Energía. Decreto 348 de 2017 (marzo 01). República de Colombia.

Montaner, Josep (2015). La arquitectura de la vivienda colectiva: políticas y proyectos en la ciudad contemporánea. Editorial Reverté, Barcelona

Moreno, David; López, Idalia; & Blessent, Daniela (2020). Geothermal energy in Colombia as of 2018. En: Ingeniería y Universidad. vol. 24, 2020. Recuperado de: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu24.geic> <Consulta: 17 de marzo de 2020>

Murguía, A. (2018). Rehabilitación de las instalaciones térmicas de una vivienda unifamiliar. Trabajo fin de grado en Ingeniería en Tecnología Industrial. Universidad del País Vasco. Recuperado de: <https://addi.ehu.es/handle/10810/29485>

Osma P, G. et al. (2015). Energy considerations of social dwellings in Colombia according to NZEB concept. *DYNA* 82(192): 120. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n192.48587> <Consulta: 31 de mayo de 2019>

Pascualino, J; Cabrera, C y Vanegas, M. (2015). Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe Colombiano. *Prospect*, Vol 13, N° 1, 68-75

Portafolio.com (2018). Los proyectos de energía renovable que piden pista. marzo 27 de 2018. <http://www.portafolio.co/economia/los-proyectos-de-energia-renovable-que-piden-pista-515628> <Consulta: 20 de abril de 2018>

REN21. (2019). Renewables 2019: Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-9818911-7-1

Rieznik, N. y Hernández, A. (2005) Análisis del ciclo de vida. [En línea]. Ciudades para un futuro más sostenible. Documentos Temas de Sostenibilidad Urbana. Madrid (España), julio de 2005. <<http://habitat.aq.upm.es/temas/a-analisis-ciclo-vida.html>> [Consulta: 12 de febrero de 2016]

Rivarola, A. y Madrazo, I. (2016). Evaluación de un aerogenerador nacional de baja potencia empleando metodología de análisis de ciclo de vida. En: *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 20, pp 06.51-06.58, 2016. Argentina

Rivela, B. (2012). Propuesta metodológica de aplicación sectorial de análisis de ciclo de vida (ACV) para la evaluación ambiental de la edificación en España. Documento de tesis



doctoral. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: <http://oa.upm.es/14912/>

Rodríguez, Ana; Cadena, Ángela y Aristizábal, Andrés (2015). Diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica para usuarios residenciales en Chía, Cundinamarca. *Revista Mutis* 5(1); pág. 55-65.

Muñoz, C. (2013). Estudio de la energía incorporada y emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de viviendas en Chile. Memoria para optar al grado de doctor. Doctorado en arquitectura y urbanismo, Universidad del Bio-Bio. Concepción, Chile. Recuperado de: <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/2217> <Consulta: 13 de diciembre de 2019>

San Pablo, J. (2012). Análisis del Ciclo de Vida de una vivienda media de la Región de Murcia. Edición electrónica. Máster en Energías Renovables. Murcia, España: Universidad Politécnica de Cartagena. Recuperado de: <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/2856/1/tfm110.pdf>

Secretaría Distrital de Planeación SDP. (2018). Bases Técnicas para el Desarrollo del Protocolo de Implementación de la Resolución 549 de 2015 en Bogotá. Secretaría de Planeación Distrital y Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, CCCS. Recuperado de: [http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/dts\\_implementac\\_protocolo.pdf](http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/dts_implementac_protocolo.pdf) <Consulta: 25 de noviembre de 2019>

Secretaría Distrital de Planeación SDP. (2019). Protocolo de implementación para el cumplimiento de los porcentajes de ahorro en agua y energía para la ciudad de Bogotá D. C., establecidos en la Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Recuperado de: <http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/protocolo.pdf> <Consulta: 25 de noviembre de 2019>

SOM Energía (2020). Guía práctica para la autoproducción colectiva en bloques de pisos. Recuperado de: <https://blog.somenergia.coop/som-energia/2020/11/publicamos-una-guia-practica-de-autoproduccion-colectiva-en-bloques-de-pisos/> <Consulta: 12 de enero de 2021>

Thiel, C. L., Campion, N., Landis, A. E., Jones, A. K., Schaefer, L. A., & Bilec, M. M. (2013). A materials life cycle assessment of a net-zero energy building. *Energies*, 6(2), 1125–1141. <https://doi.org/10.3390/en6021125> <Consulta: 18 de Abril de 2019>

Torres, Daniela (2015). Diseño de un generador eólico de eje vertical de baja potencia. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira

Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (2011). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Bucaramanga (Colombia): Universidad Industrial de Santander. 180 p

Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Convenio ATN/FM-12825-CO

Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (2016). Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética PAI PROURE 2017-2022. Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia. Recuperado de: [http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI\\_PROURE\\_2017-2022.pdf](http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf) <Consulta: 02 de julio de 2019>

Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (2018). Resolución 463 del 28 de agosto de 2018. República de Colombia.

U.S. Department of Energy. (2015). A Common Definition for Zero Energy Buildings. Recuperado de: <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/common-definition-zero-energy-buildings> <Consulta: 17 de Abril de 2019>

Vares, S., Häkkinen, T., Ketomäki, J., Shemeikka, J., & Jung, N. (2019). Impact of renewable energy technologies on the embodied and operational GHG emissions of a nearly zero energy building. *Journal of Building Engineering*, 22, 439–450. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.12.017> <Consulta: 15 de Abril de 2019>

Wendell Cox Consultancy (2019). Demographia World Urban Areas: Built-Up Urban Areas or Urban Agglomerations. 15th Annual Edition: April 2019. DEMOGRAPHIA Consultancy. Recuperado de: <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf> <Consulta: 17 de julio de 2019>

Zabalza, I. (2011). Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Recuperado de: <https://zaguan.unizar.es/record/5751?ln=es#> <Consulta: 17 de diciembre de 2019>

Zeggaf, I. (2015). Estudio de la autosuficiencia energética de una vivienda unifamiliar. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/86405> <Consulta: 06 de enero de 2021>