



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Departamento de Tecnología de la Arquitectura

TESIS DOCTORAL

**COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE
CERRAMIENTOS OPACOS VERTICALES EN
EDIFICIOS UNIVERSITARIOS DE BAHIA (BRASIL)**

Bruno Oliveira Santana

Barcelona, 2021



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Programa de Doctorado en Arquitectura, Energía y Medioambiente

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE CERRAMIENTOS OPACOS VERTICALES EN EDIFICIOS UNIVERSITARIOS DE BAHIA (BRASIL)

Tesis doctoral realizada por:

Bruno Oliveira Santana

Dirigida por:

Helena Coch Roura

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona

Barcelona, julio 2021

A mis padres, por todo el empeño y amor dedicados a mí.

AGRADECIMIENTOS

Muchas personas fueron fundamentales para la realización de este trabajo académico:

Sophia, por el afecto y la comprensión delante de las angustias de esa travesía.

Heitor, por la alegría, las aventuras diarias y la inspiración en seguir adelante.

Mis hermanas, Jaqueline y Estela, por el cariño, apoyo y confianza en mí, siempre.

Helena Coch, directora de la tesis, por el aprendizaje durante esos años del Máster y Doctorado en Arquitectura, Energía y Medioambiente.

Los amigos doctorandos (Jefferson, Carlos, Elena, Badia, Moritz, Laura, Eduardo), por compartir los momentos de alegría y de dificultades por las que todos pasamos hasta finalizar la tesis.

La realización del doctorado ha sido posible debido a la inversión de la Universidade Federal da Bahia (UFBA) en la formación de su equipo técnico-administrativo, mediante la licencia remunerada del trabajo entre Septiembre/2014 y Septiembre/2018.

SANTANA, Bruno Oliveira. Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en edificios universitarios de Bahia (Brasil). 323 pp. 2021. Tesis Doctoral – Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2021.

RESUMEN

Esta tesis analiza el comportamiento térmico de paredes de ambientes escolares y su impacto en la demanda de refrigeración. Elige como estudios de caso tres aulas, cada una ubicada en un edificio universitario distinto. Los tres edificios fueron implantados en diferentes ciudades de Bahia / Brasil, todas con latitudes próximas a los 15°S, pero ubicadas en distintas zonas climáticas del país. Además, esos edificios universitarios fueron construidos con base en un mismo proyecto arquitectónico. El marco teórico de este trabajo académico enfoca en las estrategias para el enfriamiento pasivo del ambiente por las paredes: la reducción de las ganancias térmicas y la modulación del flujo de calor. En ese sentido, las variables constructivas evaluadas son: el coeficiente de absorción; el coeficiente de transmitancia térmica; la capacidad térmica. Se utiliza simulaciones térmicas, calibradas por mediciones de temperatura interior realizadas *in situ*, para evaluar cuáles variables constructivas de la pared son las más adecuadas para las condiciones climáticas de cada sitio. Los resultados indican que la pared con bajo coeficiente de absorción, alto coeficiente de transmitancia térmica y alta capacidad térmica es la que proporciona las menores demandas de refrigeración, en los tres climas analizados. El principal motivo para una misma solución constructiva, a pesar de las diferencias climáticas, son los altos aportes internos. Debido a su magnitud, los altos aportes internos imponen a las estrategias pasivas el papel de disipar la mayor cantidad posible del calor generado internamente, así como de evitar que el periodo de ganancias térmicas por la pared ocurra cuando el ambiente esté ocupado. Sin embargo, basado en la diversidad de comportamientos térmicos de las nueve paredes analizadas, la investigación propone una clasificación para las paredes según su exposición a los factores ambientales: pared externa; pared externa sombreada; pared interna. A partir de esa clasificación, se apuntan directrices para apoyar la elección de cada variable constructiva para cada tipo de pared y cada zona climática.

Palabras clave: Comportamiento térmico de paredes. Enfriamiento pasivo. Edificios universitarios.

SANTANA, Bruno Oliveira. The thermal behaviour of walls at university buildings in Bahia (Brazil). 323 p. 2021. Doctoral Thesis – School of Architecture, Polytechnic University of Catalonia, Barcelona, 2021.

ABSTRACT

This thesis analyzes the thermal behaviour of walls at learning spaces and its impact on cooling demand. Three classrooms are selected as case studies, each located on a different university campus in separate cities in the Brazilian state of Bahia. Although all locations are close to latitude 15°S, each have a different climate zone. Furthermore, these university buildings were constructed based on the same architectural project. The theoretical framework focus on the wall's passive cooling strategies: the reduction of thermal gains and the modulation of heat flow. In that sense, the constructive variables evaluated are the absorption coefficient, the thermal transmittance coefficient and the thermal capacity. Thermal simulations, calibrated by on-site thermal measurements, are used to evaluate which wall's constructive variables are the most suitable for the climatic conditions of each site. The findings suggest that the wall with low absorption coefficient, high thermal transmittance coefficient and high thermal capacity is the one that provides the lowest cooling demands in the three climates assessed. The main reason for the same result, despite the climatic differences, is the high internal loads. Due to their magnitude, the high internal loads impose on passive strategies the dual role of dissipating the heat internally generated as much as possible, as well as avoiding thermal gains through the wall when the classroom is occupied. However, based on the thermal behaviour differences between the nine walls analyzed, the research classifies the walls according to their exposure to environmental factors: external wall, shaded external wall and inner wall. Based on this classification, guidelines are established to support the selection of each constructive variable for the type of wall and climate zone.

Keywords: Wall's thermal behaviour. Passive cooling. University buildings.

SUMARIO

INTRODUCCIÓN.....	12
1. ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE FLUJOS DE CALOR EN PAREDES.....	16
1.1 PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	16
1.2 FLUJOS DE CALOR EN UNA PARED EXTERNA PARA CLIMAS CÁLIDOS....	20
1.2.1 Flujos de calor en una pared en el régimen estacionario.....	21
1.2.2 Flujos de calor en una pared en el régimen periódico.....	25
1.3 FLUJOS DE CALOR EN UNA PARED Y LA NORMATIVA BRASILEÑA.....	27
1.4 CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	30
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE PAREDES.....	31
2.1 REDUCCIÓN DE LAS GANANCIAS TÉRMICAS.....	31
2.1.1 Orientación, emplazamiento y corrección del entorno inmediato.....	34
2.1.2 Orientación y forma del edificio.....	36
2.1.3 Orientación y organización de los ambientes internos.....	38
2.1.4 Orientación y coeficiente de absorción.....	40
2.2 MODULACIÓN DE LA ENERGÍA TÉRMICA POR LA PARED.....	43
2.2.1 Coeficiente de transmitancia térmica.....	44
2.2.2 Capacidad térmica.....	52

2.3 CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	60
3 METODOLOGÍA.....	61
3.1 RECOGIDA DE DATOS <i>IN SITU</i>	62
3.2 ELABORACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES PARA SIMULACIÓN ENERGÉTICA.....	65
3.2.1 Calibración de los modelos computacionales.....	66
3.2.2 Configuración de las simulaciones realizadas.....	66
4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PABELLONES DE AULAS.....	70
4.1 DESCRIPCIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS TRES CLIMAS.....	70
4.2 DESCRIPCIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS TRES PABELLONES DE AULAS	74
4.2.1 Descripción del proyecto estándar.....	75
4.2.2 Comparación de la implantación de los tres Pabellones de Aulas.....	80
4.2.3 Cargas térmicas que impactan en la demanda de refrigeración del Aula A101.....	85
<u>4.2.3.1 Cargas térmicas de las paredes en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....</u>	<u>89</u>
<u>4.2.3.2 Cargas térmicas de las paredes en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....</u>	<u>92</u>
<u>4.2.3.3 Cargas térmicas de las paredes en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración – Aula A101 de Barreiras (CONT).....</u>	<u>95</u>
4.3 CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	99
5 OPTIMIZACIÓN DE LAS PAREDES SEGÚN CADA CLIMA.....	104

5.1 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Y SU IMPACTO EN LA DEMANDA DE REFRIGERACIÓN.....	104
<u>5.1.1 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente absorción – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)</u>	106
<u>5.1.2 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente absorción – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)</u>	110
<u>5.1.3 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente absorción – Aula A101 de Barreiras (CONT)</u>	114
5.2 COEFICIENTE DE TRANSMITANCIA TÉRMICA.....	118
<u>5.2.1 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)</u>	121
<u>5.2.2 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)</u>	131
<u>5.2.3 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT)</u>	142
5.3 CAPACIDAD TÉRMICA.....	151
<u>5.3.1 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según la capacidad térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)</u> ..	153
<u>5.3.2 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según la capacidad térmica – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)</u>	163
<u>5.3.3 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según la capacidad térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT)</u>	173
5.4 COEFICIENTE DE TRANSMITANCIA TÉRMICA EN PAREDES PESADAS...	182

<u>5.4.1 Análisis de las cargas térmicas de las paredes pesadas y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....</u>	<u>184</u>
<u>5.4.2 Análisis de las cargas térmicas de las paredes pesadas y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....</u>	<u>194</u>
<u>5.4.3 Análisis de las cargas térmicas de las paredes pesadas y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT).....</u>	<u>206</u>
5.5 CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	216
6 CONCLUSIONES.....	226
ANEXO I ELABORACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES PARA LAS SIMULACIONES ENERGÉTICAS.....	234
I.1 RECOGIDA DE DATOS.....	234
I.2 ELABORACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES PARA SIMULACIÓN ENERGÉTICA.....	240
I.2.1 Calibración de los modelos computacionales.....	241
I.2.2 Características de los modelos computacionales para las simulaciones energéticas.....	248
ANEXO II DATOS CLIMÁTICOS.....	251
II.1 DATOS CLIMÁTICOS DE CRUZ DAS ALMAS (MAR).....	251
II.2 DATOS CLIMÁTICOS DE VITÓRIA DA CONQUISTA (ALT).....	255
II.3 DATOS CLIMÁTICOS DE BARREIRAS (CONT).....	259
ANEXO III VENTILACIÓN NATURAL.....	263
III.1 CÁLCULOS DE VENTILACIÓN NATURAL DE LAS AULAS A101.....	264

III.2 SIMULACIONES ENERGÉTICAS DE VENTILACIÓN NATURAL.....	267
III.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE CONFORT TÉRMICO.....	270
III.4 SÍNTESIS.....	276
ANEXO IV FOTOS.....	277
IV.1 REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PABELLÓN DE AULAS DE CRUZ DAS ALMAS (MAR).....	278
IV.2 REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PABELLÓN DE AULAS DE VITÓRIA DA CONQUISTA (ALT).....	281
IV.3 REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PABELLÓN DE AULAS DE BARREIRAS (CONT).....	284
ANEXO V PLANOS TÉCNICOS.....	287
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	306
LISTA DE FIGURAS.....	310
LISTA DE TABLAS.....	322

INTRODUCCIÓN

A partir de 2003, el Ministerio de Educación de Brasil (MEC) implementa un amplio programa de creación de nuevas universidades (Tabla 1), en especial la implantación de nuevos *campi* universitarios en ciudades del interior del país. Entre 2003 y 2012, el total de área construida de ese programa llega a 3.065.735,17 m². Además de los números expresivos, esas grandes inversiones dieron como resultado propuestas arquitectónicas estandarizadas, a pesar de las diferencias climáticas del territorio brasileño.

Tabla 1: Expansión de las universidades públicas federales brasileñas 2003 - 2012

	2003	2010	2012
Universidades	45	59 (14 nuevas)	63 (4 nuevas)
Campus universitarios	148	274 (126 nuevos)	321 (47 nuevos)
Ciudades contempladas	114	230	275

Fuente: (MEC 2012)

Sin embargo, en ese mismo periodo fueron publicadas normativas y documentos técnicos brasileños dedicados a establecer estrategias de políticas públicas de eficiencia energética - *Plano Nacional de Energia 2030* (EPE 2007) y *Plano Nacional de Eficiência Energética* (BRASIL 2011); así como normativas que establecen criterios técnicos para la eficiencia energética de los edificios: la *NBR 15220/2003: Desempenho térmico de edificações* (ABNT 2003) y el *Regulamento Técnico de Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios* (INMETRO 2013), tanto para edificios residenciales (RTQ-A) cuanto comerciales, institucionales y de servicios (RTQ-C).

El documento “*Plano Nacional de Energía 2030*” establece algunas proyecciones de futuro, según factores geopolíticos, macro-económicos y demográficos, para evaluar cuanta energía será necesaria para que el país pueda mantener un ritmo de desarrollo económico y ambiental sin depender de importación de energía de ningún otro país. La conclusión de ese estudio es que, mismo en la proyección de futuro con menor crecimiento económico, será necesario un incremento de 144,3 millones de toneladas equivalente de crudo (tep) entre 2005 y 2030 (EPE 2007).

Analizando esos datos con las inversiones necesarias para producir esa cantidad de energía, el Plan Nacional de Energía 2030 vaticina la necesidad de inversiones en eficiencia energética en todos los aspectos que abarcan el consumo final de energía, además de las vultuosas inversiones en producción de energía.

Es sobre esa contradicción a cerca de las inversiones públicas realizadas en la última década (2000 - 2010) que la tesis elige su tema de investigación y los objetos de estudio: los primeros edificios universitarios construidos en el estado de Bahia, todos basado en un proyecto estándar de pabellón de aulas, implantado en tres ciudades con climas distintos entre sí: Cruz das Almas (12,4°S – Zona Climática 8), Vitória da Conquista (14,5°S – Zona Climática 5) y Barreiras (12,1°S - Zona Climática 7).

Para comprender mejor el comportamiento térmico de esos edificios, su relación con el clima de cada sitio y su consumo energético, el trabajo académico elige los cerramientos opacos verticales como elemento de análisis.

Esos elementos son comúnmente conocidos como paredes. La investigación utiliza esa definición más técnica en el título para destacar que no son objeto de análisis otros elementos verticales de la piel del edificio, como las ventanas, las celosías o los elementos estructurales verticales. Sin embargo, para simplificar la lectura de la tesis, los cerramientos opacos verticales serán denominados de paredes.

Su elección como objeto de investigación parte de dos principios: las cubiertas diseñadas para esos edificios tienen diversas capas que aíslan bastante el ambiente interior de la alta radiación incidente; la práctica constructiva brasileña adopta el mismo tipo de pared cualquiera que sea el tipo de edificio, sus rutinas de ocupación, y el clima del sitio donde el mismo será construido.

OBJETIVO DE LA TESIS

Analizar el comportamiento térmico de paredes de edificios universitarios según su impacto en el consumo energético del edificio.

Como objetivos específicos, esta investigación pretende aclarar cómo las decisiones de diseño que envuelven la pared, desde la implantación del edificio hasta la elección de sus propiedades radiativa y térmicas, influyen en la demanda de refrigeración de los ambientes interiores del edificio.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

Los dos primeros capítulos de la tesis presentan el estado del arte sobre el comportamiento térmico de paredes de edificios implantados en climas cálidos. El primer capítulo aborda los aspectos teóricos a cerca de los flujos de calor que atraviesan la pared, mientras que el segundo capítulo analiza las recientes investigaciones sobre ese elemento de la envolvente.

El tercer capítulo expone la metodología utilizada en la investigación, desde los datos recogidos *in situ* hasta los criterios y configuraciones utilizadas en las simulaciones energéticas.

El cuarto capítulo evalúa los tres edificios implantados en Cruz das Almas, Vitória da Conquista y Barreiras, según los siguientes criterios: condiciones climáticas de cada

sitio; características constructivas del proyecto estándar implantado en cada ciudad; cargas térmicas que impactan la demanda de refrigeración en un aula de cada edificio; desempeño térmico de las paredes de las aulas elegidas, tanto mensualmente cuanto en los periodos de mayor y menor demanda de refrigeración en cada ciudad.

El quinto capítulo examina los resultados del ejercicio teórico propuesto por la tesis: analizar el comportamiento térmico de distintas configuraciones de paredes según sus impactos en la demanda de refrigeración de un aula, mediante cambios en sus propiedades radiativa y térmicas. Esos análisis siempre se reportan a las distintas condiciones climáticas de cada sitio y al comportamiento térmico de las paredes existentes.

El último capítulo presenta las conclusiones finales y recomendaciones para futuros trabajos de investigación.

1. ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE FLUJOS DE CALOR EN PAREDES

Ese capítulo presenta los aspectos teóricos más relevantes a cerca del comportamiento térmico de la pared de edificios ubicados en la zona intertropical, entre las latitudes 23°N y 23°S. En esos climas, la oscilación diaria de temperatura atraviesa la zona de confort térmico determinada por las normativas técnicas. Por ese motivo, el flujo de calor que atraviesa la pared presenta dos direcciones: irradiando calor hacia dentro, cuando la temperatura exterior es mayor que la interior; o disipando calor hacia fuera, cuando la temperatura exterior es menor que la interior.

Para comprender mejor ese proceso, ese capítulo presenta los principales aspectos teóricos involucrados en la transferencia de calor que ocurre en una pared externa: las formas de transferencia de calor, los parámetros ambientales que influyen en ese proceso y las variables constructivas que afectan la magnitud, la dirección y el retraso térmico de los flujos de calor que la atraviesan.

1.1 PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La ciencia que trata de la transferencia de calor busca explicar tanto el modo como la energía térmica es transferida como el tiempo en que tarda ese proceso (Holman 1999). Ese autor describe las tres formas de flujos de calor que pueden ocurrir en un objeto:

- a) flujo de calor por conducción: es la transferencia de energía en un cuerpo sólido cuando existe un gradiente de temperatura entre diferentes regiones de

su superficie. Depende del área del objeto, de la diferencia de temperatura entre sus distintas superficies y de la resistencia térmica del material, definida por su espesor y su conductividad térmica;

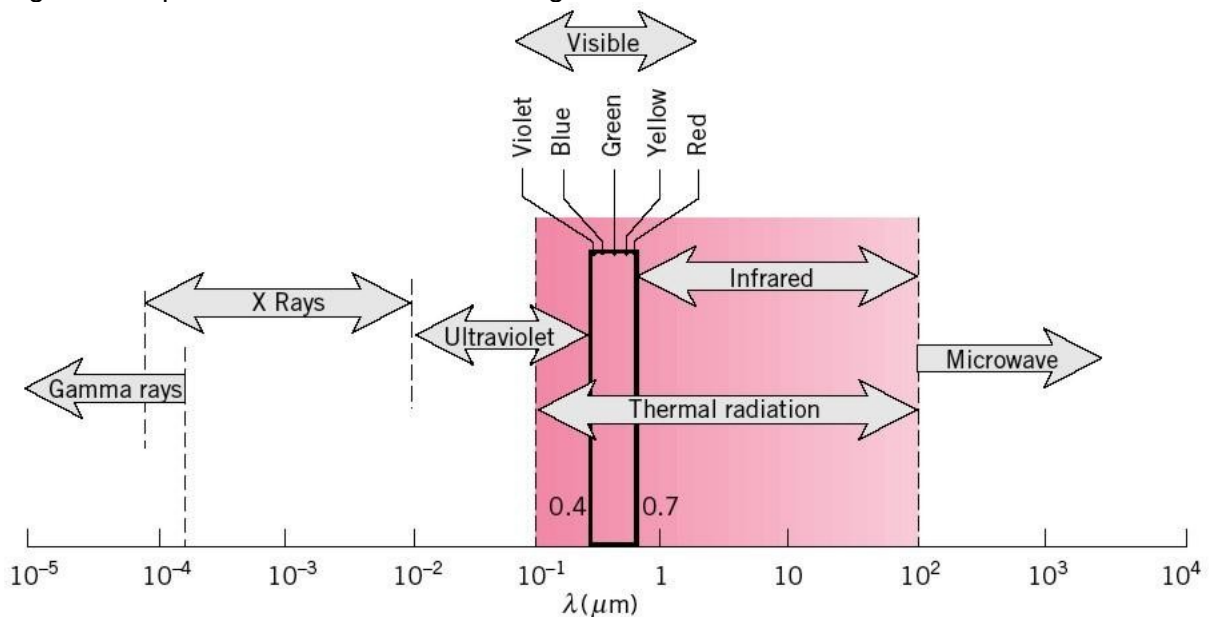
- b) flujo de calor por convección: es la transferencia de energía entre un cuerpo sólido y un fluido. Depende de las características del fluido (viscosidad, conductividad térmica, calor específico, densidad), del área de contacto entre el objeto y el fluido y del gradiente de temperatura entre ellos;
- c) flujo de calor por radiación: es la energía emitida por un cuerpo como resultado de su temperatura, independiente de la existencia de un medio material para su propagación. Su intensidad es directamente proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, medida en grados Kelvin, así como depende de la propiedad térmica del material en emitir energía térmica, denominada emisividad.

La emisividad es una propiedad del material que determina su capacidad en emitir energía térmica según la longitud de onda. Es un índice adimensional, con valores entre 0 y 1, que relaciona la cantidad de energía irradiada por la materia comparada con la irradiada por un cuerpo negro a la misma temperatura. La emisividad de los materiales constructivos generalmente utilizados puede ser organizada en dos grupos: los materiales constructivos metálicos, cuya emisividad se sitúa entre 0,00 y 0,30, siendo que los menores valores corresponden a las superficies metálicas pulidas; los materiales constructivos no metálicos, cuya emisividad varía entre 0,85 y 0,95 (Rivero 1986).

Sobre la longitud de onda, ella es inversamente proporcional a la temperatura de la materia que irradia energía térmica. Según (Iqbal 1983), la radiación térmica abarca el rango de longitud de onda entre 0,2 – 1000 μm , que pueden ser clasificadas de dos maneras:

- radiación de onda corta ($\lambda < 4 \mu\text{m}$) o radiación de onda larga ($\lambda > 4 \mu\text{m}$);
- radiación ultravioleta ($0,001 < \lambda < 0,2 \mu\text{m}$), radiación visible ($0,39 < \lambda < 0,77 \mu\text{m}$) y radiación infrarroja ($0,77 < \lambda < 1000 \mu\text{m}$), como demuestra la Figura 1.

Figura 1: Espectro de radiación electromagnética



Fuente: (Bergman et al. 2011)

La radiación solar se concentra en longitudes de ondas cortas, mientras que gran parte de la radiación térmica emitida por los cuerpos presentes en la superficie terrestre se sitúa en longitudes de ondas largas (Iqbal 1983).

Sobre la radiación solar, ella afecta los edificios de tres formas: radiación solar directa, procedente del Sol; radiación solar difusa, procedente de la bóveda celeste; y radiación solar reflejada por elementos del entorno del edificio. Los factores ambientales que influyen en la cantidad de radiación solar son: la trayectoria solar, determinada por la latitud de cada sitio; la altura sobre el nivel del mar, disminuyendo o aumentando la capa de atmósfera que la radiación solar tiene que atravesar; y la nubosidad del cielo, que afecta el reparto entre radiación solar directa y difusa.

La absorción de la radiación de onda corta incidente en una superficie depende de la propiedad del acabado exterior del material en reflejarla o absorberla. A pesar de ser muy utilizada por diversos profesionales de la construcción civil, la percepción visual de los colores puede engañar en cuanto su desempeño en reflejar y absorber la radiación solar, debido a las características de los distintos tipos de tintas en reflejar la radiación infrarroja cercana, que concentra más de la mitad de la energía proveniente de la radiación solar, mientras que los colores son reflejados por la radiación visible.

Sobre ese aspecto se concentra la investigación realizada por (Dornelles y Roriz 2007), que busca determinar la absorbancia a la radiación solar de tintas utilizadas como acabados de paredes externas, tanto de distintos colores como de diferentes tipos (látex acrílica mate, látex acrílica semi-brillante y látex PVA), a partir de mediciones de reflectancia con espectrofotómetro.

Al comparar las tintas látex acrílica y PVA de mismo color, esas últimas presentan mayor reflectancia que las primeras. Los resultados indican que las mayores diferencias encontradas son las muestras de color blanco (9,5%) y las de color marfil (8,4%). Con relación a los distintos tipos de tintas látex acrílicas – semi-brillante y mate – los resultados revelan que la primera tiene menor coeficiente de absorción que la última, diferencia esta que puede alcanzar hasta 10% en el caso del color azul.

Al comparar tintas de distintos colores, pero que provocan percepciones visuales similares, debido a sus valores próximos de reflexión a la radiación visible, también se encuentran diferencias en sus coeficientes de absorción. Los resultados apuntan diferencias de 11,9%, al comparar el color “Azul” con el “Verde Quadra”, y 18,2% al comparar los colores “Flamingo” y “Cinza BR” (Dornelles y Roriz 2007).

Esos resultados cuestionan no solo una simplificación generalizada que diversos profesionales de la construcción civil tiene a cerca del coeficiente de absorción de

los colores, como también documentos normativos de referencia, como la NBR 15220-3 (ABNT 2003) y el Manual de Fundamentos publicado por la ASHRAE (ASHRAE 2009). Para resolver esa ausencia normativa, fue publicado en Brasil un catálogo de propiedades térmicas (INMETRO 2013), que incorpora los resultados de la tesis doctoral sobre la absorbancia solar de tintas utilizadas en superficies opacas (Dornelles 2008) para ser utilizado como referencia por los profesionales de la construcción civil. Desafortunadamente, los fabricantes de tintas todavía no expresan los coeficientes de absorción de cada color en sus catálogos técnicos.

Sobre la radiación de onda larga, ella impacta los edificios debido al intercambio de energía entre la superficie exterior de la envolvente y el ambiente interior. Como ese tipo de radiación es irradiada de forma difusa, es necesario evaluar, primeramente, el factor de vista la superficie exterior de la envolvente y los elementos del ambiente exterior con los cuales el edificio intercambiará energía. En el caso de las cubiertas, tanto horizontales cuanto inclinadas, el factor de vista preponderante está orientado hacia la bóveda celeste y, por eso, se debe tener en cuenta la temperatura del cielo. Para las paredes, la temperatura a ser considerada debe ser la del aire exterior (Vijayalakshmi, Natarajan y Shanmugasundaram 2006).

Otra propiedad a ser evaluada es la capacidad de los materiales constructivos en absorber la radiación de onda larga. Así como la emisividad, esa propiedad de los materiales puede ser clasificada en dos grupos: las superficies metálicas se caracterizan por su baja absorción de energía de onda larga (0,02 – 0,30), mientras que los no metálicos absorben gran parte de la energía de onda larga incidente en su superficie (0,85 – 0,95). En ese caso, el color del acabado exterior no afecta la absorción de la radiación de onda larga (Lechner 2000).

1.2 FLUJOS DE CALOR EN UNA PARED EXTERNA PARA CLIMAS CÁLIDOS

Un aspecto relevante a cerca de los flujos de calor que atraviesan una pared externa en edificios ubicados en la zona intertropical es la oscilación diaria de la temperatura

exterior, que atraviesa la zona de confort térmico establecido por la normativa técnica. Eso implica en un proceso diario de ganancias y pérdidas térmicas por la piel del edificio, cuyo balance diario depende de los parámetros ambientales del medio exterior, de la rutina de ocupación del ambiente interior y, en el medio de esos dos, las propiedades radiactivas y térmicas de la pared. En ese sentido, ese trabajo académico busca destacar las variables constructivas de la pared externa en conjunto con los parámetros ambientales de los espacios exterior e interior. Esos aspectos serán abordados tanto para el régimen estacionario como el periódico, basándose en estudios previos de diversos autores (Rivero 1986; Szokolay 2008; Barrios, Huelsz y Rojas 2012; Muscio y Akbari 2017).

1.2.1 Flujos de calor en una pared en el régimen estacionario

En el régimen estacionario se considera que las temperaturas exterior e interior son constantes, generando un flujo de calor continuo de única dirección: desde la superficie con temperatura más alta hacia la más baja. Para eso, se establece los siguientes parámetros ambientales para determinar los flujos de calor en la pared externa:

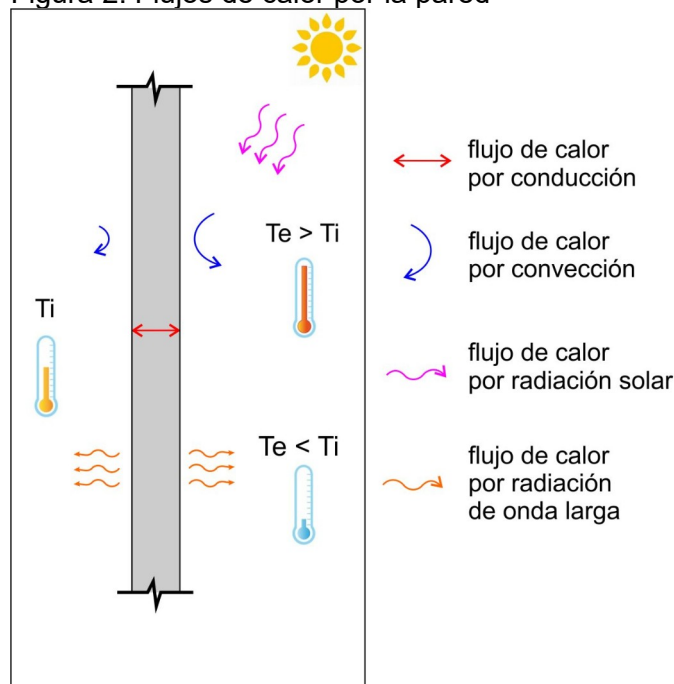
- **temperatura exterior:** se considera la temperatura media diaria (anual, verano o invierno, a depender del tipo de análisis);
- **radiación solar incidente:** se utiliza la media diaria de la radiación incidente en cada pared externa, a depender de su orientación. Así como la temperatura exterior, puede ser utilizado una media diaria anual o por periodo del año;
- **temperatura interior:** se adopta la temperatura de consigna, en el caso de ambientes climatizados. En el caso de ambientes con ventilación natural, es necesario realizar cálculos relativamente sencillos para establecer el promedio de la temperatura interior.

Para los flujos de calor provenientes del gradiente de temperatura entre los ambientes exterior e interior (Q_T , en vatios - W), son considerados la temperatura exterior (T_e , en °C), la temperatura interior (T_i , en °C), y, como variables constructivas relevantes, el coeficiente de transmitancia térmica (U , en $W/m^2 \cdot K$) y el área de la pared externa (A , en m^2).

$$Q_T = A \times U \times (T_e - T_i) \quad \text{Ec. 01}$$

El coeficiente de transmitancia térmica expresa la cantidad del flujo de calor por área de superficie que atraviesa un material cuando el gradiente de temperatura entre los dos ambientes que este separa es de $1^\circ K$ (ABNT 2003). Él engloba tanto la resistencia térmica del material, que afecta el flujo de calor por conducción, cuanto las resistencias térmicas superficiales de las capas exterior e interior de la pared externa. Esas resistencias superficiales se refieren a las transferencias de calor por convección y radiación de onda larga que ocurre entre la pared y los ambientes exterior e interior (Figura 2).

Figura 2: Flujos de calor por la pared



Vale resaltar que, por un lado, los flujos de calor por convección son mayores en la capa exterior de la pared que en la capa interior, debido a la velocidad de los vientos.

Por otro lado, los flujos de calor por radiación dependen de la temperatura superficial de la pared y de la emisividad del material. Si se mantienen el mismo material en las capas exterior e interior de la pared, la variación de ese flujo de calor dependerá exclusivamente de las temperaturas superficiales. Así, la cantidad de flujo de calor por radiación varía a lo largo del día, en las dos capas de la pared.

Además, para los flujos de calor derivados de la radiación solar incidente (Q_{Tsa}), diversos autores utilizan el concepto de temperatura sol-aire (T_{sa}) para determinar el aumento de la temperatura superficial externa de la pared debido a la radiación solar incidente y, consecuentemente, el incremento del flujo de calor que lo atraviesa. En el cálculo de la temperatura sol-aire, se considera la temperatura exterior (T_e , en °C), el coeficiente de absorción del acabado exterior de la pared (α , adimensional), la radiación incidente en esa pared (G , en W/m^2), y la resistencia superficial exterior de la pared (R_{se} , en $m^2 \cdot K/W$).

$$T_{sa} = T_e + [\alpha \times G \times R_{se}] \quad \text{Ec. 02}$$

Para calcular las cargas térmicas por radiación solar (Q_{Tsa}) en cada fachada, se puede utilizar tanto la temperatura sol-aire como referencia (Ec. 03), así como se puede calcular mediante la radiación incidente en esa pared (G , en W/m^2), su área (A , en m^2), el coeficiente de absorción de su acabado externo (α , adimensional) y las resistencias superficiales exterior e interior (R_e y R_i , en $m^2 \cdot K/W$) (Ec. 04).

$$Q_{Tsa} = A \times U \times (T_{sa} - T_i) \quad \text{Ec. 03}$$

$$Q_{Tsa} = A \times G \times \alpha \times \frac{R_e}{(R_e + R_i)} \quad \text{Ec. 04}$$

Vale resaltar que la Ec. 01 puede ser utilizada para calcular el flujo de calor para todas las paredes al mismo tiempo, pero lo mismo no puede ser realizado para calcular los flujos de calor por radiación solar, pues la cantidad de energía incidente es distinta a depender de la orientación de cada pared externa. Así, los flujos diarios de calor por cada pared externa (Q_{dia}) pueden ser estimados según la Ec. 05.

$$Q_{dia} = Q_T + Q_{Tsa} \quad \text{Ec. 05}$$

Es importante destacar que esa es una primera aproximación al problema de los flujos de calor en una pared externa. Al utilizar las medias diarias, tanto de temperatura exterior cuanto de radiación solar, los resultados de los flujos de calor diarios por la pared externa pueden presentar valores bajos, pues en algunos sitios de climas cálidos la temperatura media diaria es muy cercana a la temperatura de consigna, alrededor de los 25°C.

En realidad, esos resultados presentan los balances energéticos diarios de ganancias y pérdidas térmicas por la pared externa, lo que no equivale decir que las ganancias térmicas durante el día, o las pérdidas térmicas por la noche, sean bajas. Un ejemplo claro es un sitio de clima cálido seco, donde la temperatura media diaria puede incluso estar por debajo de la temperatura de consigna, pero las altas oscilaciones diarias de temperatura conllevan a ganancias térmicas elevadas por las paredes externas en el periodo diurno.

Así, para comprender mejor cuáles son los momentos en los que las paredes irradian calor hacia el ambiente interior y cuándo disipan la energía absorbida, tanto para el ambiente exterior cuanto interior, se analizan los flujos de calor por la pared según el régimen variable, que considera tanto la oscilación diaria de temperatura, el

momento en que incide la radiación solar y las variables constructivas de la paredes externas, en especial aquella que impacta en el tiempo que tarda el elemento opaco en transferir la energía térmica de la superficie exterior hacia la interior, y viceversa: la capacidad térmica.

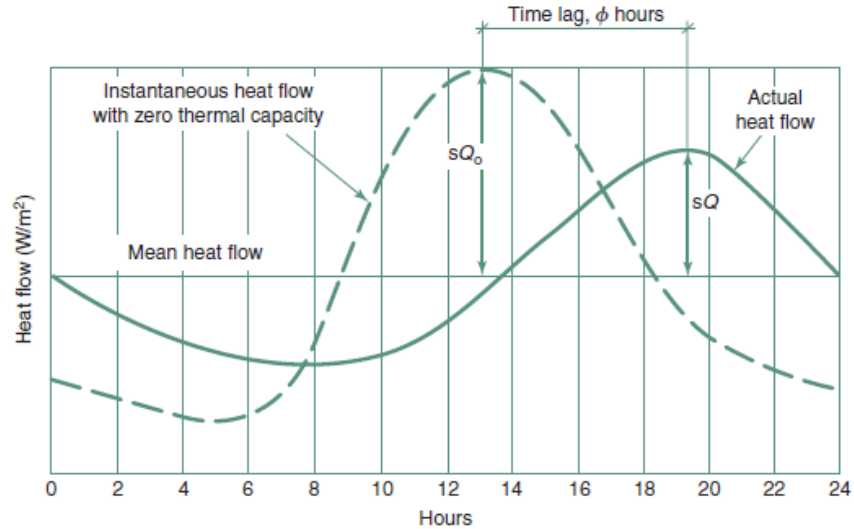
1.2.2 Flujos de calor en una pared en el régimen periódico

En el régimen periódico se considera que el flujo de calor es variable en el tiempo debido a la oscilación de por lo menos una de las temperaturas. En ese sentido, el análisis realizado a partir del régimen periódico busca acercarse a la comprensión de los fenómenos térmicos que ocurren en los elementos de la envolvente en un periodo de 24 horas. Sobre ese aspecto, otra propiedad térmica de los materiales desempeña un papel importante, además del coeficiente de transmitancia térmica: la capacidad térmica, que determina la cantidad de energía por área de superficie necesaria para elevar en 1°K la temperatura de un objeto (ABNT 2003).

Para dos materiales caracterizados con la misma resistencia térmica, la mayor capacidad térmica de uno de ellos afectará los flujos de calor que lo atraviesan de dos maneras: retardando el paso del flujo de calor por el elemento, denominado retraso térmico; y disminuyendo la amplitud del flujo de calor, denominado factor de amortiguamiento.

En la Figura 3 se presenta el flujo de calor en dos paredes externas caracterizadas por tener la misma resistencia térmica, pero una de ellas tiene capacidad térmica igual a cero, mientras que la otra tiene la capacidad térmica de una pared común. Ese modelo teórico explicita gráficamente cómo la capacidad térmica del material altera los flujos de calor: el retraso térmico (*time lag*, en inglés), medido en horas, y el factor de amortiguamiento, que disminuye la amplitud del flujo de calor. O sea, cuanto mayor es la capacidad térmica del material, mayores son el retraso térmico y el amortiguamiento de la amplitud del flujo de calor, al mismo tiempo que el promedio diario del flujo de calor (*mean heat flow*) de las dos paredes son iguales.

Figura 3: Comparación de los flujos de calor en paredes con capacidad térmica y sin capacidad térmica



Fuente: (Szokolay 2008)

La Ec. 06 presenta la fórmula para calcular el factor de amortiguamiento, una medida adimensional cuyo rango de valor está entre 0 y 1, y que, cuanto mayor sea su valor, menor será la reducción de la amplitud del flujo de calor.

$$\mu = \frac{sQ}{sQ_0}$$

Ec. 06

Además de los impulsos térmicos relacionados con la temperatura del aire, la capacidad térmica también influye en el retraso del flujo de calor provocado por la radiación solar incidente en las paredes externas. Sin embargo, vale destacar que la cantidad de energía térmica proveniente del Sol es directamente proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Así, debido al mayor flujo de calor provocado por la radiación solar, el retraso térmico será más corto que aquel procedente de la temperatura del aire, así como la amplitud del flujo de calor debido a la radiación solar será mayor que aquel provocado por la temperatura del aire, a pesar del factor de amortiguamiento permanecer igual.

1.3 FLUJOS DE CALOR EN UNA PARED Y LA NORMATIVA BRASILEÑA

El desempeño energético de las edificaciones es tratado, en términos normativos, por dos documentos en Brasil: la NBR 15220/2003 (ABNT 2003), que aborda el comportamiento térmico de los diversos elementos de la envolvente del edificio, los métodos para calcular sus variables constructivas y presenta la zonificación climática del país; y el *Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais* (RTQ-A) y el *Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, Institucionais y de Serviços* (RTQ-C), instituidos por (INMETRO 2013; BRASIL 2014). Esos reglamentos incorporan los cálculos y la zonificación climática establecidos por la NBR 15220/2003 (Figura 4).

Figura 4: Zonificación climática de Brasil para análisis de eficiencia energética de edificios



Fuente: (ABNT 2003)

Además, establecen límites para cada variable constructiva de la envolvente según la zona climática y el nivel de eficiencia energética pretendida por los edificios. Los valores establecidos por la normativa de edificios comerciales para las propiedades radiactivas y térmicas de las paredes externas están indicados en la Tabla 2 y 3.

Tabla 2: Límites para el coeficiente de absorción de las superficies externas

Zona bioclimática	Nivel A y B	Nivel C y D
1	-	-
2 a 8	$\alpha < 0,50$	$\alpha > 0,50$

Fuente: (INMETRO 2013)

Tabla 3: Límites para el coeficiente de transmitancia térmica (U, en $W/m^2 \cdot K$) y capacidad térmica (Ct, en $kJ/m^2 \cdot K$) de las paredes externas

Zona bioclimática	Nivel A	Nivel B	Nivel C y D
1 y 2	$U \geq 1,0 W/m^2 \cdot K$	$U \geq 2,0 W/m^2 \cdot K$	$U \geq 3,7 W/m^2 \cdot K$
3 a 6	$U \geq 3,7 W/m^2 \cdot K$		
7 y 8	$U \geq 2,5 W/m^2 \cdot K$, para $Ct < 80 kJ/m^2 \cdot K$		
	$U \geq 3,7 W/m^2 \cdot K$, para $Ct > 80 kJ/m^2 \cdot K$		

Fuente: (INMETRO 2013)

Sobre el coeficiente de absorción, no se establece límites para edificios ubicados en la Zona Climática 1 por causa de que su temporada de invierno es más larga y más rigurosa que en otras partes del país. Además, vale resaltar que esa normativa se preocupa más con las ganancias solares por los elementos transparentes, en especial aquellos implantados en las cubiertas y las ventanas orientadas a oeste, que por los elementos opacos de la envolvente.

Acerca del coeficiente de transmitancia térmica, la normativa presenta valores límites para cada nivel de eficiencia energética para las zonas frías de Brasil (zonas climáticas 1 y 2), mientras que, para las otras zonas climáticas, el coeficiente de transmitancia térmica es el mismo, independiente del nivel de eficiencia energética del edificio.

Sobre la capacidad térmica de las paredes externas, la normativa solo establece límites para las zonas climáticas 7 y 8, vinculando esos límites con valores específicos de transmitancia térmica de las paredes.

Por fin, vale destacar que esa normativa valora la eficiencia energética de la envolvente del edificio según dos métodos: simulación computacional o por una fórmula de regresión lineal, basada en diversas características de la envolvente (índice de esbeltez; índice de compacidad; tasa de acristalamiento, en especial la fachada Oeste y las aberturas cenitales, ángulos de sombreado de las aberturas; factor solar de los vidrios).

En esa fórmula de regresión lineal no están incluidos el coeficiente de absorción, el coeficiente de transmitancia térmica y la capacidad térmica de las paredes externas. Sobre los dos últimos, hay investigaciones que comprueban el comportamiento no lineal de esas variables en el consumo energético del edificio. Ese tema será abordado de forma más amplia en el próximo capítulo.

1.4 CONCLUSIONES PRELIMINARES

Debido a la oscilación de la temperatura exterior atravesar la zona de confort térmico, en especial en sitios ubicados en la zona intertropical, los flujos de calor por las paredes externas se caracterizan por una variación diaria de ganancias y pérdidas térmicas. Por ese motivo, los análisis de flujo de calor por la pared en un régimen estacionario solo permiten una aproximación a los fenómenos térmicos que ocurren en ese elemento opaco, indicando su balance energético diario entre ganancias y pérdidas térmicas.

Al considerar los flujos de calor por una pared externa en un régimen periódico, la comprensión sobre las ganancias y pérdidas térmicas se vuelve más próxima de la realidad, en especial si se relaciona esos datos con la rutina de ocupación del ambiente. De esa manera, es posible conocer en qué momento las ganancias térmicas impactan el ambiente interior y en qué momento ocurren las pérdidas térmicas.

Además, al relacionar esos datos con los parámetros climáticos del ambiente exterior, se percibe que cada pared tendrá un flujo de calor específico, debido a la radiación solar incidente en cada fachada.

Tener en cuenta que esos fenómenos térmicos que ocurren en las paredes, posibilita a los arquitectos e ingenieros elaborar cuál la mejor estrategia de ahorro energético a partir de las variables constructivas de ese elemento opaco.

Ese es el punto en el que esta tesis pretende contribuir. Para eso, este trabajo académico busca evaluar los resultados de otras investigaciones que se dedicaron a ese tema a fin de establecer referencias para el análisis del objeto de estudio.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE PAREDES

Ese capítulo presenta una revisión bibliográfica acerca del comportamiento térmico de la pared de edificios ubicados en climas cálidos. Para eso, se analizan los estudios de caso organizados según las principales estrategias de enfriamiento pasivo (Givoni 1991; Geetha y Velraj 2012; Santamouris y Kolokotsa 2013): reducción de las ganancias térmicas y modulación de la energía térmica absorbida. Esos autores indican una tercera estrategia de enfriamiento pasivo, la disipación del calor absorbido que, en el caso de las paredes externas, sería mediante la estrategia de ventilación nocturna. Sin embargo, esta tesis solo se dedica a evaluar el comportamiento de las variables constructivas de la pared para las dos primeras estrategias de enfriamiento pasivo.

2.1 REDUCCIÓN DE LAS GANANCIAS TÉRMICAS

Reducir o prevenir las ganancias térmicas por la pared desde el ambiente exterior parte del principio de que cuanto menor sea la energía absorbida por la pared, menor será el incremento de su temperatura y, consecuentemente, menor será la energía irradiada por ella hacia el ambiente interior.

Esa estrategia de enfriamiento pasivo ocurre en la capa exterior del elemento opaco, cuyos parámetros climáticos involucrados son: la radiación solar incidente, tanto directa cuanto difusa; la radiación de onda corta reflejada de las superficies próximas al edificio; la temperatura del aire exterior.

Por un lado, esos parámetros climáticos son afectados por aspectos ambientales del macroclima de la región y por singularidades del entorno inmediato que influyen en el microclima del lugar. Por otro lado, el impacto de esos parámetros climáticos en el comportamiento térmico de las paredes está intermediado por variables constructivas, que afectan la energía irradiada por ella hacia el ambiente interior. La comprensión de esas interacciones es fundamental a la hora de elegir las variables constructivas de la pared a fin de mejorar su desempeño térmico.

Según (Olgay, Lyndon y Reynolds 1963; Serra y Coch 1995), los principales aspectos ambientales que afectan la radiación de onda corta y la temperatura del aire están descritas abajo:

- **LATITUD:** determina el recorrido solar en cada sitio y el ángulo de incidencia solar. Las trayectorias solares en sitios ubicados en la región intertropical son caracterizados por la concentración de la radiación incidente en la superficie horizontal. Además, en esas regiones el Sol alcanza la altura de 90° dos veces al año, permitiendo que las fachadas Norte y Sur sean atingidas por los rayos solares durante el año, cada una en un periodo específico y con ángulos solares altos. Debido a esos factores, las fachadas más afectadas por la radiación solar son la Este y Oeste, siendo que esa última es atingida por los rayos solares cuando la temperatura del aire está más alta.
- **NUBOSIDAD:** interfiere en el total de radiación solar incidente, mediante la reflexión de parte de esa radiación por las nubes, así como por el reparto de la radiación que llega a la superficie terrestre entre radiación solar directa y radiación solar difusa. En sitios con cielos despejados, la radiación global incidente es más alta porque la porción de radiación directa es más significativa. En el caso de cielos nubosos, tanto la radiación global es más reducida cuanto la porción difusa se hace más relevante, si comparado con la radiación incidente en sitios con cielos despejados. Sobre la radiación difusa,

vale destacar que ella incide en todas las orientaciones;

- **ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR:** a pesar de recibir más radiación solar, por causa de la disminución de la capa de atmósfera que los rayos solares tienen que atravesar, la temperatura del aire disminuye a medida que se eleva la altura del terreno con relación al nivel del mar. A ese respecto, (Rivero 1986) destaca las diferencias de temperatura del aire entre las ciudades de Guayaquil (2°S), ubicada a 4 m.s.n.m., y Quito (0°S), cuya altura relativa es 2.850 m.s.n.m.. Ellas son distantes entre sí solo 300 km, pero la variación térmica de Guayaquil en el mes más caluroso se sitúa entre 21,7°C y 31,7°C, mientras que en Quito es entre 7,2°C y 22,8°C.
- **RELACIÓN TIERRA – AGUA:** influye en el grado de humedad relativa y, consecuentemente, en la amplitud térmica diaria. Climas cálidos-secos se caracterizan por altas amplitudes térmicas, donde las temperaturas máximas pueden sobrepasar los 40°C, mientras que los cálidos-húmedos poseen bajas amplitudes térmicas, donde las temperaturas máximas son menos calurosas pero las mínimas suelen estar por encima de los 20°C.

Basado en esas características, es posible caracterizar el macroclima de la región y elegir prioridades para el diseño arquitectónico. Para la estrategia de reducción de las ganancias térmicas, la prioridad es disminuir el impacto de la radiación solar presente en sus diversas formas: la radiación incidente en la envolvente del edificio; la radiación reflejada por su entorno inmediato; la radiación de onda larga irradiada por el suelo, que es un subproducto de la radiación solar y que influye en el aumento de la temperatura del aire de cada sitio.

A ese respecto, el impacto de las variables constructivas en el desempeño térmico de las paredes está sometida a la orientación de cada fachada. Por eso, cada una de las estrategias será evaluada en conjunto con la orientación, demostrando su mayor o menor influencia en la reducción de las ganancias térmicas por las paredes.

2.1.1 Orientación, emplazamiento y corrección del entorno inmediato

Según (Geetha y Velraj 2012), el primer paso para controlar las futuras temperaturas internas de los edificios es intentar hacer con que las temperaturas externas del entorno urbano sean las más suaves posibles. Actuar sobre ese parámetro climático afecta directamente al flujo de calor que atraviesa la pared por conducción.

Esa estrategia de prevención de ganancias térmicas debe ser llevada a cabo desde la fase inicial del diseño arquitectónico, mediante dos acciones: la elección del emplazamiento y la corrección de su entorno inmediato. En todas ellas se destaca criterios distintos según la orientación.

Sobre la elección del emplazamiento, es importante evaluar la influencia de la topografía en el microclima del lugar, en especial su relación con la radiación solar incidente según la orientación de las diversas pendientes del terreno.

Sobre ese aspecto, (Oliveira y Fialho 2017) analizaron la influencia de la morfología del terreno y sus distintas orientaciones según los distintos usos y formas de ocupación en la ciudad de Cariacica, Brasil (20°S). Para eso, fue elaborado un modelo computacional del terreno del municipio que combina los datos acerca de la orientación e inclinación de sus pendientes con los datos sobre la radiación solar incidente y los usos y formas de ocupación de la ciudad, diferenciando las áreas libres y las áreas construidas.

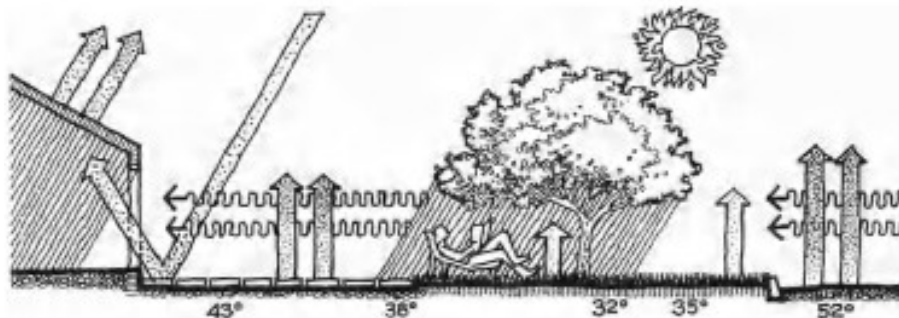
Los resultados de esa investigación indican que áreas con las mismas características de ocupación presentan variación en sus temperaturas superficiales según la orientación de sus pendientes. Las que presentan menores temperaturas están orientadas a Sur, Sureste y Suroeste, cuya diferencia de temperatura hacia las otras orientaciones varía entre 3°K y 5°K.

La diferencia de temperatura según el tipo de ocupación apunta a una diferencia de

3°K para las pendientes orientadas al cuadrante Sur, mientras que para las pendientes orientadas al cuadrante Norte es de solo 1°K.

Sobre la corrección del entorno inmediato, se debe evaluar las propiedades radiactivas de los materiales, en especial aquellos expuestos a la radiación solar. El coeficiente de absorción influye en el aumento de la temperatura de las superficies próximas y, según la emisividad de cada material, aumenta la energía irradiada por ellas, que impacta la temperatura del aire y la envolvente del edificio. En ese aspecto, (Konya 1980) presenta un esquema que indica la temperatura superficial de distintos elementos sometidos a la radiación solar, donde se destaca la importancia del acabado superficial de los materiales y el papel desempeñado por las áreas sombreadas (Figura 5). Ese boceto pone en valor que toda intervención realizada en el entorno no solo actúa como interactúa con el edificio, permitiendo efectuar cambios que mejoren o empeoren las condiciones térmicas ambientales del sitio, según cada clima específico.

Figura 5: Temperatura superficial según el coeficiente de absorción del acabado exterior



Fuente: (Konya 1980)

Las pendientes del terreno también modifican el movimiento del aire tanto en su flujo horizontal cuanto vertical, provocando mayores velocidades a barlovento y en el topo de la pendiente, mientras que ocasiona vientos menos turbulentos a sotavento. Sin embargo, su conveniencia depende de la procedencia del viento - puede ser más cálido o más frío, más seco o más húmedo - y de su relación con el microclima del lugar. En ese sentido, las correcciones del entorno inmediato pueden prever

obstáculos, naturales o artificiales, que buscan favorecer o evitar las acciones del viento.

En ese sentido, (DeKay y Brown 2014) sugieren adoptar las siguientes estrategias de diseño urbano para corregir el entorno inmediato de microclimas cálidos:

- disminución de la radiación solar incidente mediante elementos que promuevan sombra para los edificios, en especial para las fachadas orientadas a Oeste, y para el suelo urbano, evitando ganancias térmicas de esas superficies. Sobre ese aspecto, (Rivero 1986) destaca el papel desempeñado por la vegetación, que absorbe cerca de 90% de la radiación visible, 60% en el rango de la radiación infrarroja, y refleja o transmite mediante sus hojas la otra parte del espectro de la radiación;
- aumento de la humedad relativa del sitio promovida por las superficies de agua y por la transpiración de la vegetación en sitios caracterizados por microclimas cálidos-secos;
- enfoque en estrategias que potencien las condiciones de ventilación natural de cada sitio, en el caso de que la temperatura y velocidad del aire sean adecuadas para la mejorar de las condiciones de confort térmico del ambiente interior.

2.1.2 Orientación y forma del edificio

Según (Olgay, Lyndon y Reynolds 1963), la forma del edificio debe asumir un grado de exposición al entorno inmediato según las condiciones térmicas del entorno, asumiendo características más o menos permeables a depender si las condiciones son favorables o no al confort del usuario. Para climas cálidos-húmedos, esos autores sugieren formas prolongadas, con sus fachadas más largas orientadas hacia Norte y Sur, a fin de reducir las ganancias térmicas solares por Este y Oeste y

maximizar la disipación del calor almacenado en la envolvente mediante la ventilación natural.

El trabajo académico realizado por (Venancio y Pedrini 2009) busca evaluar esa variable y su impacto en el consumo energético. Para eso, ellos utilizaron como objeto de la investigación un modelo de edificios de oficinas de la “Universidade Federal do Rio Grande do Norte” (UFRN), ubicada en Natal (5°S), ciudad caracterizada por su clima cálido-húmedo. Los autores simularon tres formas de edificios (Figura 6), todos con solo una planta, combinado con tres tipos de envolvente, clasificadas en bajo, medio y alto desempeño (Tabla 4). La forma G1 tiene las fachadas más largas orientadas hacia Norte y Sur; la forma G2, hacia Este y Oeste; y la forma G3 tiene la cuatro fachadas con la misma dimensión y orientadas hacia los puntos cardinales.

Figura 6: Formas del edificio simuladas para evaluar sus impactos en el consumo energético



Fuente: (Venancio y Pedrini 2009)

Tabla 4: Coeficientes de absorción y de transmitancia térmica de paredes y cubierta para cada tipo de envolvente

	BAJO DESEMPEÑO	MEDIO DESEMPEÑO	ALTO DESEMPEÑO
PAREDES	$\alpha=0,7$; $U=3,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	$\alpha=0,5$; $U=2,47 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	$\alpha=0,3$; $U=1,66 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
CUBIERTA	$U=3,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	$U=2,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	$U=0,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Fuente: (Venancio y Pedrini 2009)

Los resultados de las simulaciones apuntan a una influencia relativa de la forma del edificio, limitada por el tipo de envolvente. Por un lado, en el caso de los edificios diseñados con la envolvente de bajo desempeño, la forma G1 reduce en 6% el consumo energético si comparado con la forma G2. Por otro lado, al utilizar las características de la envolvente de alto desempeño, la forma que más reduce el consumo es la G3, pero con un porcentaje bajo, de 2%.

Además, al comparar edificios con la misma geometría pero con diferencias en las propiedades térmicas de la envolvente, la diferencia entre los consumos energéticos de las envolventes de alto y bajo desempeños alcanza 17% para la forma G1, y 22% para la forma G2.

Debido a esos resultados, los autores concluyen que la influencia de la forma del edificio en el consumo energético depende en gran parte de la definición de las propiedades térmicas de la envolvente en las primeras etapas de diseño. No obstante, (Venancio y Pedrini 2009) resaltan que la forma G2 es la que presenta el mayor consumo energético en comparación con las otras formas, cualquier que sea el tipo de envolvente.

Vale destacar que esa investigación evaluó las propiedades térmicas de las paredes externas en conjunto con las cubiertas, disminuyendo los coeficientes de absorción y de transmitancia térmica de esos dos elementos de la envolvente al mismo tiempo. Como ellos reciben distintas porciones de radiación solar, lo más adecuado sería la evaluación de las propiedades radiactivas y térmicas de las paredes separada de la cubierta.

2.1.3 Orientación y organización de los ambientes internos

Esa variable pone de relieve las relaciones de los ambientes interiores con el ambiente exterior, así como la relación entre los ambientes interiores entre sí. En ese aspecto, (Serra y Coch 1995) apuntan tres tipos generales de espacios:

- a) espacios principales: aquellos que requieren condiciones de confort más estrictas porque, en general, son espacios de permanencia continua;
- b) espacios secundarios: aquellos que permiten una cierta flexibilidad a causa de su uso discontinuo;
- c) espacios independientes: aquellos que tienen características ambientales propias y, por eso, suelen ser muy exigentes con relación a su desempeño ambiental, tanto en términos de aislarse de factores ambientales, como salas de teatro, cuanto en el caso de volverse una fuente de propagación de calor y/o ruido, como cocinas industriales.

Considerando ese tema como una definición a ser tomada en las primeras etapas del diseño, (Venancio y Pedrini 2009) evaluaron dos tipologías de distribución interna para el edificio de oficinas de la UFRN:

- pasillo central, con salas de oficinas orientadas a Norte – Sur y a Este – Oeste;
- pasillo lateral, con fachada exterior orientada hacia los cuatro puntos cardinales.

Todos los pasillos fueron configurados con aberturas en sus fachadas exteriores en la proporción de 50% ($WWR = 50\%$). En los pasillos laterales, debido a su mayor exposición a la radiación solar, fue configurada una tercera tipología, la del pasillo lateral con la abertura protegida por un voladizo.

Los resultados de las simulaciones demuestran que, entre la tipología de pasillo central, las salas de oficinas orientadas a Norte – Sur tiene ganancias térmicas 17% menores que la otra, con salas orientadas a Este – Oeste.

Entre la tipología de pasillo lateral, todas afectan muy poco el desempeño térmico de las salas de oficinas, excepto el pasillo lateral orientado hacia Oeste sin protección solar, que contribuye con hasta 18% a más de ganancias térmicas.

Al comparar las condiciones térmicas de los pasillos entre las dos tipologías, los resultados indican que, por un lado, el ambiente del pasillo central presenta pérdidas térmicas un poco mayores que las ganancias térmicas, debido a la disipación de calor promovida por la ventilación cruzada. Por otro lado, en la tipología de pasillo lateral, las ganancias son mayores que las pérdidas en el ambiente del pasillo, cualquiera que sea la orientación. Según los autores, eso se debe a la ausencia de ventilación cruzada en esos espacios secundarios, afectando al espacio interior por generar menor cantidad de disipación del calor entre la pared que divide ese espacio y el pasillo lateral.

Además, (Venancio y Pedrini 2009) concluyen que la incidencia solar que atraviesa las aberturas adoptadas en los pasillos es el aspecto más relevante a ser considerado. Esas aberturas impactan el consumo energético, tanto por el aumento de la temperatura interior de los pasillos como por permitir que los rayos solares alcancen las paredes de las oficinas. Por lo tanto, la organización de los ambientes internos debe ser elaborada en conjunto con las estrategias de orientación del edificio y de protección solar de la envolvente, tanto de los espacios principales como de los secundarios.

2.1.4 Orientación y coeficiente de absorción

Todo material opaco, al recibir la radiación solar, refleja una parte y absorbe la otra. Las características de reflexión y absorción de la radiación solar en los elementos opacos son complementares y varían según la longitud de onda. Para la radiación de onda corta, la superficie con bajo coeficiente de absorción puede reflejar hasta 95%, absorbiendo solo 5% de la radiación solar. Por otro lado, una superficie de color negro refleja solo 10% de la radiación solar incidente, absorbiendo 90% y,

consecuentemente, sufriendo un aumento significativo de su temperatura superficial (Frota 2004).

Centrado en ese tema, (Cheng, Ng y Givoni 2005) evaluaron la influencia del color de la envolvente en la temperatura interior de edificios ubicados en Hong Kong (20°N), caracterizada por su clima cálido-húmedo. Mediante prototipos instalados en la cubierta de un edificio, fueron evaluados los datos de temperatura interior de cada prototipo según las siguientes variables: color de la envolvente (blanca: $\alpha=0,25$; negra: $\alpha=0,80$); cantidad de radiación solar global horizontal; orientación de la pared; masa térmica de las paredes (liviana: placas de madera de 20mm con aislamiento interior de 25mm; pesada: añadiendo a la pared liviana bloques de hormigón con espesor de 90mm en su interior).

Relativo al coeficiente de absorción de la envolvente, el experimento con paredes livianas apunta a un aumento de la temperatura interior en el periodo diurno mucho más grande para los prototipos pintados de negro. Estos registraron diferencia de 15°K a más, con relación a la temperatura exterior, mientras que los pintados de blanco registraron un aumento de 3°K. Vale destacar que esos datos se refieren a días con radiación global horizontal de 800 W/m². Cuando la radiación solar disminuye para 300 W/m², debido a las condiciones del cielo, el aumento de temperatura interior es menos significativo: 1°K y 5°K para los prototipos pintados de blanco y de negro, respectivamente. En días lluviosos, cuando la radiación solar alcanza valores mínimos, la diferencia entre temperatura exterior e interior, en los dos casos, es casi inexistente. Así como en días lluviosos, la diferencia también es mínima durante las noches de verano.

A partir de esos datos, los autores destacan la importancia del color de la envolvente para las temperaturas interiores de edificios con paredes externas livianas en climas cálidos-húmedos. Por un lado, cuanto más oscuro, mayores son las ganancias térmicas por radiación solar transmitidas por la pared, impactando en el aumento de la temperatura interior diurna. Por otro lado, debido a la alta reflectividad a la

radiación solar de los colores claros, las ganancias térmicas y el incremento de la temperatura interior son menos significativas si comparadas con el caso anterior.

La investigación del efecto de la orientación en la temperatura interior fue realizada en el invierno, cuando el Sol en Hong Kong está inclinado hacia el Sur. Para eso, cada prototipo fue dividido internamente, creando cuatro cámaras idénticas con sus paredes exteriores orientadas para cada uno de los puntos cardinales. En el prototipo con las paredes livianas pintadas de blanco, la diferencia entre las temperaturas interiores de las cámaras orientadas a Sur y a Norte alcanzaron 16°K. Las cámaras orientadas a Este y a Oeste registraron temperaturas máximas entre las cuatro cámaras, por la mañana y por la tarde, respectivamente.

En el caso de las paredes pesadas, el efecto más emblemático del experimento es la disminución de la amplitud térmica de la temperatura interior, tanto en los picos de temperatura máximos cuanto en los mínimos. En los prototipos pintados de negro fueron registradas durante el día temperaturas máximas 2°K por encima de la temperatura exterior y, durante la noche, temperaturas mínimas 5°K por encima de la temperatura exterior. En el caso de los prototipos pintados de blanco, fueron registradas temperaturas máximas 2°K por debajo de la temperatura exterior, mientras que las mínimas alcanzaron 2°K por encima de temperatura exterior.

Al evaluar el efecto de la orientación sobre las paredes pesadas, los resultados indican que no hay diferencias significativas entre las cámaras, independiente de su orientación. La más destacable es la temperatura interior de la cámara oeste durante la tarde, que presenta temperaturas más altas si comparadas con las temperaturas interiores de las otras cámaras. Hay que resaltar, una vez más, que las temperaturas interiores nocturnas siempre estuvieron por encima de la temperatura exterior, independiente de la orientación.

Los autores concluyen que el impacto del color de la envolvente en la temperatura

interior depende de la cantidad de radiación solar recibida y de la masa térmica del elemento constructivo. Por un lado, la utilización de colores claros en edificios con paredes externas livianas es la estrategia más efectiva, y también económica, de reducir la temperatura interior en climas cálidos-húmedos. Por otro lado, en edificios con paredes externas pesadas, la mayor capacidad térmica disminuye la amplitud térmica diaria de la temperatura interior, así como reduce la influencia del color y de la orientación de la pared externa en la variación de la temperatura interior.

Vale destacar que, en ese experimento, los comportamientos térmicos de las paredes son evaluados según los parámetros climáticos, pero sin la influencia de los aportes internos en el flujo de calor que las atraviesa.

2.2 MODULACIÓN DE LA ENERGÍA TÉRMICA POR LA PARED

Modular la carga térmica por la pared tiene como finalidad regular la magnitud del flujo de calor que la atraviesa, así como posibilitar la acumulación de la energía térmica por un periodo de tiempo para disiparla en un momento posterior.

Los parámetros climáticos involucrados son la temperatura del aire, tanto exterior cuanto interior, y la radiación solar incidente en cada pared. Además, la rutina de ocupación del espacio interfiere en la modulación de la carga térmica tanto por la cantidad de energía generada en el ambiente interior como por los momentos del día en que el ambiente está ocupado.

Conforme a lo citado anteriormente, la oscilación diaria de la temperatura exterior en la zona intertropical atraviesa la zona de confort térmico establecido por la normativa técnica, así como su promedio, tanto diario cuanto anual, suele ser próximo a la temperatura de consigna establecida para el ambiente interior (ABNT 2008). Debido a esos motivos, el análisis sobre el flujo de calor que atraviesa la pared debe tener en cuenta la oscilación diaria y su influencia sobre dos aspectos: la magnitud y la dirección del flujo de calor.

Con relación a la cantidad de flujo de calor, los parámetros ambientales que la afectan directamente son la amplitud térmica de la temperatura exterior y la radiación solar incidente. La primera determina las temperaturas exteriores máxima y mínima e influyen directamente en la cantidad de energía absorbida y disipada por la superficie exterior de la pared. La segunda puede aumentar significativamente la energía absorbida por la pared externa según su orientación y el coeficiente de absorción de su acabado exterior.

Sobre la dirección del flujo de calor, si la temperatura interior se mantuviese siempre constante, la variación diaria de la temperatura exterior sometería las paredes a una oscilación diaria de la dirección del flujo de calor: durante el día, con la temperatura exterior por encima de la temperatura interior, la transferencia de calor ocurriría hacia el ambiente interior; por la noche, con la temperatura exterior por debajo de la temperatura interior, se invertiría la dirección del flujo.

Sin embargo, la temperatura interior no suele ser constante 24 horas por día. Ella varía según la rutina de ocupación del espacio, que determina no solo la temperatura interior, mediante los aportes internos y la utilización de sistemas de climatización o de sistemas de enfriamiento pasivo, como también el periodo en el cual el ambiente está desocupado.

Exactamente en el medio de esas variaciones climáticas, tanto del ambiente exterior cuanto del interior, se sitúa la pared. El flujo de calor siempre la atravesará, a causa de la diferencia de temperatura de sus superficies, pero puede ser modulado según las intenciones del diseño de sus variables constructivas: el coeficiente de transmitancia térmica (U , medido en $W/m^2 \cdot K$) y la capacidad térmica (C_t , medido en $kJ/m^2 \cdot K$).

2.2.1 Coeficiente de transmitancia térmica

En países donde el invierno es la estación dominante durante el año, sus códigos

técnicos y algunos trabajos académicos que evalúan edificios ubicados en esos climas apuntan que lo más recomendable es la adopción de bajos valores de la U (Balaras 1996). Debido al menor flujo de calor, se evitan pérdidas térmicas al exterior en periodos fríos, así como se disminuyen las ganancias térmicas en periodos calurosos.

Sin embargo, recientes investigaciones desarrolladas por académicos de países de climas cálidos cuestionan la recomendación de aumentar la resistencia térmica de las paredes a fin de ahorrar energía. (Masoso y Grobler 2008) atestan que, para climas cálidos, la relación entre el desempeño térmico de la pared, su coeficiente de transmitancia térmica y la demanda de refrigeración depende de la temperatura de consigna adoptada. Mediante simulaciones energéticas de un edificio de oficinas de tres plantas ubicado en Gaborone - Botsuana (24°S), cuyo clima es cálido-seco, fueron adoptados distintos valores de temperatura de consigna, tanto para la calefacción cuanto para refrigeración (22°C; 24°C; 25°C; 25,5°C; 26°C; 26,5°C), combinados con diferentes valores del coeficiente de transmitancia térmica de la pared (2,258 W/m²·K; 0,618 W/m²·K; 0,358 W/m²·K; 0,252 W/m²·K; 0,194 W/m²·K) y distintos aportes internos (9 W/m²; 15 W/m²).

Por un lado, los autores apuntan que, para la demanda de calefacción, cuanto menor sea el coeficiente de transmitancia térmica, menor es la demanda de calefacción. Por otro lado, el desempeño térmico de las paredes para la demanda de refrigeración presenta un comportamiento diverso, dependiendo de la temperatura de consigna adoptada. Según la investigación realizada, para temperaturas de consigna por encima de 25°C, disminuir el coeficiente de transmitancia térmica implica aumentar el consumo energético. Ese desempeño térmico inesperado es denominado por los autores de “comportamiento anti-aislamiento”.

Masoso y Grobler (2008) afirman que todavía no es posible definir las causas de ese fenómeno, pero ponen de relieve que el comportamiento térmico de la pared tiene un punto de inflexión térmica, que se define como la temperatura en la cual

aumentar la capa de aislamiento significa aumentar la demanda de refrigeración. El punto de inflexión térmica depende del clima de cada sitio y de la energía generada en cada ambiente interior, ya que ese comportamiento es más significativo cuando los aportes internos son más altos. Por fin, los autores resaltan que ese comportamiento térmico distinto de las paredes es característico de climas cálidos, pues solo afecta a la demanda de refrigeración.

Sobre ese trabajo académico, vale destacar la utilización de la temperatura de consigna como variable. Ella es un instrumento normativo importante para el ahorro energético de un país o región porque, al establecer límites de temperatura un poco superiores o inferiores a los padrones corrientes, la Administración Pública confía en la capacidad de aclimatación de los usuarios a pequeñas variaciones climáticas, al mismo tiempo que pretende lograr ahorros energéticos en gran escala. Sin embargo, ese instrumento normativo debe estar bien ajustado con el límite del coeficiente de transmitancia térmica definido por las normativas para que los edificios realmente logren ahorros energéticos.

Preocupados con esos aspectos, (Idris y Mae 2017) buscaron comprender el “comportamiento anti-aislamiento” descrito por (Masoso y Grobler 2008) a partir de simulaciones energéticas con las siguientes variables: cinco valores del coeficiente de transmitancia térmica, cuya variación se sitúa entre $0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y $4,45 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; temperatura de consigna de refrigeración (22°C ; 24°C ; 26°C ; 28°C ; 30°C); archivos climáticos de 13 ciudades, con distintas clasificaciones climáticas de ASHRAE [11 ciudades americanas, una canadiense (Vancouver - 49°N) y una de Arabia Saudí (Riad - 24°N)]; cuatro padrones de rutina de ocupación (dos residenciales y dos de oficinas). El criterio de evaluación fue el punto de inflexión térmica (PTI, sigla en inglés), definido como la temperatura de consigna a partir de la cual la disminución del coeficiente de transmitancia térmica implica el aumento del consumo energético.

Los resultados de esa investigación apuntan que 80% de los casos presentan PTI

entre 22°C y 30°C. Los autores afirman que ese comportamiento se debe principalmente al papel que desempeña la envolvente con relación al flujo de calor: disipar el calor generado internamente, a depender de la cantidad de los aportes internos, o evitar condiciones térmicas extremas en el interior, a depender del clima de cada sitio.

Los autores destacan que, por un lado, las ciudades con clima cálido-seco son menos susceptibles a los efectos desfavorables de aumentar el aislamiento, presentando los mayores puntos de inflexión de la temperatura de consigna. Por otro lado, las ciudades con climas marinos demostraron ser más sensibles a los efectos desfavorables de aumentar el aislamiento, registrando los menores puntos de inflexión de la temperatura de consigna. Por fin, (Idris y Mae 2017) señalan que cuanto mayores sean los aportes internos, mayor es la probabilidad de ocurrir el aumento de la demanda de refrigeración con la disminución del coeficiente de transmitancia térmica.

Con respecto a trabajos académicos sobre el coeficiente de transmitancia térmica en climas cálidos, (Chirarattananon, Hien y Tumm 2012) eligieron investigar edificios con diferentes usos (hotel, oficinas y tienda comercial) y distintas tasas de acristalamiento (0%, 30%; 60%) a fin de definir la mejor configuración de aislamiento en paredes externas para Bangkok, Tailandia (14°N), cuyo clima es caracterizado como cálido-húmedo.

Para los edificios sin ventanas, los resultados presentan un progresivo ahorro energético a medida que se aumenta el espesor de la capa de aislamiento, para los tres usos. Sin embargo, a medida que se aumenta la tasa de acristalamiento, el consumo energético presenta comportamientos distintos, que dependen del uso y de la tasa de acristalamiento adoptada.

Con la tasa de acristalamiento de 30%, disminuir el coeficiente de transmitancia térmica de las paredes afecta muy poco al consumo energético, en los tres usos.

Para la tasa de acristalamiento de 60%, aumentar el aislamiento de las paredes eleva el consumo energético de la oficina y de la tienda comercial, mientras que se registra ahorro energético para el hotel.

Los autores concluyen que cuando las ganancias solares por las ventanas en la zona interior son reducidas, el aislamiento en la pared expuesta tiene un resultado más efectivo, reduciendo las ganancias térmicas a través la pared desde el exterior. Cuando la tasa de acristalamiento es mayor, la radiación solar que llega al espacio interno eleva las cargas térmicas del ambiente interior. Así, el aislamiento instalado en la pared retrasa la disipación del calor, influyendo en el aumento de la demanda de refrigeración. Hay que destacar también la relación entre los ahorros energéticos y los usos del espacio, con sus respectivos aportes internos, que tienen papel decisivo en la definición del coeficiente de transmitancia térmica más adecuado para las paredes externas. Aquellos con rutina de ocupación diurna tienen más necesidad de disipar el calor. Mientras tanto, el hotel, cuya rutina de ocupación fue configurada para 24 horas de uso continuo, tiene mejor desempeño térmico con paredes externas con mayor resistencia térmica.

En Brasil, las investigaciones acerca del coeficiente de transmitancia térmica pueden ser caracterizadas en dos grupos: aquellas dedicadas a comprender el papel desempeñado por cada elemento de la envolvente en el consumo energético del edificio, y las que se enfocan solo en las paredes externas del edificio y su relación con la eficiencia energética.

En cuanto al primer grupo, (Signor, Westphal y Lamberts 2001; Carlo 2008) buscaron crear ecuaciones de regresión lineal para estimar, de forma rápida, el consumo energético de los edificios ubicados en distintas zonas climáticas del país. Esos autores afirman que el coeficiente de transmitancia térmica de las paredes presenta un comportamiento no lineal, lo que imposibilita su utilización como variable en las ecuaciones elaboradas. Por ese motivo, el coeficiente de

transmitancia térmica de las paredes fue excluido de las ecuaciones generadas por esas investigaciones.

Otra investigación académica, realizada para establecer parámetros de eficiencia energética para la envolvente a ser incluidos en el código técnico municipal de Salvador – Brasil (13°S) también revela ese comportamiento no lineal del coeficiente de transmitancia térmica.

(Carlo, Ghisi y Lamberts 2003) elaboraron 12 modelos de edificios para esa ciudad que, combinados con distintas variables de la envolvente, dieron como resultado 1.616 prototipos simulados. Al evaluar el efecto del coeficiente de transmitancia térmica de las paredes en el consumo energético, los autores destacan comportamientos distintos de esa variable según la masa térmica: para paredes livianas, el consumo energético aumenta con el aumento de la transmitancia térmica. Por otro lado, en un edificio con paredes de alta masa térmica, el consumo energético disminuye cuando el coeficiente de transmitancia térmica se sitúa entre 1,50 W/m²·K y 1,70 W/m²·K y entre 2,20 W/m²·K y 3,00 W/m²·K, mientras que aumenta en los otros intervalos.

Además, al comparar el consumo energético del edificio con el mismo coeficiente de transmitancia térmica, el modelo de paredes livianas presenta un consumo energético mayor, debido a la ausencia de los efectos de la inercia térmica.

Basado en ese comportamiento térmico dependiente de tantas variables, el trabajo académico de (Melo 2007) busca evaluar la influencia del coeficiente de transmitancia térmica de las paredes en el consumo energético de edificios comerciales según distintas rutinas de ocupación (periodo de ocupación y aportes internos) y diferentes variaciones de sus características constructivas (coeficiente de absorción; factor solar de los vidrios; tasa de acristalamiento). Como método, la autora utiliza simulaciones termo-energéticas en tres ciudades - Curitiba (25°S), Florianópolis (27°S) y São Luís (2°S) -, cada una ubicada en una zona climática del

país – Zona 1, Zona 3 y Zona 8, respectivamente (ABNT 2003).

A pesar de haber adoptado cuatro valores distintos del coeficiente de transmitancia ($1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), los análisis enfocan la comparación entre el consumo energético de los valores límites adoptados, $1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y $4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Así, el tema del comportamiento no lineal de esa variable no es abordado en esa investigación.

El principal resultado de ese trabajo académico es demostrar que, en la mayoría de los casos simulados, aumentar el coeficiente de transmitancia térmica de las paredes, de $1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ para $4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, contribuye para disminuir el consumo energético del edificio. La autora concluye que paredes externas con menores resistencias térmicas permiten la disipación del calor del ambiente interior.

Por un lado, al comparar el desempeño térmico de las paredes en las tres ciudades, São Luís es la que presenta las menores tasas de ahorro energético, alrededor de 1% al adoptar la pared externa menos aislada. Por otro lado, Curitiba y Florianópolis presentaron tasas de reducción del consumo energético similares entre sí, alrededor de 4% y 6%, respectivamente.

Los casos que representan mayores reducciones de consumo energético al aumentar el valor del coeficiente de transmitancia térmica, para las tres ciudades, son aquellos caracterizados por mayores cargas térmicas en el ambiente interior: mayores aportes internos (70 W/m^2), con reducciones de la demanda de refrigeración de 16%, 10% y 5% para Florianópolis, Curitiba y São Luis, respectivamente; y mayor factor solar de los vidrios (0,87), con reducciones de la demanda de refrigeración de 12%, 16% y 10% para Florianópolis, Curitiba y São Luis, respectivamente.

La relación entre el coeficiente de transmitancia térmica y la variación de la tasa de

acristalamiento apuntan a un ahorro energético cuando, para el mismo valor de WWR (*window wall ratio*, sigla en inglés), el coeficiente de transmitancia térmica es de $4\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Sin embargo, las reducciones del consumo son más significativas cuanto menores sean las tasas de cristalamiento adoptadas. Por un lado, (Melo 2007) justifica que las ganancias térmicas solares por las ventanas son bastante significativas y, consecuentemente, aumentan considerablemente el consumo energético durante el día. Por otro lado, hay que destacar que una mayor tasa de cristalamiento disminuye también las superficies de paredes externas. Por esos motivos, los cambios del coeficiente de transmitancia térmica de las paredes externas son menos significativos en el consumo energético.

Al evaluar distintos periodos de ocupación, las simulaciones presentan menores consumos energéticos para Curitiba y Florianópolis al aumentar el coeficiente de transmitancia térmica, con reducciones más significativas cuanto mayor es el periodo de ocupación. En el caso de São Luís, para el periodo de ocupación de ocho horas, hubo un ligero aumento del consumo energético al aumentar el coeficiente de transmitancia térmica. Mientras tanto, para el periodo de 12 horas, el consumo energético se mantuvo constante, a pesar del cambio del coeficiente de transmitancia térmica.

Esa investigación solo registró un caso en el cual el consumo energético se elevó al aumentar el coeficiente de transmitancia térmica en las tres ciudades: cuando se adoptó el coeficiente de absorción de 0,90 para las paredes. En ese caso, São Luís registró la mayor variación del consumo energético. La autora argumenta que, con el coeficiente de absorción, las ganancias térmicas por las paredes influyen más que las pérdidas por las mismas y, por lo tanto, ese acabado externo contribuye para el aumento del consumo energético.

Por fin, Melo (2007) concluye que la definición del coeficiente de transmitancia térmica de las paredes externas de los edificios ubicados en Brasil debe considerar principalmente la posibilidad de disipación del calor generado en el ambiente interior.

Para eso, su diseño debe tener en cuenta el clima del sitio, las características de ocupación del ambiente interior y las variables constructivas de las paredes que influyen en el flujo de calor entre los ambientes exterior e interior.

2.2.2 Capacidad térmica

Mientras que la resistencia térmica es apuntada como el factor más importante para la reducción del consumo energético, especialmente en climas dominados por la demanda de calefacción, (Verbeke y Audenaert 2018) pone de relieve la complejidad del papel desempeñado por la capacidad térmica del edificio en el consumo energético y las posibilidades de ahorro permitidas por esa propiedad térmica de los materiales.

Primeramente, esos autores destacan el comportamiento del material en una situación de flujo térmico en régimen transitorio, cuando la masa térmica de un edificio absorbe, almacena y libera progresivamente el calor dependiendo de la diferencia de su temperatura con el entorno inmediato. En ese proceso, el flujo de calor es afectado de dos maneras: por la reducción de la cantidad máxima del flujo de calor que es disipado hacia el ambiente interior, y por la diferencia de tiempo en que ocurre el pico máximo de temperatura en las superficies exterior e interior de la pared externa.

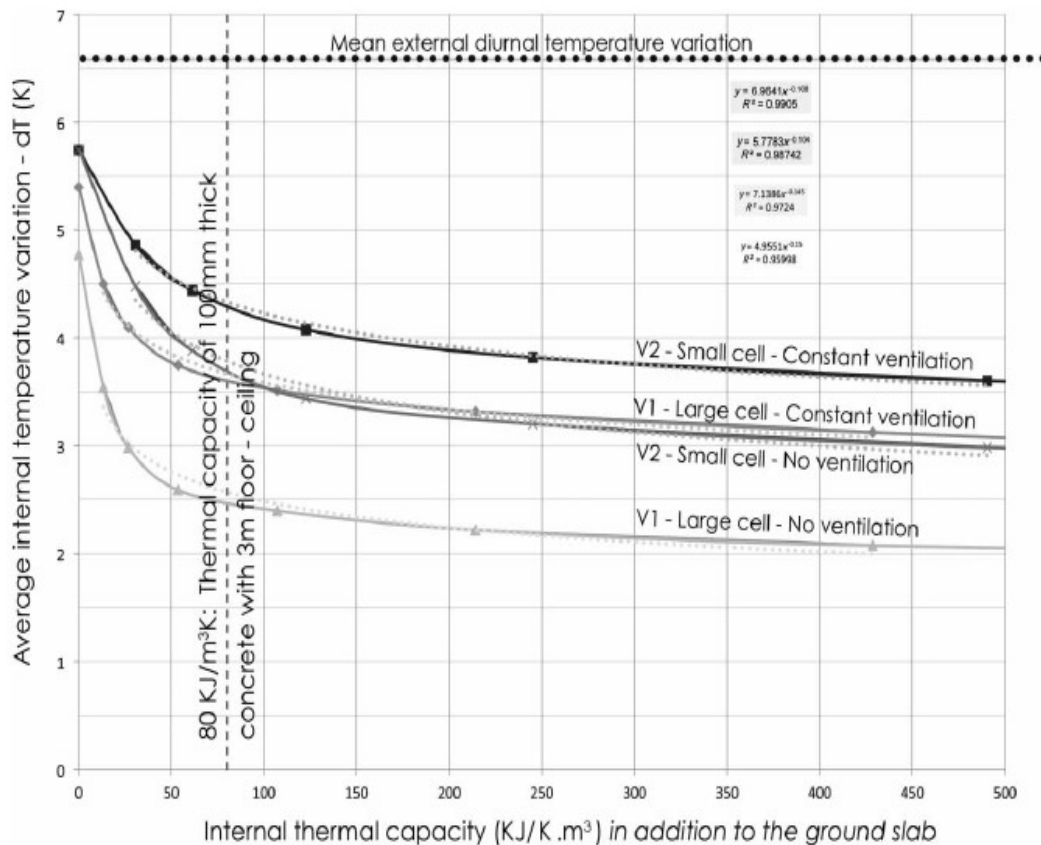
(Slee, Parkinson y Hyde 2014) destacan que la relación entre la cantidad óptima de masa térmica en el edificio está íntimamente relacionada con las condiciones climáticas de cada sitio. Esa relación es importante tanto para minimizar los costes con la climatización del espacio interior como para disminuir la cantidad de energía incorporada en el edificio.

En ese sentido, los autores investigaron cual sería esa relación para la ciudad costera de Sydney (34°S). El resultado apunta que el valor óptimo aproximado de capacidad térmica del ambiente interior es de $80 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$, además de la capacidad

térmica de la losa de hormigón utilizada en el piso.

(Slee, Parkinson y Hyde 2014) resaltan que, tan importante cuanto el valor de referencia de la capacidad térmica del ambiente, es la demostración de que hay un límite a partir del cual añadir más masa térmica al ambiente interior no ejerce tanta influencia en la temperatura interior (Figura 7).

Figura 7: Capacidad térmica óptima y su influencia en el desempeño térmico del ambiente en Sydney (34°S)



Fuente: (Slee, Parkinson y Hyde 2014)

Además, es importante destacar que los autores llegaron a esos valores mediante experimentos con células de ensayo y simulaciones energéticas, donde los espacios interiores no tenían rutinas de ocupación ni ganancias térmicas solares por ventanas.

Coincidencia o no¹, el Reglamento Técnico de Clasificación Energética de Edificios Comerciales, Institucionales y de Servicios de Brasil (INMETRO 2013) adopta el valor de $80 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ para la capacidad térmica de las paredes externas, a partir del cual se definen valores límites para el coeficiente de transmitancia térmica de las zonas bioclimáticas 7 y 8, conforme a lo apuntado en el capítulo anterior.

Sobre su influencia en ambientes interiores, (Granja y Labaki 2004) evalúan el impacto de la capacidad térmica de las paredes externas en la oscilación de la temperatura interior en Campinas, Brasil (23°S). Para eso, los autores analizan las cargas térmicas emitidas hacia el ambiente interior por paredes orientadas a Este y a Oeste en un día de verano. Se utilizan dos modelos teóricos: la “Pared 1” es de hormigón y tiene densidad de 2.200 kg/m^3 y calor específico de $1 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, mientras que la “Pared 2” es de hormigón con arcilla expandida y posee 500 kg/m^3 y $1 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$. Todas las otras variables son iguales, incluso el coeficiente de transmitancia térmica, $3,13 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.²

Según los autores, en un periodo de 24h el flujo de calor es igual entre las dos paredes, ya que la transmitancia térmica no cambia. La diferencia está en los picos de carga térmica hacia el ambiente interior. Por un lado, la pared más liviana es más sensible a las condiciones climáticas externas, especialmente a la radiación solar recibida, y emiten más rápido la carga térmica hacia el interior, mientras que la pared más pesada acumula la energía térmica recibida desde el exterior y retrasa su paso hacia el interior. Por otro lado, la pared liviana alcanza temperaturas superficiales más bajas durante la noche, mientras que la pesada mantiene casi constante su temperatura superficial interior (Granja y Labaki 2004).

Por esos motivos, los autores resaltan la importancia de comprender el

¹Según (Silva, Callejas y Durante 2016), hay pocas investigaciones en Brasil que se dedican a evaluar el papel de la inercia térmica en edificios, en especial estudios que fundamenten los valores normativos adoptados.

²A fin de comparar con otras investigaciones, se realizaron cálculos con los datos indicados por (Granja y Labaki 2004) para las capacidades térmicas de las paredes 1 y 2. Los valores encontrados son, respectivamente, $574 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ y $131 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$.

comportamiento térmico de la pared y adecuar sus propiedades térmicas al uso final del edificio, considerando tanto la resistencia térmica cuanto la capacidad térmica del elemento opaco.

(Amos-Abanyie, Akuffo y Kutin-Sanwu 2013) destacan el uso predominante de paredes externas de bloque de arena-cemento en Kumasi, Ghana (7°N), caracterizados por su baja masa térmica. Además, las fachadas de los edificios de oficinas construidos en esa ciudad se caracterizan también por sus altas tasas de acristalamiento. Así, los autores deciden evaluar las posibilidades de ahorros energéticos en esa tipología de edificios mediante la simulación de nueve modelos de edificios, combinando las siguientes características:

- Paredes externas: bloque de arena-cemento (material de baja densidad); bloque cerámico (material de media densidad); hormigón (material de alta densidad);
- Tasa de acristalamiento: 54% (habitualmente utilizada); 27%; 0%;

Todos los resultados de las simulaciones son comparados con un modelo de referencia, caracterizado por paredes de bloque de arena-cemento y tasa de acristalamiento de 54%.

Acerca de los materiales de las paredes externas, los resultados apuntan que, al aumentar la masa térmica de las paredes, se registra una reducción del pico de la temperatura máxima interior, de 35,6°C a 32,6°C, así como un retraso en el momento en que ocurre ese pico de temperatura en el ambiente interior. Además, las temperaturas mínimas interiores registradas son más altas que aquellas del modelo referencia. Sin embargo, su influencia en reducir la temperatura máxima interior se mostró más relevante que el aumento de la mínima interior, principalmente por causa de la rutina de ocupación del edificio, predominantemente diurna.

(Chiraratananon y Hien 2011) evaluaron el papel de la capacidad térmica de las paredes externas en la demanda de refrigeración en edificios de distintos usos, todos ubicados en Bangkok, Tailandia (14°N). La Tabla 5 indica los usos elegidos y sus distintas rutinas de ocupación.

Tabla 5: Rutinas de ocupación por uso y periodo de la semana

RUTINAS DE OCUPACIÓN POR USO		LUNES – VIERNES	SÁBADO - DOMINGO
COMERCIAL	Hotel (24h)	0:00h – 24:00h	0:00h – 24:00h
	Oficina	8:00h – 18:00h	cerrada
	Tienda comercial	10:00h – 22:00h	10:00h – 22:00h
RESIDENCIAL	Salón	18:00h – 21:00h	9:00h – 21:00h
	Dormitorio	21:00h – 6:00h	21:00h – 8:00h
	Estudio	18:00h – 6:00h	9:00h – 8:00h

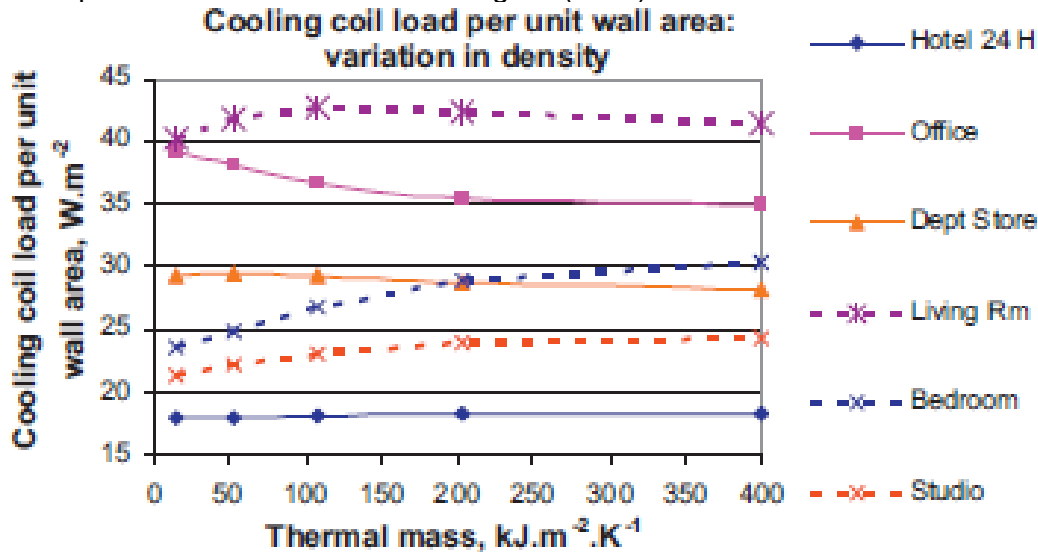
Fuente: (Chiraratananon y Hien 2011)

Los autores realizaron tomas de datos en edificios de referencia para calibrar el modelo computacional. Con el modelo calibrado, fueron realizados dos grupos de simulaciones: el primero con el cambio de la capacidad térmica de la pared sin cambiar su resistencia térmica; el segundo con el cambio del espesor de la pared, cuando se cambian al mismo tiempo la capacidad térmica y la resistencia térmica. Mientras que el primero tiene un carácter más teórico, pero no menos relevante, el segundo, por su proximidad a la realidad, permite que los autores puedan evaluar los desafíos profesionales de arquitectos e ingenieros a la hora de elegir las distintas configuraciones de la pared.

En el primer grupo de simulaciones, fueron utilizados los siguientes valores de capacidad térmica (en $\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$): 14,7; 52,4; 106,6; 203,3; 400,2. La resistencia térmica fue fijada en $0,18 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}^3$ (Figura 8).

³Adoptando los valores de $0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ y $0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ para las resistencias térmicas superficiales exterior e interior de la pared, su coeficiente de transmitancia térmica es de $2,86 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Figura 8: Demanda de refrigeración según los usos y la capacidad térmica de la pared para edificios simulados en Bangkok (14°N)



Fuente: (Chiraratananon y Hien 2011)

Los resultados para edificios comerciales presentan comportamientos distintos entre sí. El consumo energético del hotel cambia muy poco con el aumento de la masa térmica, mientras que la oficina presenta un significativo ahorro energético cuando las paredes tienen más capacidad térmica. Mientras tanto, la tienda comercial presenta un ligero incremento de la demanda de refrigeración hasta la capacidad térmica alcanzar el valor de $52,4 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ y, a partir de ese valor, se registra un pequeño ahorro energético al aumentarla.

Para los usos residenciales, los resultados presentan similitud entre el dormitorio y el estudio: los dos registran aumento de la demanda de refrigeración con el incremento de la capacidad térmica. Para el salón, el consumo energético muestra un comportamiento similar a la tienda comercial: sube hasta la capacidad térmica alcanzar el valor de $106,6 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ y, a partir de ese valor, se registra un pequeño ahorro energético al aumentarla.

A partir de esos resultados, los autores destacan que las paredes con elevada capacidad térmica almacenan la energía recibida en su cara exterior durante el día y

la disipan durante la noche, mientras que las livianas presentan un pico de carga térmica hacia el interior durante el día y el flujo térmico se dirige hacia el exterior durante la noche.

Al confrontar esa característica con los usos de los edificios, queda claro que aquellos con rutinas diurnas presentan ahorros energéticos con el aumento de la capacidad térmica de las paredes externas por causa de su efecto en retardar la transferencia de las cargas térmicas hacia el interior hasta al momento en que los edificios se encuentren desocupados. Sin embargo, aquellos con ocupaciones nocturnas presentan aumento de la demanda de refrigeración debido a la transmisión de energía térmica hacia el ambiente interior por la noche. Así, los sistemas de climatización tienen que retirar del ambiente la carga térmica de los aportes internos y de la carga térmica irradiada por las paredes hacia el interior. En el caso del estudio, del hotel y de la tienda comercial, que están casi todo el día ocupado, el aumento de la masa térmica poco influye en la demanda de refrigeración.

En el segundo grupo de simulaciones, fueron modificados los espesores de la pared y, consecuentemente, se cambiaron también su resistencia térmica y capacidad térmica. Para todos los casos indicados en la Tabla 6, la densidad del material de la pared es 2.210 kg/m^3 y la conductividad térmica es $0,546 \text{ W/m.K}$.

Tabla 6: Espesor, resistencia térmica y capacidad térmica de las paredes de edificios simulados en Bangkok (14°N)

Espesor (mm)	Resistencia térmica (m ² ·K/W)	Capacidad térmica (kJ/m ² ·K)
7,24	0,013	14,72
25,79	0,047	52,44
52,94	0,097	107,64
100,00	0,183	203,32
196,83	0,360	400,20

Fuente: (Chiraratananon y Hien 2011)

Los resultados del segundo grupo de simulaciones demuestran que la demanda de refrigeración se reduce a medida que se aumenta el espesor de la pared para todos los usos, excepto para el dormitorio. En ese último caso, el consumo energético sube ligeramente hasta alcanzar el espesor de 100mm y, a partir de ese valor, se registra un ahorro energético constante al aumentar su espesor.

Para todos los casos, hay que destacar que el aumento del espesor de la pared implica no solo en retrasar la disipación de la carga térmica para el periodo nocturno pero también la reducción del flujo de calor que atraviesa la pared. Esos dos factores explican el ahorro energético logrado en la mayoría de los casos, siendo que los ahorros más significativos fueron registrados en edificios sin usos nocturnos.

En el caso del dormitorio, es importante registrar que las paredes más delgadas registraron picos de flujos térmicos negativos por la noche, periodo en el cual el ambiente está ocupado. Así, al aumentar ligeramente el espesor de la pared, la reducción del flujo de calor no fue suficiente para compensar la carga térmica irradiada hacia el interior durante la noche y, por eso, fueron registrados demandas de refrigeración mayores. Solo con espesores significativamente más grandes es que el aumento de la resistencia térmica compensó las ganancias térmicas nocturnas producidas por las paredes en ese ambiente.

2.3 CONCLUSIONES PRELIMINARES

Esa revisión bibliográfica demuestra que la definición de las variables constructivas de las paredes debe considerar los efectos de los parámetros climáticos en conjunto con la rutina de ocupación del espacio, tanto sus aportes internos como el momento en que el ambiente es ocupado.

Al contrario de las cubiertas, donde la intensidad de la radiación solar incidente hace con que las cargas generadas internamente sean menos relevantes, las paredes de edificios implantados en la zona intertropical son más vulnerable a la interacción entre la oscilación de la temperatura del ambiente exterior y de las cargas térmicas del ambiente interior. O sea, cada tipo de uso del ambiente conlleva a una distinta configuración de sus variables constructivas.

La mayor parte de los estudios presentados revelan también la complejidad del comportamiento térmico de las paredes al evaluar dos variables constructivas de ese elemento: coeficiente de absorción y densidad de la pared; coeficiente de transmitancia térmica y capacidad térmica.

A cerca del coeficiente de transmitancia térmica para paredes de edificios de climas cálidos, los recientes estudios apuntan a la dirección opuesta de las nuevas normativas de países de climas fríos: cuanto menos aislada sea la pared, mejor su desempeño térmico.

Sobre la capacidad térmica, hay que destacar que el retraso térmico proporcionado por paredes pesadas en edificios de climas cálidos solo implica en ahorro energético si están ajustadas a la rutina de ocupación del espacio.

A partir de ese marco teórico, la tesis busca evaluar el comportamiento térmico de las paredes de los tres objetos de estudio elegidos: los pabellones de aulas implantados en Cruz das Almas, Vitória da Conquista y Barreiras.

3 METODOLOGÍA

Este capítulo presenta la metodología utilizada en la investigación, contemplando los siguientes aspectos:

- recogida de datos *in situ*;
- calibración de los modelos computacionales utilizados para las simulaciones energéticas;
- cálculos realizados para estimar la carga térmica por radiación solar transmitida por las paredes;
- simulaciones energéticas realizadas para analizar las cargas térmicas que afectan la demanda de refrigeración de las aulas, así como la contribución de las paredes a ese consumo energético;
- configuración de los modelos de paredes según las variables constructivas.

Como esta tesis realiza un análisis comparativo de edificios ubicados en tres ciudades distintas de Brasil, al referirse a ellas son indicados códigos y colores para facilitar sus identificaciones, especialmente en las tablas y gráficas elaboradas. El criterio para la elección de los códigos y colores es el factor topográfico que distingue los climas de cada una de esas ciudades: la proximidad al Océano Atlántico, en el caso de Cruz das Almas; la altura sobre el nivel del mar, en el caso de Vitória da Conquista; y la distancia al Océano Atlántico, que explica su clima

continental, en el caso de Barreiras. Así, las tres ciudades son identificadas de la siguiente manera:

- Cruz das Almas: código (MAR), color azul;
- Vitória da Conquista: código (ALT), color verde;
- Barreiras: código (CONT), color rojo.

3.1 RECOGIDA DE DATOS *IN SITU*

En los meses de agosto y septiembre de 2016 fueron realizadas visitas técnicas a los tres *campi* universitarios con el objetivo de recoger datos sobre los tres edificios y realizar mediciones de temperatura interior en algunas aulas de cada pabellón. Fue establecido un periodo de nueve días en cada ciudad para poder recoger una semana completa de actividades. El período de realización de cada visita técnica fue: Vitória da Conquista (ALT), entre 01 y 09 de agosto de 2016; Barreiras (CONT), entre 22 y 30 de agosto de 2016; Cruz das Almas (MAR), entre 31 de agosto y 8 de septiembre de 2016. Fueron realizadas las siguientes actividades en cada una de las ciudades:

a) Datos técnicos sobre los tres pabellones de aulas

Primeramente fueron consultados los departamentos de arquitectura e ingeniería de cada universidad dónde fueron solicitados los siguientes datos técnicos de cada edificio: planos arquitectónicos; características de los equipos de climatización; características de los sistemas de iluminación; funcionamiento de los aparatos; consumo energético de cada edificio; posibles estrategias de ahorro de energía implantadas en cada campus.

A partir de los planos arquitectónicos, fueron revisados los siguientes datos en cada

ambiente: acabados internos y externos; cantidad de luminarias y aparatos instalados; funcionamiento de puertas y ventanas (cómo abren y sus respectivos porcentajes de abertura).

Antes de las visitas técnicas, se imaginaba poder acceder a los consumos energéticos mensuales de cada uno de los pabellones de aulas. Sin embargo, los tres edificios no poseen lectura de consumos energéticos individualizados. Fueron construidas pocas subestaciones y cada una alimenta a un conjunto de edificios, en general tres por cada subestación. Además, la lectura de energía no distingue el consumo de cada edificio. Así, desafortunadamente, esa información no está disponible ni para la gestión energética de cada edificio ni para actividades de investigación.

b) Recogida de datos sobre la rutina de ocupación de las aulas

Fue elaborada una ficha, rellena por los profesores, solicitando las siguientes informaciones: identificación del aula; la fecha; horario en qué ocurre la clase; número de alumnos; funcionamiento de las ventanas (abierto / cerrado); funcionamiento de los aparatos (proyector; lámparas; aire acondicionado y su respectiva temperatura de consigna). La Figura 9 presenta una ficha rellena en Barreiras (CONT).

Figura 9: Modelo de ficha utilizada para la recogida de datos

PESQUISA SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS PAVILHÕES DE AULA (UFBA / UFOB / UFRB)			
SALA	25/08/11	DATA	25/08
HORÁRIO DA AULA	07:30	Nº ALUNOS	25
JANELA PRINCIPAL ABERTA	sim	JANELA LATERAL ABERTA	sim
	não <input checked="" type="checkbox"/>		não <input checked="" type="checkbox"/>
APARELHOS UTILIZADOS NA AULA	PROJETOR	sim	não <input checked="" type="checkbox"/>
	LÂMPADAS	sim <input checked="" type="checkbox"/>	não
	AR-CONDICIONADO 01	sim <input checked="" type="checkbox"/>	não
	TEMP. AR-COND. 01 (maior)		25'
	AR-CONDICIONADO 02	sim <input checked="" type="checkbox"/>	não
	TEMP. AR-COND. 02 (menor)		25'

Esos datos fueron recogidos en Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT). Desafortunadamente, no hubo clases en Cruz das Almas (MAR) en el periodo de la visita técnica a esa universidad debido a una huelga de profesores y funcionarios.

c) Mediciones de temperatura interior en las aulas

Para las mediciones de temperatura interior fue utilizado un datalogger Testo 174H, instalado a la altura de 1,20m. Él fue configurado para registrar la temperatura en un intervalo de diez minutos, durante siete días completos.

Fueron seleccionadas cuatro aulas en cada pabellón para la medición de temperatura interior. Para verificar cuál era el aula con la situación más desfavorable, fueron utilizados los siguientes criterios de selección:

- elección del ala del edificio más expuesto a la radiación solar por la tarde;
- dos aulas en la planta superior de esa ala, para evaluar las cargas térmicas por las paredes externas y por la cubierta.

La indicación de esas aulas, para cada edificio, se encuentra en los Anexos.

3.2 ELABORACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES PARA SIMULACIÓN ENERGÉTICA

Para las simulaciones energéticas fue utilizado el programa Designbuilder v. 4.02. por causa de las siguientes características: permite utilizar los archivos climáticos de ciudades brasileñas; es capaz de simular 8.760 horas por año, con variaciones horarias de ocupación y funcionamiento de aparatos; permite determinar la capacidad de los equipos de climatización de cada ambiente; simula los efectos de la inercia térmica de los materiales en los ambientes.

Antes de las visitas técnicas se imaginaba que era posible elaborar solo un modelo computacional para hacer las simulaciones en las tres ciudades, pues los pabellones fueron construidos con base en un mismo proyecto estándar. Sin embargo, hay diferencias constructivas significativas entre ellos que impusieron la realización de tres modelos:

- La posición de la circulación varía entre los pabellones: en Cruz das Almas (MAR) y en Vitória da Conquista (ALT) el pasillo se sitúa a la izquierda, con relación a la entrada principal, mientras que en Barreiras (CONT) está a la derecha;
- El módulo estructural del pabellón de Cruz das Almas (MAR) es distinto de los otros dos edificios, implicando dimensiones distintas tanto de la circulación como de las aulas.

Por lo tanto, fueron construidos tres modelos computacionales, uno para cada pabellón. Sin embargo, las plantillas de configuración de la edificación (actividades, materiales constructivos, aberturas y sistemas de acondicionamiento del aire) fueron compartidas entre los modelos computacionales, solo cambiando elementos específicos de cada edificio, como los colores de los acabados externos, por ejemplo.

3.2.1 Calibración de los modelos computacionales

Con las características constructivas de cada modelo computacional configuradas, fueron realizadas simulaciones de calibración de cada archivo basándose en los siguientes datos:

- las mediciones de temperatura interior realizadas;
- los datos meteorológicos de cada ciudad en el periodo de cada medición, consultados en el sitio del *Instituto de Meteorologia* (INMET);
- las rutinas de ocupación registradas en las fichas durante la recogida de datos.

La variable utilizada para las calibraciones fue la temperatura interior. Fue utilizada la fórmula estadística de Pearson (Chi-cuadrado) para comparar las temperaturas interiores registradas por las mediciones y las obtenidas mediante simulación (Ec. 01). Para eso, fue establecido un intervalo de 30 minutos para la comparación de los datos y un margen de error aceptable de 0,5.

$$x^2 = \sum_i \left(\frac{(\text{observada}_i - \text{teórica}_i)^2}{\text{teórica}_i} \right) \quad \text{Ec. 01}$$

A partir de las calibraciones, fue posible definir las siguientes variables: infiltración (renov./h); tasas de ventilación natural (renov./h); temperatura de consigna de los aparatos de acondicionamiento de aire.

3.2.2 Configuración de las simulaciones realizadas

Con los modelos computacionales calibrados fue seleccionado un ambiente de cada edificio, el aula A101, situada en la primera planta al final del pasillo (Figura 10). Fue

establecida una misma rutina de ocupación para los tres ambientes de acuerdo a los datos recogidos *in situ*, conforme indicado en la Tabla 7.

Figura 10: Ubicación del Aula A101 en la primera planta del pabellón de aulas

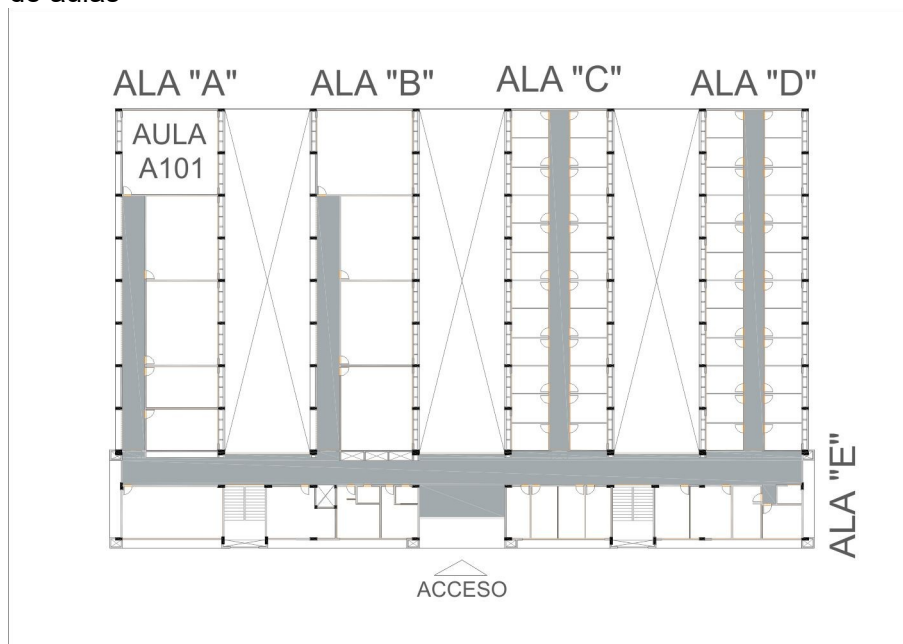


Tabla 7: Características de la rutina de ocupación del aula utilizada para las simulaciones

horario de ocupación		7:00h – 12:00h (mañana) 13:30h – 18:30h (tarde) 19:00h – 22:00h (noche)
densidad de cargas internas	ocupación	67,0 W/m ²
	iluminación	3,6 W/m ²
	aparatos	2,7 W/m ²
sistema de climatización	configuración EnergyPlus	<i>HVAC Autosize; Ideal Loads</i>
	temperatura de consigna	24°C
	COP	3,20 W/W
tasa de infiltración		0,80 renov/h

Fueron realizadas las simulaciones energéticas para analizar el estado actual de cada edificación: anual, mensual, y horaria. Para esa última, fueron elegidas una semana de los meses de mayor y menor demanda de refrigeración. Fue elegido ese criterio por dos motivos: primero, el objetivo de la tesis es evaluar el papel desempeñado por las paredes en el consumo energético; las semanas de verano e invierno definidas en los archivos climáticos de cada ciudad no coinciden con los periodos de mayor y menor consumo energético.

El único periodo que coincide es la semana de menor demanda de refrigeración de Vitória da Conquista (ALT) con la semana de invierno indicada en el archivo climático. Como el mes de julio registra la menor demanda de refrigeración para las tres ciudades, esa misma semana fue utilizada para las simulaciones de los tres sitios. La Tabla 8 indica las fechas para las semanas de mayor y menor demanda de refrigeración.

Tabla 8: Semana elegida para las simulaciones horarias

	mayor demanda de refrigeración	menor demanda de refrigeración
Cruz das Almas (MAR)	12/02 - 19/02	16/07 - 23/07
Vitória da Conquista (ALT)	20/03 - 27/03	16/07 - 23/07
Barreiras (CONT)	15/01 - 22/01	16/07 - 23/07

Para calcular las cargas térmicas por radiación solar (Q_{Tsa}) en cada fachada, se utilizó el dato de radiación solar incidente de las simulaciones energéticas y la siguiente fórmula (SERRA y COCH 1995):

$$Q_{Tsa} = G_v \times S_v \tag{Ec. 02}$$

$$S_v = \frac{(S \times \alpha \times R_e)}{V \times (R_e + R_i)} \tag{Ec. 03}$$

Q_{Tsa} : carga térmica por radiación solar (W/m^3)

G_v : radiación en el plano vertical (W/m^2)

S_v : superficie del plano vertical por volumen habitable (m^2/m^3)

S : área del plano vertical (m^2)

α : coeficiente de absorción del acabado externo del plano vertical

R_e : resistencia superficial exterior ($m^2 \cdot K/W$)

R_i : resistencia superficial interior ($m^2 \cdot K/W$)

V : volumen habitable (m^3)

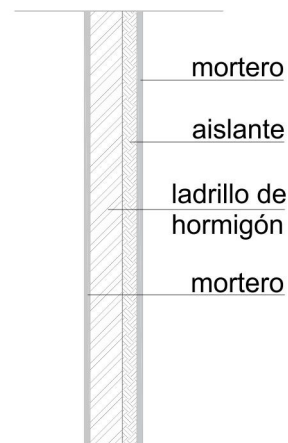
Las variables constructivas de las paredes siguen las especificaciones del proyecto arquitectónico (Tabla 9). Para la definición del coeficiente de absorción de las paredes externas fue consultado también el trabajo académico de (Dornelles 2008).

Tabla 9: Variables constructivas de las paredes existentes

	MAR	ALT	CONT
Promedio del coeficiente de absorción de todas las paredes externas	0,37	0,26	0,22
Coeficiente de transmitancia térmica ($W/m^2 \cdot K$)	2,73		
Capacidad térmica ($kJ/m^2 \cdot K$)	236,00		

Para la configuración de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica (0,70; 1,40; 2,10; 3,50; 4,20 $W/m^2 \cdot K$) y de capacidad térmica (70 y 400 $kJ/m^2 \cdot K$), fue utilizada una sección estándar (Figura 11) con las siguientes capas, desde la superficie interior hasta la exterior: mortero de cemento; bloque hueco de hormigón; aislante de lana mineral; mortero de hormigón.

Figura 11: Sección estándar pared



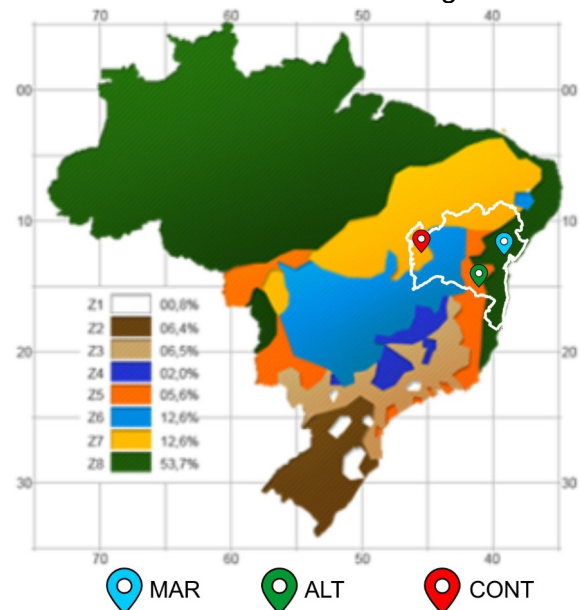
4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PABELLONES DE AULAS

Este capítulo se dedica a analizar los tres objetos de estudio seleccionados para la investigación: las paredes de un aula de cada uno de los pabellones de aulas implantados en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT). Para eso, el capítulo está estructurado en: descripción y comparación de los distintos climas; descripción y comparación de la implantación de los tres pabellones de aulas; análisis comparativo del desempeño térmico de las tres aulas elegidas de cada edificio, en especial la contribución de las paredes en la demanda de refrigeración de cada aula.

4.1 DESCRIPCIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS TRES CLIMAS

A fin de especificar los parámetros constructivos para los edificios según las características climáticas, el territorio brasileño es dividido en ocho zonas climáticas (ABNT 2003). En la Figura 12 se presentan esas ocho zonas, el límite territorial del estado de Bahia y la ubicación de las tres ciudades donde fueron implantados los pabellones de aulas, objetos de esta investigación.

Figura 12: Zonas climáticas de Brasil y ubicación de las ciudades investigadas



Las características climáticas de las ciudades del interior de Bahia – Brasil donde fueron implantados los pabellones son:

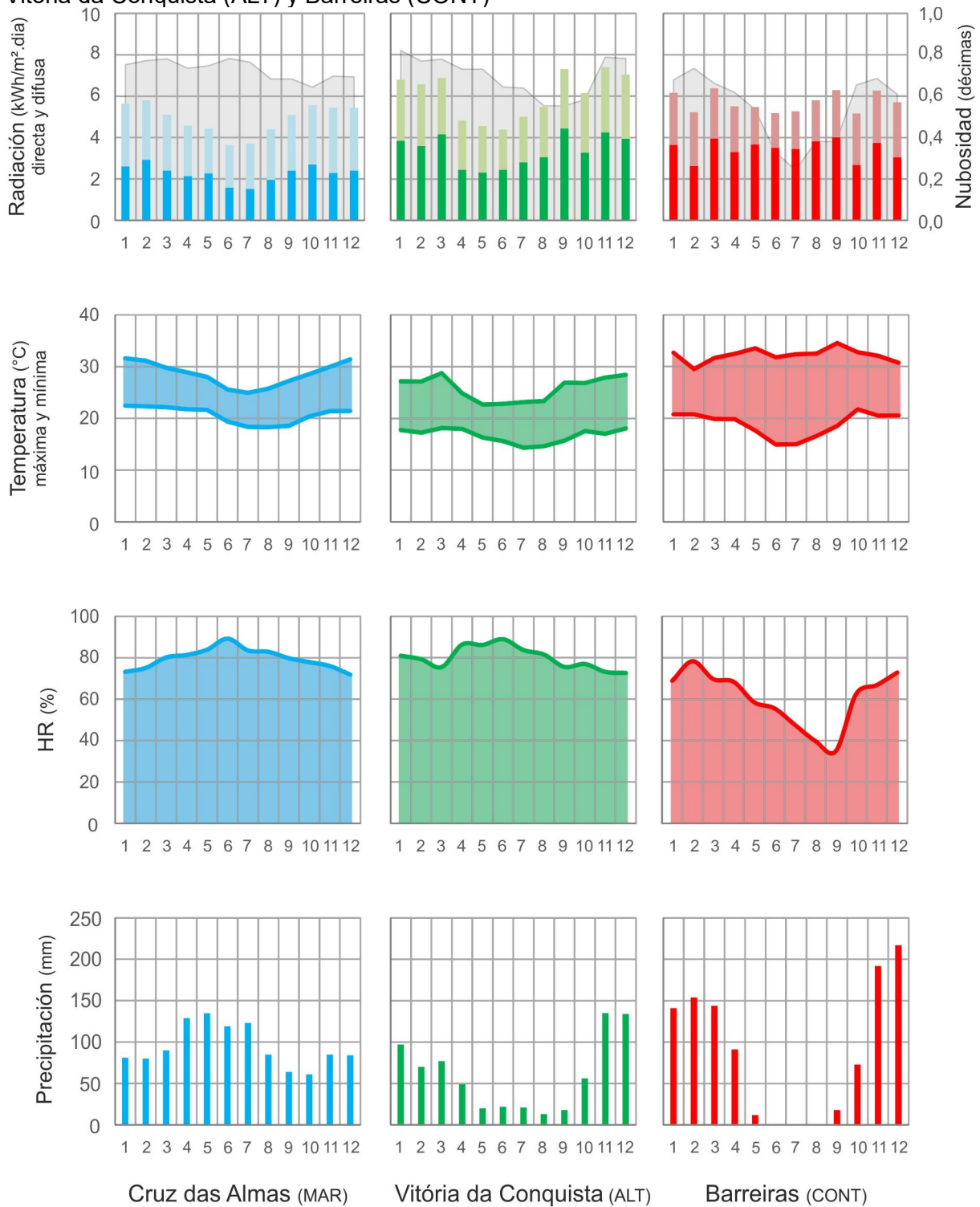
- **Cruz das Almas (MAR):** latitud 12°40'S, es la ciudad más cercana a la costa Atlántica, ubicada a 224 metros sobre el nivel del mar. Está contemplada en la Zona climática 8 (ABNT 2003) y, según la clasificación climática de Köppen-Geiger, su código es Af – clima tropical ecuatorial (SEI 2014). Sus principales características climáticas son: temperatura media anual de 24,0°C; oscilación media anual de 5,1°K, mientras que la oscilación media diaria es de 7,9°K; humedad relativa media anual de 79,6%; pluviosidad anual de 1.136 mm; durante todo el año el clima es cálido-húmedo, con temperaturas más suaves entre los meses de junio y agosto, cuando las máximas se sitúan alrededor de los 25,0°C y las mínimas, 19,0°C (INMET 2016). Debido a su latitud, el Sol pasa por esa localidad a 90° de altura dos veces al año: en 18 de febrero y en 22 de octubre (Beckers y Masset 2003).
- **Vitória da Conquista (ALT):** latitud 14°52'S, está ubicada a 923 metros sobre el nivel del mar. Está contemplada en la Zona climática 5 (ABNT 2003) y, según la clasificación climática de Köppen-Geiger, su código es Cwb – clima de latitudes medias, con invierno seco y temperaturas templadas (SEI 2014). Sus principales características climáticas son: temperatura media anual de 20,7°C; oscilación media anual de 4,7°K, mientras que la oscilación media diaria es de 9,1°K; humedad relativa media anual de 80,1%; pluviosidad anual de 712 mm; dos periodos definidos: uno caluroso, entre septiembre y marzo, y otro frío, entre mayo y agosto (INMET 2016). Debido a su latitud, el Sol alcanza la altura de 90° dos veces al año: en 12 de febrero y en 28 de octubre (Beckers y Masset 2003).
- **Barreiras (CONT):** latitud 12°09'S, está ubicada a 452 metros sobre el nivel del mar. Está contemplada en la Zona climática 7 (ABNT 2003) y, según la clasificación climática de Köppen-Geiger, su código es Aw – clima tropical de

sabana (SEI 2014). Sus principales características climáticas son: temperatura media anual de 25,0°C; oscilación media anual de 3,7°K, mientras que la oscilación media diaria es de 13,3°K; humedad relativa media anual de 60,3%; pluviosidad anual de 1.045 mm; dos periodos definidos: un seco, entre mayo y septiembre, y otro que concentra la temporada de lluvias, entre octubre y abril (INMET 2016). Igual que Cruz das Almas (MAR), el Sol pasa por esa localidad a 90° de altura en 18 de febrero y en 22 de octubre (Beckers y Masset 2003).

Al comparar los tres climas, mediante la visualización conjunta de los datos climáticos para las tres ciudades en la Figura 13, se destacan algunos aspectos. La radiación global en un plano horizontal tiene valores distintos entre las tres ciudades, a pesar de latitudes similares. En Cruz das Almas (MAR), la proximidad al Océano Atlántico y las lluvias constantes durante todo el año influyen de manera significativa en la nubosidad y en las altas humedades. Además, es la ciudad con menor altura con relación al nivel del mar, lo que implica una mayor capa de atmósfera que los rayos solares tienen que atravesar. En conjunto, esos factores impactan en la radiación global que incide en esa ciudad: es el menor valor promedio anual entre las tres ciudades estudiadas (4,9 kWh/m².día), así como es el porcentaje más alto de radiación difusa (54% de la radiación global horizontal).

Vitória da Conquista (ALT), debido a su altitud, posee el mayor valor de radiación global: 6,0 kWh/m².día. Sin embargo, ese factor geográfico también explica las temperaturas medias más suaves, si comparado con las otras dos ciudades. Además, el periodo de lluvias coincide con la estación calurosa y el periodo sin lluvias con las temperaturas más bajas. Esa conjunción de factores explica las altas humedades durante todo el año y la poca variación mensual de la nubosidad. Así, la alta radiación global está aliada a un alto grado de humedad y nubosidad a lo largo del año, que reparte casi que por la mitad la fracción de radiación directa (56%) y de radiación difusa (44%).

Figura 13: Comparación de los datos meteorológicos mensuales de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT)



Cruz das Almas (MAR)

Vitória da Conquista (ALT)

Barreiras (CONT)

Fuente: INMET (2016); Climate Data (2017a); Climate Data (2017b); Climate Data (2017c); Wilson y Jetz (2016)

En Barreiras (CONT), el promedio anual de la radiación global es 5,7 kWh/m²·día. Sin embargo, su reparto entre radiación directa y difusa presenta valores diversos a lo largo del año, debido a la concentración del periodo de lluvias en una época específica del año. Ellas ocurren entre los meses de noviembre y febrero, influyendo directamente en la humedad relativa (78%), en el grado de nubosidad (0,7) y, por consecuencia, en el reparto entre radiación directa y difusa (50% - 50%)⁴. Ese periodo coincide con las mayores alturas solares, cuando el Sol está más próximo de las latitudes al Sur. Entre los meses de mayo y septiembre, la ciudad enfrenta un periodo seco, cuando la humedad relativa y el grado de nubosidad llegan a 35% y 0,2 décimas, respectivamente, y la relación entre radiación directa y difusa alcanza 64% - 36%⁵. En ese periodo, la ausencia de nubes contribuye con el aumento relativo de radiación global que impacta la ciudad, que es el mayor entre las tres ciudades en esos meses, a pesar del Sol estar más lejos de los sitios ubicados en las latitudes al Sur.

4.2 DESCRIPCIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS TRES PABELLONES DE AULAS

Este apartado tiene como objetivo destacar las similitudes y diferencias existentes entre los tres pabellones de aulas, tanto en términos constructivos cuanto en términos de desempeño térmico. Para eso, son abordados los siguientes aspectos: descripción del proyecto estándar utilizado para la construcción de los tres pabellones de aulas; comparación de sus distintas implantaciones en cada ciudad; análisis de las cargas térmicas que impactan en la demanda de refrigeración del aula evaluada, en especial las cargas térmicas de las paredes.

⁴Valores promedios para el mes de febrero (INMET 2016)

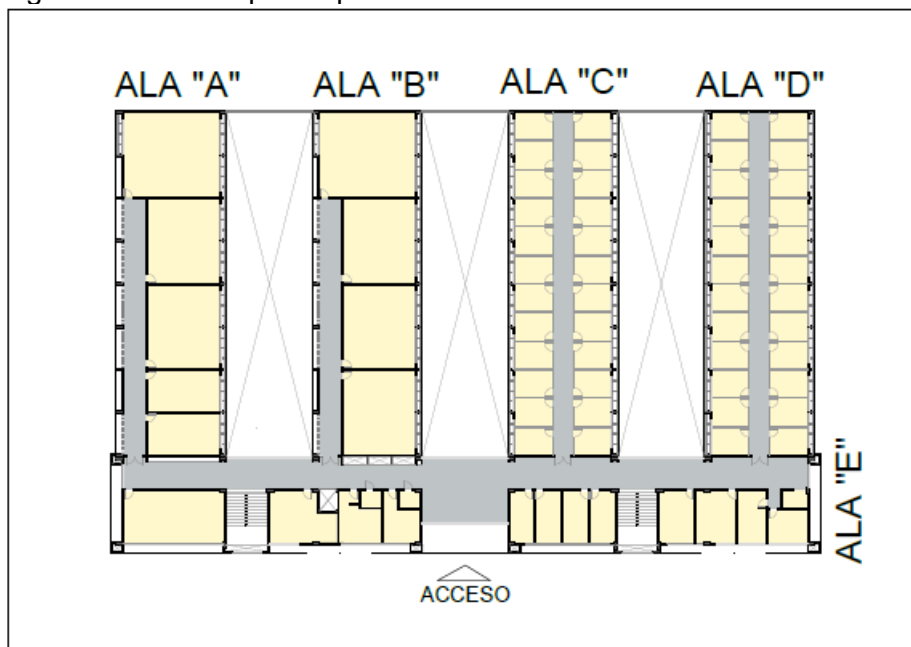
⁵Valores promedios para el mes de septiembre (INMET 2016)

4.2.1 Descripción del proyecto estándar

Debido al proceso de implantación de nuevos *campi* universitarios en diferentes ciudades, todos al mismo tiempo y con un reducido equipo técnico de arquitectos e ingenieros, fue decidido diseñar un proyecto estándar para la construcción de los pabellones de aulas para esos *campi*. Los tres casos estudiados en esta investigación son basados en ese proyecto.

El pabellón de aulas construido en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT) es un edificio de dos plantas, formado por cuatro alas paralelas (A, B, C, D) y conectados por un ala central "E" (Figura 14). En esa ala se concentran el acceso principal, la circulación principal, las oficinas administrativas y otros usos (baños, vestuarios, depósitos etc), mientras que las otras cuatro alas están dedicadas a las aulas y gabinetes de profesores. El área construida de cada pabellón es de 4.284,60 m².

Figura 14: Planta tipo del pabellón de aulas



La forma de ese edificio estándar es caracterizada por su baja compacidad (índice de 0,42, en un rango que varía de 0 – 1⁶) y su bajo índice de asentamiento (0,27, en un rango que varía de 0 – 1⁷), permitiendo mayor exposición de sus superficies externas tanto al paso del aire como a la radiación solar.

Sobre la piel de los tres edificios, sus paredes externas fueron construidas con bloques huecos de hormigón de 0,11m de espesor, revestidas de mortero de cemento en las dos caras ($e=0,02\text{m}$), con espesor total de 0,15m. Así, su coeficiente de transmitancia térmica es $2,73\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y su capacidad térmica, $236\text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$.

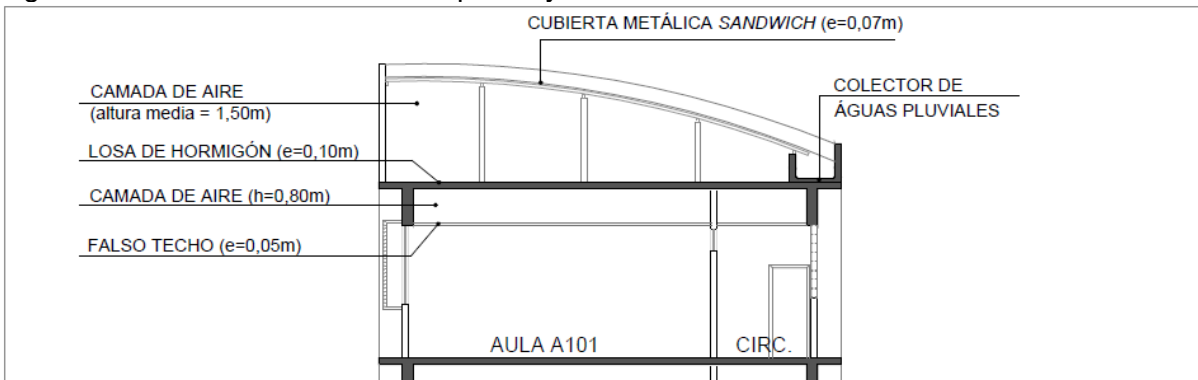
Las ventanas exteriores e interiores son de vidrio simple con marcos de aluminio, sin puente térmico, con transmitancia térmica de $5,70\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. La estructura de los tres edificios - pilares, vigas y losas - es de hormigón armado, cuyos coeficientes de transmitancia térmica son, respectivamente, $1,71\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $3,05\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y $3,73\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. La diferencia entre esos coeficientes se debe a las distintas medidas de cada elemento estructural: pilares, con sección de $0,70\times 0,30\text{m}$; vigas, con sección de $0,25\times 0,85\text{m}$; losas, con espesor de $0,10\text{m}$, sin los acabados.

Se utiliza la cubierta metálica *sandwich* ($U=0,46\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=9\text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), separada del ambiente interior por una camada de aire, una losa de hormigón, otra camada de aire y un falso techo de fibra mineral (Figura 15). Considerando todas esas camadas, esa solución de cubierta se caracteriza por las siguientes propiedades térmicas: $U=0,33\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=230,5\text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$.

⁶ El índice de compacidad toma como referencia la compacidad de una esfera, que es igual a 1,00 y representa la forma más compacta (Serra y Coch 1995).

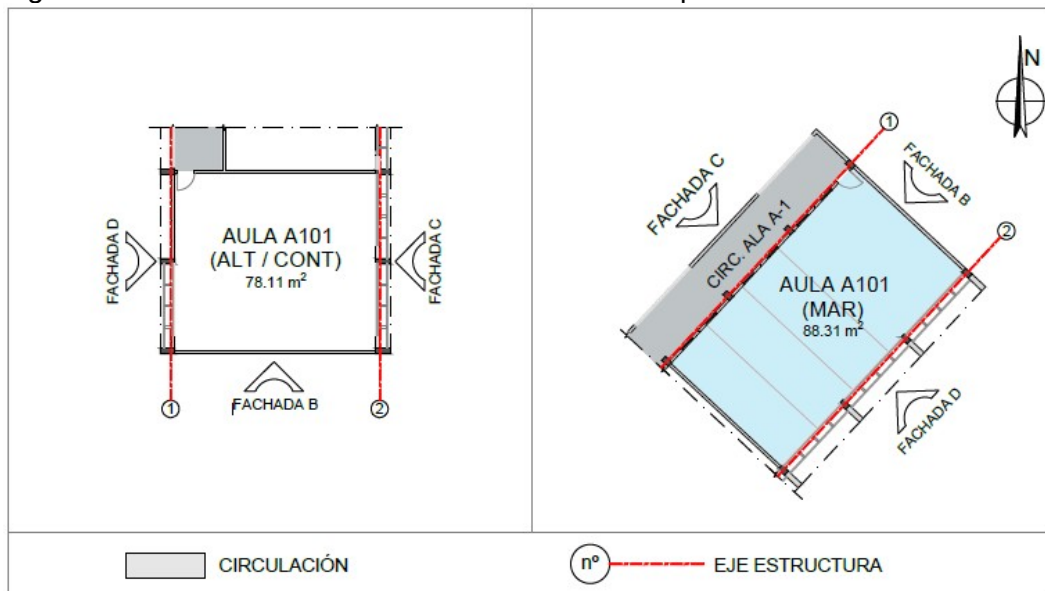
⁷ El índice de asentamiento representa las superficies del edificio en contacto con el terreno con respecto a la superficie global del mismo (Serra y Coch 1995).

Figura 15: Sección transversal - 1ª planta y cubierta del Pabellón de Aulas



A pesar de un mismo proyecto estándar, hay algunas diferencias entre los tres edificios estudiados que merecen destaque. El diseño estructural del pabellón de aulas de Cruz das Almas (MAR) es distinto de los otros dos pabellones. Los ejes estructurales de las alas A, B, C y D de ese edificio coinciden con una pared exterior y con la pared interna que divide las aulas de la circulación, mientras que, en los otros dos edificios, los ejes estructurales coinciden con las dos paredes exteriores (Figura 16).

Figura 16: Distintos módulos estructurales entre los pabellones de aulas



Esa diferencia permite que el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) tenga dos paredes totalmente expuestas a los factores ambientales (Fachadas B y D), y una que está sombreada por las celosías y por la circulación (Fachada C). Esa circulación funciona como espacio secundario para el Aula A101, protegiendo su Fachada C (317°N) de los factores ambientales externos (Figura 17).

Otra diferencia que debe ser resaltada es que todas las aulas del pabellón de aulas de Cruz das Almas (MAR) adoptaron formatos más rectangulares y con filas en diferentes niveles (Figura 18), mientras que las aulas A101 de los pabellones de aulas de Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT) tienen formatos más cuadrados y sin diferencia de niveles.

Figura 17: Fachada C - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)

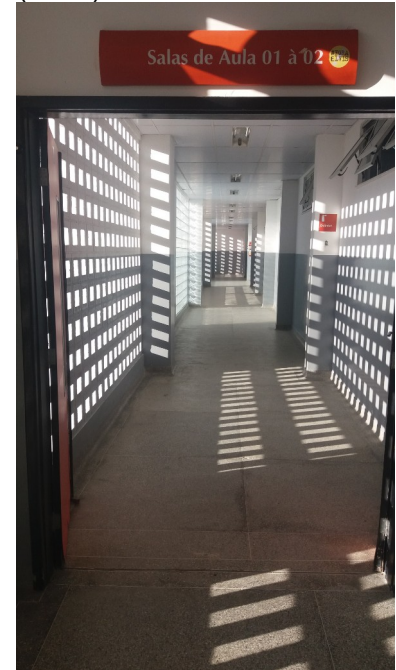
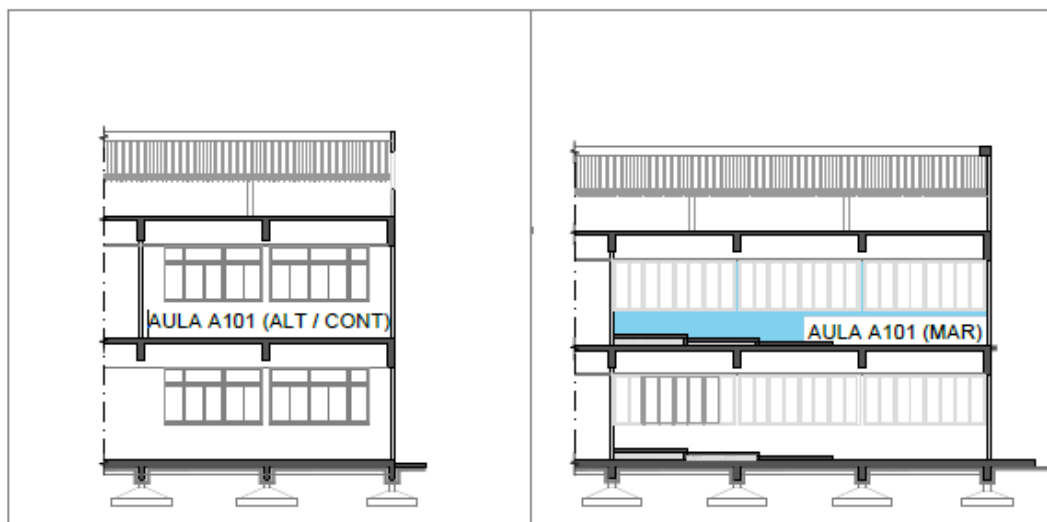


Figura 18: Distintos formatos del Aula A101 entre los pabellones de aulas



Esas diferencias conllevan no solo a distintas áreas y volúmenes entre el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) y las otras dos, pero también distintas proporciones de las paredes de cada aula con relación a su volumen (Tabla 10).

Tabla 10: Proporción de las paredes externas con relación al volumen del Aula A101

Aula A101	MAR	ALT	CONT
Área (m ²)	87,26	78,11	78,11
Volumen (m ³)	266,52	242,14	242,14
Superficie de pared / volumen (m ² /m ³)	0,23	0,26	0,26
% de la Fachada B en el total de superficie de pared / volumen del Aula A101	32,3%	46,8%	46,8%
% de la Fachada C en el total de superficie de pared / volumen del Aula A101	44,7%	31,5%	31,5%
% de la Fachada D en el total de superficie de pared / volumen del Aula A101	22,9%	21,7%	21,7%

Fuente: UFRB (2006); UFOB (2006); UFBA (2006); INMETRO (2013); datos recogidos in situ

Por esos motivos, la proporción entre las todas las paredes exteriores sobre el volumen habitable en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) es un poco menor que en las otras dos aulas, debido a su mayor volumen. Además, la pared con mayor superficie por volumen en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) es la Fachada C (44,7%), mientras que, en las otras dos aulas, la pared con mayor superficie por volumen es la Fachada B (46,8%).

Por fin, vale destacar sutiles diferencias entre los colores utilizados en las paredes de esos tres edificios (Tabla 11; Figura 19). Mismo con distinción entre los colores, los coeficientes de absorción de todas las paredes de las Aulas A101 están por debajo de 0,50, siguiendo la recomendación del código técnico de eficiencia energética brasileño (INMETRO, 2013).

Tabla 11: Coeficientes de absorción de las paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT)

	MAR	ALT	CONT
Fachada B	0,30	0,28	0,28
Fachada C	0,46	0,22	0,22
Fachada D	0,34	0,26	0,22
Promedio de las tres paredes	0,38	0,27	0,26

Fuente: UFRB (2006); UFOB (2006); UFBA (2006); INMETRO (2013); datos recogidos *in situ*

Figura 19: Colores utilizados en las fachadas de los pabellones de aulas de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT)



4.2.2 Comparación de la implantación de los tres Pabellones de Aulas

Los sitios elegidos para la implantación de los tres *campi* universitarios presentan topografías planas, sin pendientes significativas, así como no hay obstáculos naturales a la incidencia de radiación solar en las fachadas y al paso del aire.

En cada campus, los entornos inmediatos de cada pabellón de aulas fueron tratados de manera distinta (Figura 20). En Cruz das Almas (MAR), el suelo está cubierto solo por un césped, sin ningún otro tipo de vegetación. En Vitória da Conquista (ALT), hay una definición clara entre los espacios verdes, con césped y vegetación de pequeño porte, y áreas pavimentadas con bloques de hormigón enclavados. Sin embargo, al fondo de ese Pabellón de Aulas, no hay ningún tipo de pavimentación (Figura 19). En Barreiras (CONT) solo fueron pavimentadas las áreas de circulación alrededor del pabellón de aulas. Todo el resto no fue tratado de manera paisajística, dejando el

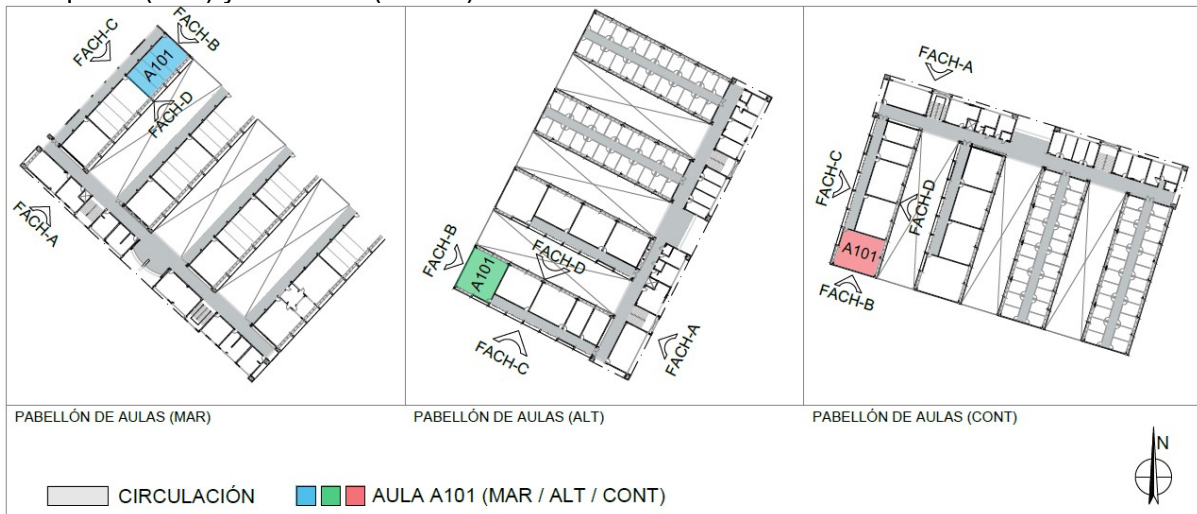
suelo barroso característico de la región sin ningún tipo de cobertura vegetal.

Figura 20: Pabellones de Aulas de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT) y sus entornos inmediatos



Cada pabellón de aulas fue implantado en una orientación distinta (Figura 21). El Aula A101, indicada en cada plano, está en la 1ª planta y en el Ala “A” de cada pabellón.

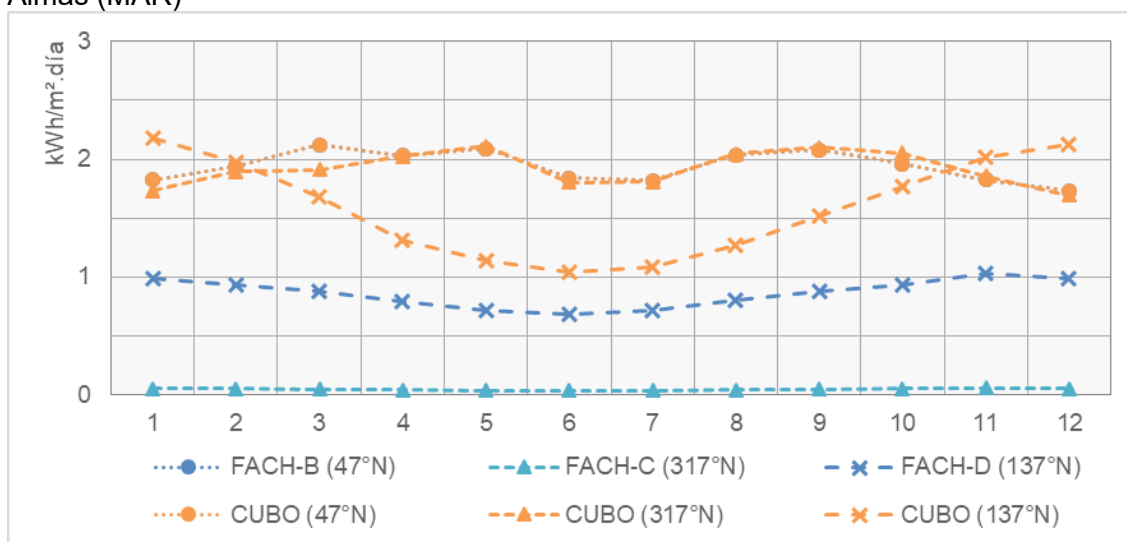
Figura 21: Orientación de los pabellones de aulas en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT)



El promedio anual diario de radiación incidente en cada uno de los planos verticales del Aula A101 (FACH-B; FACH-C; FACH-D) se presenta en las Figuras 22 – 24. Esas gráficas comparan la radiación solar incidente “teórica”, simulada en un cubo, con la radiación solar incidente simulada en los modelos computacionales de cada edificio. Con eso, es posible evaluar tanto la cantidad de energía recibida por cada pared como la efectividad de los elementos de sombreado del edificio.

En el Aula A101 del Pabellón de Aulas de Cruz das Almas (MAR), las paredes que, en teoría, más recibirían radiación solar serían las Fachadas B y C, orientadas a 47°N y 317°N , respectivamente (Figura 22). Sin embargo, la pared del Aula A101 orientada a 317°N (FACH-C) está protegida por la circulación del Ala A y por la pared de celosías que separa el ambiente exterior del pasillo. Por eso, la radiación incidente en esa pared es de $0,05 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{día}$, lo que equivale a 2,4% del promedio anual de radiación solar que incide en esa orientación. Además, eso representa 1,6% de la radiación solar incidente en las tres paredes evaluadas.

Figura 22: Radiación solar incidente en cada fachada del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)



La pared externa del Aula A101 orientada a 47°N (FACH-B) no posee elementos de sombreado y, por eso, recibe toda la radiación solar para esa orientación, cuyo promedio anual es de $1,9 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{día}$ ⁸. Ese valor equivale a 68,1% de la radiación solar incidente en las tres paredes evaluadas, cuyo promedio anual es de $2,9 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{día}$.

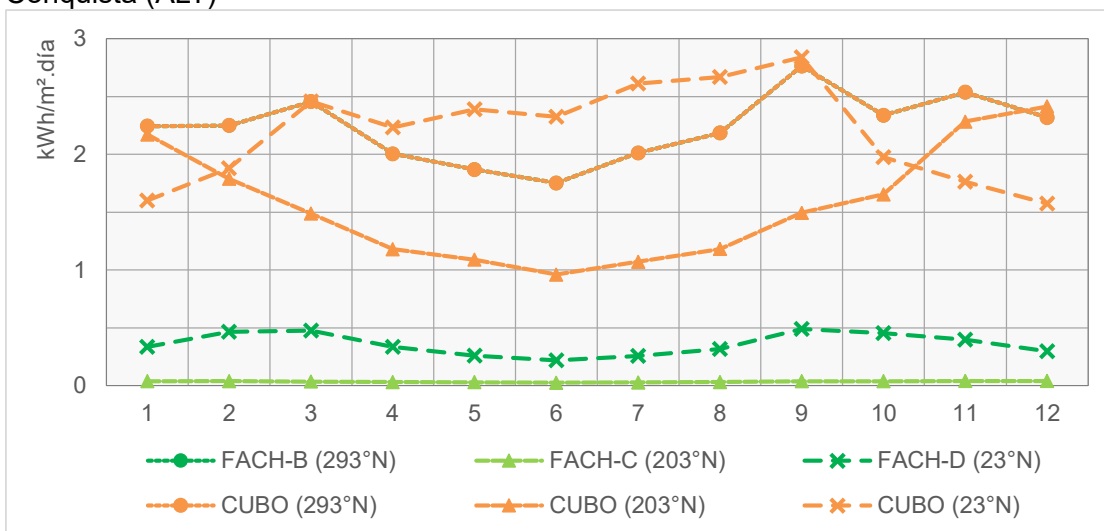
En el caso de la pared orientada a 137°N (FACH-D) del Aula A101 de Cruz das

⁸ Los valores de radiación solar incidente "teórica" y la que realmente incide en esa pared del Aula A101 coinciden entre sí. Por eso, solo se ve una de sus líneas en la gráfica.

Almas (MAR), los elementos de sombreado son las lamas horizontales, instaladas por delante de las ventanas a una distancia de 0,45m, los volúmenes salientes de los pilares y vigas, y el volumen del Ala B del edificio, que reducen la radiación solar para 54% del promedio anual que incide para esa orientación. El promedio anual de radiación solar incidente en esa pared es de 0,9 kWh/m²·día, lo que representa 30,3% de la radiación solar incidente en las tres paredes evaluadas.

En el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), las paredes que, en teoría, más recibirían radiación solar serían las Fachadas B y D, orientadas a 293°N y 23°N, respectivamente (Figura 23). Sin embargo, la pared del Aula A101 orientada a 23°N (FACH-D) está protegida por los elementos de sombreado del propio edificio (lamas horizontales, pilares, vigas y el volumen del Ala B del pabellón de aulas). Por eso, la radiación incidente en esa pared es de 0,4 kWh/m²·día, lo que equivale a 16,3% del promedio anual de radiación solar que incide en esa orientación. Además, eso representa 13,7% de la radiación solar incidente en las tres paredes evaluadas.

Figura 23: Radiación solar incidente en cada fachada del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)



La pared externa del Aula A101 orientada a 293°N (FACH-B) no posee elementos de sombreado. Así, recibe toda la radiación solar para esa orientación, cuyo promedio

anual es de 2,2 kWh/m²·día⁹. Ese valor equivale a 85,0% de la radiación solar incidente en las tres paredes evaluadas, cuyo promedio anual es de 2,6 kWh/m²·día.

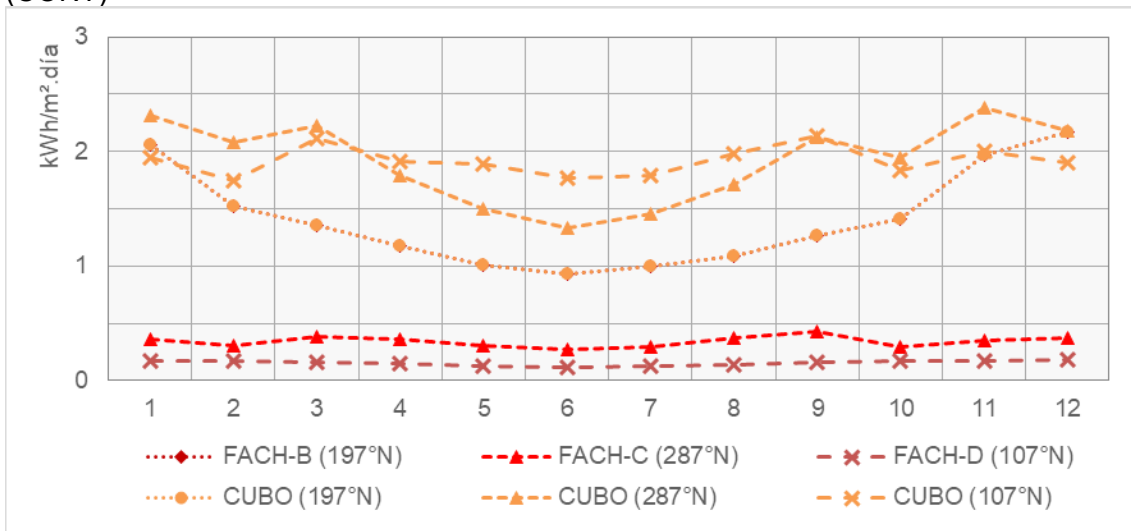
En el caso de la pared del Aula A101 orientada a 203°N (FACH-C) de Vitória da Conquista (ALT), los elementos de sombreado son las lamas horizontales y los volúmenes salientes de los pilares y vigas, que reducen la radiación solar incidente para 0,03 kWh/m²·día, lo que equivale a 2,2% del promedio anual de radiación solar que incide en esa orientación. Además, eso representa 1,3% de la radiación solar incidente en las tres paredes evaluadas.

A pesar de poseer menos elementos de sombreado que la Fachada D (23°N), la orientación de la Fachada C (203°N), en conjunto con sus elementos de sombreado, explican por qué ella es la que recibe menos radiación solar. Ella está orientada hacia el cuadrante Sur, mientras que la otra está hacia el cuadrante Norte. Así, cuando el Sol está más cerca del Hemisferio Norte, la radiación incidente es predominantemente difusa de la bóveda celeste. Cuando el Sol está más cerca del Hemisferio Sur, la altura solar en ese periodo es muy alta (81°, al mediodía) y, por eso, los elementos de sombreado existentes son bastante efectivos para reducir la radiación solar incidente en esa orientación.

En el Aula A101 del Pabellón de Aulas de Barreiras (CONT), las paredes que, en teoría, más recibirían radiación solar serían las Fachadas C y D, orientadas a 287°N y 107°N, respectivamente (Figura 24). Sin embargo, las dos fachadas poseen elementos de sombreado del propio edificio que disminuyen la radiación solar incidente: la pared del Aula A101 orientada a 287°N (FACH-C) está protegida por las lamas horizontales, pilares y vigas, mientras que la pared del Aula A101 orientada a 107°N (FACH-D) está sombreada por esos mismos elementos y el volumen del Ala B del pabellón de aulas.

⁹ Los valores de radiación solar incidente “teórica” y la que realmente incide en esa pared del Aula A101 coinciden entre sí. Por eso, solo se ve una de sus líneas en la gráfica.

Figura 24: Radiación solar incidente en cada fachada del Aula A101 de Barreiras (CONT)



Por eso, la radiación incidente en cada una de esas fachadas es de 0,3 kWh/m²·día y 0,2 kWh/m²·día, respectivamente, lo que representa 17,9% y 8,1% del promedio anual de radiación solar que incide en cada una de esas orientaciones, respectivamente. Esos valores representan 17,9% y 8,1%, respectivamente, de la radiación solar incidente en las tres paredes evaluadas.

En el caso de la pared del Aula A101 orientada a 197°N (FACH-B) de Barreiras (CONT), no hay elementos de sombreado que disminuyan la radiación solar incidente. Así, recibe toda la radiación solar para esa orientación, cuyo promedio anual es de 1,4 kWh/m²·día¹⁰. Ese valor equivale a 74,0% de la radiación solar incidente en las tres paredes evaluadas, cuyo promedio anual es de 1,9 kWh/m²·día.

4.2.3 Cargas térmicas que impactan en la demanda de refrigeración del Aula A101

La evaluación del desempeño térmico de las paredes del Aula A101 de cada pabellón de aulas se basan en los siguientes datos: las demandas mensuales de refrigeración, las cargas térmicas mensuales de las paredes, de los falsos techos, de

¹⁰ Los valores de radiación solar incidente "teórica" y la que realmente incide en esa pared del Aula A101 coinciden entre sí. Por eso, solo se ve una de sus líneas en la gráfica.

los aportes internos y de las ganancias solares directas por las ventanas de cada una de las aulas evaluadas, en conjunto con la variación mensual de la temperatura exterior de cada ciudad (Figuras 25 – 27).

Sobre la demanda de refrigeración, esa primera comparación demuestra que la energía necesaria para mantener las aulas de Cruz das Almas (MAR) y Barreiras (CONT) climatizadas a 24,0°C presentan valores próximos entre sí, con promedios anuales de 182,9 Wh/m³·día y 173,4 Wh/m³·día, respectivamente. Sin embargo, el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) presenta una demanda de refrigeración menor, de 103,2 Wh/m³·día. La principal razón para esa diferencia es la temperatura del aire, que en Vitória da Conquista (ALT) registra valores menores durante todo el año, especialmente durante el invierno¹¹.

Sobre los aportes internos, ellos son los responsables por la mayor carga térmica de las Aulas A101, cuyo promedio entre las tres aulas evaluadas es de 107,3 Wh/m³·día. Sus proporciones con relación a los promedios anuales de demanda de refrigeración de cada espacio es: 60,1% para el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR); 102,0% para el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)¹¹; 61,6% para el Aula A101 de Barreiras (CONT).

Sobre las ganancias solares directas por las ventanas, a pesar de la utilización de lamas horizontales delante de las ventanas exteriores, ellas no fueron diseñadas para cada orientación específica y, por eso, no funcionan al 100%.

¹¹ El Anexo III presenta la influencia de la temperatura exterior de cada ciudad en las condiciones de confort térmico, explicando por qué la demanda de refrigeración en el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) es más baja que en las otras dos ciudades.

Figura 25: Temperatura exterior y cargas térmicas mensuales para: demanda de refrigeración, aportes internos, ganancias solares directas y paredes externas (MAR)

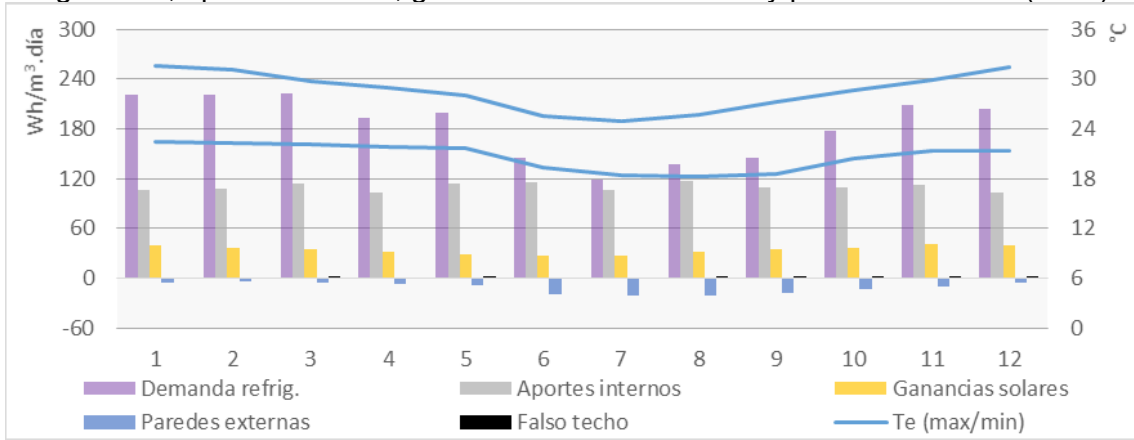


Figura 26: Temperatura exterior y cargas térmicas mensuales para: demanda de refrigeración, aportes internos, ganancias solares directas y paredes externas (ALT)

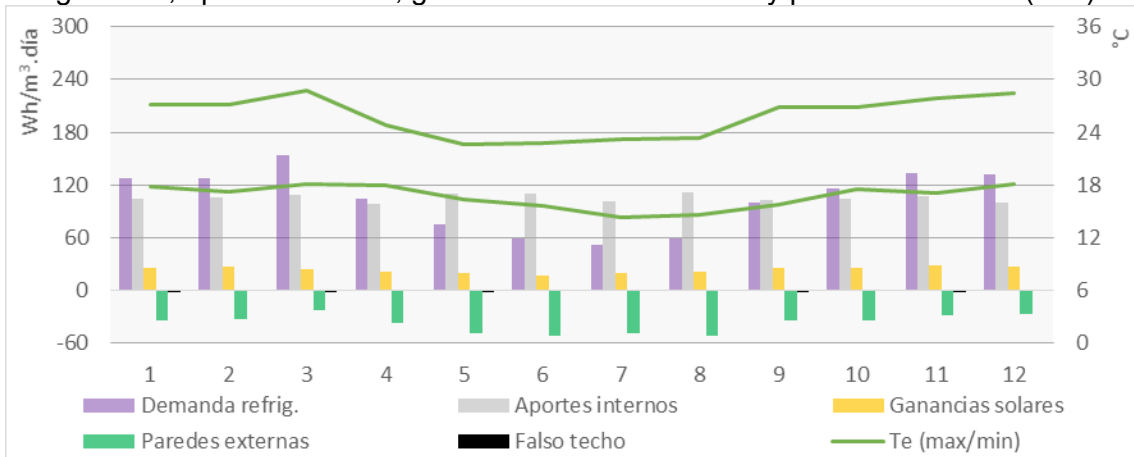
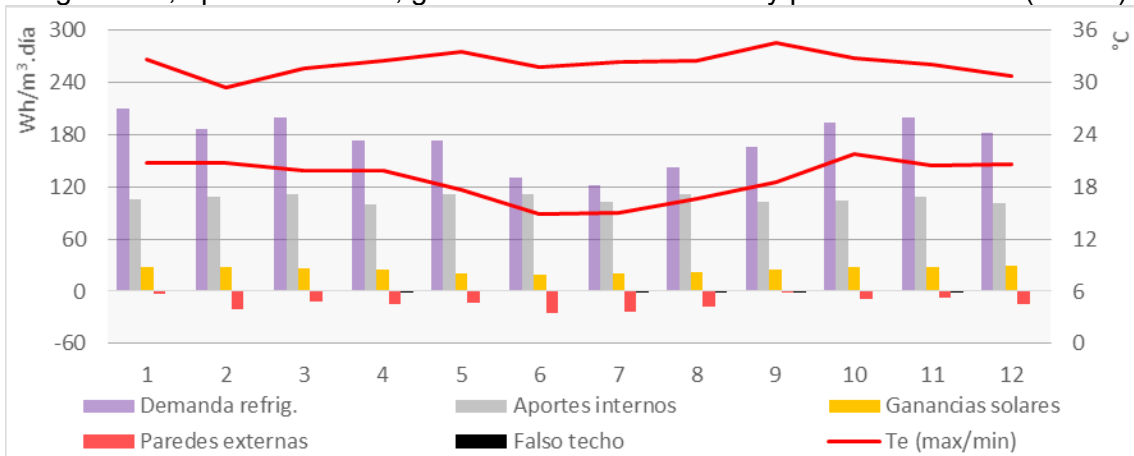


Figura 27: Temperatura exterior y cargas térmicas mensuales para: demanda de refrigeración, aportes internos, ganancias solares directas y paredes externas (CONT)



Acerca de las cargas térmicas transmitidas por el falso techo, las gráficas demuestran que ellas son despreciables en las tres aulas. El principal motivo es la solución diseñada para las cubiertas del proyecto estándar, que ofrece aislamiento térmico suficiente para evitar la transferencia de las cargas térmicas resultantes de la intensa radiación solar en el plano horizontal de los tres edificios. Además, es una solución de bajo mantenimiento a las intensas lluvias tropicales.

Sobre las cargas térmicas transmitidas por las paredes, esa comparación indica que el balance energético mensual es más favorable a las pérdidas térmicas. Una vez más, los promedios anuales de disipación de calor por las paredes de Cruz das Almas (MAR) y Barreiras (CONT) presentan valores similares: 11,4 Wh/m³·día y 13,3 Wh/m³·día, respectivamente. Mientras tanto, Vitória da Conquista (ALT) presenta valores más altos de disipación del calor por las paredes, 37,5 Wh/m³·día.

El promedio anual de la energía térmica disipada por las paredes, si comparadas con las demandas de refrigeración de cada Aula A101, equivalen a 6,2% para el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR); 36,3%, para el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT); y 7,7%, para el Aula A101 de Barreiras (CONT).

Como los análisis mensuales solo presentan disipación del calor por las paredes externas, mismo en periodos con temperaturas exteriores por encima de 30,0°C en algunas ciudades, se evalúa el comportamiento térmico de las paredes en dos días típicos: un día del mes con mayor demanda de refrigeración y un día del mes con menor demanda de refrigeración (Tabla 12).

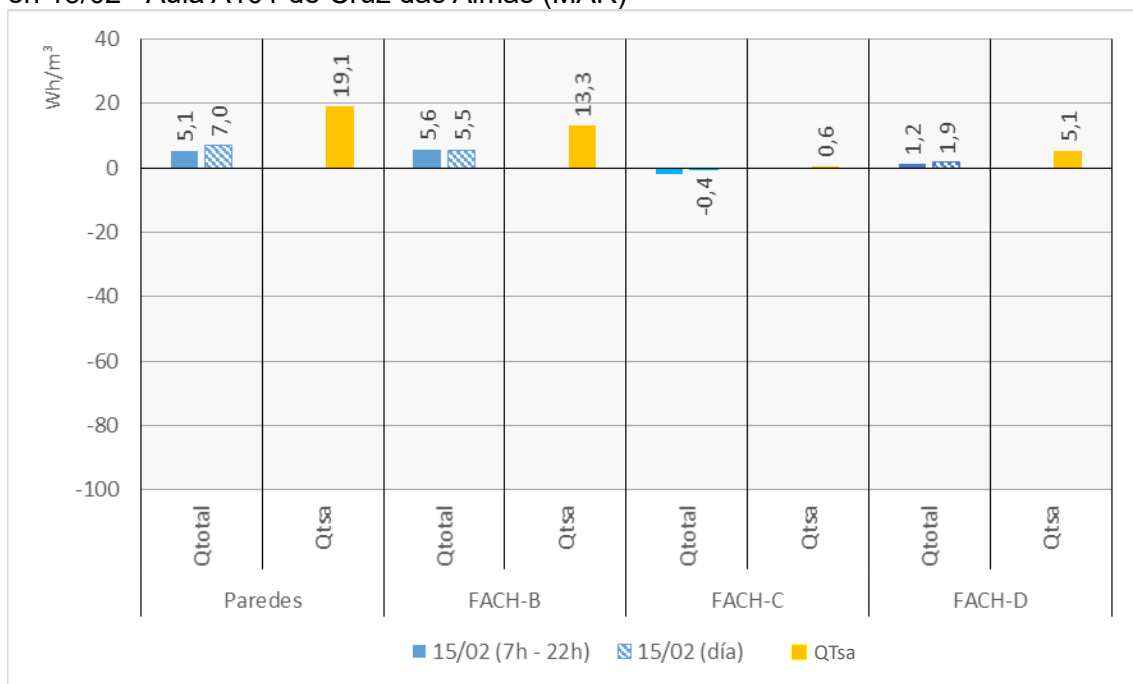
Tabla 12: Días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración del Aula A101

	MAR	ALT	CONT
Día típico con mayor demanda de refrigeración	15/02	23/03	18/01
Día típico con menor demanda de refrigeración	19/07	19/07	19/07

4.2.3.1 Cargas térmicas de las paredes en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)

En el día típico de mayor demanda de refrigeración en Cruz das Almas (MAR) – 15/02 –, el balance energético del conjunto de paredes (Figura 28) indica que 72,9% de las ganancias térmicas ocurren cuando el ambiente está ocupado, entre 7h y 22h.

Figura 28: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 15/02 - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)



En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 7:00h, alcanza su temperatura máxima, 32,9°C, a las 12:00h y solo baja de los 24°C a las 1h del día siguiente. La temperatura mínima registrada en ese día es 22,6°C, a las 6h.

La carga térmica por radiación solar que afecta el conjunto de paredes es mayor que su balance energético diario, indicando que parte de esa energía es disipada hacia el exterior en algún momento del día.

La Fachada B es la más relevante en términos de cargas térmicas en ese día,

representando 79,1% del balance energético diario. Entre 7h y 22h, sus ganancias térmicas son mayores que las ganancias del conjunto de paredes para ese mismo periodo.

Sobre la relevancia de las cargas térmicas de la Fachada B, vale destacar dos aspectos. Primeramente, es la pared con la segunda mayor proporción de superficie por volumen habitable entre las tres paredes evaluadas. En segundo lugar, es la pared más impactada por las cargas térmicas por radiación solar: 69,9% del total que afecta al conjunto de paredes.

La Fachada C es la que presenta balances energéticos negativos, tanto en el periodo ocupado cuanto diario. Por estar protegida por la circulación, su intercambio térmico se da con ese ambiente interior, que resulta en un gradiente térmico menor si comparado con las paredes expuestas al ambiente exterior. Además, las cargas térmicas por radiación solar en esa pared son despreciables.

Por esos motivos, sus balances energéticos presentan magnitudes inferiores a las otras dos paredes, a pesar de su mayor superficie por volumen habitable entre las tres paredes evaluadas. Otra consecuencia es que la Fachada C no sigue la tendencia de mayores ganancias que pérdidas térmicas registradas en las otras dos.

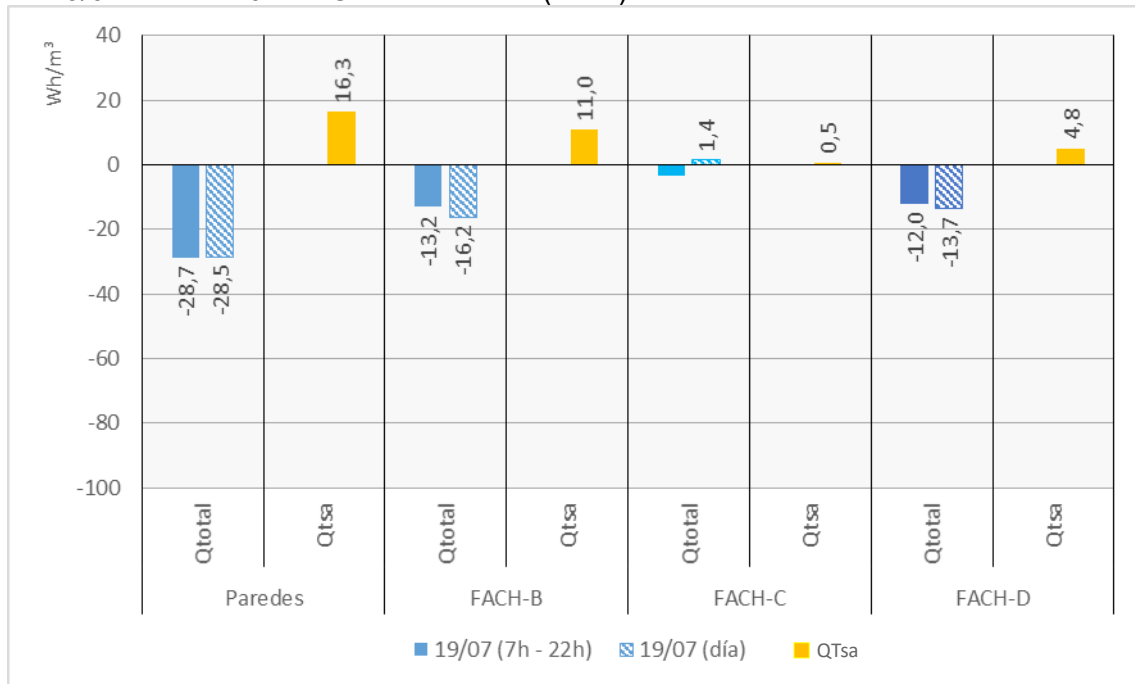
La Fachada D es la pared con menor superficie por volumen habitable entre las tres paredes evaluadas. Su balance energético presenta ganancias térmicas, tanto en el periodo de ocupación del ambiente como durante todo el día, pero con magnitudes menores que los registrados por la Fachada B. Las cargas térmicas de esa pared en cada uno de esos periodos representa 24,2% y 27,1% de las cargas térmicas de todas las paredes, respectivamente. Las cargas térmicas por radiación solar en esa pared equivalen a 27,0% del total que afectan al conjunto de paredes.

La demanda diaria de refrigeración para ese día típico es de 331,8 Wh/m³, siendo

que la contribución de las cargas térmicas de las paredes cuando el aula está ocupada, entre 7h y 22h, equivalen a 1,5% de ese consumo energético.

En el día típico de menor demanda de refrigeración en Cruz das Almas (MAR) – 19/07 –, el balance energético del conjunto de paredes presentan mayores pérdidas que ganancias térmicas (Figura 29). Además, la disipación del calor en el periodo de ocupación del ambiente es un poco superior que el balance energético diario: 28,7 Wh/m³ y 28,5 Wh/m³, respectivamente.

Figura 29: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 19/07 - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)



En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 11h, alcanza su temperatura máxima, 24,2°C, a las 11:20h y a las 12h los termómetros ya registran 22,3°C. La temperatura mínima registrada en ese día es 19,5°C, a las 5h.

La carga térmica por radiación solar que afecta el conjunto de paredes es menor que el balance energético diario.

En ese día típico, las Fachadas B y D disipan casi la misma cantidad de energía cuando el aula está ocupada, lo que equivale a 46,0% y 41,8% de las pérdidas térmicas del conjunto de paredes entre 7h y 22h.

El principal motivo de tasas de disipación de calor similares, a pesar de diferentes proporciones de superficie por volumen habitable, es la carga térmica por radiación solar en la Fachada B: ella representa 67,4% del total que afecta al conjunto de paredes, lo que disminuye significativamente sus pérdidas térmicas.

Al contrario de lo que ocurre con el conjunto de paredes, los balances energéticos diarios en las Fachadas B y D son un poco superiores que el saldo energético registrado entre 7h y 22h, demostrando tasas de disipación relevantes cuando el aula está desocupada.

La Fachada C es la que presenta balance energético diario con ganancias térmicas, a pesar de registrar pérdidas térmicas en el periodo de ocupación del aula. Esas pérdidas térmicas representan 12,2% del total de la energía disipada hacia el exterior por el conjunto de paredes entre 7h y 22h.

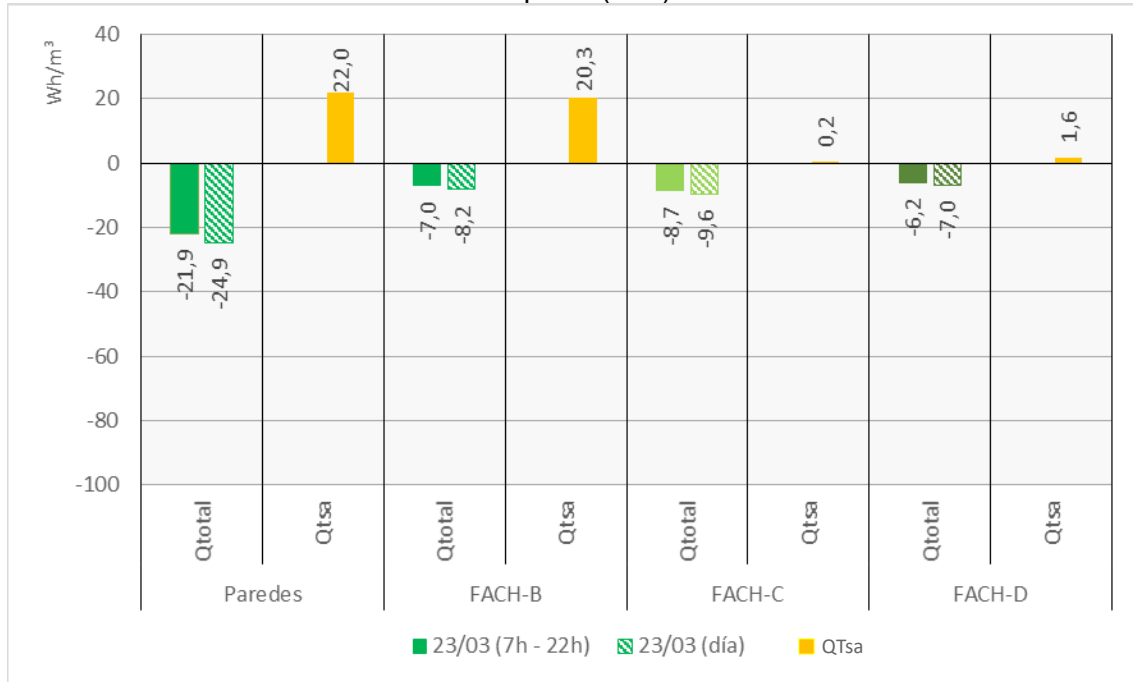
La demanda diaria de refrigeración para ese día típico es de 172,7 Wh/m³, un consumo energético 48% menor que el registrado en el día típico de mayor demanda de refrigeración. Además, las cargas térmicas disipadas por las paredes cuando el aula está ocupada equivalen a 16,6% de ese consumo energético.

4.2.3.2 Cargas térmicas de las paredes en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)

En el día típico de mayor demanda de refrigeración en Vitória da Conquista (ALT) – 23/03 –, el balance energético del conjunto de paredes presenta mayores pérdidas que ganancias térmicas (Figura 30). Mientras el ambiente está ocupado, entre 7h y 22h, ocurre la mayor parte de la disipación del calor por las paredes, 88,3% del total

de las pérdidas térmicas diarias.

Figura 30: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 23/03 - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)



En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 9h, alcanza su temperatura máxima, 28,9°C, a las 15h y solo baja de los 24°C a las 18h. La temperatura mínima registrada en ese día es de 18,4°C, a las 6h.

La carga térmica por radiación solar que afecta el conjunto de paredes representa la totalidad de toda la carga térmica disipada por las paredes cuando el aula está ocupada, lo que indica que parte de esa energía es disipada hacia el exterior en algún momento del día. Además, 92,1% de esa carga térmica se concentra en la Fachada B.

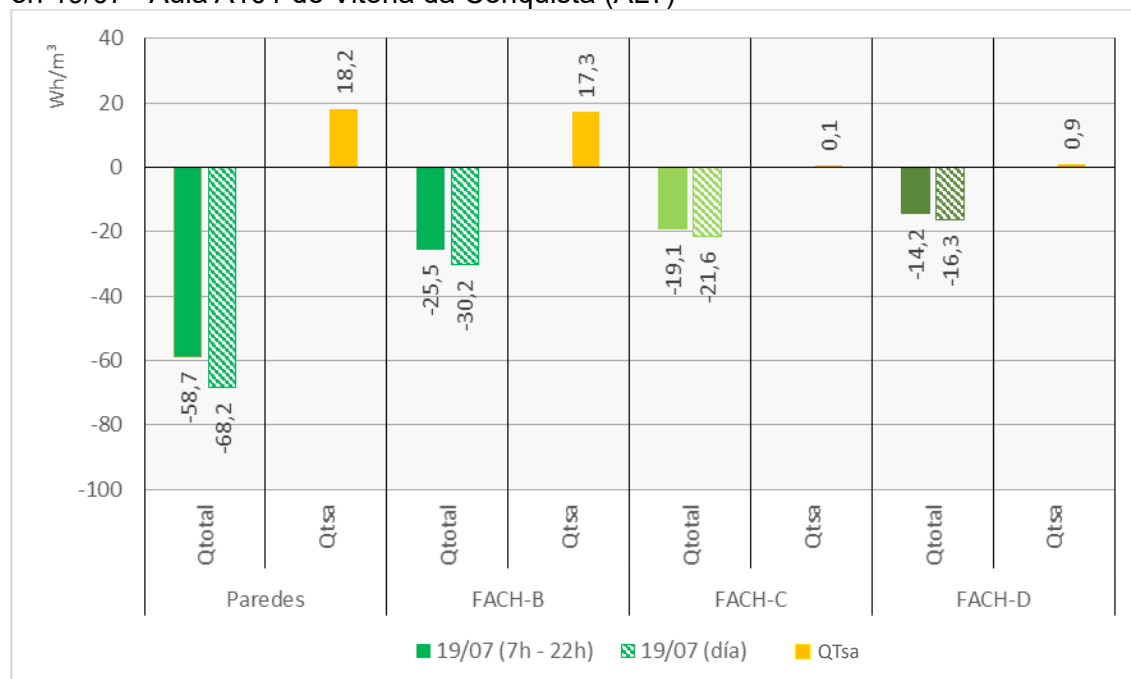
La contribución de esa pared a la disipación del calor equivale a 33,1% del total de pérdidas térmicas por el conjunto de paredes, mientras que las cargas térmicas disipadas por las Fachadas C y D representan, respectivamente, 38,7% y 28,2%.

En términos de proporción de superficie por volumen habitable, la Fachada B es la que presenta la mayor proporción entre las tres paredes evaluadas. Su menor tasa de disipación del calor se debe a la mayor carga térmica por radiación solar que le afecta y que disminuye significativamente sus pérdidas térmicas.

La demanda diaria de refrigeración para ese día típico es de 218,3 Wh/m³, siendo que las cargas térmicas disipadas por las paredes cuando el aula está ocupada equivalen a 10,0% de ese consumo energético.

En el día típico de menor demanda de refrigeración en Vitória da Conquista (ALT) – 19/07 –, el balance energético del conjunto de paredes registra pérdidas térmicas de 58,7 Wh/m³ cuando el aula está ocupada, lo que representa 86,2% del total de las pérdidas térmicas diarias (Figura 31).

Figura 31: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 19/07 - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)



En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 11h, alcanza su temperatura máxima, 25,6°C, a las 13h y a las 15h los termómetros ya registran

23,2°C. La temperatura mínima registrada en ese día es de 10,3°C, a las 6h.

La carga térmica por radiación solar que afecta el conjunto de paredes representa 12,4% de la carga térmica disipada por las paredes a lo largo del día, siendo que 94,7% de esa energía se concentra en la Fachada B.

La contribución de esa pared a la disipación del calor equivale a 44,4% del total de pérdidas térmicas por todas las paredes, mientras que las cargas térmicas disipadas por las Fachadas C y D representan, respectivamente, 31,7% y 23,9%.

La demanda diaria de refrigeración para ese día típico es de 70,8 Wh/m³, un consumo energético 67,6% menor que el registrado en el día típico de mayor demanda de refrigeración. Además, las cargas térmicas disipadas por las paredes cuando el aula está ocupada equivalen a 82,9% de ese consumo energético.

4.2.3.3 Cargas térmicas de las paredes en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración – Aula A101 de Barreiras (CONT)

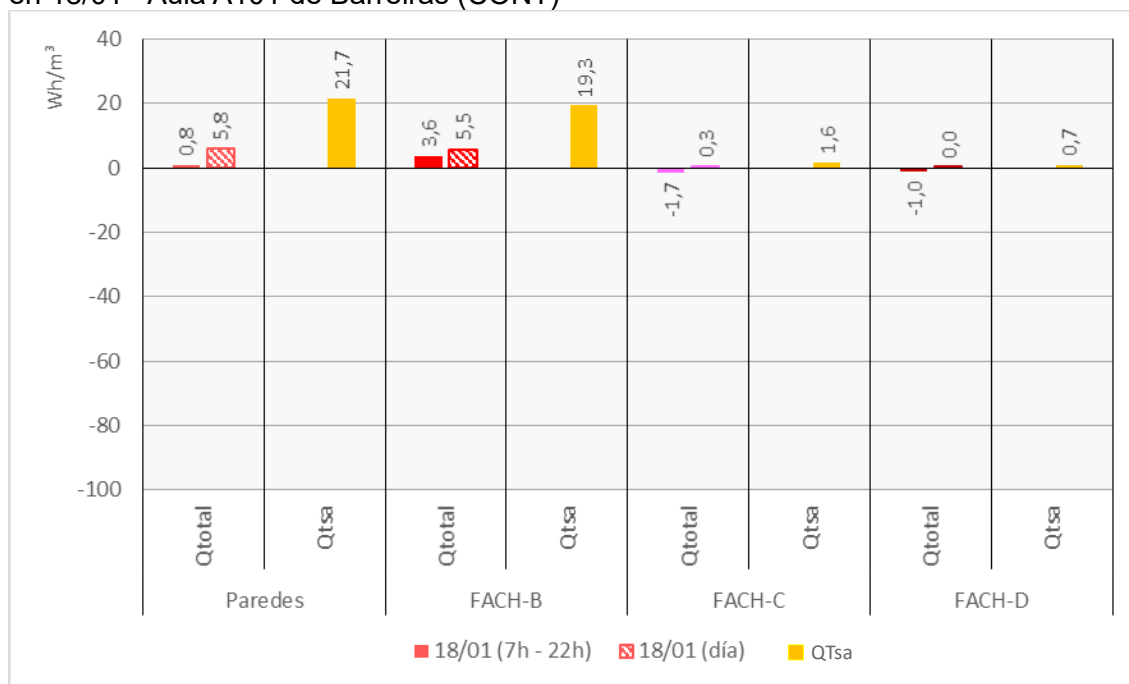
En el día típico de mayor demanda de refrigeración en Barreiras (CONT) – 18/01–, el balance energético diario del conjunto de paredes registra ganancias térmicas de 5,8 Wh/m³. Sin embargo, mientras el ambiente está ocupado, entre 7h y 22h, las ganancias térmicas por las paredes representan solo 14,2% del total diario (Figura 32).

En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 8h, alcanza su temperatura máxima, 32,9°C, a las 15h y solo baja de los 24°C a las 21h. La temperatura mínima registrada en ese día es de 20,2°C, a las 6h.

La carga térmica por radiación solar que afecta el conjunto de paredes sobrepasa en 72,6% el balance energético diario. La Fachada B concentra 89,2% de esas cargas térmicas.

Por un lado, debido a la radiación incidente en la Fachada B, aliado a su mayor superficie por volumen habitable entre las tres paredes evaluadas, su contribución a las ganancias térmicas cuando el ambiente está ocupado representa más que el triple del balance energético del conjunto de paredes para ese mismo periodo.

Figura 32: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 18/01 - Aula A101 de Barreiras (CONT)



Por otro lado, las Fachadas C y D registran cargas térmicas por radiación solar reducidas, así como sus balances energéticos presentan pérdidas térmicas cuando el ambiente está ocupado: 1,7 Wh/m³ y 1,0 Wh/m³, respectivamente. Como la Fachada C posee mayor superficie por volumen que la Fachada D, su tasa de disipación es mayor que el de la otra pared.

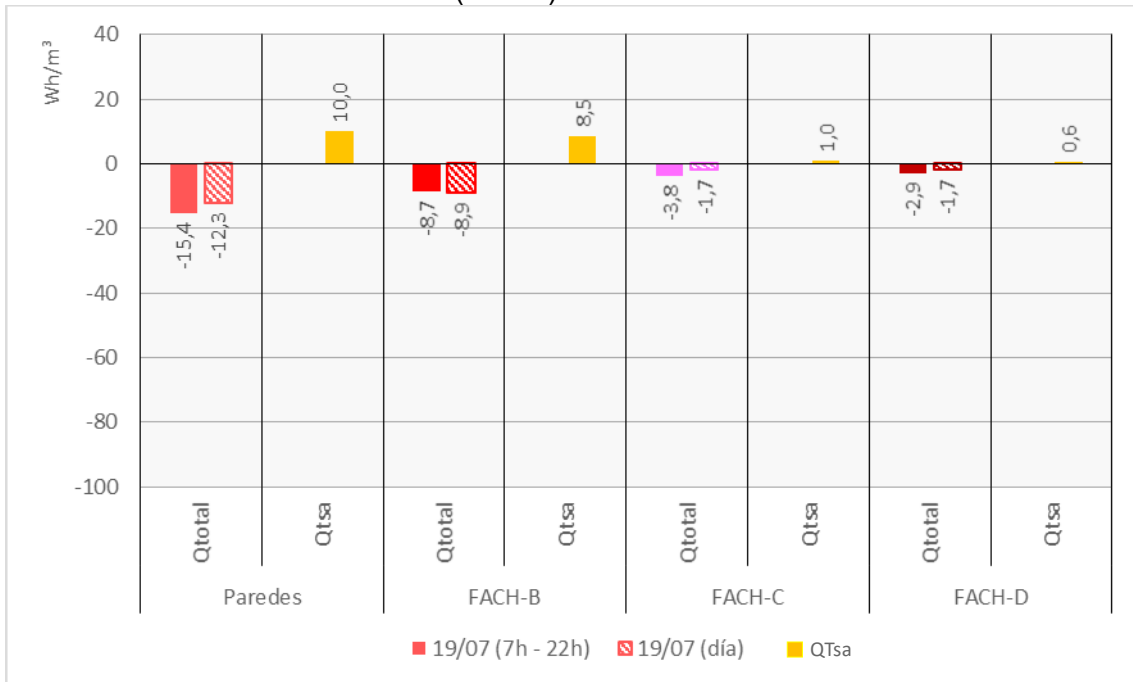
El motivo de las ganancias térmicas diarias por las Fachadas C y D, a pesar de las pérdidas térmicas registradas entre 7h y 22h, es que el flujo de calor por esas paredes no son afectados por la radiación solar incidente, solo por la oscilación diaria de la temperatura. Así, el retraso térmico proporcionado por esas paredes permite la disipación del calor por entre 7h y 16h, suficiente para compensar las

ganancias térmicas que ocurren a partir de 17h y siguen hasta la madrugada del otro día.

La demanda de refrigeración de ese día es de 287,2 Wh/m³, siendo que la contribución de las cargas térmicas del conjunto de paredes cuando el aula está ocupada, entre 7h y 22h, es de 0,3%.

En el día típico de menor demanda de refrigeración en Barreiras (CONT) – 19/07 –, el balance energético del conjunto de paredes indica disipación de las cargas térmicas hacia el exterior, registrando pérdidas térmicas de 15,4 Wh/m³ cuando el aula está ocupada (Figura 33).

Figura 33: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 19/07 - Aula A101 de Barreiras (CONT)



En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 9h, alcanza su temperatura máxima, 34,7°C, a las 15h y los termómetros bajan de los 24°C a las 20h. La temperatura mínima registrada en ese día es de 17,4°C a las 6h.

La carga térmica diaria por radiación solar que afecta al conjunto de paredes es menor que su tasa de disipación del calor a lo largo del día. La Fachada B es impactada por 84,7% de esa energía térmica.

La contribución de esa pared a la disipación del calor equivale a 72,2% del total de pérdidas térmicas por todas las paredes, mientras que las cargas térmicas disipadas por las Fachadas C y D representan, respectivamente, 13,8% y 14,0%.

El principal motivo de la Fachada B presentar mayores tasas de disipación de calor a lo largo del día, si comparado con el periodo de ocupación del aula, es su mayor superficie por volumen habitable, que permite mayores tasas de disipación del calor cuando la temperatura exterior alcanza sus valores mínimos, por la madrugada.

Mientras tanto, en las otras dos paredes, sus menores superficies por volumen habitable no proporcionan tasas de disipación del calor tan altas, al mismo tiempo que registran ganancias térmicas durante toda la noche.

La demanda de refrigeración de ese día es de 214,4 Wh/m³, un consumo energético 25% menor que el registrado en el día típico de mayor demanda de refrigeración. Además, las cargas térmicas disipadas por las paredes cuando el aula está ocupada equivalen a 7,2% de ese consumo energético.

4.3 CONCLUSIONES PRELIMINARES

A partir del análisis comparativo realizado, vale destacar algunos aspectos del proyecto estándar y de sus distintas implantaciones a fin de comprender el comportamiento térmico de las paredes de las Aulas A101.

La forma adoptada para el proyecto estándar del pabellón de aulas permite mayor exposición de sus superficies externas, tanto al paso del aire como a la radiación solar. Sin embargo, la implantación de los tres edificios no adopta un criterio claro sobre la exposición a la radiación solar y al clima de cada sitio.

Tomando como referencia los estudios realizados por (Olgyay, Lyndon y Reynolds 1963) para climas cálidos, las mayores fachadas de las alas A, B, C y D deberían estar expuestas a los cuadrantes Norte y Sur, para evitar la mayor radiación incidente de los cuadrantes Este y Oeste, que ocurren durante todo el año.

Vale destacar que, en términos de ganancias térmicas, la orientación más molesta para los climas cálidos en esa latitud es la Oeste, debido a su magnitud y a su interacción con las temperaturas exteriores más altas, que ocurren por la tarde.

El pabellón de aulas que más se aproxima de esa orientación es el edificio implantado en Vitória da Conquista (ALT), la ciudad que presenta las temperaturas más suaves y las mayores tasas de disipación del calor por las paredes. Las aberturas están concentradas en las fachadas Norte y Sur, todas protegidas por dispositivos de sombreado. Sin embargo, la distancia entre la ventana y las lamas horizontales permite la entrada de los rayos solares, aunque reducida.

La fachada con orientación más cerca al cuadrante Oeste en ese edificio, la Fachada B del Aula A101, no tiene ventanas, evitando las ganancias solares directas. No obstante, esa pared tampoco tiene elementos de sombreado y almacena gran parte de las cargas térmicas por radiación solar que afectan el

conjunto de paredes del Aula A101.

El pabellón de aulas implantado en Cruz das Almas (MAR) está inclinado en 47° con relación al Norte. Así, ninguna de sus fachadas recibe rayos solares perpendiculares a la normal de sus superficies, lo que reparte de forma casi equitativa la radiación incidente en las fachadas orientadas a Noreste (Fachada B) y Noroeste (Fachada C), así como para las fachadas orientadas a Sureste (Fachada D) y Suroeste (Fachada A). En ese aspecto, vale recordar que esa Fachada C del Aula A101 está protegida de los rayos solares del cuadrante Noroeste por la pared externa de celosías y la circulación.

El pabellón de aulas de Barreiras (CONT) está implantado con sus mayores fachadas orientadas a Este y Oeste, al revés de lo que indica (Olgyay, Lyndon y Reynolds 1963). Además, es la ciudad que presenta las mayores temperaturas máximas a lo largo del año y el segundo mayor promedio de radiación global entre los tres casos analizados. Las aberturas están concentradas en las fachadas Este y Oeste, todas protegidas por lamas horizontales. Sin embargo, la distancia entre la ventana y esas lamas permite la entrada de los rayos solares, aunque reducida.

La fachada orientada a Oeste en ese edificio, la Fachada C, tiene la circulación como espacio secundario de protección a la radiación solar incidente, excepto para los ambientes situados al final del pasillo, como es el caso del Aula A101.

Además de las distintas orientaciones y sus impactos en la radiación solar incidente, vale destacar otras estrategias utilizadas en los tres pabellones a fin de disminuir las cargas térmicas por radiación solar. En primer lugar, la elección de bajos coeficientes de absorción para las paredes, en especial para las paredes expuestas a la radiación solar.

En segundo lugar, el papel de las lamas horizontales, distantes de las ventanas en

0,45m, permiten sombrear tanto las ventanas cuanto las paredes. Por fin, la decisión de sacar los elementos estructurales hacia fuera, creando volúmenes que también les hacen sombra.

Por esos motivos, las Fachadas C y D de las Aulas A101 de Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT), así como la Fachada D de Cruz das Almas (MAR), son muy poco afectadas por las cargas térmicas por radiación solar.

Esas paredes también están expuestas al ambiente exterior, permitiendo mayor disipación del calor si comparadas con la Fachada C de Cruz das Almas (MAR), debido a las menores temperaturas exteriores y al movimiento de los vientos, que aumenta las pérdidas por convección.

Sobre las cargas térmicas que impactan en la demanda de refrigeración, los aportes internos son los más relevantes en ese consumo energético, tanto por su magnitud como por su larga jornada, entre 7h y 22h. Debido a los altos valores de esa carga térmica, esta también influye en la tendencia a la disipación del calor por las paredes de las tres aulas, en todos los meses del año.

Sin embargo, es importante contrastar esa tendencia de disipación del calor por las paredes con las características climáticas de cada sitio y con los análisis realizados en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración.

El clima de Cruz das Almas (MAR), debido a su menor amplitud térmica y su temperatura media anual de 24,0°C, igual a la temperatura de consigna adoptada para el sistema de climatización, justifica los menores promedios de las tasas de disipación del calor por las paredes del Aula A101, de 11,4 Wh/m³·día.

No obstante, los balances energéticos diarios revelan, por un lado, ganancias térmicas en el día de mayor demanda de refrigeración, y, por otro lado, pérdidas térmicas en el día de menor demanda de refrigeración.

Así, las paredes de esa aula presentan desempeños térmicos distintos, a depender de la época del año: en los periodos cálidos, la energía térmica transmitida por las paredes aumenta las cargas térmicas del ambiente y, consecuentemente, contribuye al incremento de la demanda de refrigeración; en los periodos caracterizados por temperaturas más suaves, la energía térmica disipada por las paredes disminuye las cargas térmicas del ambiente y, consecuentemente, contribuye a la reducción de la demanda de refrigeración.

Vale destacar que, en el caso del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), el promedio mensual de febrero presenta tasa de disipación del calor de $3,7 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{día}$. La diferencia entre el balance energético diario, que indica ganancias térmicas de $7,0 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{día}$, y ese promedio mensual ocurre por dos motivos: la semana elegida para el día típico es la más calurosa en ese mes; además, el promedio mensual de las cargas térmicas de las paredes contempla todos los días del mes, incluso los fines de semana, cuando el aula está desocupada.

El clima de Vitória da Conquista (ALT), que registra temperatura media anual de $20,7^\circ\text{C}$ y presenta menores temperaturas a lo largo del año, si comparado con las otras dos ciudades, explica los mayores valores de disipación del calor por las paredes del Aula A101 de esa ciudad: $37,5 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{día}$.

Sus balances energéticos diarios revelan pérdidas térmicas en los días de mayor y menor demanda de refrigeración, siendo que las mayores tasas de disipación del calor ocurren en este último. Por ese motivo, las paredes de esa aula siempre presentan desempeños térmicos que contribuyen a la reducción de la demanda de refrigeración del ambiente.

El clima de Barreiras (CONT), a pesar de que sus temperaturas máximas se sitúan siempre por encima de los $30,0^\circ\text{C}$, su mayor amplitud térmica posibilita que sus temperaturas mínimas estén por debajo de los $20,0^\circ\text{C}$ en casi todos los meses del año. Por ese motivo, las paredes del Aula A101 de esa ciudad presentan promedios

anuales de tasas de disipación del calor mayores que los registrados por las paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR): 13,3 Wh/m³·día.

Sin embargo, los balances energéticos diarios revelan, por un lado, ganancias térmicas en el día de mayor demanda de refrigeración, y, por otro lado, pérdidas térmicas en el día de menor demanda de refrigeración.

Por lo tanto, las paredes de esa aula presentan desempeños térmicos distintos, a depender de la época del año: en los periodos en que la temperatura exterior se sitúa por encima de los 24,0°C por más de 12h, la energía térmica transmitida por las paredes aumenta las cargas térmicas del ambiente y, consecuentemente, contribuye al incremento de la demanda de refrigeración; en los periodos en que la temperatura exterior se sitúa por encima de los 24°C por menos de 12h, la energía térmica disipada por las paredes disminuye las cargas térmicas del ambiente y, consecuentemente, contribuye a la reducción de la demanda de refrigeración.

Vale destacar que, en todas las aulas evaluadas, las mayores tasas de flujo de calor, tanto de ganancias cuanto de pérdidas térmicas, ocurre en la pared expuesta con mayor proporción de superficie por volumen, la Fachada B. Esta también es la pared más afectada por la radiación solar incidente, si comparado con las otras paredes, debido a la ausencia de elementos de sombreado. Eso repercute en la disminución de sus tasas de disipación del calor, cuando las condiciones climáticas lo permiten, así como en el incremento de las ganancias térmicas por esas paredes, cuando las temperaturas presentan valores más altos que el promedio anual en cada ciudad.

Basado en ese análisis comparativo, la investigación busca optimizaciones para las paredes del Aula A101 a partir de la interacción de sus variables constructivas - el coeficiente de absorción, el coeficiente de transmitancia térmica y la capacidad térmica – con el clima de cada sitio.

5 OPTIMIZACIÓN DE LAS VARIABLES CONSTRUCTIVAS DE LAS PAREDES

Este capítulo se dedica a analizar los impactos de diferentes cambios en las variables constructivas de las paredes en la demanda de refrigeración del Aula A101 de cada uno de los pabellones de aulas investigados. Las variables constructivas analizadas son: coeficiente de absorción, coeficiente de transmitancia térmica y la capacidad térmica. Por ese motivo, este capítulo está estructurado según cada una de esas variables.

5.1 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Y SU IMPACTO EN LA DEMANDA DE REFRIGERACIÓN

Fue simulada la utilización del color blanco ($\alpha=0,15$) en todas las superficies externas de las paredes del Aula A101 a fin de evaluar el ahorro energético con la climatización de las aulas (Tabla 13).

Tabla 13: Coeficientes de absorción de las paredes y la reducción de la demanda anual de refrigeración

	MAR	ALT	CONT
Coeficiente de absorción de las paredes existentes (α)	0,38	0,27	0,26
Coeficiente de absorción de las paredes blancas ($\alpha=0,15$)	0,15	0,15	0,15
Reducción anual de la demanda de refrigeración	2,1%	4,0%	2,3%

Al comparar la diferencia entre los distintos porcentajes de reducción de la demanda de refrigeración, los datos revelan que el menor impacto en la reducción de la demanda anual de refrigeración ocurre en el aula en Cruz das Almas (MAR), a pesar de que esa aula posee el mayor promedio del coeficiente de absorción de las

paredes existentes.

La principal razón son las características de la Fachada C de esa aula. Ella es la pared con mayor coeficiente de absorción ($\alpha=0,46$), mayor proporción de superficie por volumen habitable entre las tres paredes evaluadas (44,7%), así como se encuentra protegida de la radiación solar por la circulación. Por esos motivos, el cambio de la propiedad radiativa en esa pared no impacta en la reducción de las cargas térmicas transmitidas por la misma.

Sobre las paredes más expuestas a la radiación solar, la Fachada B del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) concentra 67,8% de la incidencia solar entre las tres paredes evaluadas, pero su proporción de superficie por volumen habitable equivale a 32,3% del conjunto de paredes de esa aula.

No obstante, la Fachada B de Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT) son las que tienen la mayor superficie por volumen del conjunto de paredes evaluadas en cada aula, representando cada una 46,8%. Además, esas paredes concentran 92,9% y 85,9%, respectivamente, de las cargas térmicas por radiación solar transmitidas por las mismas hacia el ambiente interior.

Vale destacar que, en el caso de las aulas de Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT), la Fachada B también es la que posee el mayor coeficiente de absorción ($\alpha=0,28$), mientras que en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), su coeficiente de absorción ($\alpha=0,30$) es el más bajo entre las tres paredes evaluadas.

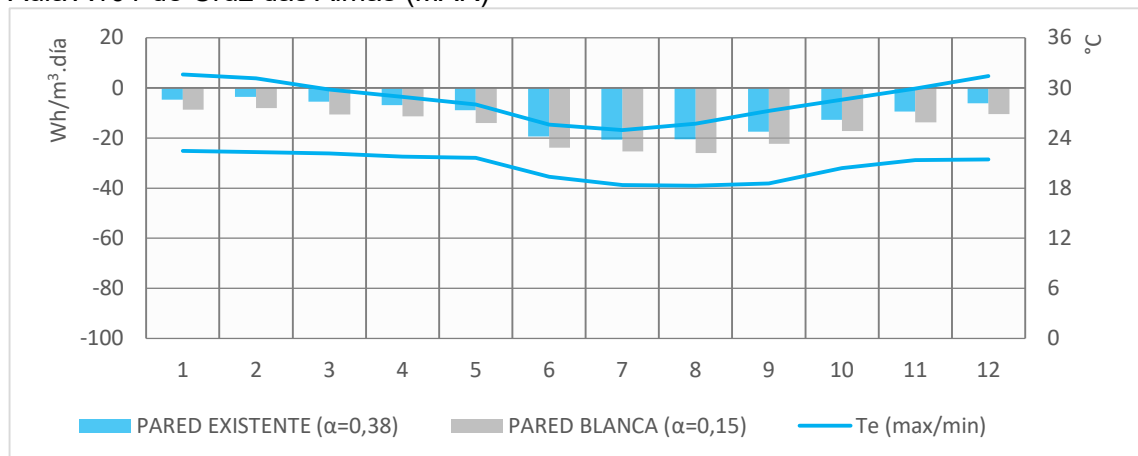
Por esos motivos, la reducción anual de la demanda de refrigeración en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) es la menor entre las tres aulas evaluadas. El mayor ahorro energético en Vitória da Conquista (ALT) se justifica por la mayor proporción de la Fachada B, por los mayores valores de radiación solar incidente en esa ciudad y por la orientación del pabellón de aulas implantado en ese campus, que hace de la Fachada B la pared más impactada por la radiación solar incidente.

A fin de comprender de forma más detallada el comportamiento térmico de cada pared, se evalúa el impacto térmico del cambio del coeficiente de absorción en sus cargas térmicas y en las demandas de refrigeración de cada aula, tanto mensualmente cuanto en los días de mayor y menor demanda de refrigeración.

5.1.1 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente absorción – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)

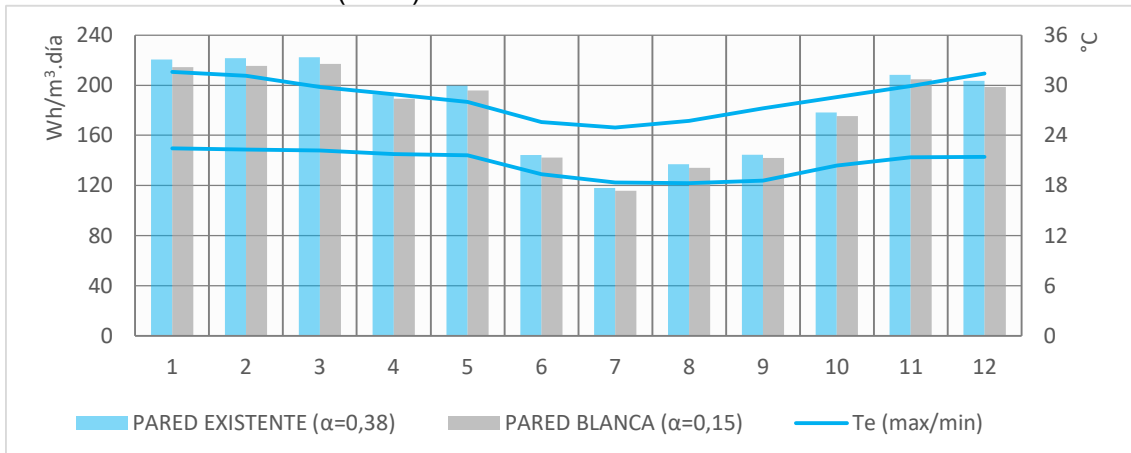
El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) (Figura 34) revela que hay un aumento de la disipación del calor por las paredes en todos los meses del año al adoptar $\alpha=0,15$. El mes que registra el mayor aumento de la disipación del calor es febrero, con 120,8%, mientras que el mes que registra el menor incremento de las pérdidas térmicas es julio, con 22,6%.

Figura 34: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de absorción – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)



Al comparar esos resultados con la demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de absorción (Figura 35), se revela que el mes con mayor ahorro energético en esa aula es febrero, con 2,8%, mientras que el mes que registra la menor reducción del consumo energético con la climatización es junio, con 1,5%. La reducción en el mes de julio es de 1,9%.

Figura 35: Demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de absorción - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)

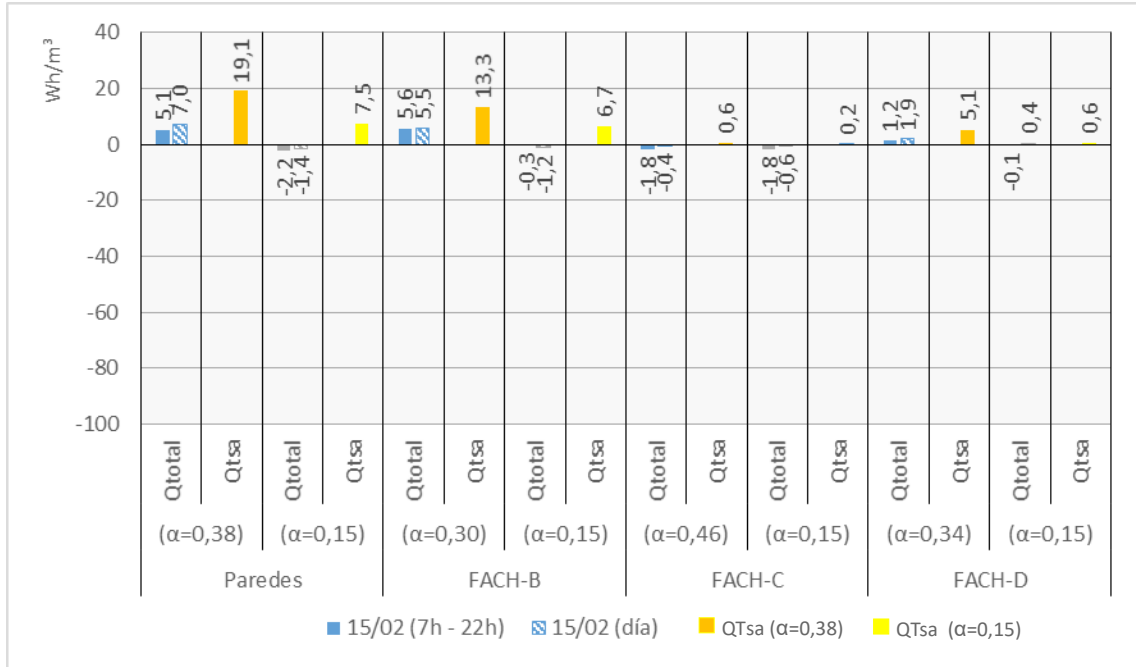


En el día de mayor demanda de refrigeración en Cruz das Almas (MAR) – 15/02 –, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 cambian de transmitir cargas térmicas hacia el ambiente interior para disiparlas hacia el exterior (Figura 36) al adoptar el menor coeficiente de absorción.

En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 7:00h, alcanza su temperatura máxima, 32,9°C, a las 12:00h y solo baja de los 24°C a las 1h del día siguiente. La temperatura mínima registrada en ese día es 22,6°C, a las 6h.

En el periodo de ocupación, el conjunto de paredes existentes registra ganancias de 5,1 Wh/m³. Con el cambio de coeficiente de absorción, pasa a indicar pérdidas de 1,4 Wh/m³.

Figura 36: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02



Vale destacar que el cambio relevante en el comportamiento térmico sucede en la Fachada B, que concentra 69,9% de la carga térmica por radiación solar en ese día. Su balance energético en el periodo de ocupación, que supera las ganancias térmicas del conjunto de paredes cuando $\alpha=0,30$, pasa a registrar pérdidas térmicas hacia el ambiente exterior de $0,3 \text{ Wh/m}^3$ cuando $\alpha=0,15$, lo que representa 13,6% de las pérdidas térmicas del conjunto de paredes.

En la Fachada C, no hubo cambios significativos en su comportamiento térmico. Con el coeficiente de absorción de las paredes existentes, esa pared es la única a presentar pérdidas térmicas entre las tres paredes evaluadas. Al adoptar $\alpha=0,15$, sus pérdidas térmicas en el periodo de ocupación pasan a representar 81,8% del conjunto de paredes.

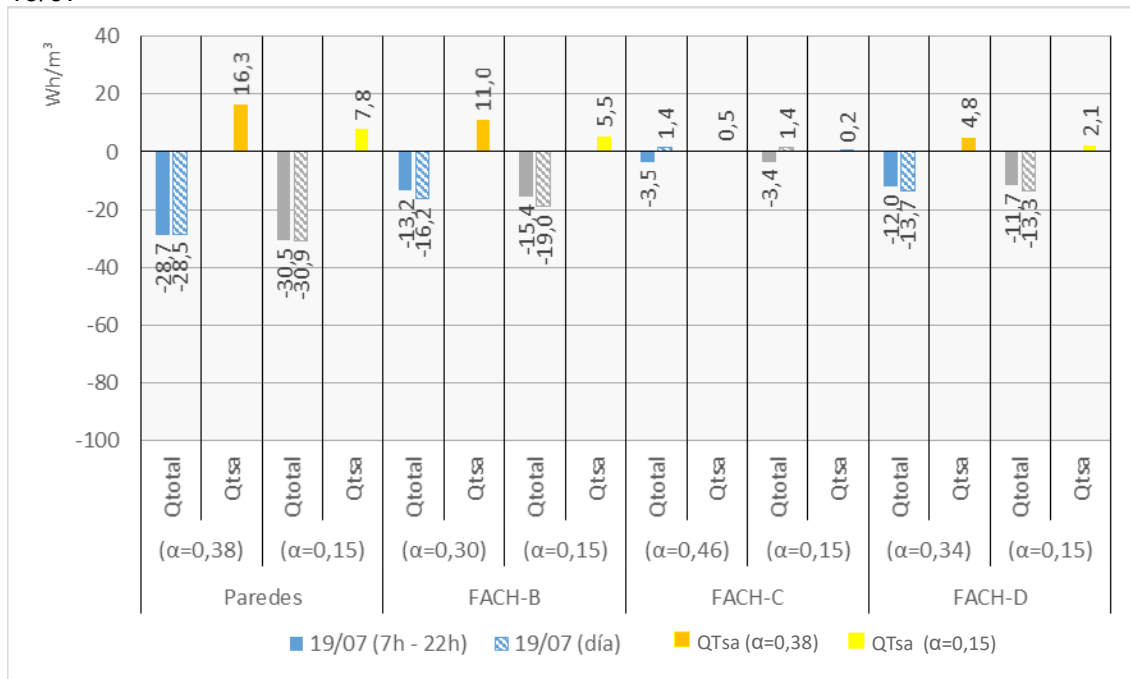
Sin embargo, la Fachada D presenta cambios en el balance energético cuando el aula está ocupada, de ganancias para pérdidas térmicas (de $1,2 \text{ Wh/m}^3$ a $0,1$

Wh/m³), lo que representa 4,5% de las pérdidas térmicas del conjunto de paredes.

En ese día típico, el ahorro energético con la climatización al cambiar el coeficiente de absorción para $\alpha=0,15$ es de 4,2%, índice mayor que la reducción anual de la demanda de refrigeración.

En el día de menor demanda de refrigeración en Cruz das Almas (MAR) – 19/07 –, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 aumentan la disipación del calor hacia el exterior al adoptar el menor coeficiente de absorción (Figura 37). En el periodo de ocupación, el conjunto de paredes existentes registra un incremento de las pérdidas térmicas de 6,3%.

Figura 37: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07



En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 11h, alcanza su temperatura máxima, 24,2°C, a las 11:20h y a las 12h los termómetros ya registran 22,3°C. La temperatura mínima registrada en ese día es 19,5°C, a las 5h.

Ese mismo comportamiento térmico del conjunto de paredes ocurre en la Fachada B, cuyas pérdidas térmicas aumentan en 16,7% cuando el aula está ocupada. Además, pasa a representar 49,5% de las pérdidas térmicas del conjunto de paredes cuando $\alpha=0,15$, mientras que representa 46,0% con el coeficiente de absorción de la pared existente. Vale recordar que la carga térmica por radiación solar en la Fachada B es 67,4% del total que afecta al conjunto de paredes

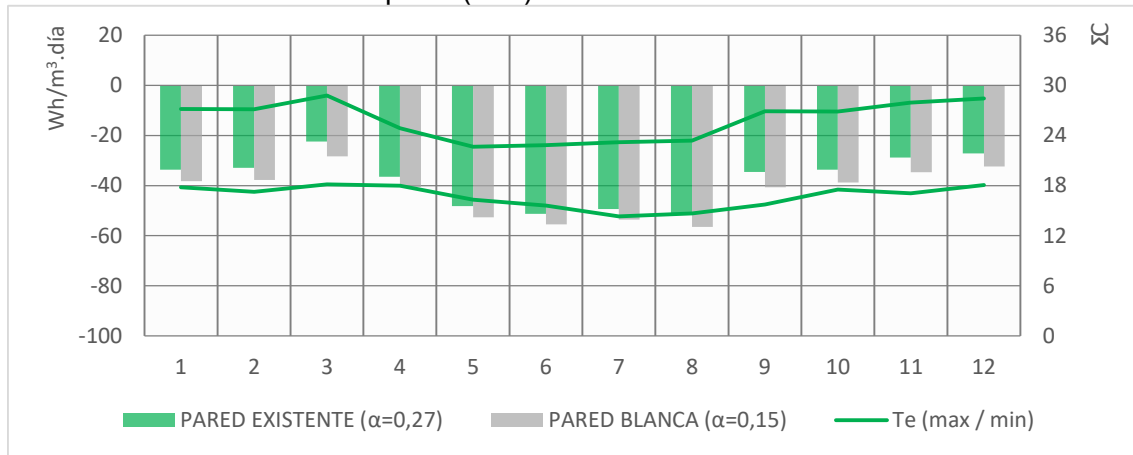
Sin embargo, las Fachadas C y D no presentan diferencias significativas en sus balances energéticos al cambiar el coeficiente de absorción para $\alpha=0,15$. Con el coeficiente de absorción de las paredes existentes, sus pérdidas térmicas entre 7h y 22h representan 12,2% y 41,8%, respectivamente, del total disipado por el conjunto de paredes. Al adoptar $\alpha=0,15$, sus tasas de disipación del calor cuando el aula está ocupada pasan a representar 11,1% y 38,4%, respectivamente.

En ese día típico, el ahorro energético con la climatización al cambiar el coeficiente de absorción para $\alpha=0,15$ es de 1,4%, índice menor que la reducción anual de la demanda de refrigeración.

5.1.2 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente absorción – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)

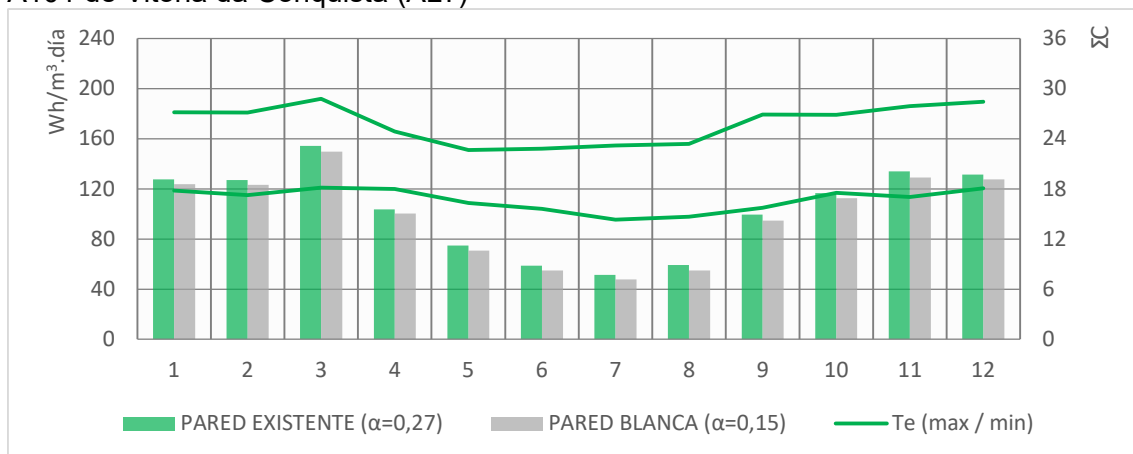
El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) revela que hay un aumento de la disipación del calor por las paredes en todos los meses del año al adoptar $\alpha=0,15$ (Figura 38). El mes que registra el mayor aumento de la disipación del calor es marzo, con 26,5%, mientras que el mes que registra el menor incremento de las pérdidas térmicas es junio, con 8,1%.

Figura 38: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de absorción – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)



Al comparar esos resultados con la demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de absorción (Figura 39), se revela que los meses con mayor ahorro energético en esa aula son julio y agosto, con 6,9% y 7,1%, respectivamente. Mientras tanto, los meses que registran la menor reducción del consumo energético con la climatización son diciembre y enero, con 2,9%. La reducción en el mes de marzo de 3,1%.

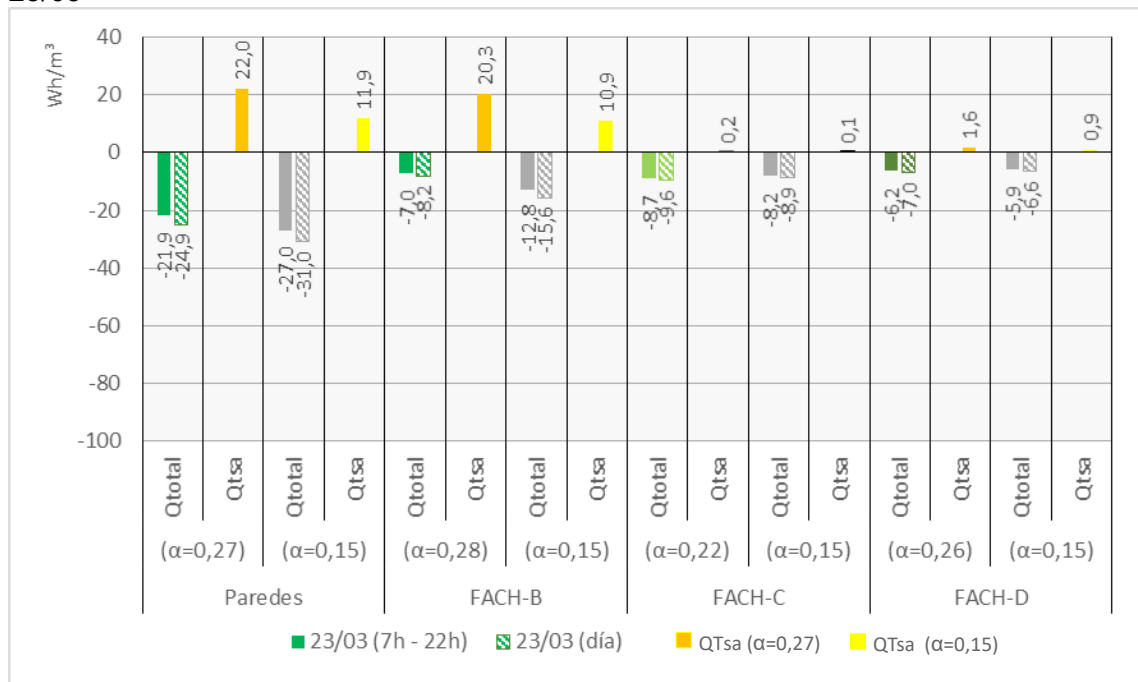
Figura 39: Demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de absorción - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)



En el día de mayor demanda de refrigeración en Vitória da Conquista (ALT) – 23/03 –, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 aumentan la

disipación del calor hacia el exterior al adoptar el menor coeficiente de absorción (Figura 40). En el periodo de ocupación, el conjunto de paredes existentes registra un incremento de 23,3% de las pérdidas térmicas.

Figura 40: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03



En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 9h, alcanza su temperatura máxima, 28,9°C, a las 15h y solo baja de los 24°C a las 18h. La temperatura mínima registrada en ese día es de 18,4°C, a las 6h.

Vale destacar que el cambio relevante en el comportamiento térmico sucede en la Fachada B, que concentra 92,1% de la carga térmica por radiación solar en ese día. Su balance energético en el periodo de ocupación aumenta las pérdidas térmicas en 82,9% al adoptar α=0,15, lo que representa 47,4% de las pérdidas térmicas del conjunto de paredes.

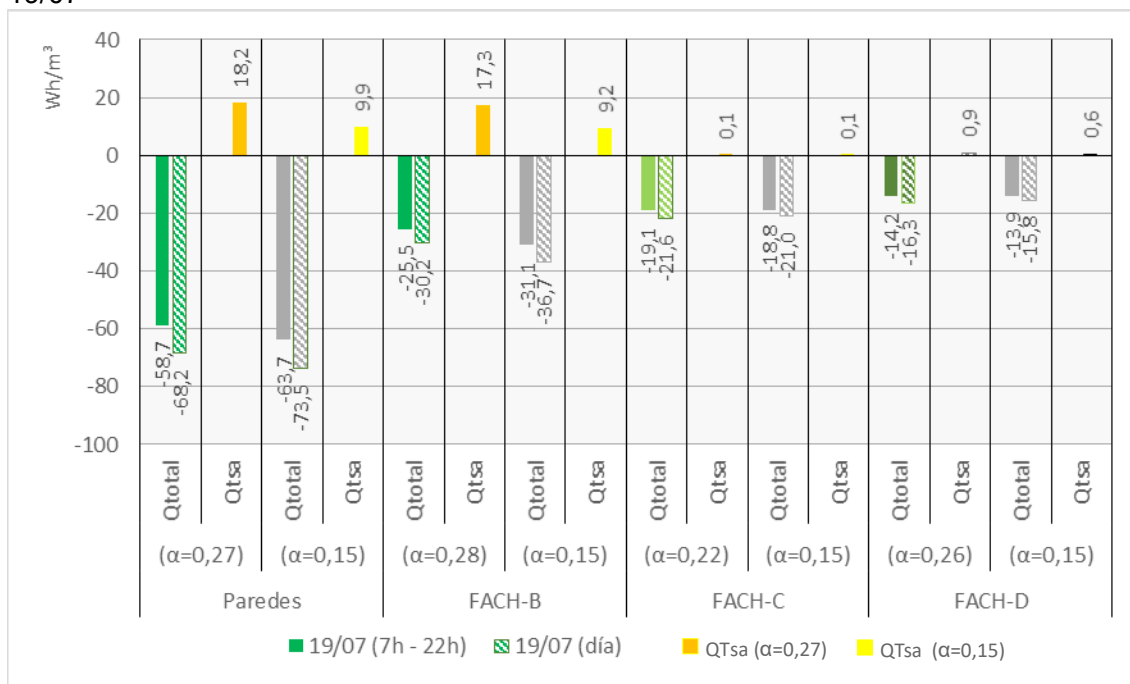
Tanto en la Fachada C cuanto en la Fachada D, hubo una ligera disminución de las

pérdidas térmicas. Con el coeficiente de absorción de las paredes existentes, sus pérdidas térmicas entre 7h y 22h representan 37,4% y 28,3%, respectivamente, del total disipado por el conjunto de paredes. Al adoptar $\alpha=0,15$, sus tasas de disipación del calor cuando el aula está ocupada pasan a representar 30,4% y 21,9%, respectivamente.

En ese día típico, el ahorro energético con la climatización al cambiar el coeficiente de absorción para $\alpha=0,15$ es de 2,9%, índice menor que la reducción anual de la demanda de refrigeración.

En el día de menor demanda de refrigeración en Vitória da Conquista (ALT) – 19/07 –, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 aumentan la disipación del calor hacia el exterior al adoptar el menor coeficiente de absorción (Figura 41). En el periodo de ocupación, el conjunto de paredes existentes registra un incremento de las pérdidas térmicas de 8,5%.

Figura 41: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07



En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 11h, alcanza su temperatura máxima, 25,6°C, a las 13h y a las 15h los termómetros ya registran 23,2°C. La temperatura mínima registrada en ese día es de 10,3°C, a las 6h.

Así como en el día de mayor demanda de refrigeración, el cambio relevante en el comportamiento térmico sucede en la Fachada B, que concentra 94,7% de la carga térmica por radiación solar en ese día. Su balance energético en el periodo de ocupación aumenta sus pérdidas térmicas hacia el ambiente exterior en 22,0%. Con el coeficiente de absorción de la pared existente, las pérdidas térmicas por la Fachada B son 43,4% y, con el cambio del coeficiente de absorción, pasa a representar 48,8% de las pérdidas térmicas del conjunto de paredes.

Tanto en la Fachada C cuanto en la Fachada D, hubo una ligera disminución de las pérdidas térmicas. Con el coeficiente de absorción de las paredes existentes, sus pérdidas térmicas entre 7h y 22h representan 32,5% y 24,2%, respectivamente, del total disipado por el conjunto de paredes. Al adoptar $\alpha=0,15$, sus tasas de disipación del calor cuando el aula está ocupada pasan a representar 29,5% y 21,8%, respectivamente.

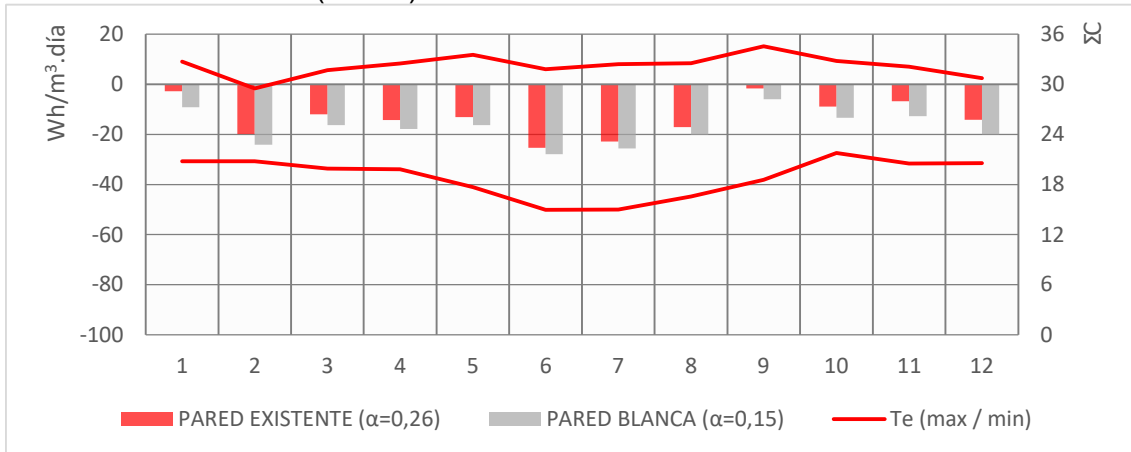
En ese día típico, el ahorro energético con la climatización al cambiar el coeficiente de absorción para $\alpha=0,15$ es de 9,1%, índice mayor que la reducción anual de la demanda de refrigeración.

5.1.3 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente absorción – Aula A101 de Barreiras (CONT)

El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes del Aula A101 de Barreiras (CONT) revela que hay un aumento de la disipación del calor por las paredes en todos los meses del año al adoptar $\alpha=0,15$ (Figura 42). Los meses que registran los mayores aumentos de las pérdidas térmicas son enero y septiembre, con 222,5% y 245,5%, respectivamente. Mientras tanto, el que registra el menor

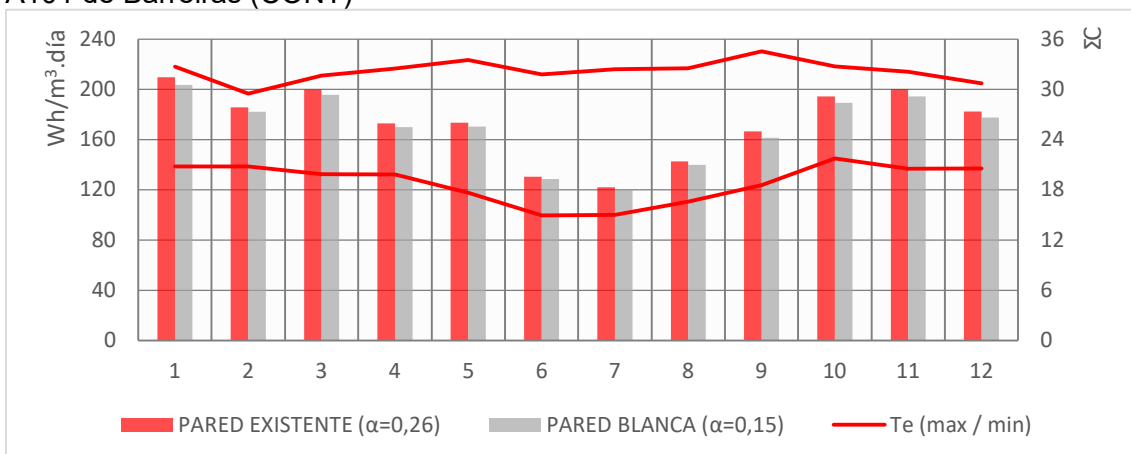
incremento de las pérdidas térmicas es junio, con 9,6%.

Figura 42: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de absorción – Aula A101 de Barreiras (CONT)



Al comparar esos resultados con la demanda mensual de refrigeración para las paredes según el coeficiente de absorción (Figura 43), se revela que los meses con mayores ahorros energéticos en esa aula son enero y septiembre, con 3,0%. Mientras tanto, el mes que registra la menor reducción del consumo energético con la climatización es junio, con 1,4%.

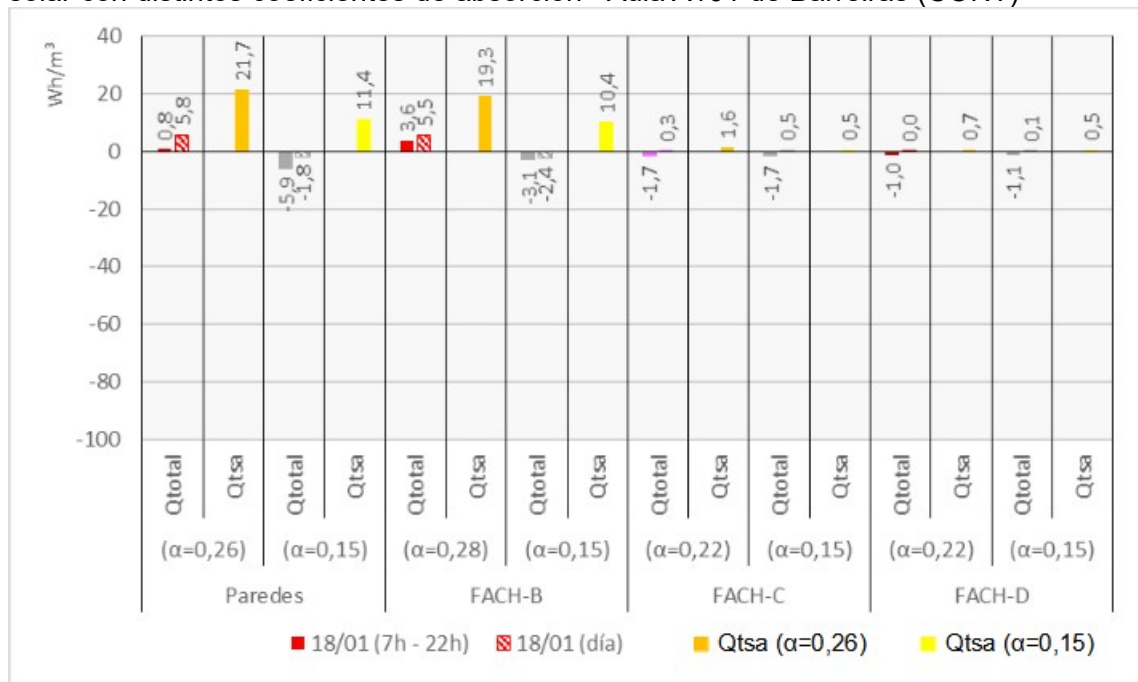
Figura 43: Demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de absorción - Aula A101 de Barreiras (CONT)



En el día de mayor demanda de refrigeración en Barreiras (CONT) – 18/01 –, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 cambian de transmitir

cargas térmicas hacia el ambiente interior para disiparlas hacia el exterior al adoptar el menor coeficiente de absorción (Figura 44). En el periodo de ocupación, el conjunto de paredes existentes registra ganancias de 0,8 Wh/m³. Con el cambio de coeficiente de absorción, pasa a indicar pérdidas de 5,9 Wh/m³.

Figura 44: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Barreiras (CONT)



En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 8h, alcanza su temperatura máxima, 32,9°C, a las 15h y solo baja de los 24°C a las 21h. La temperatura mínima registrada en ese día es de 20,2°C, a las 6h.

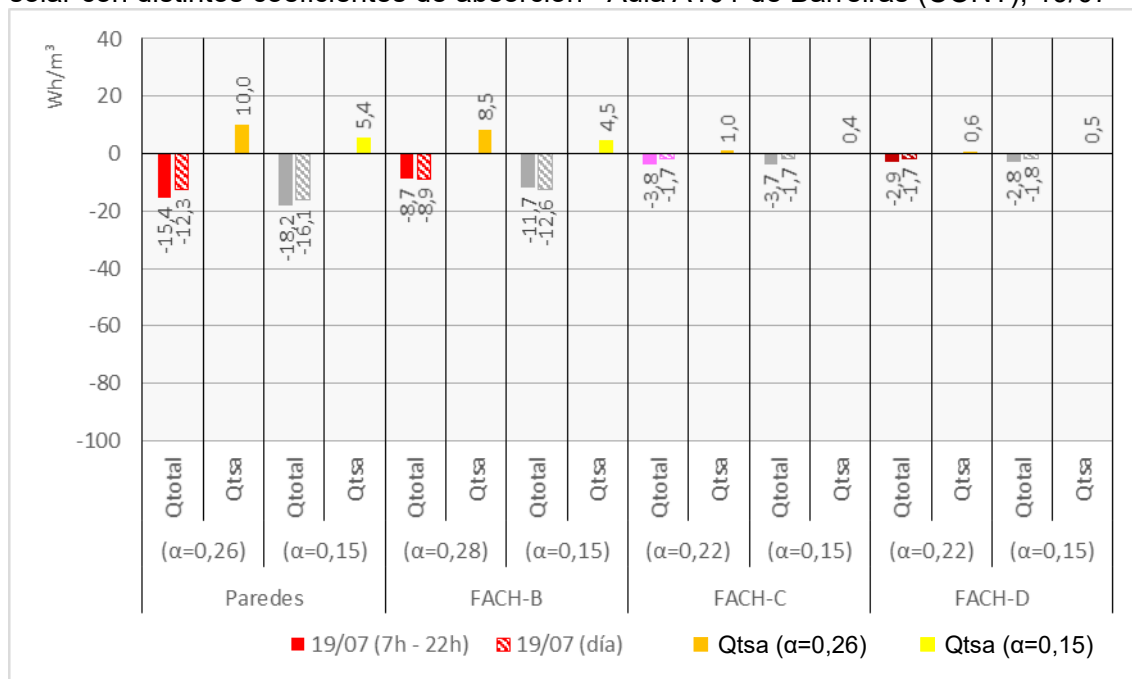
Una vez más, el cambio relevante en el comportamiento térmico sucede en la Fachada B, que concentra 89,2% de las cargas térmicas por radiación solar en ese día. Su balance energético en el periodo de ocupación, que supera las ganancias térmicas del conjunto de paredes cuando $\alpha=0,28$, pasa a registrar pérdidas térmicas hacia el ambiente exterior de 3,1 Wh/m³ cuando $\alpha=0,15$, lo que representa 52,5% de las pérdidas térmicas del conjunto de paredes.

Tanto en la Fachada C cuanto en la Fachada D, los cambios en los balances energéticos son despreciables. Al adoptar el coeficiente de absorción $\alpha=0,15$, sus pérdidas térmicas entre 7h y 22h representan 28,8% y 18,6%, respectivamente, del total disipado por el conjunto de paredes.

En ese día típico, el ahorro energético con la climatización al cambiar el coeficiente de absorción para $\alpha=0,15$ es de 2,0%, índice ligeramente menor que la reducción anual de la demanda de refrigeración.

En el día de menor demanda de refrigeración en Barreiras (CONT) – 19/07 –, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 aumentan la disipación del calor hacia el exterior al adoptar el menor coeficiente de absorción (Figura 45). En el periodo de ocupación, el conjunto de paredes existentes registra un incremento de las pérdidas térmicas de 18,2%.

Figura 45: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07



En ese día típico, la temperatura del aire sobrepasa los 24°C a las 9h, alcanza su temperatura máxima, 34,7°C, a las 15h, y los termómetros bajan de los 24°C a las 20h. La temperatura mínima registrada en ese día es de 17,4°C a las 6h.

El mismo comportamiento térmico del conjunto de paredes ocurre en la Fachada B, que concentra 84,7% de las cargas térmicas por radiación solar en ese día. Con el coeficiente de absorción $\alpha=0,15$, sus pérdidas térmicas aumentan en 34,5% cuando el aula está ocupada y pasan a representar 64,3% de las pérdidas térmicas del conjunto de paredes. Con el coeficiente de absorción de las paredes existentes, sus tasas de disipación del calor representan 56,5% del total.

Tanto en la Fachada C cuanto en la Fachada D, hubo una ligera disminución de las pérdidas térmicas. Con el coeficiente de absorción de las paredes existentes, sus pérdidas térmicas entre 7h y 22h representan 24,7% y 18,8%, respectivamente, del total disipado por el conjunto de paredes. Al adoptar $\alpha=0,15$, sus tasas de disipación del calor cuando el aula está ocupada pasan a representar 20,3% y 15,4%, respectivamente.

En ese día típico, el ahorro energético con la climatización al cambiar el coeficiente de absorción para $\alpha=0,15$ es de 1,9%, índice menor que la reducción anual de la demanda de refrigeración.

5.2 COEFICIENTE DE TRANSMITANCIA TÉRMICA

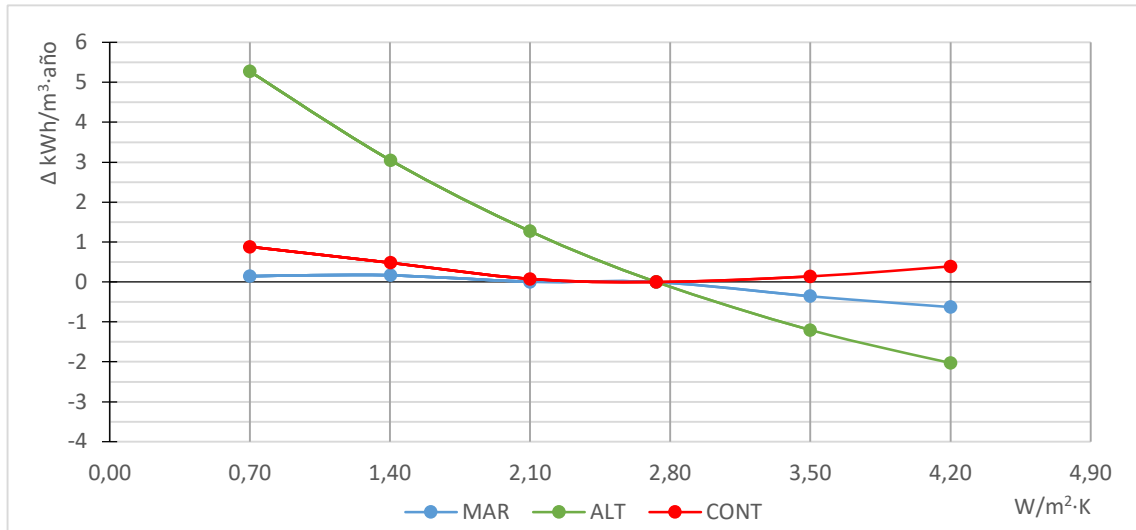
Fueron simulados cinco valores distintos de coeficiente de transmitancia térmica (0,70 W/m²·K; 1,40 W/m²·K; 2,10 W/m²·K; U=3,50 W/m²·K; U=4,20 W/m²·K) para comparar con la pared utilizada en los tres edificios, con U=2,73 W/m²·K. En todos los casos se mantuvo la misma capacidad térmica de la pared, en 236 kJ/m²·K.

La Figura 46 presenta la variación de la demanda anual de refrigeración del Aula A101 según el coeficiente de transmitancia térmica de las paredes de los edificios implantados en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT). En esa gráfica, la pared existente presenta una variación nula de la demanda anual de refrigeración, ya que ella es utilizada como parámetro para comparar el comportamiento de las otras configuraciones de paredes.

En el primer análisis, se destaca que la demanda de refrigeración presenta comportamientos distintos en las tres ciudades, indicando que los parámetros climáticos de cada sitio, en conjunto con los distintos valores de coeficiente de transmitancia térmica simulados, afectan el consumo energético con la climatización del ambiente.

En Cruz das Almas (MAR), la demanda anual de refrigeración se mantiene casi constante, donde la línea de tendencia indica un pequeño ahorro energético pendiente para los valores más altos de coeficiente de transmitancia térmica. En ese sentido, el mayor ahorro energético anual, de 0,9%, se registra con la pared externa menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). En el otro extremo, con la pared externa más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), se registra un aumento anual de la demanda de refrigeración de 0,2%. Vale registrar que la pared externa con $U=2,10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ presenta una diferencia despreciable con relación a la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), de $0,01 \text{ kWh/m}^3\cdot\text{año}$.

Figura 46: Variación de la demanda anual de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica en las tres aulas



En Vitória da Conquista (ALT), la reducción del consumo energético es más significativo (5,4%) y ocurre con el aumento del coeficiente de transmitancia térmica ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Sin embargo, al adoptar coeficientes de transmitancia térmica más bajos, se registran aumentos constantes en la demanda de refrigeración, que alcanzan 14,0% con la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

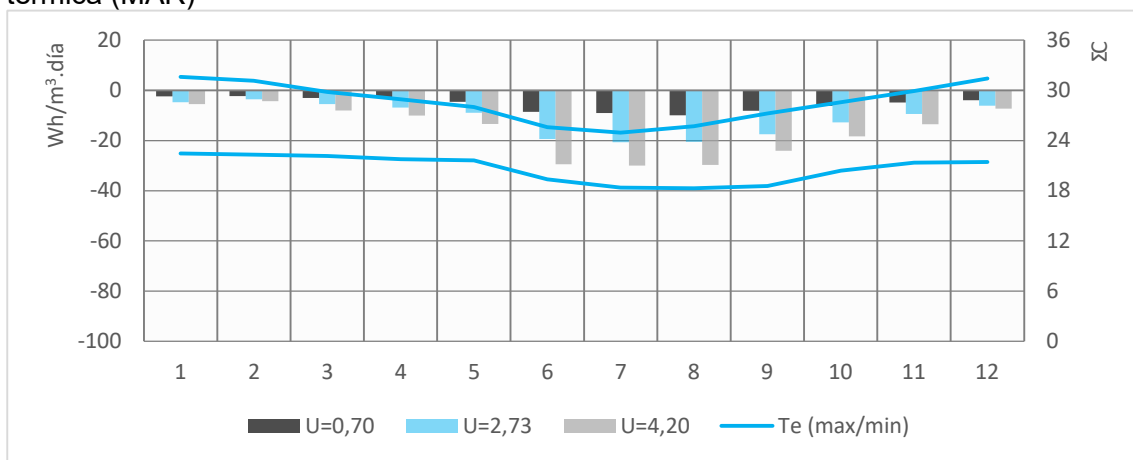
En Barreiras (CONT) los cambios del coeficiente de transmitancia térmica son menos relevantes con relación a la variación anual de la demanda de refrigeración, si lo comparamos con Vitória da Conquista (ALT), y siempre registran aumento en la demanda de refrigeración, sea con la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), cuyo incremento es de 1,4%, sea con la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), cuyo aumento es de 0,6%.

A fin de comprender de forma más detallada el comportamiento térmico de cada pared, se evalúa el impacto térmico del cambio del coeficiente de transmitancia térmica en sus cargas térmicas y en las demandas de refrigeración de cada aula, tanto mensualmente cuanto en los días de mayor y menor demanda de refrigeración.

5.2.1 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)

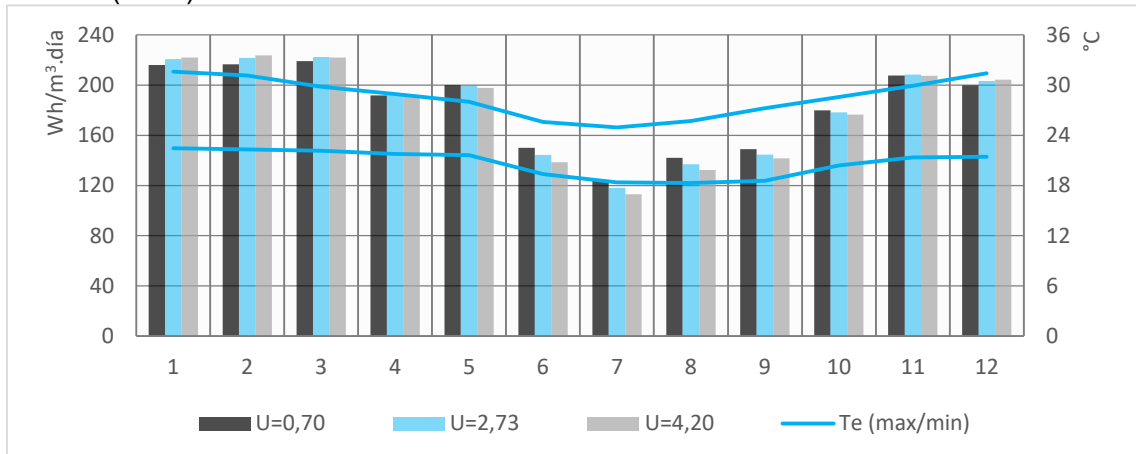
El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) revela que hay una tendencia de disipación del calor en todos los meses del año, cualquiera que sea el coeficiente de transmitancia térmica (Figura 47). La disipación del calor hacia el ambiente exterior es mayor cuando el coeficiente de transmitancia térmica es más alto y cuando bajan las temperaturas, entre junio y septiembre. En los meses más cálidos, entre diciembre y marzo, el saldo de las cargas térmicas de las tres configuraciones de paredes presentan valores próximos entre sí, con menores valores de pérdidas térmicas incluso para las paredes menos aisladas ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 47: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de transmitancia térmica (MAR)



Al comparar esos resultados con la demanda mensual de refrigeración para cada configuración de pared (Figura 48), se demuestra que la adopción de la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) posibilita ahorros energéticos entre mayo y noviembre, que varían entre 0,2% (marzo) y 4,3% (julio) con relación a la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra ahorros energéticos entre diciembre y abril, que varían entre 0,4% (noviembre) y 2,3% (febrero) con relación a la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 48: Demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica (MAR)

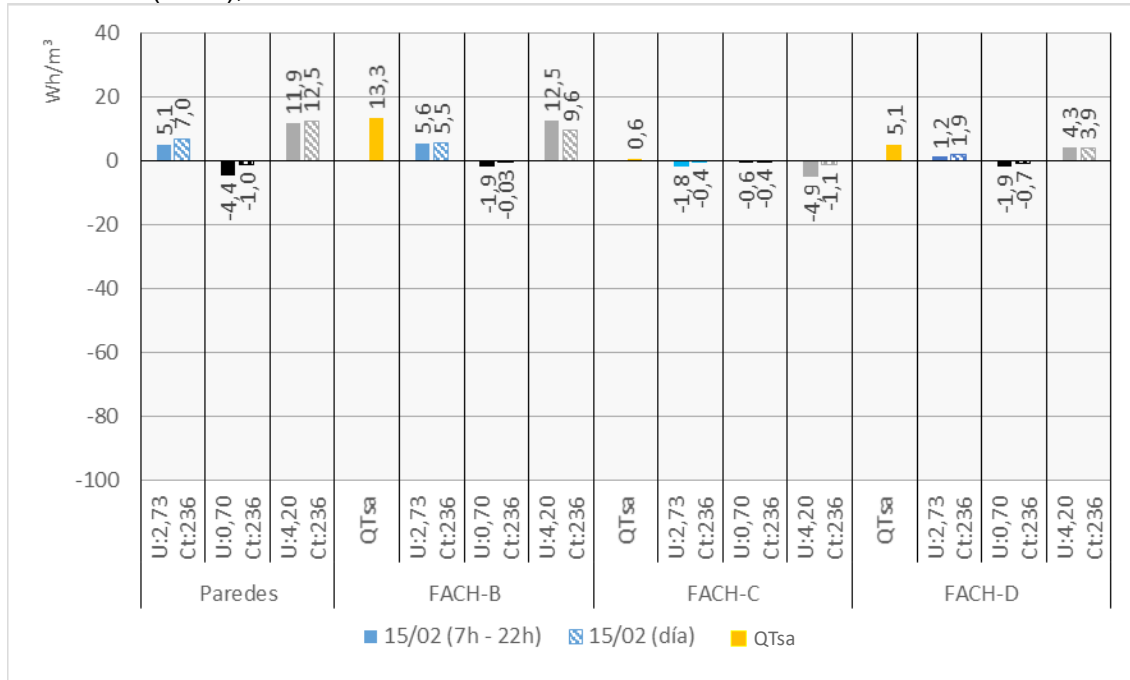


En el día típico de mayor demanda de refrigeración (Figura 49), los balances energéticos entre 7h y 22h del conjunto de paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) demuestran que la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra mayores ganancias térmicas que la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Cuando el aula está ocupada, ese incremento es de 123,2% con relación la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Las Fachadas B y D presentan el mismo comportamiento térmico del conjunto de paredes: cambio de la dirección del flujo de calor, de ganancias para pérdidas térmicas, al adoptar la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$); aumento de 123,2% y 258,3% en las ganancias térmicas, respectivamente, al adoptar la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Vale destacar que la Fachada B es la segunda mayor pared, en términos de superficie por volumen habitable entre las tres paredes evaluadas, pero la más afectada por las cargas térmicas por radiación solar. Mientras tanto, la Fachada D es la menor pared, en términos de superficie por volumen habitable, y las cargas térmicas por radiación solar que la afectan representan 13,9%.

Figura 49: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02



En la Fachada C, la que está protegida de la radiación solar por la circulación, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) promueve un aumento de 172,2% de las pérdidas térmicas, si comparado con la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) cuando el aula está ocupada. No obstante, con la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), se nota una disminución de la disipación del calor hacia el ambiente exterior de 66,7%.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su coeficiente de transmitancia térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 50 – 52).

Figura 50: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02

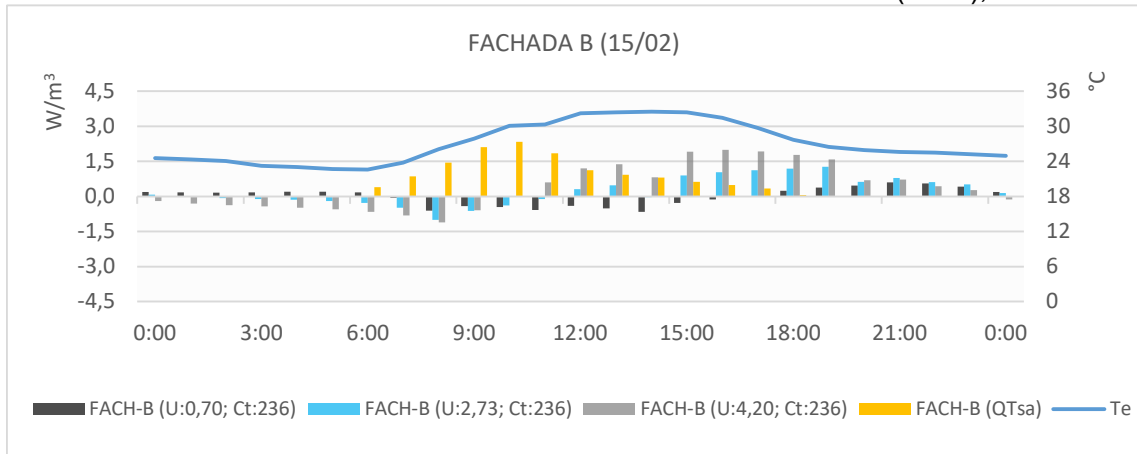


Figura 51: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02

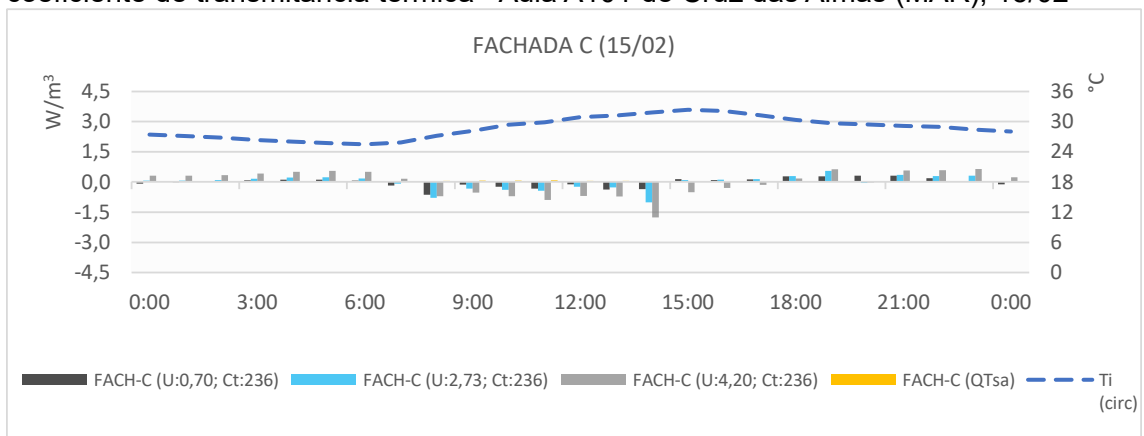
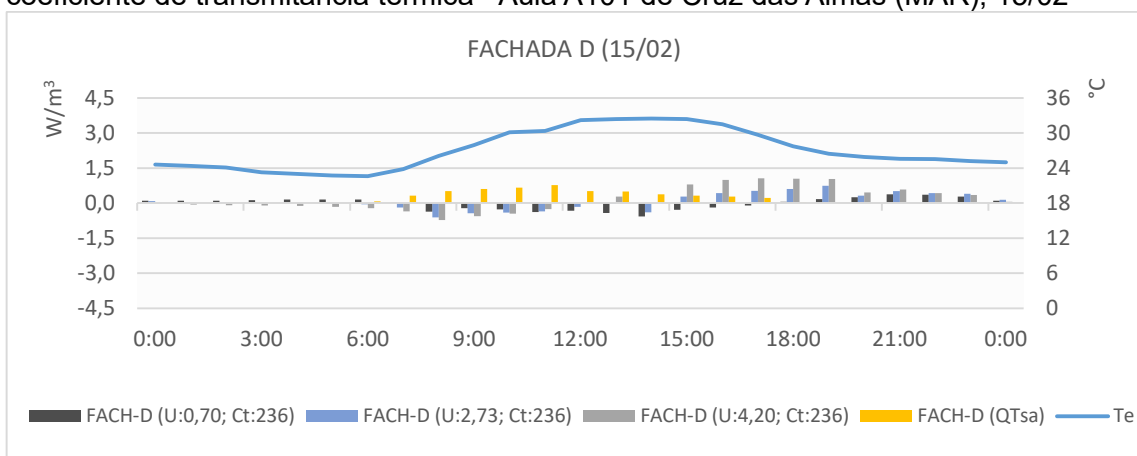


Figura 52: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02



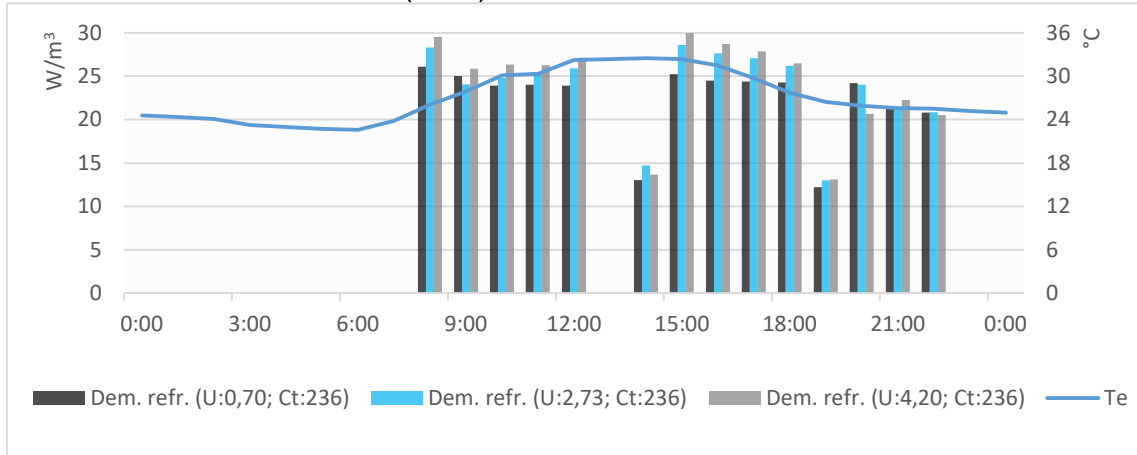
En la Fachada B (Figura 50), la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) demuestra mejor desempeño térmico porque solo transmite energía térmica hacia el ambiente interior en el periodo nocturno, a partir de las 18h, mientras que la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) y la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) irradian su calor hacia el ambiente interior a partir de las 12h y 11h, respectivamente. Sin embargo, su pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) es la única que presenta ganancias térmicas cuando el aula está desocupada. Vale destacar que, en ese día, las temperaturas están por encima de los 24°C hasta las 2:00h.

En la Fachada C (Figura 51), la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) demuestra mejor desempeño térmico porque aumenta las tasas de disipación del calor hacia el ambiente exterior desde las 7h hasta las 17h, así como solo transmite energía térmica hacia el ambiente interior en el periodo nocturno, a partir de las 18h. Mientras tanto, la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) y la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) irradian su calor hacia el ambiente interior a partir de las 15h. Sin embargo, su pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta las mayores tasas de ganancias térmicas cuando el aula está desocupada.

La Fachada D (Figura 52) presenta un comportamiento térmico similar a la Fachada B, pero con valores más reducidos con relación a esa pared debido a su menor superficie por volumen, así como por las menores cargas térmicas por radiación solar que la afectan.

Sobre las demandas de refrigeración para ese día típico según el coeficiente de transmitancia térmica (Figura 53), la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 5,7%, mientras que la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 1,9%.

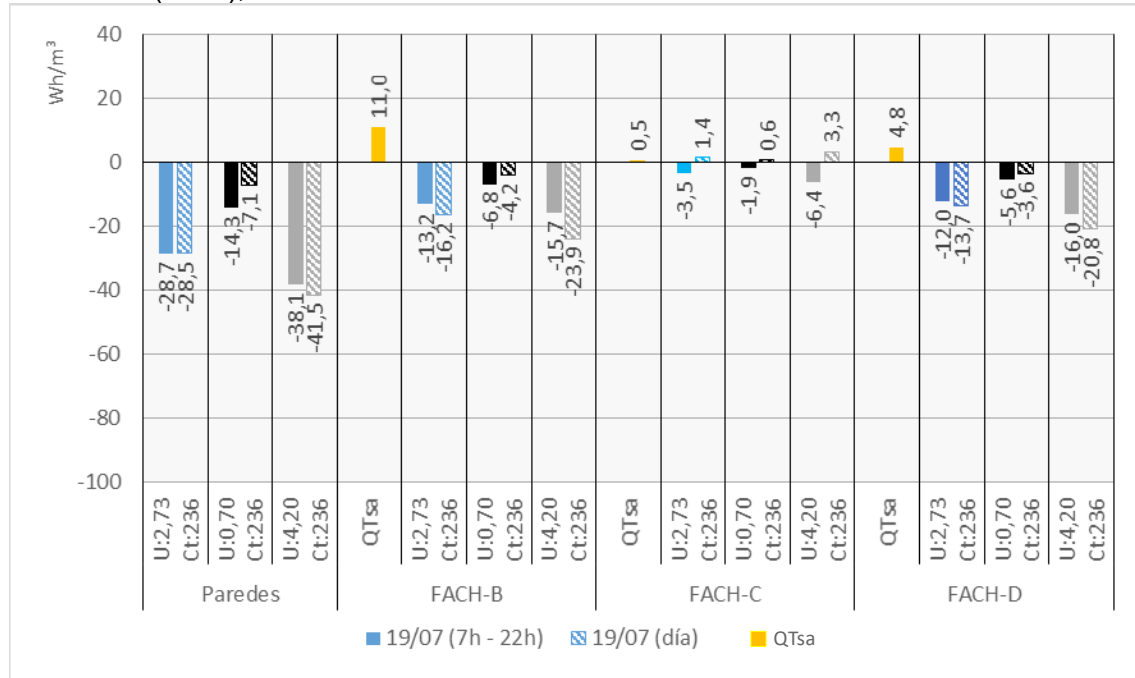
Figura 53: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02



Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica, se revela la influencia de la resistencia térmica de las paredes a las cargas térmicas del ambiente exterior en el ahorro energético. La menor demanda de refrigeración por la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) ocurre en el periodo diurno, cuando la temperatura exterior está más alta y la radiación solar incide en las Fachadas B y D.

En el día típico de menor demanda de refrigeración en Cruz das Almas (MAR), los balances energéticos del conjunto de paredes presentan disipación de las cargas térmicas hacia el ambiente exterior (Figura 54). Entre las tres configuraciones de pared, la menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) es la que disipa más calor, mientras que la más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) es la que presenta menores pérdidas térmicas.

Figura 54: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07



En el conjunto de paredes, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra una disminución de 50,2% en las tasas de disipación del calor con relación a la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) cuando el aula está ocupada. Mientras tanto, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta un incremento de 32,8% en las pérdidas térmicas para ese periodo, si comparado con la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Las Fachadas B y D presentan el mismo comportamiento térmico del conjunto de paredes: disminución de 48,5% y 53,3% de las pérdidas térmicas, respectivamente, al adoptar la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$); aumento de 18,9% y 33,3% en las tasas de disipación del calor, respectivamente, al adoptar la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Vale destacar que las cargas térmicas disipadas por las Fachadas B y D son próximas entre sí, tanto cuando el edificio está ocupado cuanto en el ciclo diario. Eso ocurre a pesar de sus distintas proporciones de superficie por volumen y las diferentes cargas térmicas debido a la radiación solar que afectan a cada una de

esas paredes.

En la Fachada C, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) promueve el aumento de las tasas de flujo de calor, siguiendo la tendencia de la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) de disipar energía térmica cuando el ambiente está ocupado y registrar ganancias térmicas en el ciclo diario. Entre 7h y 22h, el incremento de las pérdidas térmicas es de 82,9%.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su coeficiente de transmitancia térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 55 - 57).

En la Fachada B (Figura 55), la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores tasas de disipación del calor hacia el ambiente exterior por las mañanas. Por la tarde, las pérdidas térmicas de las tres configuraciones de paredes se equiparan entre sí, presentando las menores tasas de flujo de calor en el periodo de ocupación del aula. En el periodo nocturno, las pérdidas térmicas por la pared menos aislada vuelven a destacarse de las demás a partir de las 20h, cuando el edificio todavía está ocupado. La pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) es la única que presenta ganancias térmicas cuando el aula está desocupada.

En la Fachada C (Figura 56), la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra las mayores tasas de disipación del calor mientras el aula está ocupada, así como es la que empieza a transmitir ganancias térmicas para el ambiente interior más tarde, a las 19h. Sin embargo, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta las menores tasas de disipación del calor mientras el aula está ocupada, así como irradia su calor hacia el ambiente interior a partir de las 17h.

Figura 55: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07

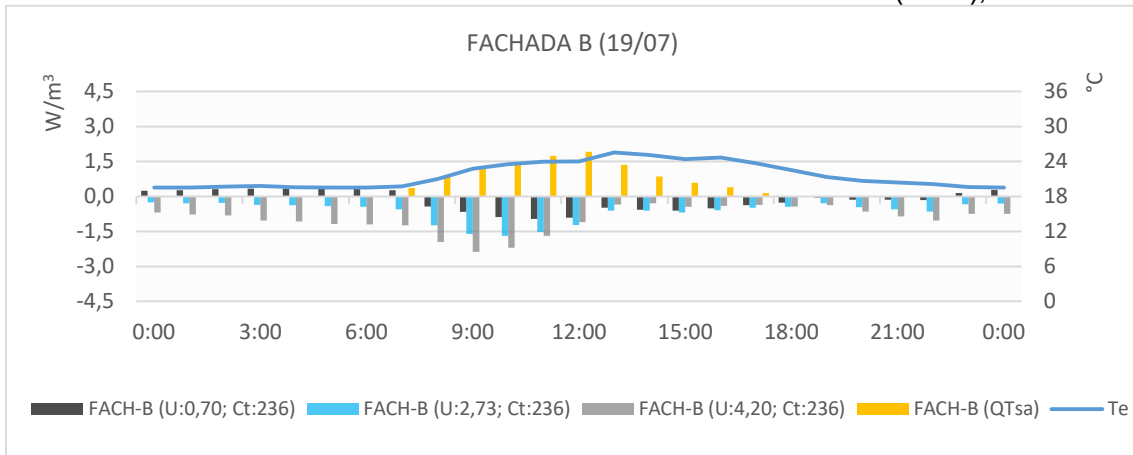


Figura 56: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07

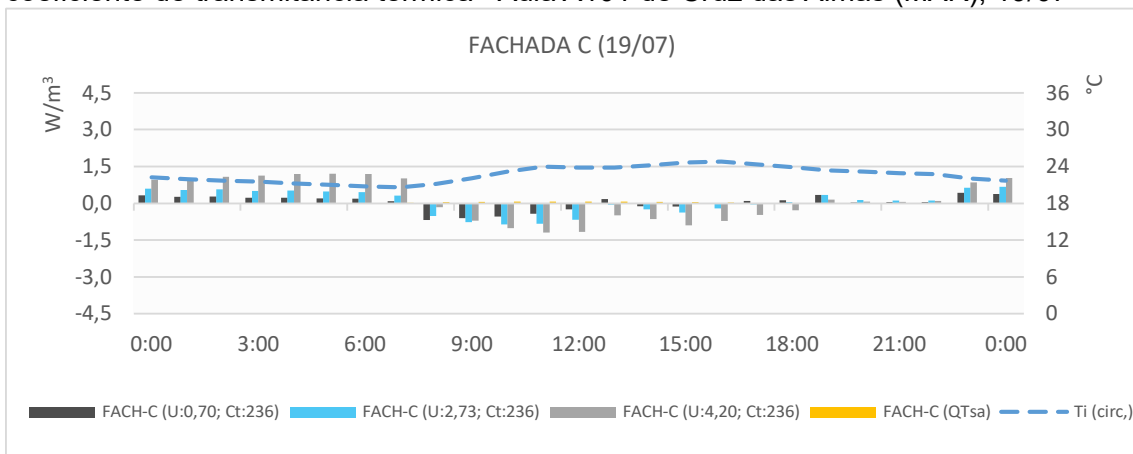
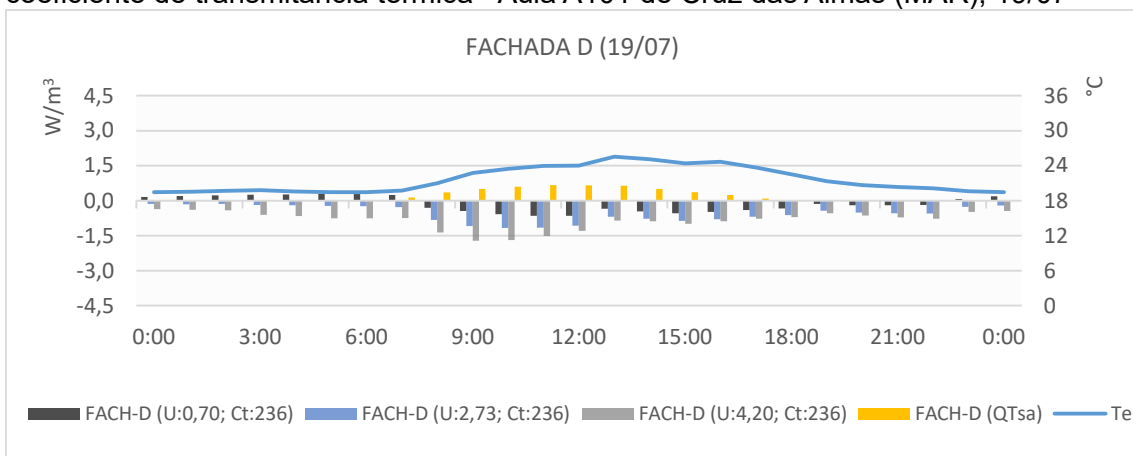


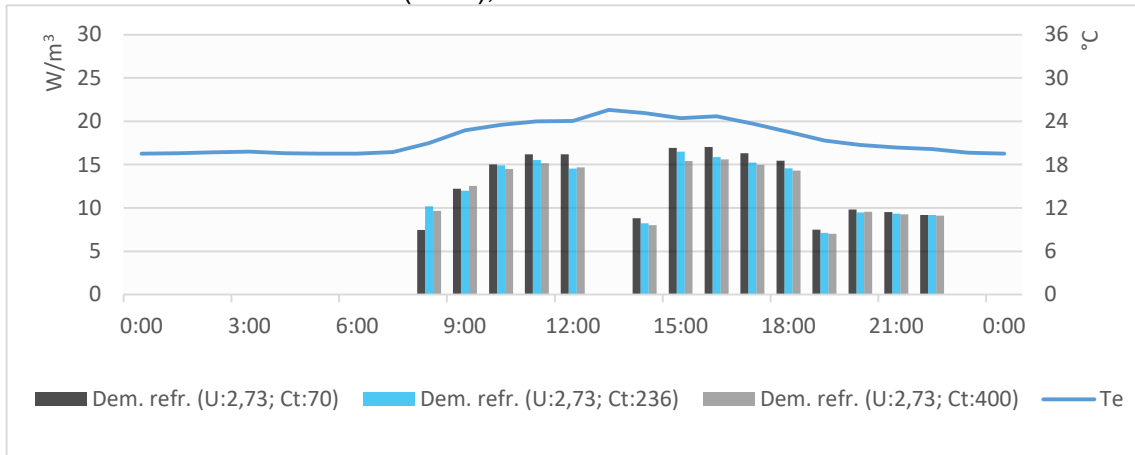
Figura 57: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07



En la Fachada D (Figura 57) las pérdidas térmicas ocurren durante todo el día. La pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) es la que presenta mayores tasas de disipación del calor a lo largo del día, especialmente por la mañana.

Sobre las demandas de refrigeración para ese día típico según el coeficiente de transmitancia térmica, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 6,0%, mientras que la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 7,2%.

Figura 58: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07



Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica, se demuestra que el ahorro energético promovido por la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) ocurre en el momento de mayor disipación del calor por la Fachada C, entre 11h y 18h.

Al adoptar la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), ocurre el aumento de la potencia de los aparatos de climatización, a pesar de su ahorro energético en la demanda anual de refrigeración. La potencia necesaria para climatizar el ambiente pasa de 37.600 BTU/h ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) para 38.400 BTU/h ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Con relación a la magnitud de las tasas de flujo de calor según el coeficiente de transmitancia térmica de la pared, los resultados evidencian que cuanto mayor sea esa variable constructiva, mayores serán las tasas de flujo de calor.

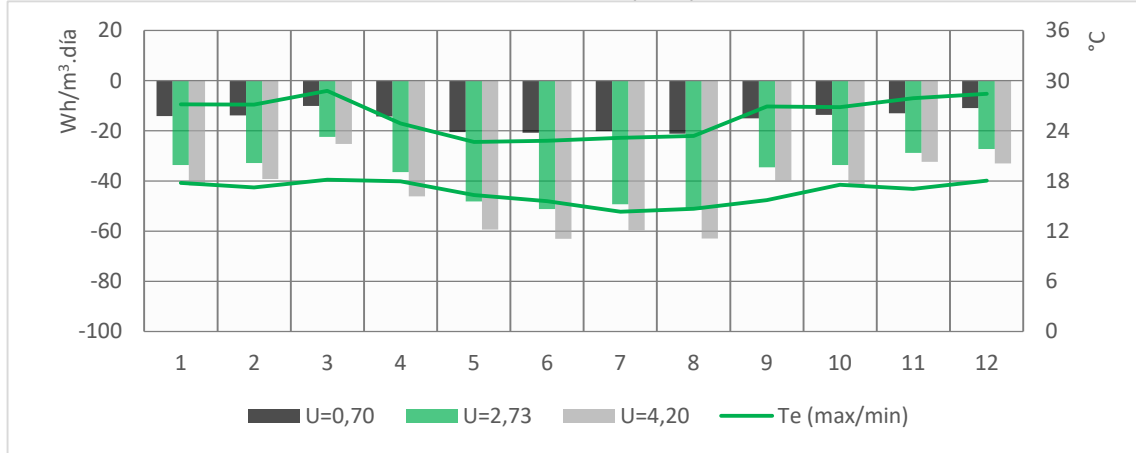
Además del coeficiente de transmitancia térmica, los resultados para los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración revelan que la pared con la mayor superficie por volumen, la Fachada C, no es la que presenta las mayores tasas. Eso ocurre porque esa pared no está expuesta al ambiente exterior. Por ese motivo, es la pared que presenta las menores tasas de flujo de calor.

Entre las Fachadas B y D, la primera presenta las mayores tasas de flujo de calor debido a su mayor superficie por volumen y a las mayores cargas térmicas por radiación solar que la afectan.

5.2.2 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)

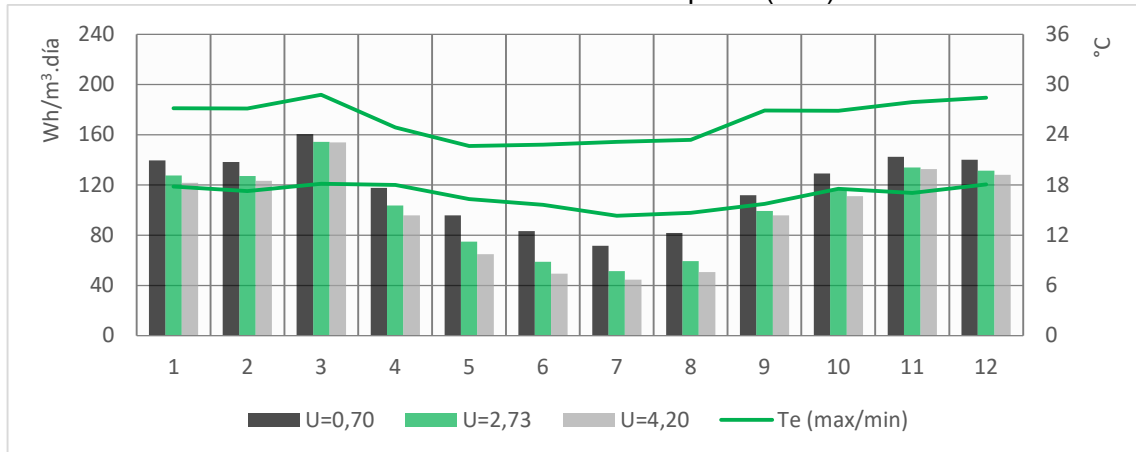
El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes de esa aula demuestra que la disipación del calor hacia el ambiente exterior ocurre en todos los meses del año, cualquiera que sea el coeficiente de transmitancia térmica de la pared (Figura 59). Además, las pérdidas térmicas son mayores cuando el coeficiente de transmitancia térmica es más alto ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Eso ocurre de forma más acentuada con el descenso de las temperaturas, entre mayo y agosto.

Figura 59: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)



La demanda mensual de refrigeración del Aula A101 de Vitória da Conquista (Figura 60) revela que la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) consigue ahorros energéticos en todos los meses del año, que varían entre 0,4% (marzo) a 16,0% (junio) con relación a la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra mayores consumos energéticos con la climatización en todos los meses del año, que varían entre 3,9% (marzo) a 41,4% (junio) con relación a la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 60: Demanda mensual de refrigeración de las paredes según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)

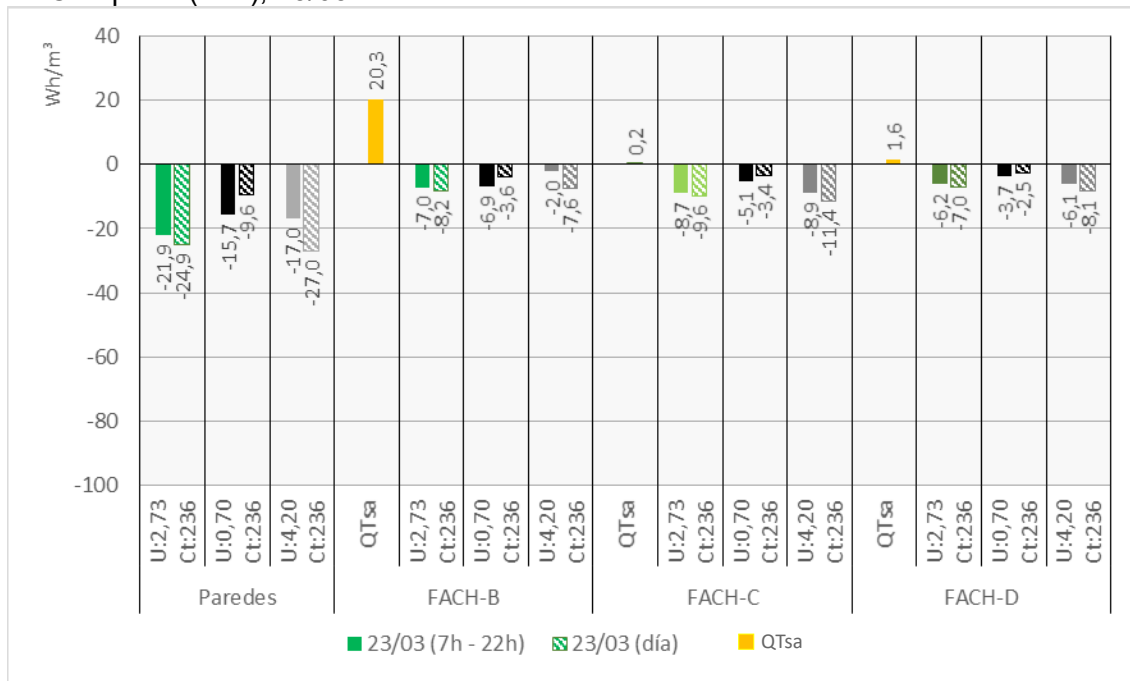


En el día típico de mayor demanda de refrigeración, los balances energéticos de

todas las paredes del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) presentan pérdidas térmicas (Figura 61). Al comparar la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) con la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), se registra una reducción de 22,4% de las pérdidas térmicas cuando el aula está ocupada. Esa disminución es más significativa cuando se adopta la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$): 28,3%.

Las tres paredes presentan pérdidas térmicas similares entre sí, a pesar de la Fachada B poseer la mayor superficie por volumen habitable entre las tres paredes evaluadas y ser la más afectada por las cargas térmicas por radiación solar.

Figura 61: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03



En la Fachada B, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayor reducción de las pérdidas térmicas, 71,4%, cuando el aula está ocupada. En ese periodo, las tasas de disipación del calor entre la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) y la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) son similares.

En la Fachada C, la pared menos afectada por las cargas térmicas por radiación

solar, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) promueve el aumento de 2,3% de las pérdidas térmicas ya registradas por la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) entre 7h y 22h. Mientras tanto, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra una reducción de 41,4% de las tasas de disipación del calor en ese periodo.

En la Fachada D, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta valores similares de pérdidas térmicas entre 7h y 22h, si comparado con la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra una reducción de 40,3% de las tasas de disipación del calor en ese periodo.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su coeficiente de transmitancia térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 62 - 64).

En la Fachada B (Figura 62), la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta menores tasas de disipación del calor, si comparado con la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), así como menores tasas de ganancias térmicas a partir de las 18h. Mientras tanto, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores tasas de disipación del calor entre las tres paredes, así como mayores tasas de ganancias térmicas, siendo que sus ganancias térmicas empiezan a las 14h.

En la Fachada C (Figura 63), la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta las mayores pérdidas térmicas por las mañanas. Por la tarde, sus pérdidas térmicas se equivalen a las tasas de disipación del calor de la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). A partir de las 17h, todas las paredes presentan tasas de flujo de calor próximas a cero, registrando influencia casi nula tanto en las ganancias cuanto en las pérdidas térmicas.

Figura 62: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 23/03

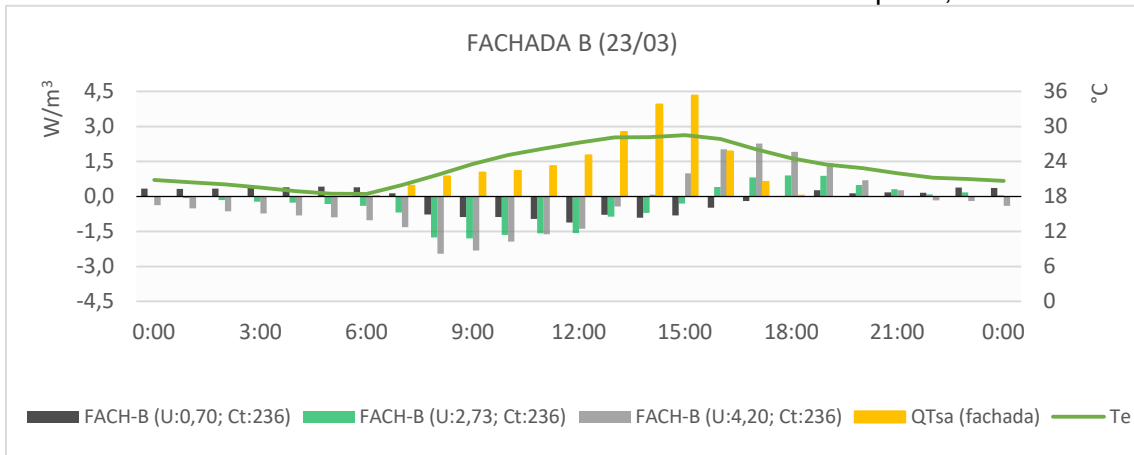


Figura 63: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 23/03

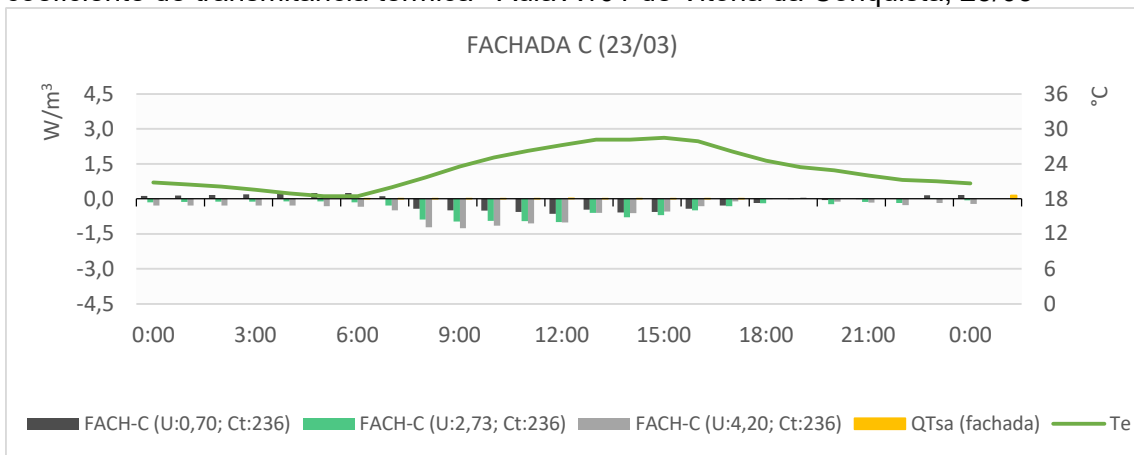
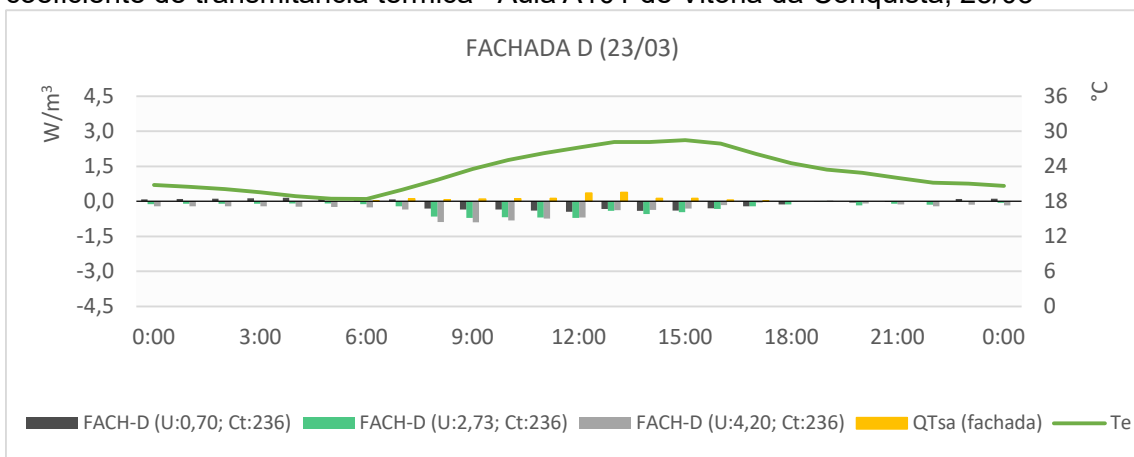


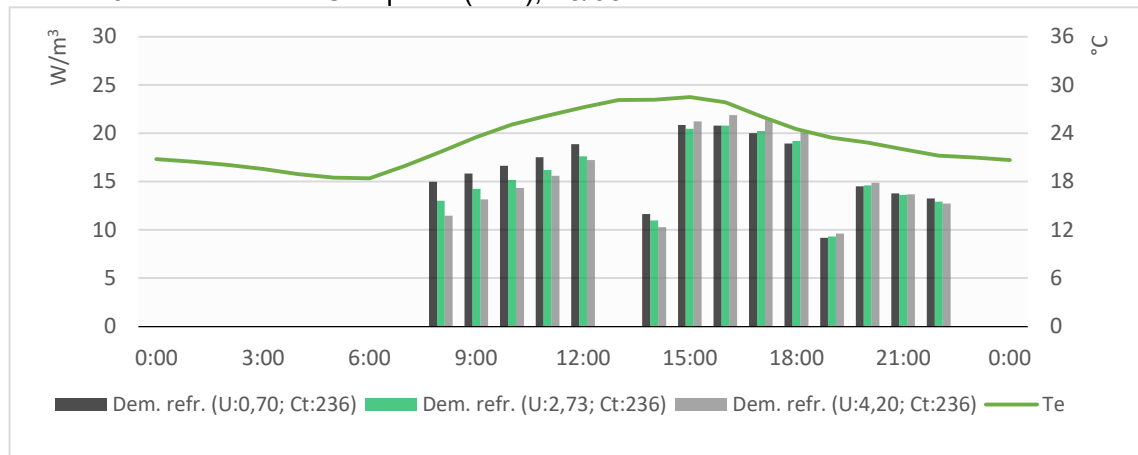
Figura 64: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 23/03



La Fachada D (Figura 64) presenta un comportamiento térmico similar a la Fachada C, pero con valores más reducidos con relación a esa pared debido a su menor superficie por volumen habitable.

Sobre las demandas de refrigeración para ese día típico según el coeficiente de transmitancia térmica (Figura 65), la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 0,4%, mientras que la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 3,9%.

Figura 65: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03



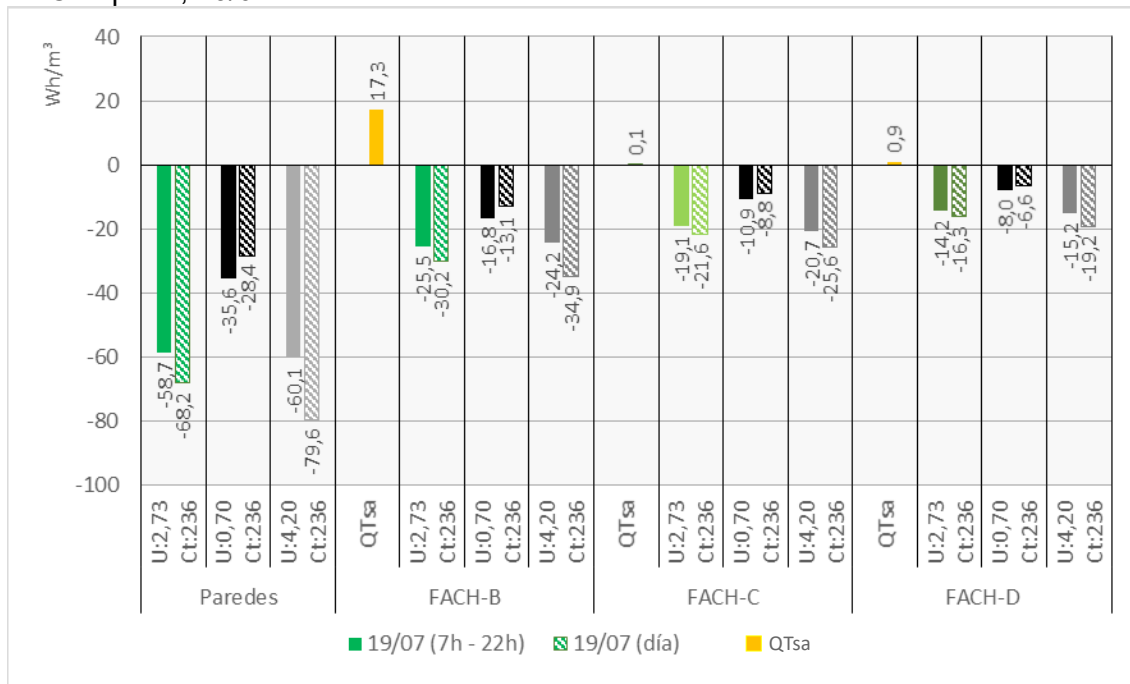
Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica, se revela la influencia de la disipación del calor por las paredes menos aisladas ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo matutino. Sin embargo, las paredes existentes ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) son las que presentan el mejor balance entre ganancias y pérdidas térmicas a lo largo del día y un consumo energético muy próximo al de las paredes menos aisladas ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Sobre la demanda de refrigeración de las paredes más aisladas ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), sus consumos energéticos solo logran ser menores que las otras dos paredes entre 17h y 21h, con diferencias tan reducidas con relación a la pared existente ($U=2,73$

W/m²·K) que no compensan la mayor energía consumida con la climatización en los otros periodos del día.

En el día típico de menor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) (Figura 66) demuestran que la pared menos aislada (U=4,20 W/m²·K) registra mayores pérdidas térmicas que la pared existente (U=2,73 W/m²·K), tanto en el ciclo diario cuanto entre 7h y 22h. No obstante, sus tasas de disipación del calor cuando el aula está ocupada son muy próximas a la pared existente (U=2,73 W/m²·K), con diferencia de 2,4%.

Figura 66: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07



Al utilizar la pared más aislada (U=0,70 W/m²·K), las tasas de disipación del calor disminuyen con relación a la pared existente (U=2,73 W/m²·K), tanto en el ciclo diario cuanto entre 7h y 22h. En ese periodo, la reducción de las pérdidas térmicas es de 39,4%, si comparado con la pared existente (U=2,73 W/m²·K).

La Fachada B es la más afectada por las cargas térmicas por radiación solar. En esa

pared, el comportamiento térmico de la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra una disminución de 5,1% de las pérdidas térmicas con relación a la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), entre 7h y 22h. Mientras tanto, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) reduce en 34,1% la tasa de disipación del calor con relación a la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

En la Fachada C, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra valores próximos de pérdidas térmicas, si comparado con la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), con diferencia de $1,6 \text{ Wh/m}^3$. Mientras tanto, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) reduce en 42,9% las pérdidas térmicas entre 7h y 22h.

En la Fachada D, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra un incremento de 7,0% en las pérdidas térmicas, si comparado con la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo de ocupación del aula. Mientras tanto, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) reduce en 43,7% las pérdidas térmicas entre 7h y 22h.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su coeficiente de transmitancia térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 67 - 69).

Figura 67: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07

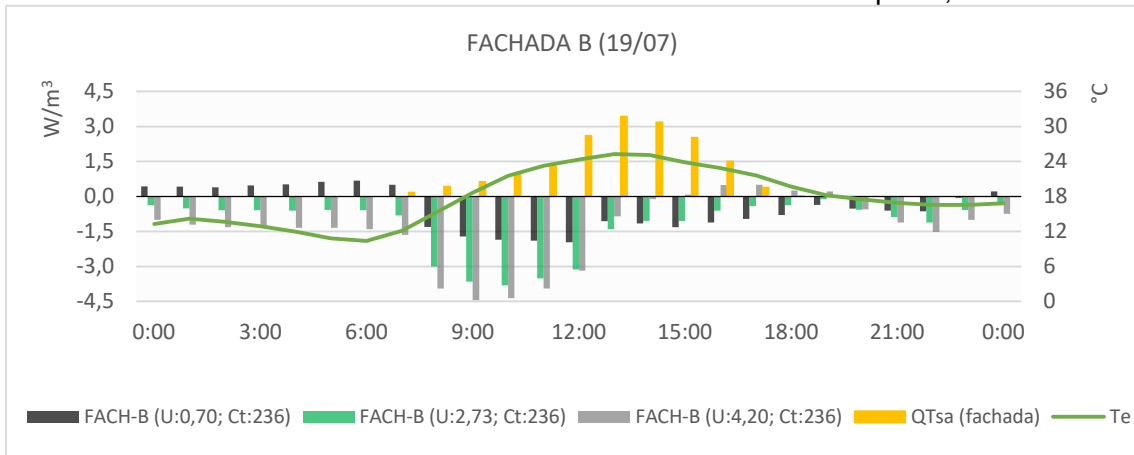


Figura 68: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07

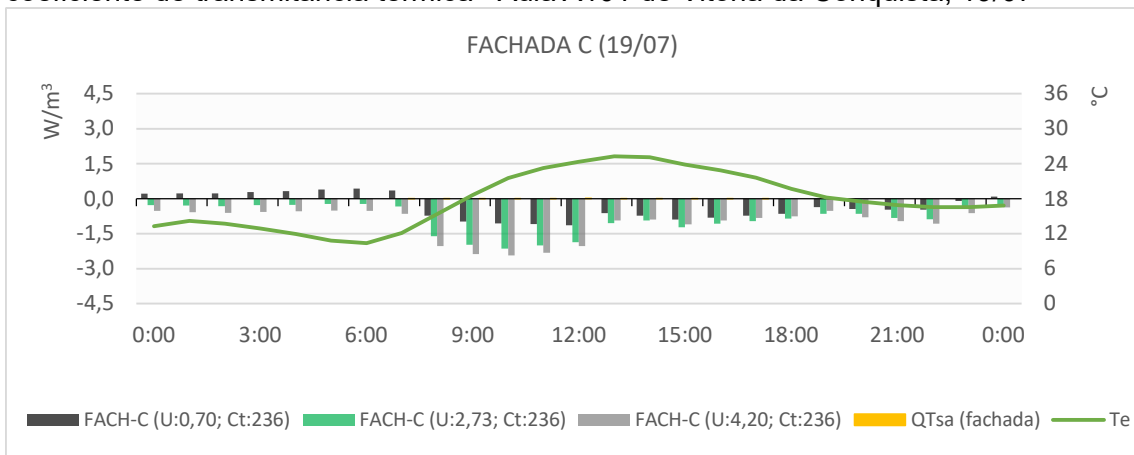
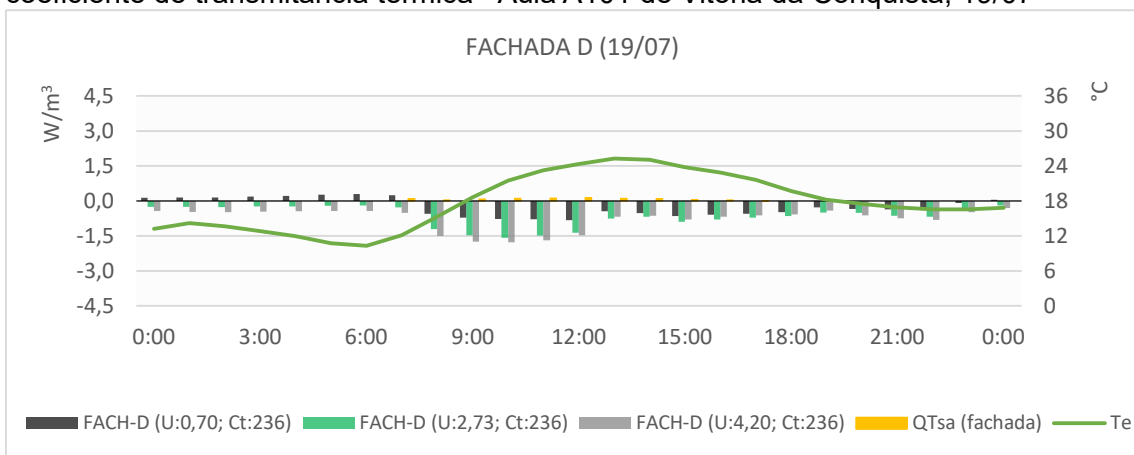


Figura 69: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07



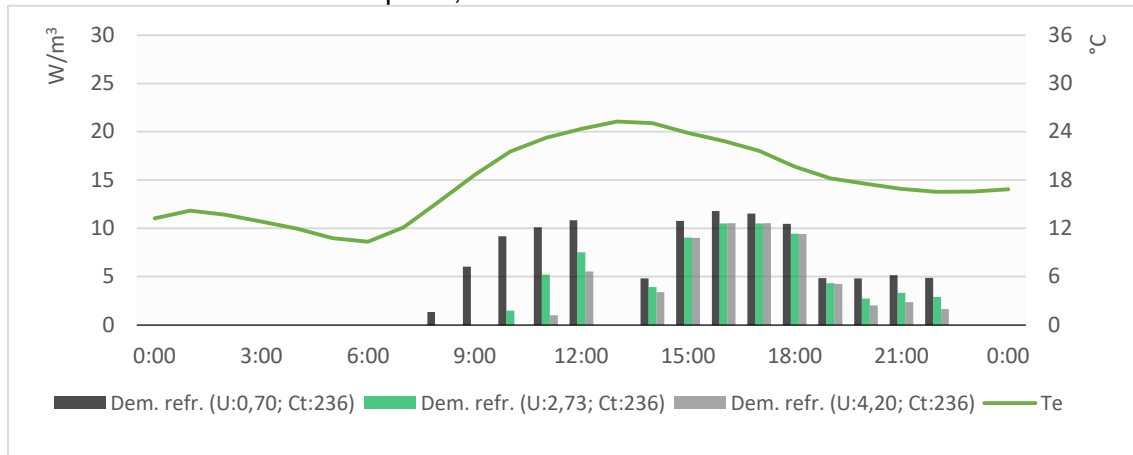
En la Fachada B (Figura 67), la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores pérdidas térmicas por la mañana y por la noche. Debido a las cargas térmicas por radiación solar y su alto coeficiente de transmitancia térmica, esa pared es la única que registra ganancias térmicas en ese día, entre 15h y 19h. La pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra las menores tasas de disipación del calor entre las tres configuraciones de pared a lo largo del día, así como es la única que transmite energía hacia el ambiente interior cuando el edificio está desocupado.

En la Fachada C (Figura 68), la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) también registra mayores tasas de disipación del calor entre las tres configuraciones de pared, especialmente por la mañana y por la noche. En el turno vespertino, las pérdidas térmicas de las tres paredes son muy próximas entre sí. La pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) es la única que presenta ganancias térmicas a lo largo del día, que ocurren cuando el edificio está desocupado.

La Fachada D (Figura 69) presenta un comportamiento térmico similar a la Fachada C, en las tres configuraciones de pared. Sus menores tasas de flujo de calor, si comparado con la Fachada C, se debe a su menor superficie por volumen habitable.

Sobre las demandas de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica, para ese día típico (Figura 70), la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 15,7%, mientras que la pared menos aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 50,5%.

Figura 70: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07



Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica, se demuestra la influencia de la disipación del calor por las paredes en el ahorro o en el aumento de la demanda de refrigeración. El ahorro energético promovido por la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) ocurre en todas las horas del día, en especial por las mañanas, cuando los equipos de climatización solo se encienden a partir de las 11h.

No obstante, al adoptar la pared externa menos aislada en Vitória da Conquista (ALT), la potencia de los aparatos de climatización aumentan de 33.900 BTU/h para 34.600 BTU/h, a pesar de su ahorro energético en la demanda anual de refrigeración.

Con relación a la magnitud de las tasas de flujo de calor según el coeficiente de transmitancia térmica de la pared, los resultados evidencian que cuanto mayor sea esa variable constructiva, mayores serán las tasas de flujo de calor.

Además del coeficiente de transmitancia térmica, los resultados para los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración revelan que la Fachada B presenta las mayores tasas debido a su mayor superficie por volumen.

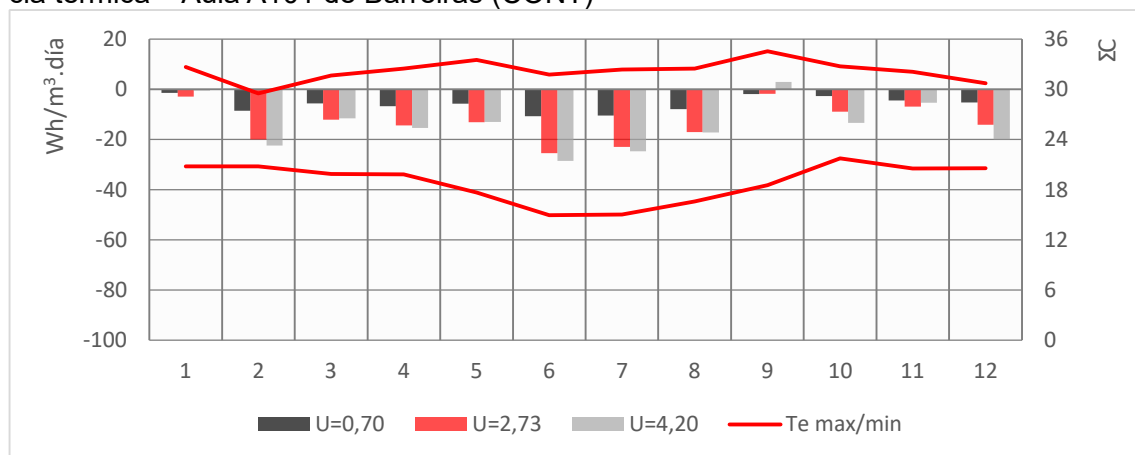
Sin embargo, debido a las mayores cargas térmicas por radiación solar que la afectan, en el día de mayor demanda de refrigeración la contribución a las pérdidas térmicas de las tres paredes son similares entre sí.

Entre las Fachadas C y D, la primera presenta tasas de flujo de calor mayores que la segunda debido a su mayor superficie por volumen habitable.

5.2.3 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT)

El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes del Aula A101 de Barreiras (CONT) (Figura 71) revela que hay una tendencia a la disipación del calor en la mayoría de los meses del año. Sin embargo, el saldo entre ganancias y pérdidas térmicas por las mismas es casi nulo en los meses de enero y septiembre. Además, al adoptar la pared externa menos aislada ($U= 4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), las ganancias sobrepasan las pérdidas térmicas en el mes de septiembre.

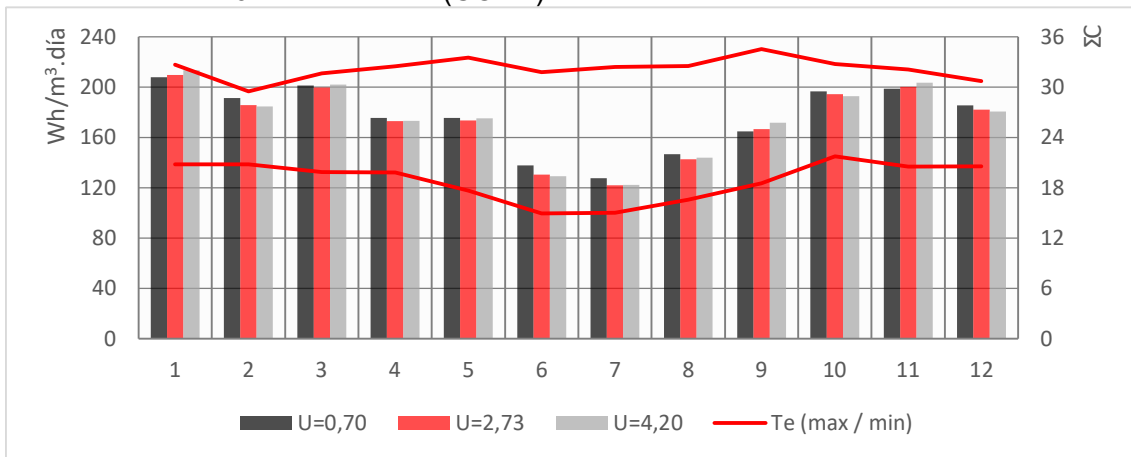
Figura 71: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT)



Al comparar esos resultados con la demanda mensual de refrigeración para cada configuración de pared (Figura 72), se percibe que la pared existente ($U= 2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta consumos energéticos menores que las otras dos en cinco meses

del año: marzo, abril, mayo, julio y agosto. En los meses de enero, septiembre y noviembre, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra las menores demanda de refrigeración, mientras que en febrero, junio, octubre y diciembre, eso ocurre con la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

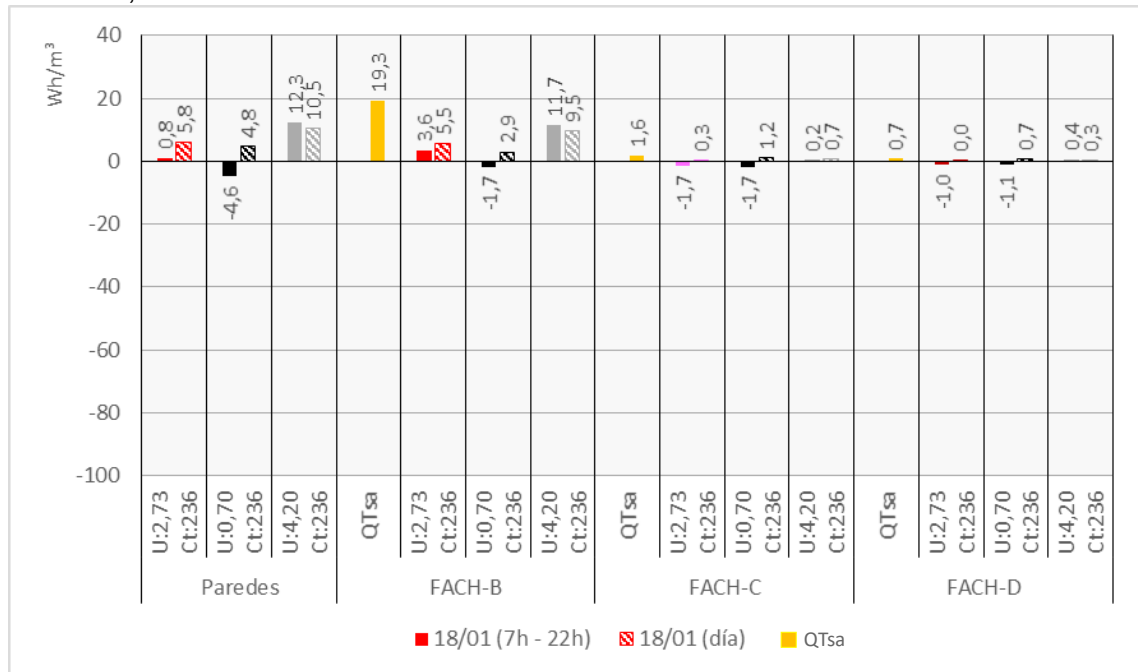
Figura 72: Demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT)



En el día típico de mayor demanda de refrigeración (Figura 73), los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Barreiras (CONT) presentan ganancias térmicas significativas de la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) con relación a la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), entre 7h y 22h. Mientras tanto, al adoptar la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), ocurre el cambio de la dirección del flujo de calor, de ganancias para pérdidas térmicas, para ese mismo periodo.

La Fachada B, la pared más afectada por las cargas térmicas por radiación solar, presenta el mismo comportamiento térmico del conjunto de paredes: cambio de la dirección del flujo de calor, de ganancias para pérdidas térmicas, al adoptar la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), entre 7h y 22h; aumento de 255,0% en las ganancias térmicas al adoptar la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) cuando el aula está ocupada.

Figura 73: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras, 18/01



Las Fachadas C y D presentan balances energéticos que no sobrepasan los 2,0 Wh/m³, cualquier que sea el periodo y el coeficiente de transmitancia térmica de la pared evaluada. Además, las dos también presentan comportamientos térmicos similares. Por un lado, la pared más aislada (U=0,70 W/m²·K) presenta pérdidas térmicas con valores muy próximos a la pared existente (U=2,73 W/m²·K), entre 7h y 22h. Por otro lado, la pared menos aislada (U=4,20 W/m²·K) presenta ganancias térmicas cuando el aula está ocupada, pero con valores que no sobrepasan 1,0 Wh/m³.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su coeficiente de transmitancia térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 74 - 76).

Figura 74: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01

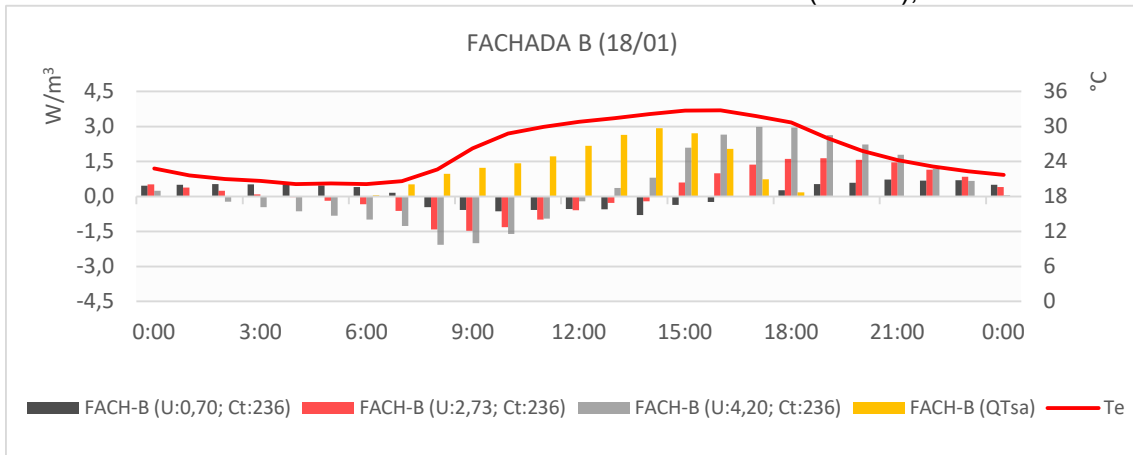


Figura 75: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01

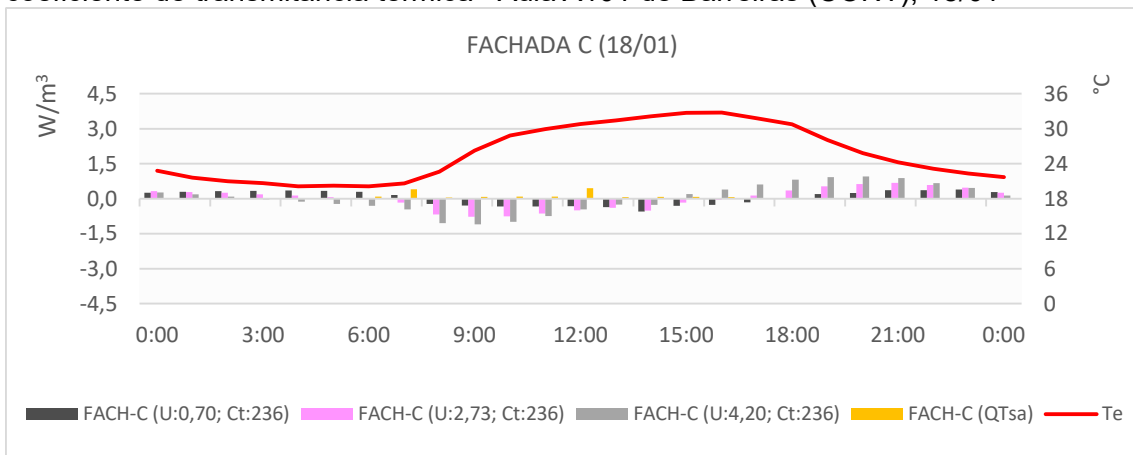
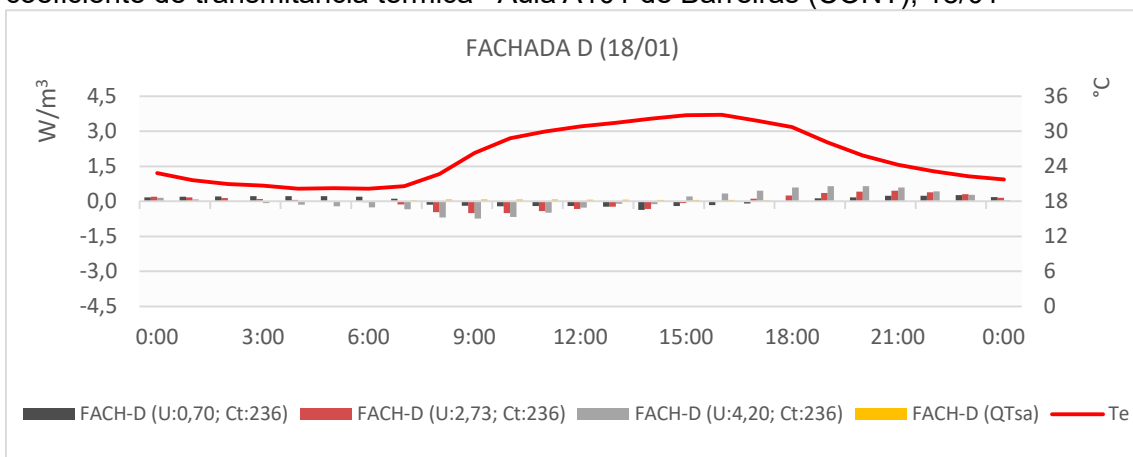


Figura 76: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01



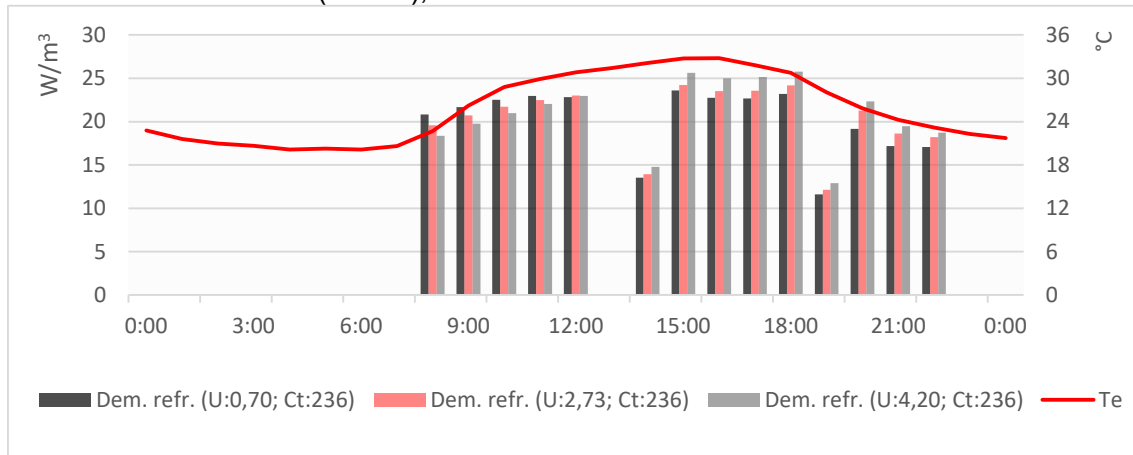
En la Fachada B (Figura 74), la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta tasas de disipación del calor menores que las otras dos paredes, pero sus pérdidas térmicas ocurren hasta las 17h. Mientras tanto, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores pérdidas térmicas por la mañana, pero empieza a transmitir energía térmica hacia el ambiente interior a partir de las 13h y su flujo de calor solo cambia de dirección en el otro día, por la madrugada.

Las Fachadas C y D (Figuras 75 - 76), así como en los balances energéticos diarios, también presentan comportamientos térmicos similares. La pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores tasas de disipación por la mañana, pero es la que primero empieza a transmitir cargas térmicas hacia el ambiente interior: a las 15h, tanto en la Fachada C cuanto en la Fachada D. Mientras tanto, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) registra menores tasas de disipación del calor, pero ellas tardan hasta las 18h a cambiar de dirección y empezar a transmitir energía térmica hacia el ambiente interior.

Sobre las demandas de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica, para ese día típico (Figura 77), la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 1,9%, mientras que la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 2,3%.

Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica, se demuestra la influencia de la resistencia térmica de las paredes en el ahorro o en el aumento de la demanda de refrigeración. El ahorro energético promovido por la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) se debe a su desempeño por la tarde y noche, pues son los periodos en que todavía ocurre disipación del calor por esa pared, a pesar de las altas temperaturas exteriores y la carga térmica por radiación solar que afecta las paredes. Además, vale resaltar sus menores tasas de transmisión de calor hacia el ambiente interior, a partir de las 18h.

Figura 77: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01

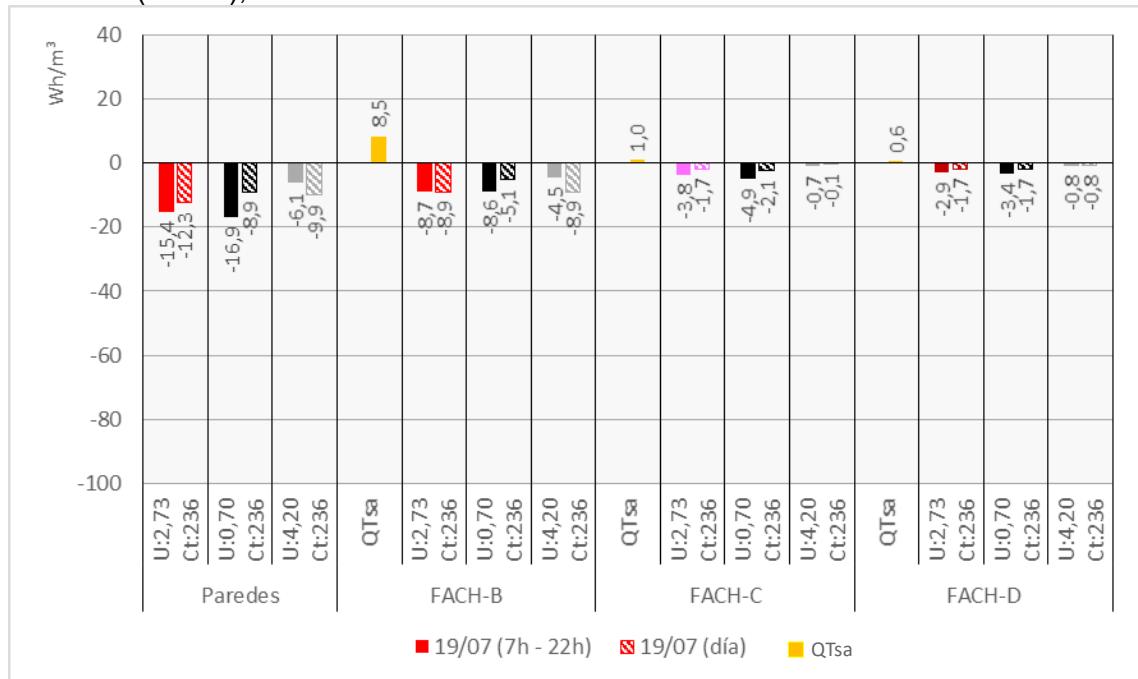


En el día típico de menor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Barreiras (CONT) (Figura 78) presentan pérdidas térmicas. Al adoptar la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), la tasa de disipación del calor aumenta 9,7% con relación a la pared existente en el periodo de ocupación del aula. Mientras tanto, al adoptar la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), las pérdidas térmicas disminuyen en 60,4% en ese periodo.

La Fachada B es la más afectada por las cargas térmicas por radiación solar. En esa pared, el comportamiento térmico de la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) es la que registra las mayores pérdidas térmicas entre 7h y 22h. La reducción en las tasas de disipación del calor por la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) es menor que 1,0%, mientras que, en la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), esa disminución es de 47,9%.

Las Fachadas C y D presentan balances energéticos más relevantes al conjunto de paredes, si comparado al día típico de mayor demanda de refrigeración. Al adoptar la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), el incremento en las tasas de disipación del calor es de 29,0% y 17,2% cuando el aula está ocupada, respectivamente. Mientras tanto, al adoptar la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), la disminución de las pérdidas térmicas es de 81,6% y 72,4%, respectivamente.

Figura 78: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07



La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su coeficiente de transmitancia térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 79 - 81).

En la Fachada B (Figura 79), la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores pérdidas térmicas por la mañana, pero sus ganancias térmicas son las que empiezan primero, a partir de las 15h. Sobre ese momento de cambio de dirección de las tasas de flujo de calor, la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) empieza a transmitir energía térmica hacia el ambiente interior a las 17h, mientras que la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), a partir de las 19h.

Figura 79: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07

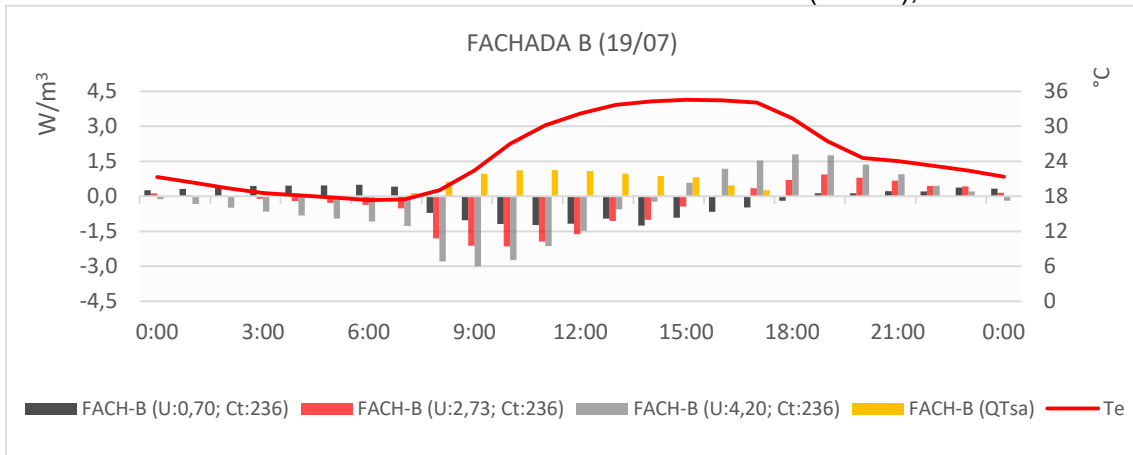


Figura 80: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07

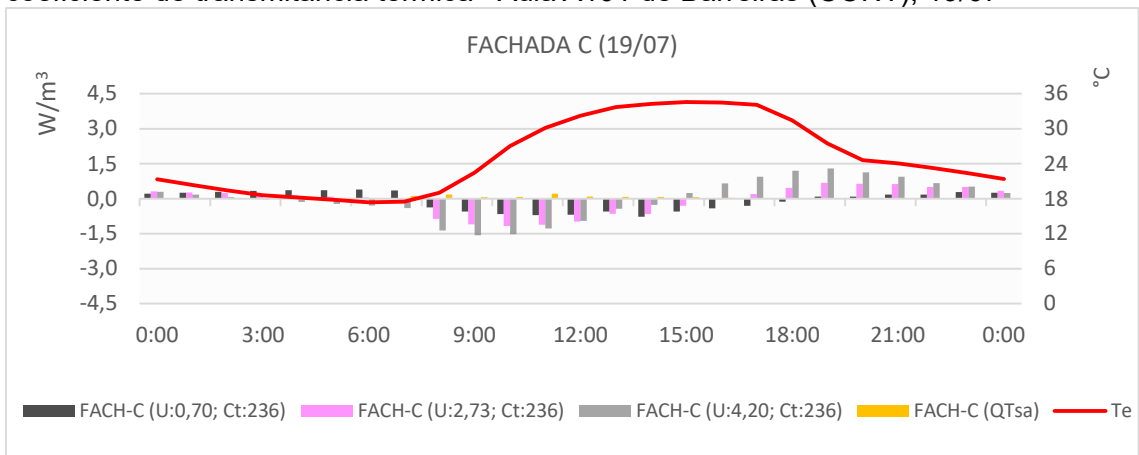
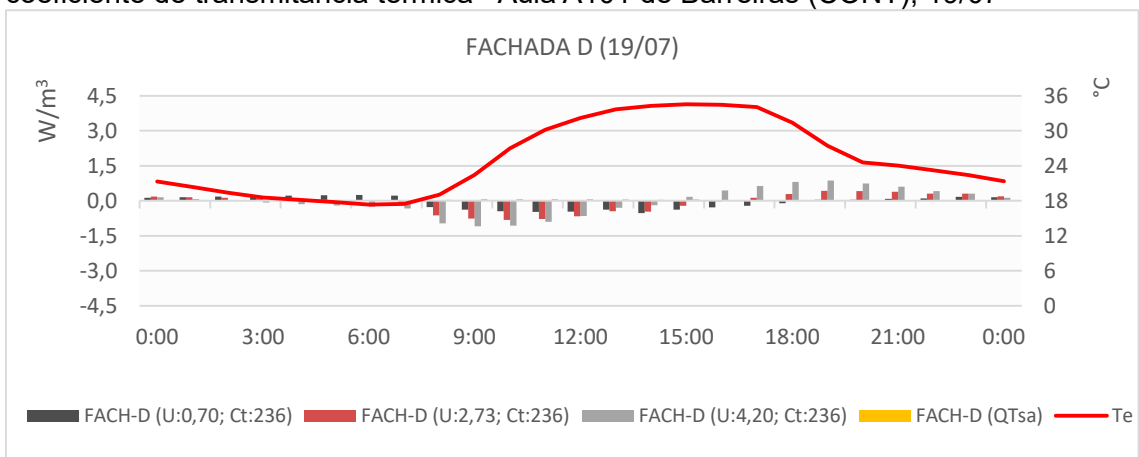


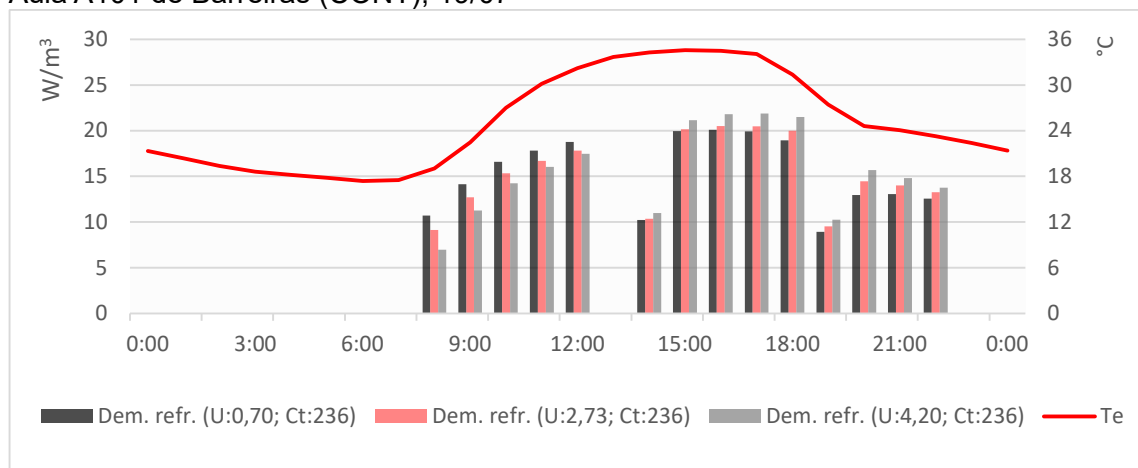
Figura 81: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07



Las Fachadas C y D (Figuras 80 - 81), así como en los balances energéticos diarios, también presentan comportamientos térmicos similares. La pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores tasas de disipación por la mañana, pero es la que primero empieza a transmitir cargas térmicas hacia el ambiente interior: a las 15h, tanto en la Fachada C cuanto en la Fachada D. Sobre ese momento de cambio de dirección de las tasas de flujo de calor para las Fachadas C y D, la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) empieza a transmitir energía térmica hacia el ambiente interior a las 17h, mientras que la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), a partir de las 19h.

Sobre las demandas de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica, para ese día típico (Figura 82), la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) presenta consumo energético con la climatización similar a la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), cuya diferencia es de 0,1%, mientras que la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta la demanda de refrigeración en 1,5%.

Figura 82: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07



Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica, se demuestra que las menores tasas de flujo de calor de la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) tienen efectos similares al de las mayores tasas de flujo de calor de la pared existente

($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) en la demanda diaria de refrigeración. Mientras la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) ahorra más energía en las primeras horas del día, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) evita mayores ganancias térmicas por la tarde y noche. Las mayores tasas de flujo de calor de la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), especialmente sus ganancias térmicas, son las que presentan impacto negativo en la demanda de refrigeración.

Con relación a la magnitud de las tasas de flujo de calor según el coeficiente de transmitancia térmica de la pared, los resultados evidencian que cuanto mayor sea esa variable constructiva, mayores serán las tasas de flujo de calor.

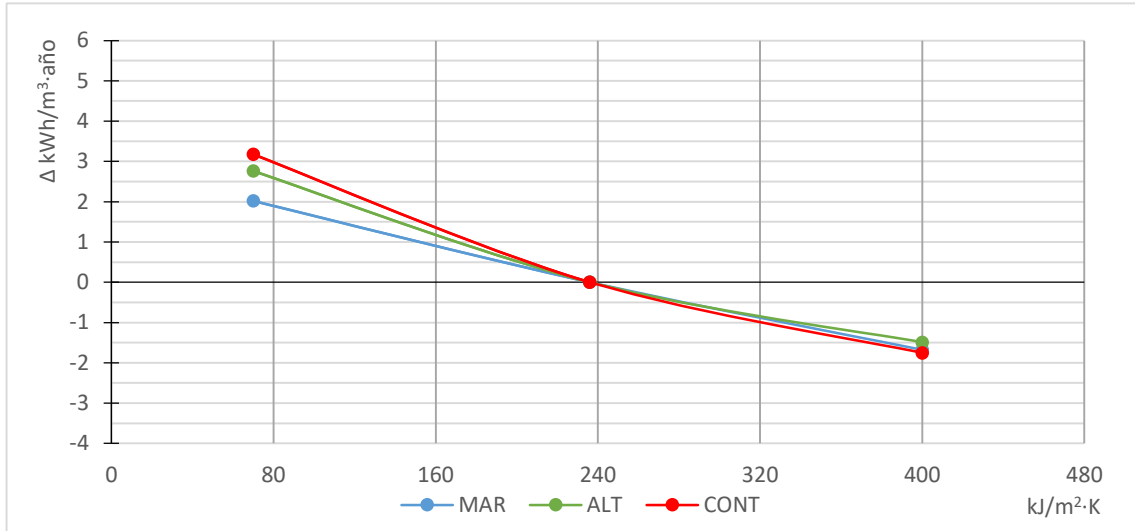
Además del coeficiente de transmitancia térmica, los resultados para los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración revelan que la Fachada B presenta las mayores tasas debido a su mayor superficie por volumen y por las mayores cargas térmicas por radiación solar que la afectan.

Entre las Fachadas C y D, la primera presenta tasas de flujo de calor mayores que la segunda debido a su mayor superficie por volumen habitable.

5.3 CAPACIDAD TÉRMICA

Fueron simulados dos valores distintos de capacidad térmica de las paredes ($70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$; $400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) para comparar con la pared utilizada en los tres edificios ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). En todos los casos se mantuvo el mismo coeficiente de transmitancia térmica de la pared, en $2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. La Figura 83 presenta la variación de la demanda anual de refrigeración del Aula A101 según la capacidad térmica de las paredes de los edificios implantados en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT).

Figura 83: Variación de la demanda anual de refrigeración según la capacidad térmica en las tres aulas



En esa gráfica, se destaca la reducción de la demanda de refrigeración de los tres espacios investigados al adoptar la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), siguiendo casi la misma línea de tendencia, independiente del clima.

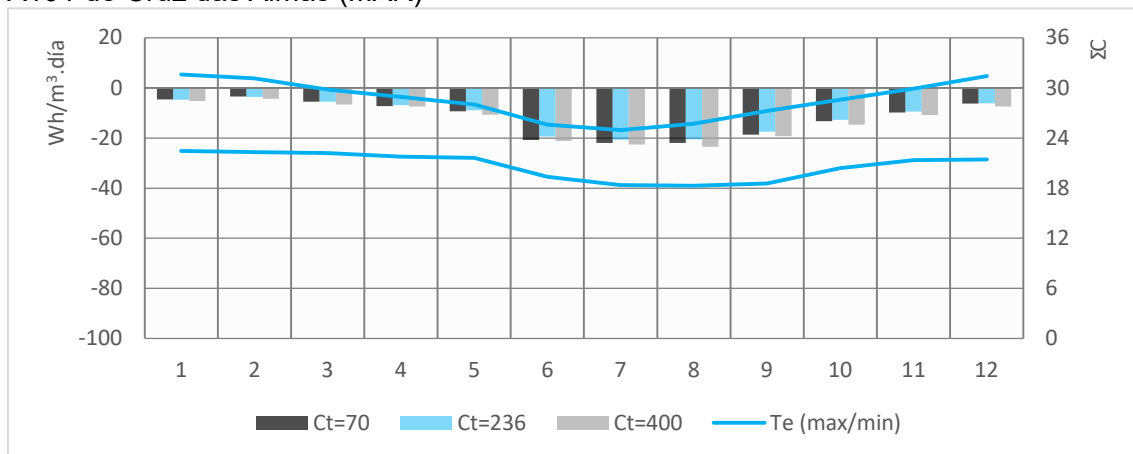
Comparando con los edificios existentes, el ahorro energético anual al adoptar la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es de 2,5%, 4,0% y 2,8% para las Aulas A101 de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT), respectivamente. Mientras tanto, la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización del espacio en 3,0%, 7,3% y 5,0%, respectivamente.

A fin de comprender de forma más detallada el comportamiento térmico de cada pared, se evalúa el impacto térmico del cambio de la capacidad térmica en sus cargas térmicas y en las demandas de refrigeración de cada aula, tanto mensualmente cuanto en los días de mayor y menor demanda de refrigeración.

5.3.1 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según la capacidad térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)

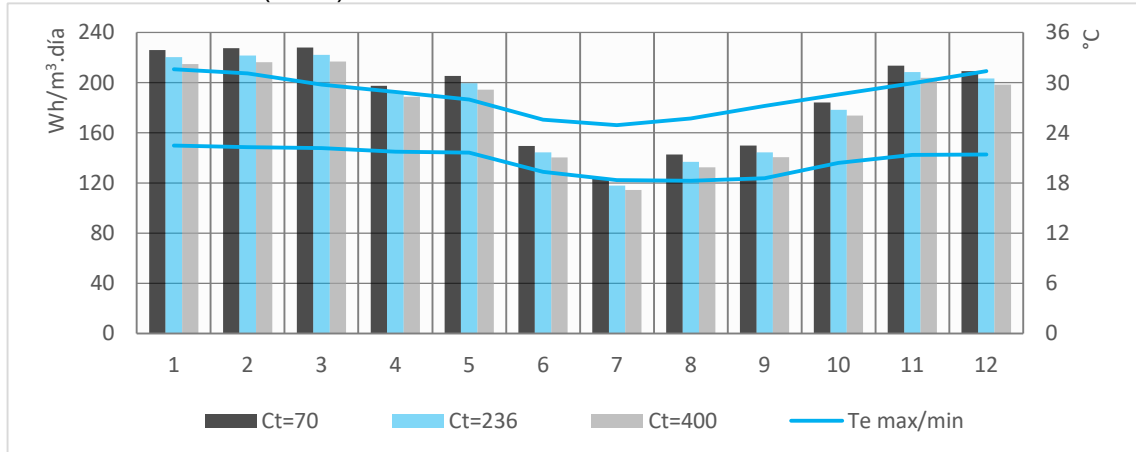
El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) revela disipación del calor por todas las configuraciones de paredes en todos los meses del año (Figura 84). Las pérdidas térmicas por la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) son mayores que la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en todos los meses, mientras que la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra mayor disipación del calor que la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) entre los meses de abril y diciembre.

Figura 84: Carga térmica mensual de las paredes según la capacidad térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)



Al comparar esos resultados con la demanda mensual de refrigeración para cada configuración de pared (Figura 85), se percibe que la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta consumos energéticos menores que la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en todos los meses del año, con reducciones que varían entre 2,0% (abril) y 3,3% (agosto). Los meses que presentan reducciones por encima de 3,0%, julio y agosto, coinciden con los meses con las menores temperaturas: tanto máximas ($24,9^{\circ}\text{C}$ y $25,7^{\circ}\text{C}$, respectivamente) cuanto mínimas ($18,4^{\circ}\text{C}$ y $18,3^{\circ}\text{C}$, respectivamente).

Figura 85: Demanda mensual de refrigeración según la capacidad térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)

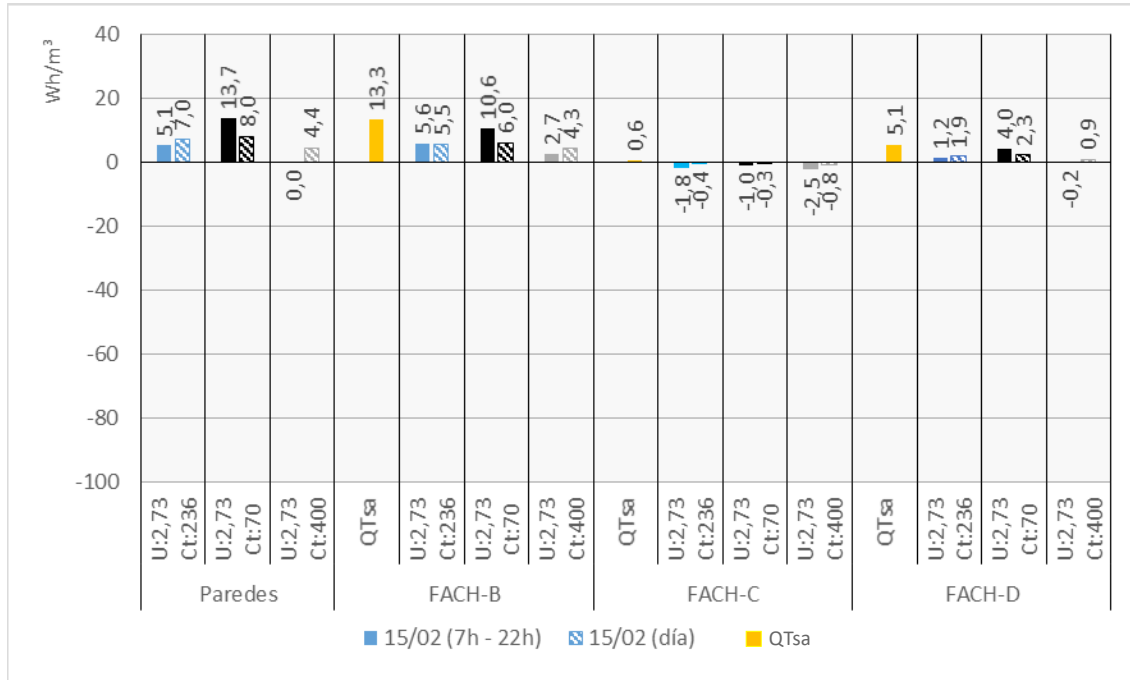


Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra aumento de la demanda de refrigeración en todos los meses, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Ese incremento varía entre 2,4% (noviembre) y 4,4% (julio). O sea, la mayor tasa mensual de disipación del calor por la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) entre los meses de abril y diciembre no da como resultado menor demanda de refrigeración.

En el día típico de mayor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) demuestran que la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la única a no registrar ganancias térmicas entre 7h y 22h (Figura 86).

Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta un incremento de las ganancias térmicas de 168,6%, si comparado con las ganancias térmicas de la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cuando el aula está ocupada.

Figura 86: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) - 15/02



La Fachada B, la pared más afectada por las cargas térmicas por radiación solar, al adoptar la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), registra una reducción de 48,2% de las ganancias térmicas, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) entre 7h y 22h. Mientras tanto, al adoptar la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), presenta un aumento de 89,3% de las ganancias térmicas, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

En la Fachada C, todas las configuraciones de pared presentan pérdidas térmicas. Comparando con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo de ocupación del aula, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta un incremento de la disipación del calor de 38,9%, mientras que la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra una reducción de las pérdidas térmicas de 44,4%.

En la Fachada D, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la única a presentar pérdidas térmicas en el periodo de ocupación del aula. Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento de 233,3% de las ganancias

térmicas, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) entre 7h y 22h.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 87 - 89).

En la Fachada B (Figura 87), la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la que primero cambia la dirección del flujo de calor, de pérdidas para ganancias térmicas. Eso ocurre a las 9h y sigue hasta las 20h. Mientras tanto, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo transmite energía térmica hacia el ambiente interior a partir de las 15h y la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), a las 12h.

En la Fachada C (Figura 88), tanto la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cuanto la menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) inician la transmisión de energía térmica hacia el ambiente interior a las 15h. A pesar de coincidir en el momento, esa gráfica revela que la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra valores mayores de ganancias térmicas, especialmente por la tarde. Mientras tanto, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cambia la dirección de su flujo de calor hacia el ambiente interior a las 18h.

En la Fachada D (Figura 89), la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) empieza a transmitir ganancias térmicas a las 11h, la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), a las 15h, y la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), a las 16h.

Figura 87: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02

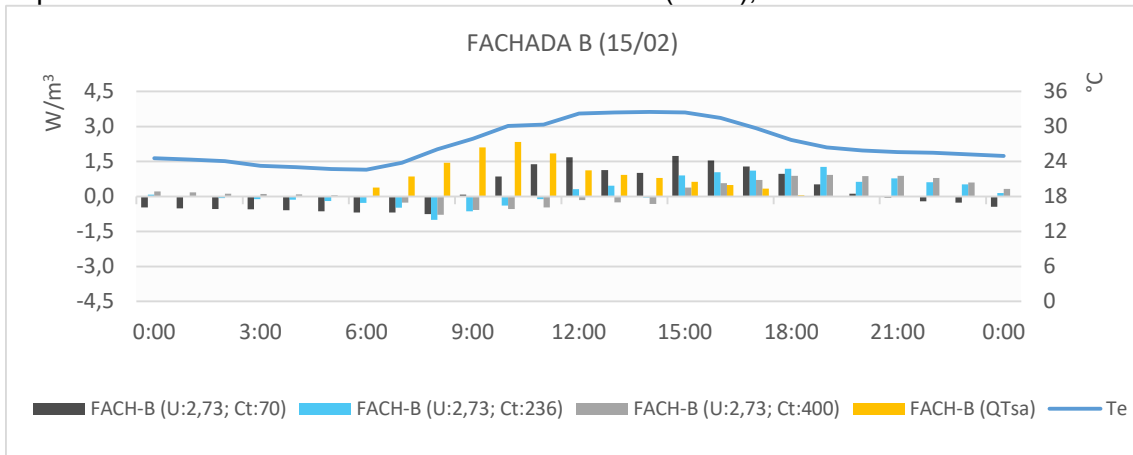


Figura 88: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02

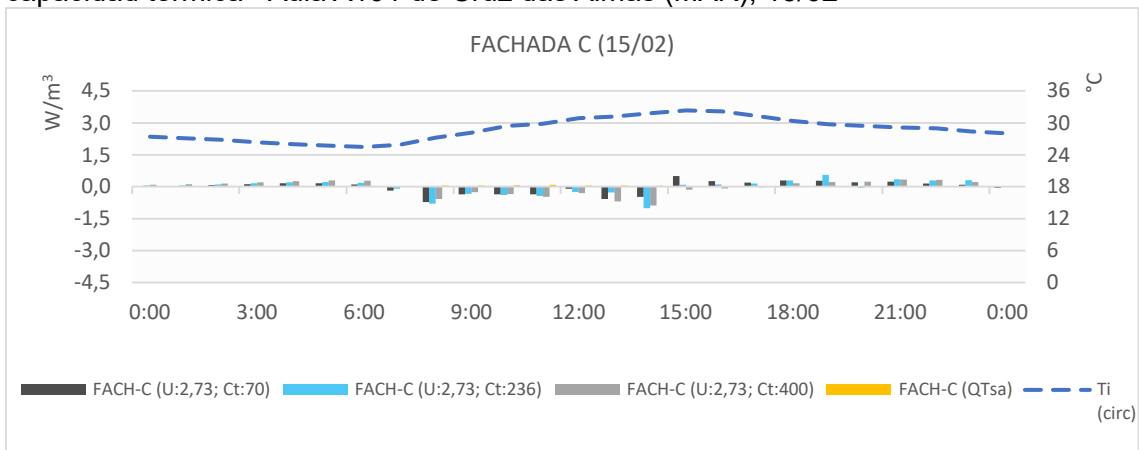
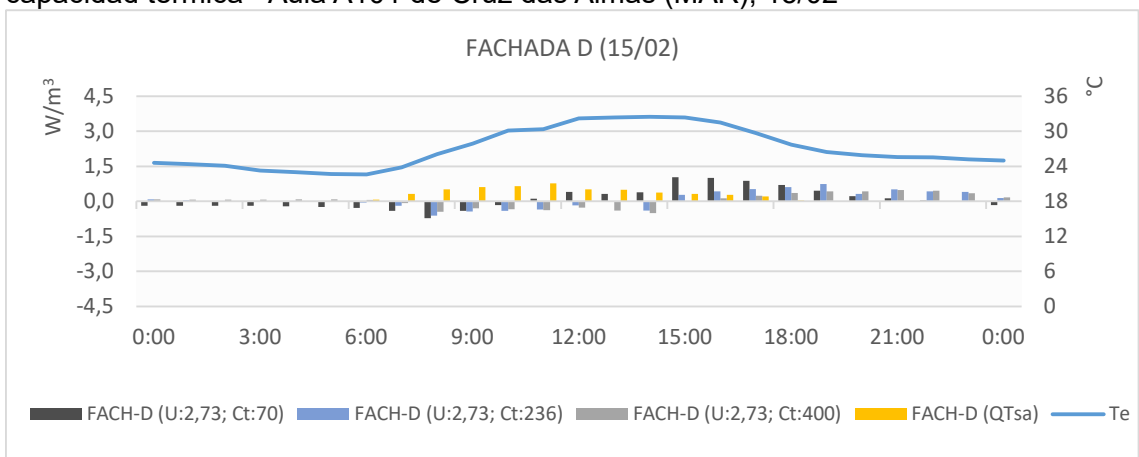
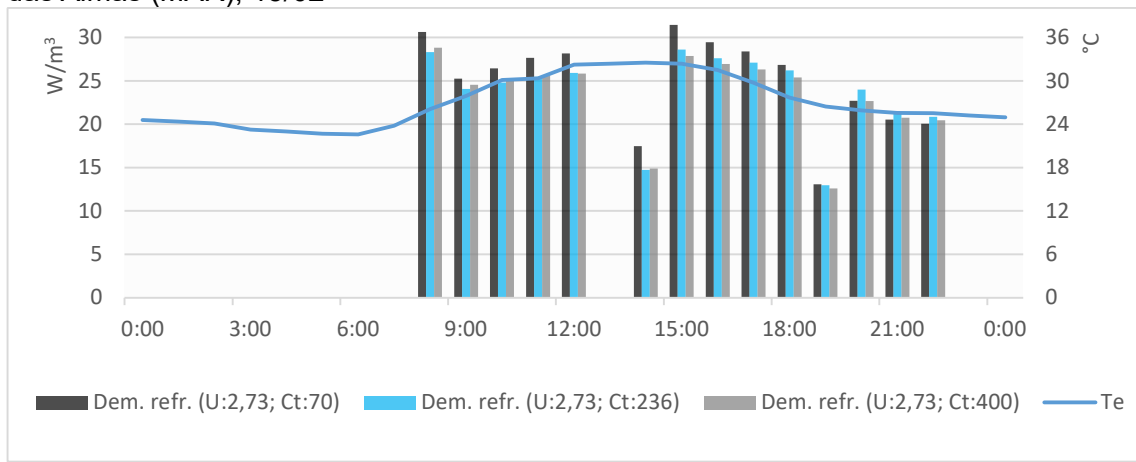


Figura 89: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02



Sobre las demandas de refrigeración según la capacidad térmica para ese día típico (Figura 90), la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 1,2%, mientras que la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 4,9%.

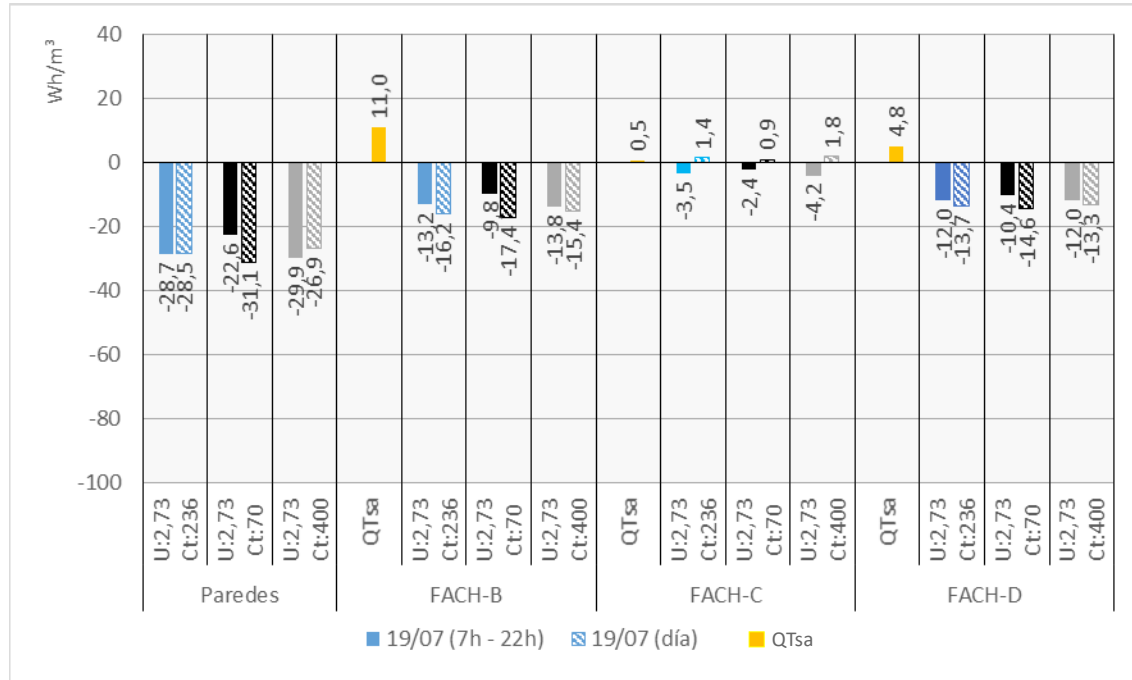
Figura 90: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02



Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según la capacidad térmica, se demuestra que las mayores ganancias térmicas por la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo diurno impactan directamente el consumo energético con la climatización. Sin embargo, debido al mayor retraso térmico proporcionado por la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), su demanda de refrigeración es menor que las otras tres paredes, especialmente por la tarde y por la noche.

En el día típico de menor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) demuestran disipación del calor en el periodo de ocupación del aula, cualquiera que sea la capacidad térmica (Figura 91). Sin embargo, vale destacar que la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta las pérdidas térmicas en 4,3%, mientras que la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las pérdidas térmicas en 21,1%.

Figura 91: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07



La Fachada B, al adoptar la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), presenta aumento de 4,5% de las tasas de disipación del calor con relación a la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las pérdidas térmicas en 25,8% con relación a la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

En la Fachada C, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un incremento de 20,0% en las pérdidas térmicas en el periodo de ocupación del aula, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las pérdidas térmicas en 31,4%, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) entre 7h y 22h.

En la Fachada D, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra la misma tasa de disipación del calor que la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) para el periodo de ocupación del aula. Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta reducción en las pérdidas térmicas de 13,3% para ese mismo periodo.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 92 - 94).

En la Fachada B (Figura 92), la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la única que presenta ganancias térmicas, entre 13h y 15h, periodo que coincide con temperaturas exteriores por encima de 24°C . Además, esa pared es la que presenta las menores tasas de disipación del calor por la mañana, debido principalmente a la radiación solar incidente. Mientras tanto, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la que presenta las mayores tasas de pérdidas térmicas entre 11h y 18h.

En la Fachada C (Figura 93), la menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) inicia las ganancias térmicas a las 17h, mientras que la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) empieza a las 18h, y la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo registra pérdidas térmicas cuando el ambiente está ocupado.

En la Fachada D (Figura 94), ninguna de las tres configuraciones de pared presentan ganancias térmicas cuando el ambiente está ocupado. Vale registrar que, hasta las 10h, la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la que presenta las mayores pérdidas térmicas. Sin embargo, a partir de las 13h, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la que registra las mayores tasas de disipación del calor.

Figura 92: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07

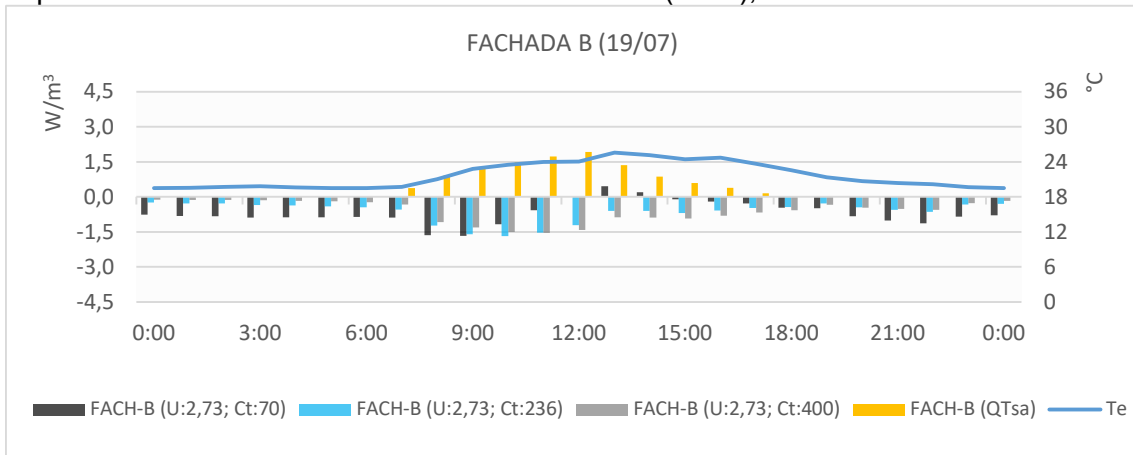


Figura 93: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07

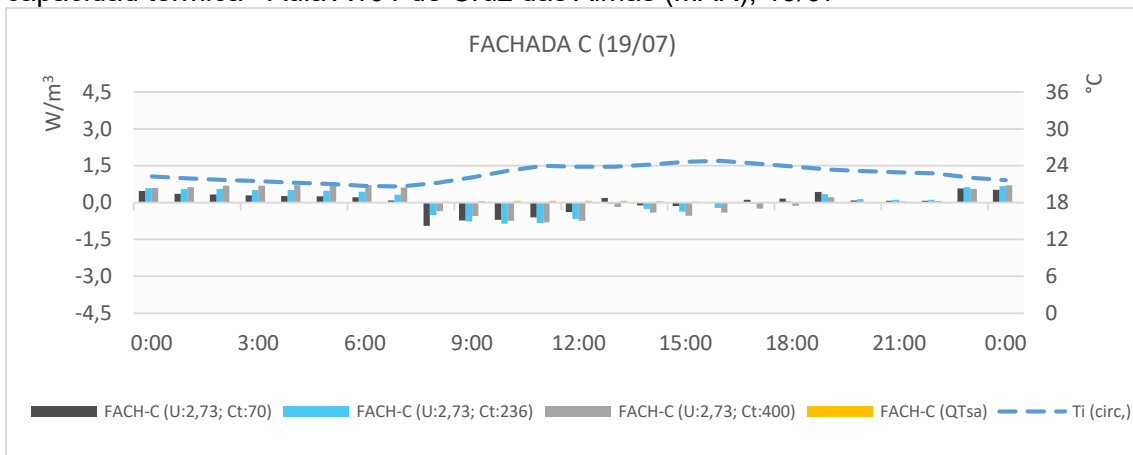
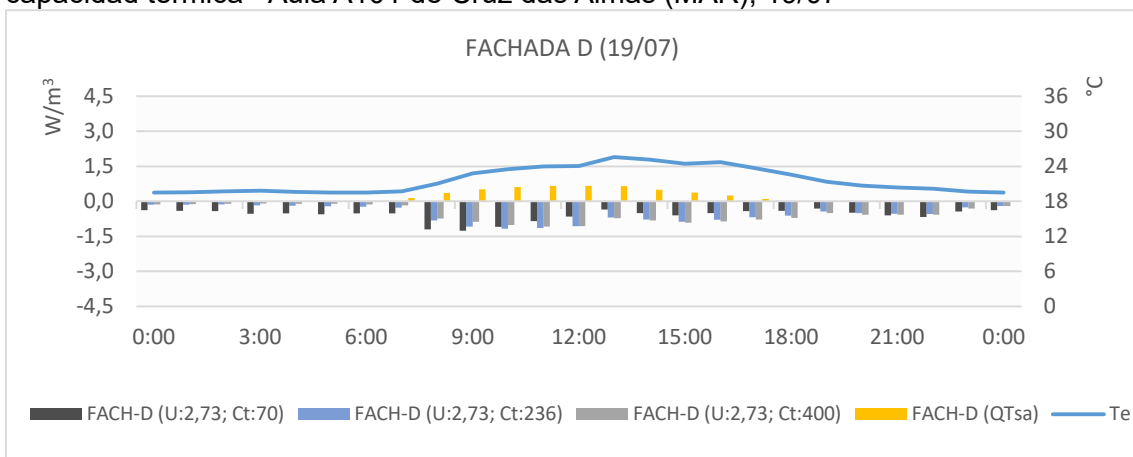
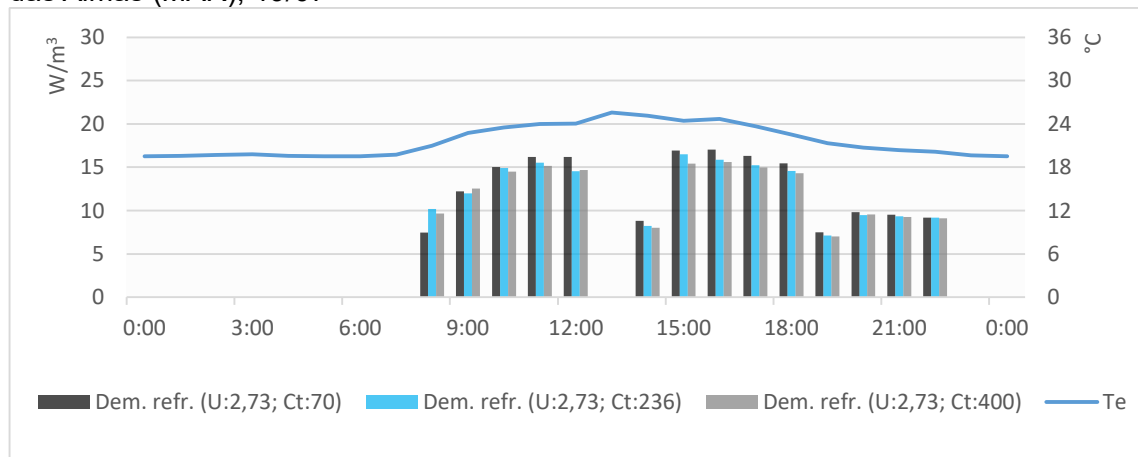


Figura 94: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07



Sobre las demandas de refrigeración según la capacidad térmica para ese día típico (Figura 95), la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 1,7%, mientras que la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 2,9%.

Figura 95: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07



Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según la capacidad térmica, se demuestra que, por un lado, las mayores ganancias térmicas por la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo diurno impactan directamente el consumo energético con la climatización. Por otro lado, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta menores demanda de refrigeración que las otras dos paredes desde las 10h hasta las 22h.

Al adoptar la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) demanda aparatos de climatización con menor potencia: de 37.600 BTU/h ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) para 36.700 BTU/h ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Con relación a la magnitud de las tasas de flujo de calor según la capacidad térmica de la pared, los resultados evidencian que la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores pérdidas y mayores ganancias en función de la temperatura exterior alcanzar sus valores mínimo y máximo, respectivamente.

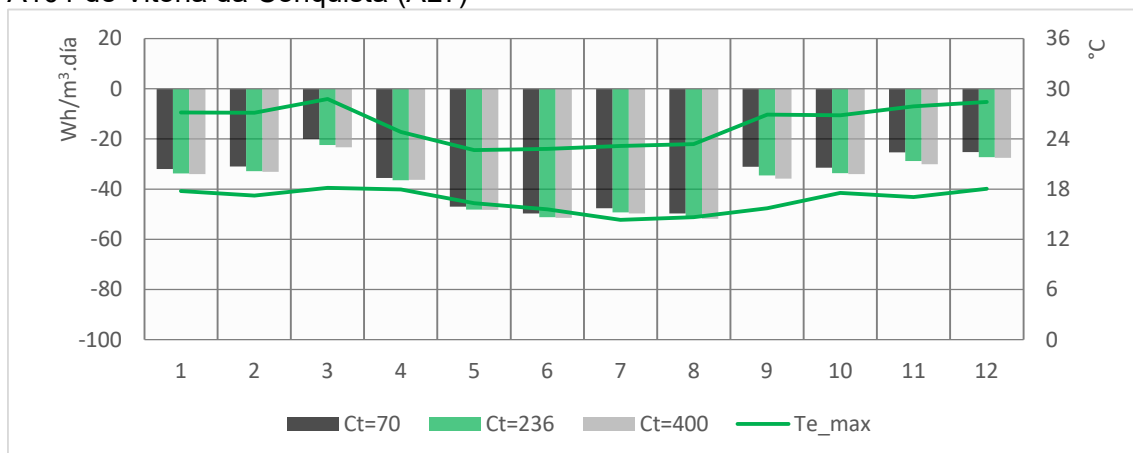
Mientras tanto, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) revela mayor estabilidad en su comportamiento térmico, tardando más en cambiar la dirección del flujo de calor si comparado con las otras dos paredes.

Sin embargo, vale destacar que los balances energéticos diarios de las tres configuraciones de pared presentan valores similares entre sí, debido al mismo coeficiente de transmitancia térmica de las paredes.

5.3.2 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según la capacidad térmica – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)

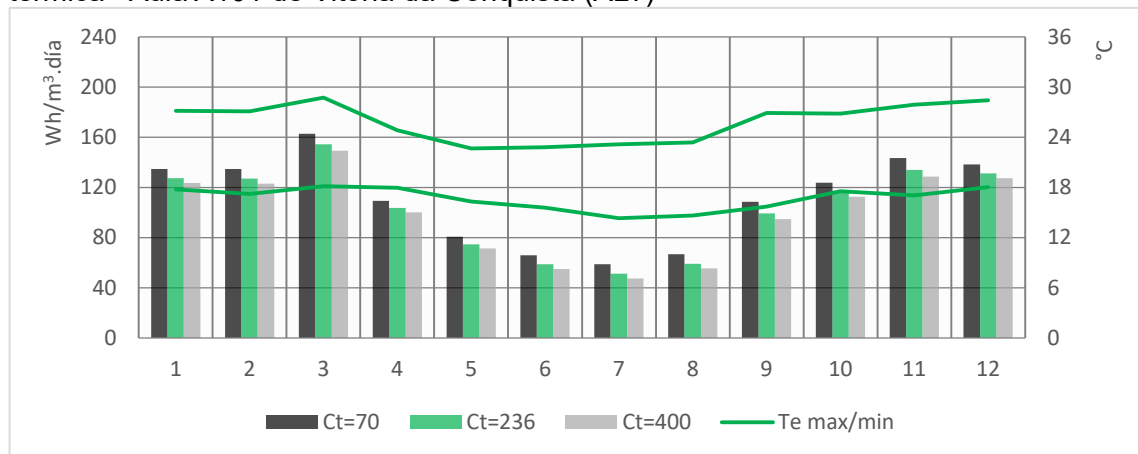
El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) (Figura 96) demuestra que la disipación del calor hacia el ambiente exterior ocurre en todos los meses del año, cualquiera que sea la capacidad térmica de la pared. Las pérdidas térmicas son ligeramente superiores cuando la capacidad térmica es más alta ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Eso ocurre de forma más acentuada cuando bajan las temperaturas mínimas, entre mayo y agosto. Vale destacar que, al adoptar las paredes menos pesadas ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), la variación de las tasas de disipación del calor son menores que las registras con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en todos los meses del año.

Figura 96: Carga térmica mensual de las paredes según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)



La demanda mensual de refrigeración del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) (Figura 97) revela una relación directa entre las mayores tasas de disipación del calor de la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) y menores consumos energéticos con la climatización del espacio. Sus ahorros energéticos varían entre 3,0% (diciembre) a 7,7% (julio) con relación a la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra mayores consumos energéticos con la climatización en todos los meses del año, que varían entre 5,4% (abril) a 14,9% (julio) con relación a la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 97: Demanda mensual de refrigeración de las paredes según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)

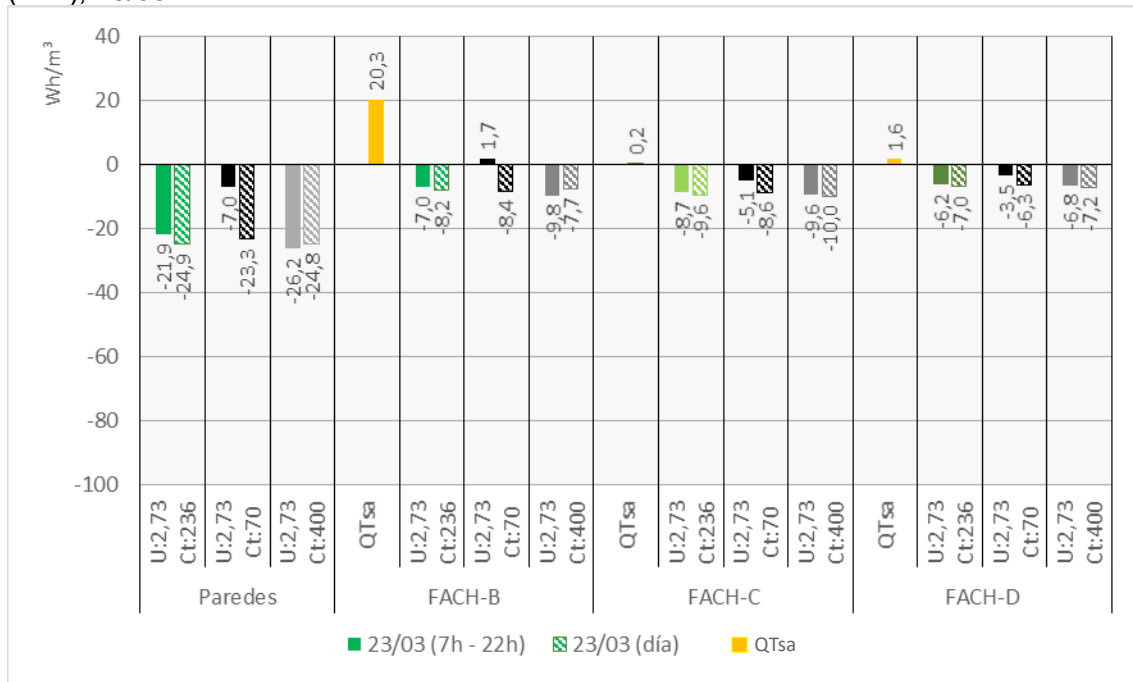


En el día típico de mayor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) presentan pérdidas térmicas (Figura 98). Al comparar la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), se percibe un aumento de 19,6% en las pérdidas térmicas cuando el aula está ocupada. Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta reducción de 68,0% en las tasas de disipación del calor para el mismo periodo. En el ciclo diario, el conjunto de paredes del Aula A101 presentan pérdidas térmicas con valores próximos entre sí.

Las tres paredes presentan pérdidas térmicas similares entre sí, a pesar de la Fachada B poseer la mayor superficie por volumen habitable entre las tres paredes

evaluadas. Además, esa es la pared más afectada por las cargas térmicas por radiación solar.

Figura 98: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03



En la Fachada B, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra aumento de las pérdidas térmicas de 38,9%, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) para el periodo de ocupación del aula. Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra ganancias térmicas para ese mismo periodo.

En la Fachada C, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un incremento en las tasas de disipación del calor de 10,3% entre 7h y 22h, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta disminución de las pérdidas térmicas de 41,3%, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

En la Fachada D, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un incremento de 9,5% en las tasas de disipación del calor entre 7h y 22h, si comparado con la pared

existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta disminución de las pérdidas térmicas de 42,9%, si comparado con la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) para ese mismo periodo.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 99 - 101).

En la Fachada B (Figura 99), la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cambia la dirección del flujo de calor para ganancias térmicas a partir de las 13h y se extiende hasta las 19h. Mientras tanto, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo empieza a transmitir energía térmica hacia el ambiente interior a las 18h, mientras que la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) lo hace a las 16h. Sin embargo, esas dos paredes siguen transmitiendo ganancias térmicas hasta la madrugada del otro día.

En la Fachada C (Figura 100), la menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) transmite energía térmica hacia el ambiente interior entre 16h y 19h, mientras que la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) y la más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo registran pérdidas térmicas durante todo el día.

Igual que en la Fachada C, solo la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) de la Fachada D (Figura 101) transmite ganancias térmicas hacia el ambiente interior, entre 13h y 19h. Tanto la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cuanto la más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo registran pérdidas térmicas durante todo el día.

Figura 99: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03

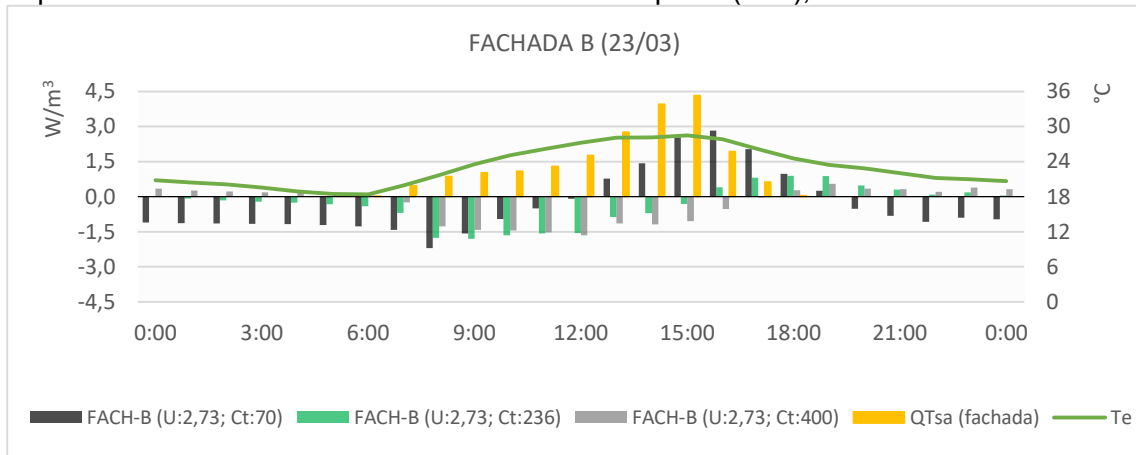


Figura 100: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03

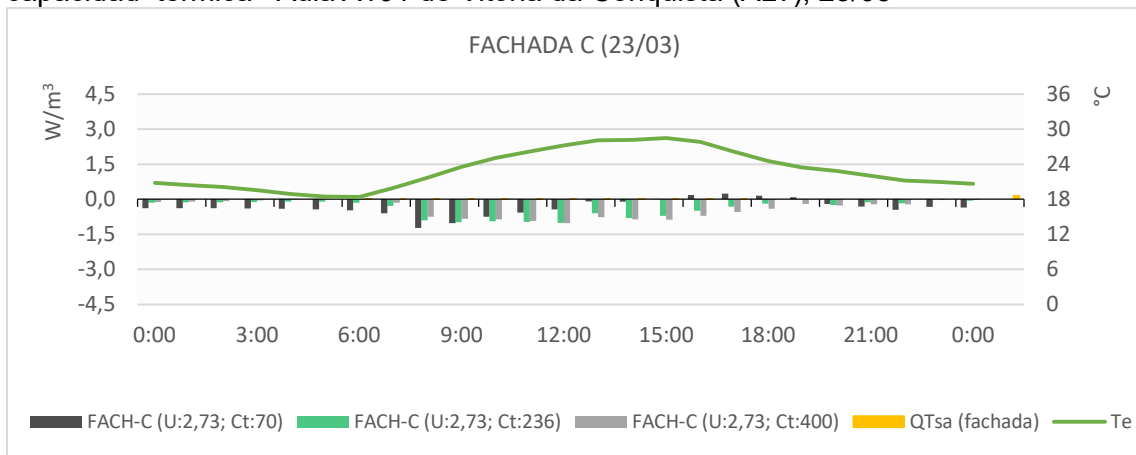
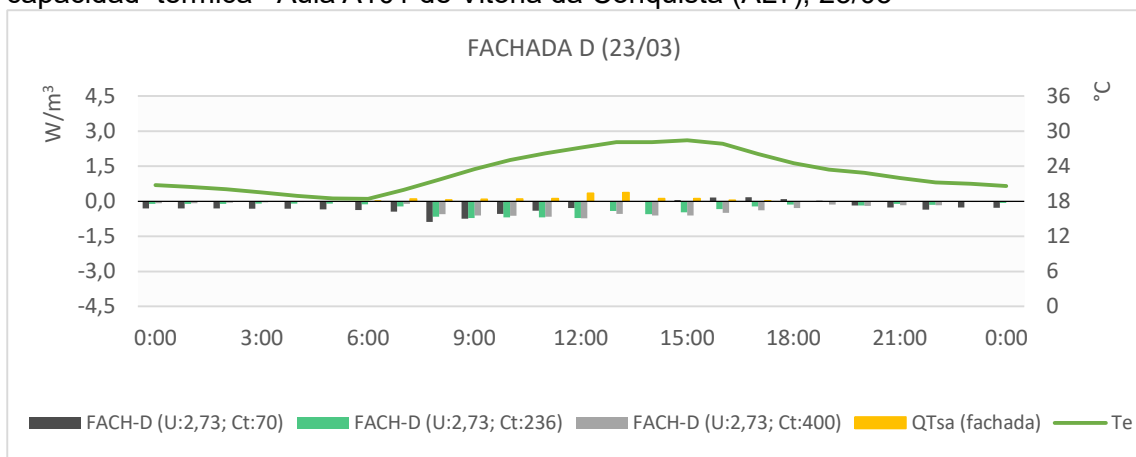
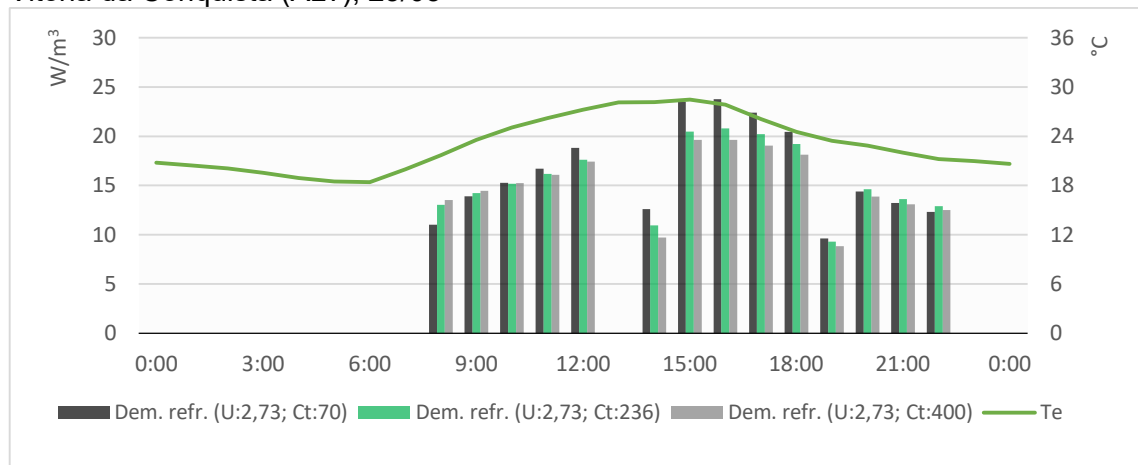


Figura 101: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03



Sobre las demandas de refrigeración para ese día típico según la capacidad térmica, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 3,3%, mientras que la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 4,4% (Figura 102).

Figura 102: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03



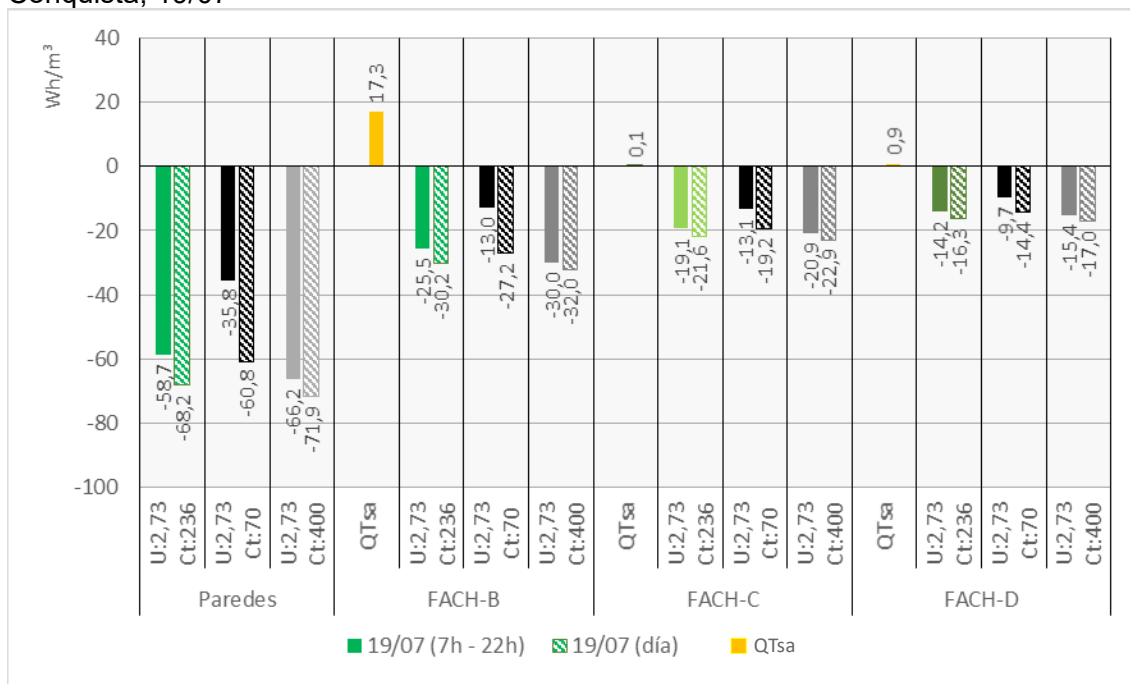
Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según la capacidad térmica, se demuestra que, por un lado, las mayores ganancias térmicas por la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo diurno impactan directamente el consumo energético con la climatización. Por otro lado, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta menores demanda de refrigeración que las otras dos paredes desde las 11h hasta las 20h.

En el día típico de menor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) (Figura 103) demuestran que la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra mayores pérdidas térmicas que la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), tanto en el ciclo diario cuanto entre 7h y 22h. Su tasa de disipación del calor cuando el aula está ocupada es 12,8% mayor que el registrado por la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Por el contrario, la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta menores pérdidas

que la pared existente (Ct=236 kJ/m²·K), tanto en el ciclo diario cuanto entre 7h y 22h, cuando registra una disminución de 39,1% de pérdidas térmicas si comparado a la pared existente (Ct=236 kJ/m²·K).

Figura 103: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07



En la Fachada B, la pared más pesada (Ct=400 kJ/m²·K) registra un aumento de 17,4% de pérdidas térmicas si comparado con la pared existente (Ct=236 kJ/m²·K) en el periodo de ocupación del aula. Mientras tanto, la pared menos pesada (Ct=70 kJ/m²·K) presenta una reducción de 49,1% de sus pérdidas térmicas, si comparado con la pared existente (Ct=236 kJ/m²·K) en ese mismo periodo. En el ciclo diario, sus valores de pérdidas térmicas son similares entre sí.

En la Fachada C, la pared más pesada (Ct=400 kJ/m²·K) registra un incremento de 9,6% en las pérdidas térmicas si comparado con la pared existente (Ct=236 kJ/m²·K) para el periodo de ocupación del aula. Mientras tanto, la pared menos pesada (Ct=70 kJ/m²·K) presenta una reducción de 31,1% de sus pérdidas térmicas, si comparado con la pared existente (Ct=236 kJ/m²·K) en ese mismo periodo.

En la Fachada D, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un incremento de 8,5% en las pérdidas térmicas si comparado con la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) para el periodo de ocupación del aula. Mientras tanto, la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta una reducción de 31,7% de sus pérdidas térmicas, si comparado con la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 104 - 106).

En la Fachada B (Figura 103), tanto la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cuanto la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) no presentan ganancias térmicas a lo largo del día. Mientras tanto, la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra ganancias térmicas entre 13h y 17h. Sin embargo, esa pared demuestra mayor disipación del calor en el periodo nocturno, mientras que la pared pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra mayores pérdidas térmicas por la tarde, si comparada con las otras dos paredes.

Las Fachadas C y D (Figuras 104 – 105) presentan comportamientos térmicos similares. Sus diferencias de valores se deben a la mayor proporción de superficie por volumen de la Fachada C. La pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo presenta mayores pérdidas térmicas que las otras dos al inicio de la mañana y por la noche. En los otros periodos, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores tasas de disipación del calor hacia el ambiente exterior, especialmente por la tarde.

Figura 104: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07

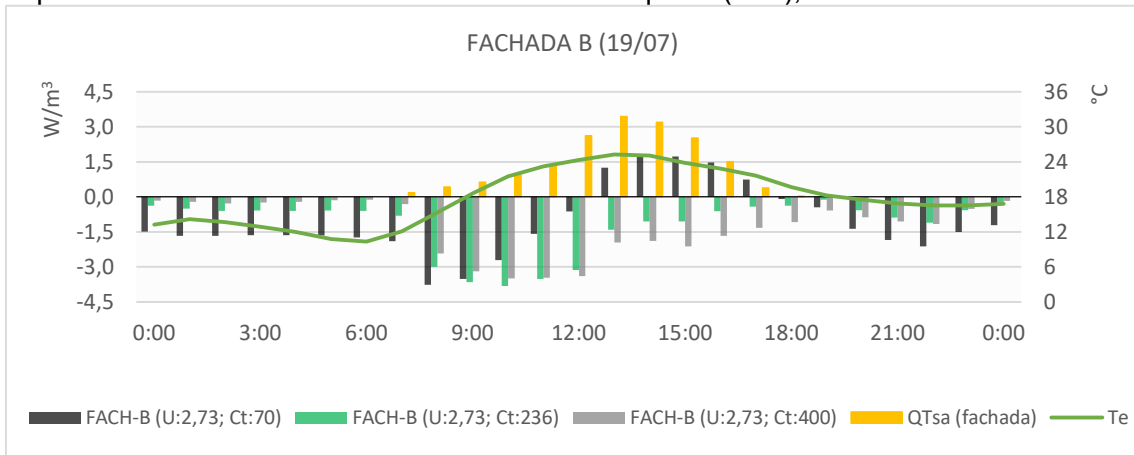


Figura 105: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07

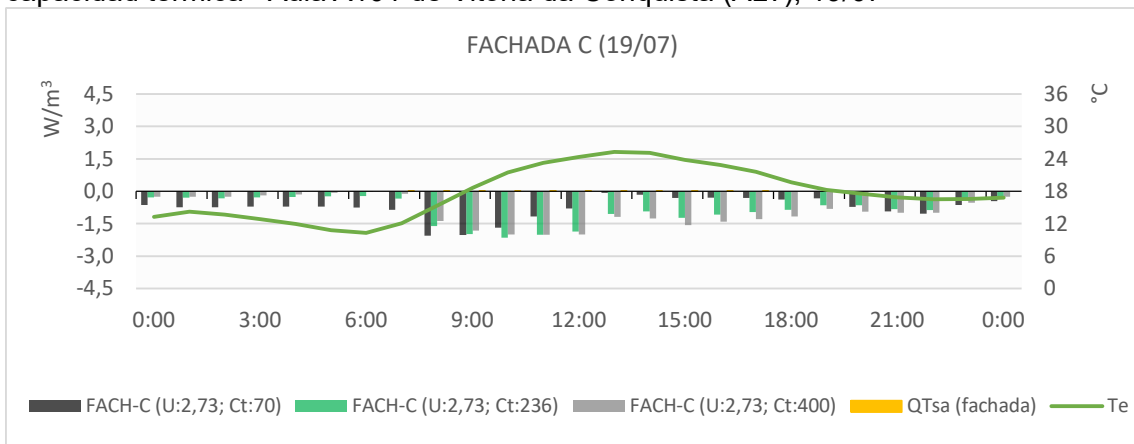
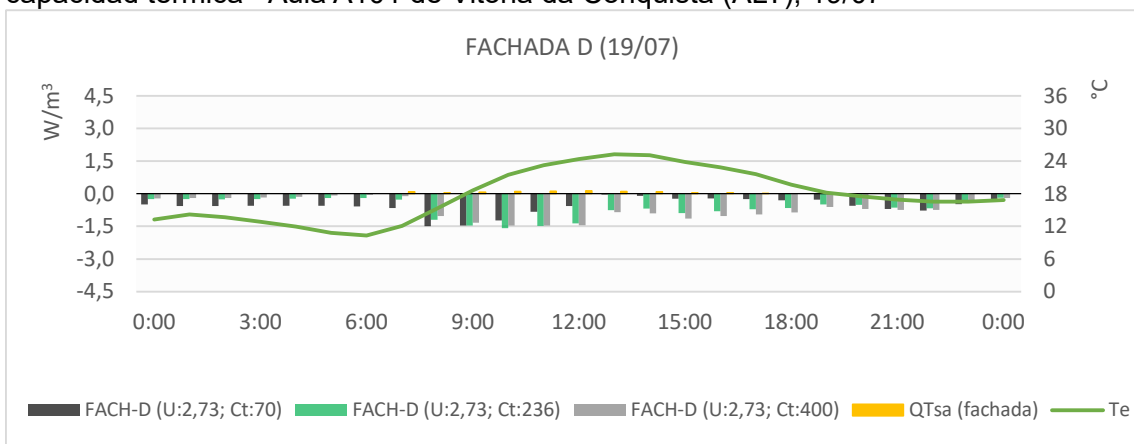
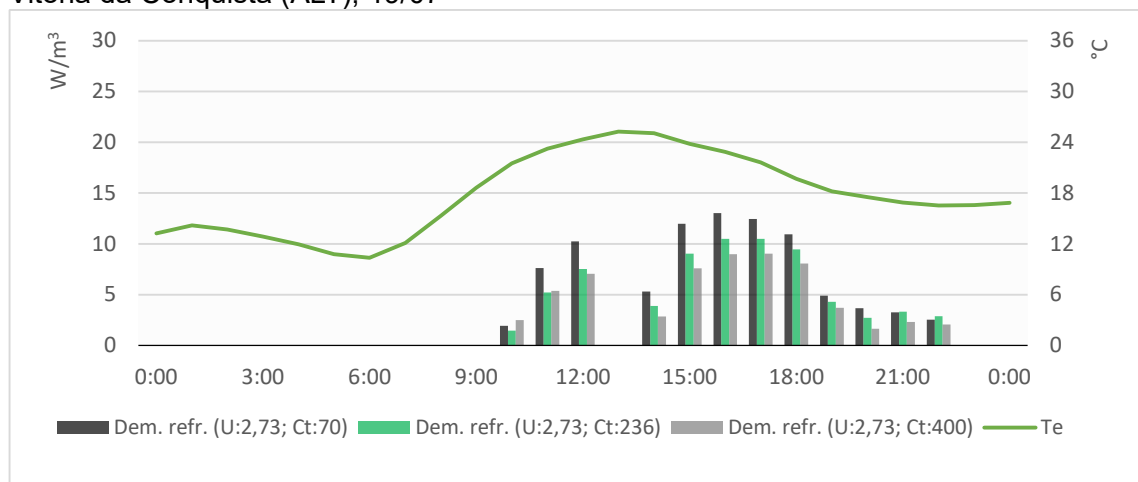


Figura 106: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07



Sobre las demandas de refrigeración según la capacidad térmica, para ese día típico (Figura 107), la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 13,7%, mientras que la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 24,1%.

Figura 107: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07



Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según la capacidad térmica, se demuestra que, por un lado, las mayores ganancias térmicas por la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo diurno impactan directamente el consumo energético con la climatización. Por otro lado, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta menores demanda de refrigeración que las otras dos paredes desde las 12h hasta las 22h.

Al adoptar la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en Vitória da Conquista (ALT), la potencia de los aparatos de climatización disminuye de 33.900 BTU/h para 31.800 BTU/h.

Con relación a la magnitud de las tasas de flujo de calor según la capacidad térmica de la pared, los resultados evidencian que la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores pérdidas y mayores ganancias en función de la temperatura

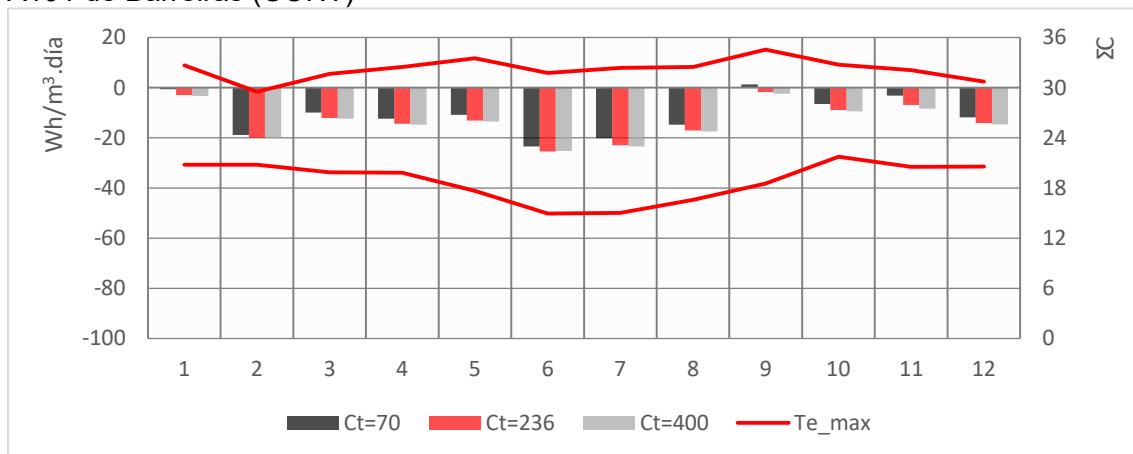
exterior alcanzar sus valores mínimo y máximo, respectivamente.

Mientras tanto, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) revela mayor estabilidad en su comportamiento térmico, tardando más en cambiar la dirección del flujo de calor si comparado con las otras dos paredes.

5.3.3 Análisis de las cargas térmicas de las paredes y de la demanda de refrigeración según la capacidad térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT)

El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes del Aula A101 de Barreiras (CONT) (Figura 108) demuestra que la disipación del calor hacia el ambiente exterior ocurre en todos los meses del año para la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) y para la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Sin embargo, la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra ganancias térmicas mensuales en los meses de enero y septiembre.

Figura 108: Carga térmica mensual de las paredes según la capacidad térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT)

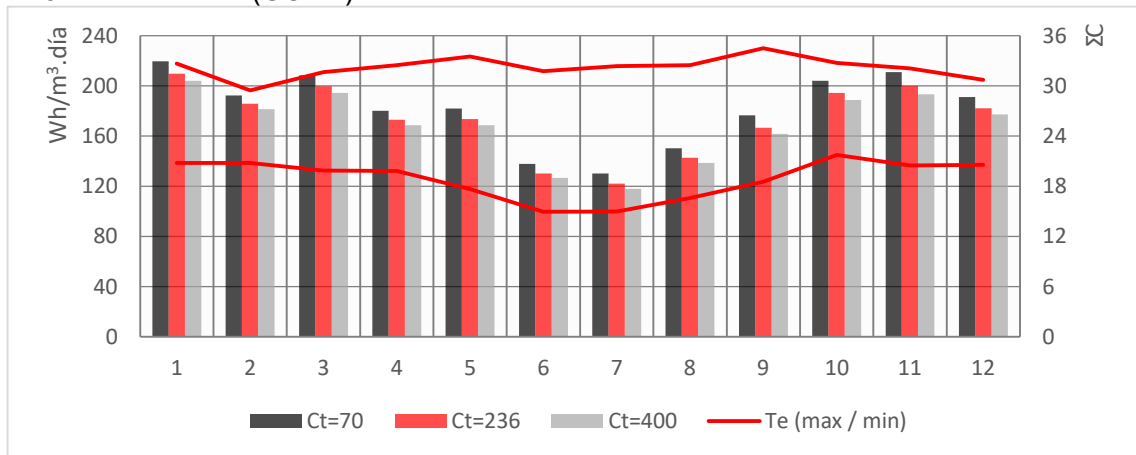


Las pérdidas térmicas son ligeramente superiores al adoptar la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), excepto en los meses de febrero y junio, cuando la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores tasas de disipación del calor.

La demanda mensual de refrigeración del Aula A101 de Barreiras (CONT) (Figura

109) revela que la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta los menores consumos energéticos con la climatización. Sus ahorros energéticos varían entre 2,3% (febrero) a 3,3% (noviembre) con relación a la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra mayores consumos energéticos con la climatización en todos los meses del año, que varían entre 3,6% (febrero) a 6,8% (julio) con relación a la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

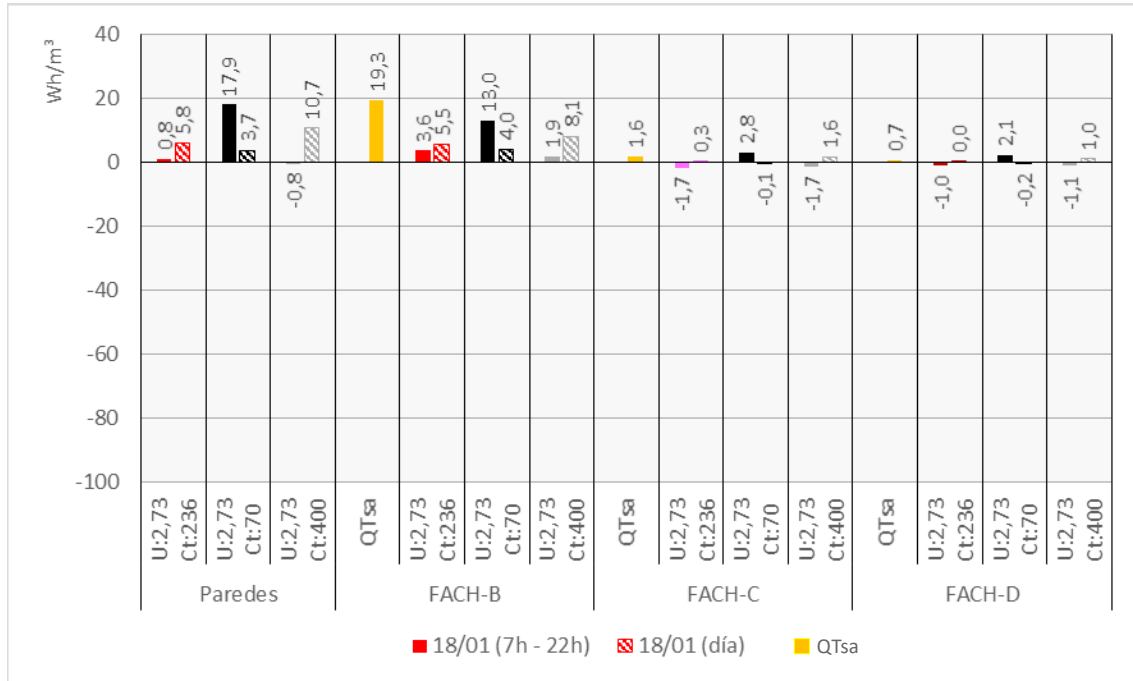
Figura 109: Demanda mensual de refrigeración según la capacidad térmicas – Aula A101 de Barreiras (CONT)



En el día típico de mayor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Barreiras (CONT) presentan ganancias térmicas al adoptar la capacidad térmica de la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) y de la existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), tanto en el ciclo diario cuanto en el periodo de ocupación del aula (Figura 110). Vale destacar el incremento expresivo de las ganancias térmicas de la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), entre 7h y 22h, del orden de 2073,0%, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Sin embargo, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la única a registrar pérdidas térmicas, entre 7h y 22h, pero presenta ganancias térmicas en el ciclo diario, mayores que el registrado por la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 110: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01



La Fachada B presenta ganancias térmicas en las tres configuraciones de pared evaluadas. La pared más pesada (Ct=400 kJ/m²·K) registra disminución de las ganancias térmicas de 46,1%, si comparado con la pared existente (Ct=236 kJ/m²·K) entre 7h y 22h. Mientras tanto, la pared menos pesada (Ct=70 kJ/m²·K) registra un aumento de 266,0% de ganancias térmicas para ese mismo periodo.

Los balances energéticos de las Fachadas C y D presentan comportamientos similares. Entre 7h y 22h, la pared más pesada (Ct=400 kJ/m²·K) presenta pérdidas térmicas similares a la pared existente (Ct=236 kJ/m²·K). Mientras tanto, la pared menos pesada (Ct=70 kJ/m²·K) presenta ganancias térmicas en lugar de pérdidas.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por

cada pared (Figuras 111 – 113).

Figura 111: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01

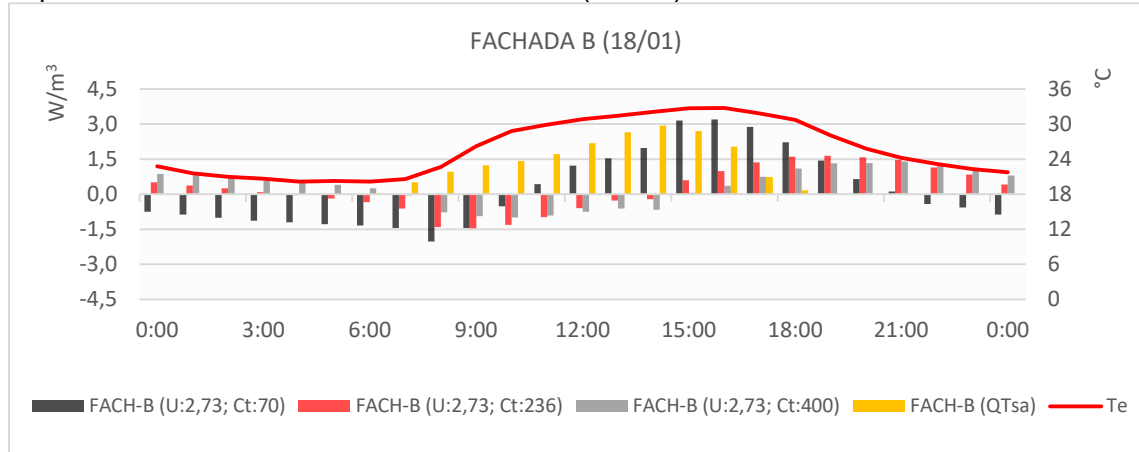


Figura 112: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01

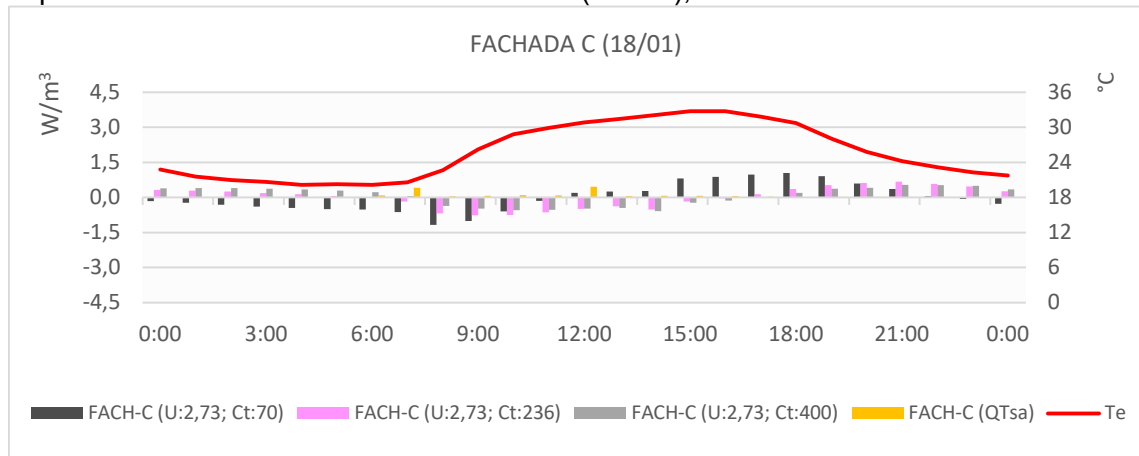
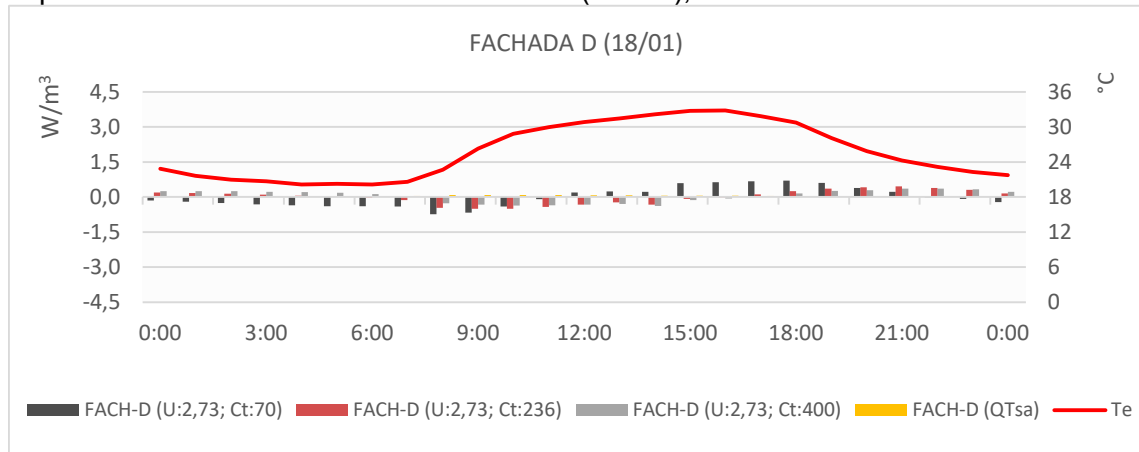


Figura 113: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01



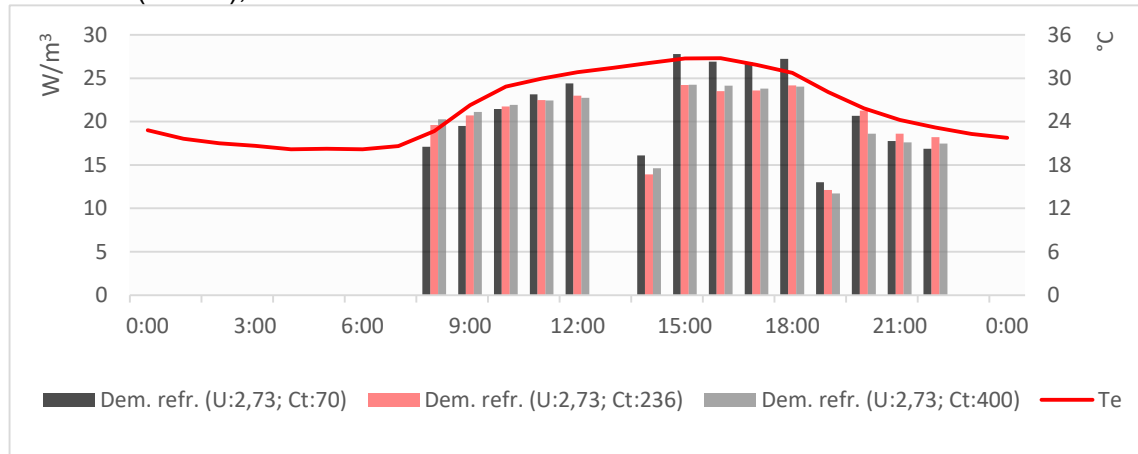
En la Fachada B (Figura 111), la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cambia la dirección del flujo de calor para ganancias térmicas a partir de las 11h. Mientras tanto, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo empieza a transmitir energía térmica hacia el ambiente interior a las 16h, mientras que la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) lo hace a las 15h. Sin embargo, esas dos paredes siguen transmitiendo ganancias térmicas hasta la madrugada del otro día, mientras que la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cambia la dirección del flujo de calor hacia el ambiente exterior a las 22h.

Las Fachadas C y D (Figura 112 - 113), así como en los balances energéticos diarios, también presentan comportamientos térmicos similares. La pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) transmite energía térmica hacia el ambiente interior entre 12h y 22h, mientras que la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) y la más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) lo hacen a partir de las 17h. Ellas siguen registrando ganancias térmicas hasta la madrugada del otro día.

Sobre las demandas de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica, para ese día típico (Figura 114), la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 0,9%, mientras que la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 4,0%.

Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según la capacidad térmica, se demuestra que, por un lado, las mayores ganancias térmicas por la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo diurno impactan directamente el consumo energético con la climatización. Por otro lado, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo presenta reducciones significativas en la demanda de refrigeración, si comparado con la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), a partir de las 20h.

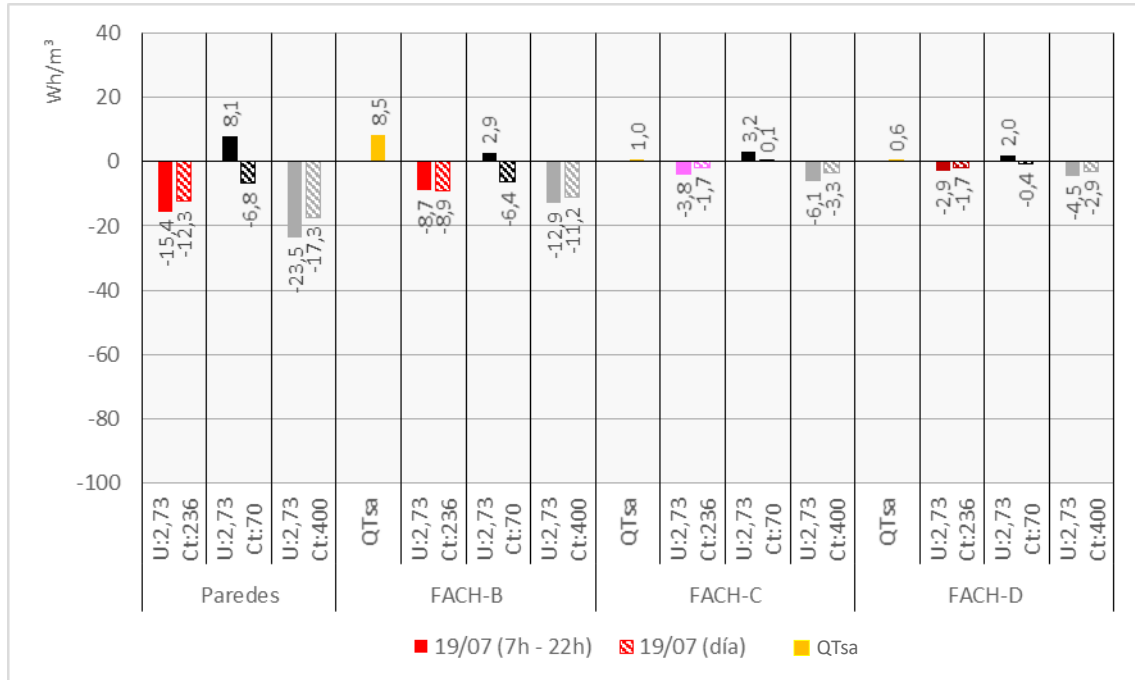
Figura 114: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01



En el día típico de menor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Barreiras (CONT) presentan comportamientos térmicos distintos (Figura 115). La pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta un aumento de la tasa de disipación del calor de 52,2%, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo de ocupación del aula. Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra ganancias térmicas cuando el aula está ocupada. Sin embargo, en el ciclo diario todas las configuraciones de paredes registran pérdidas térmicas.

Al igual que el conjunto de paredes, la Fachada B presenta pérdidas térmicas para las paredes más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) y la existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), tanto en el ciclo diario cuanto en el periodo de ocupación del aula. La pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento de las pérdidas térmicas de 47,7%, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) entre 7h y 22h. Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra ganancias térmicas cuando el aula está ocupada.

Figura 115: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07



Los balances energéticos de las Fachadas C y D presentan comportamientos térmicos similares. Entre 7h y 22h, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra incremento de las pérdidas térmicas, si comparado con la pared existente ($Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$): 19,1% y 16,1% para las Fachadas C y D, respectivamente. Mientras tanto, la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ganancias térmicas en lugar de pérdidas.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 116 - 118).

Figura 116: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07

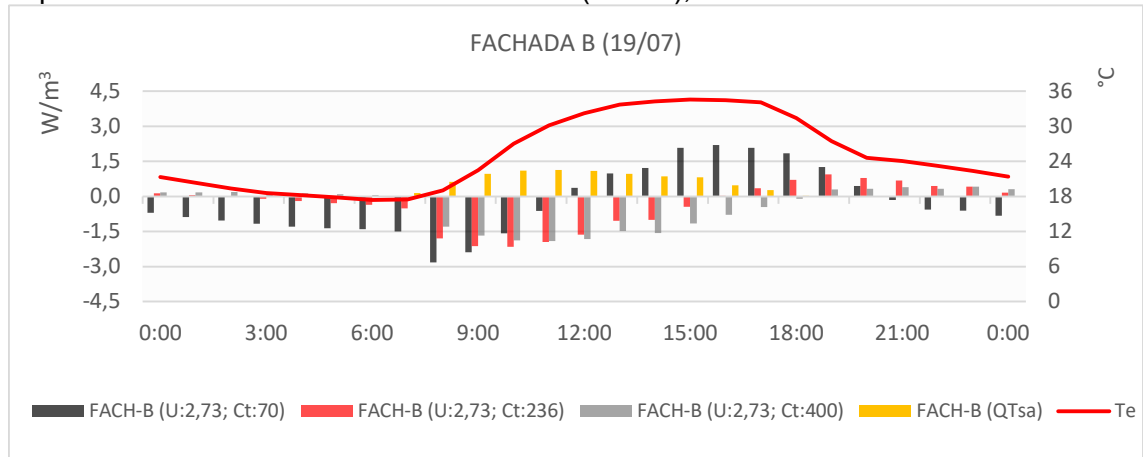


Figura 117: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07

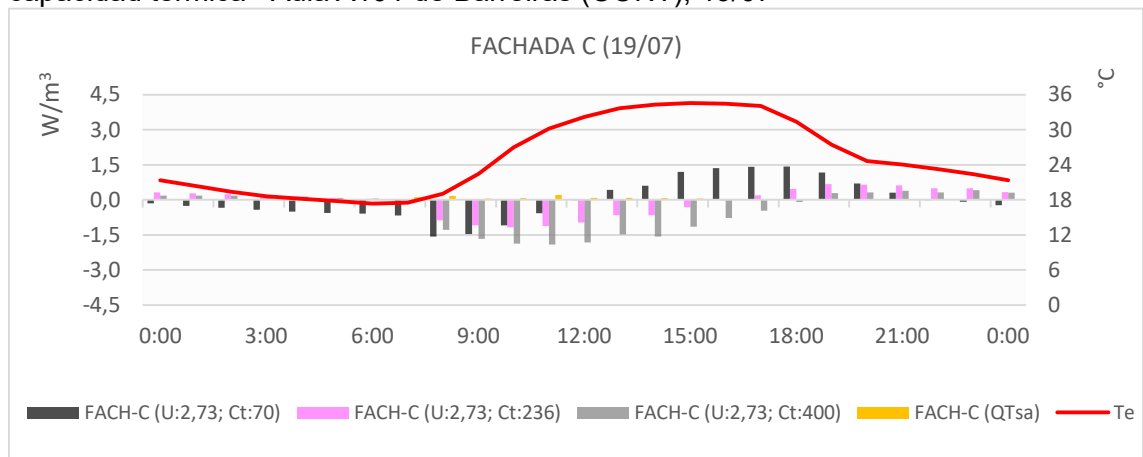
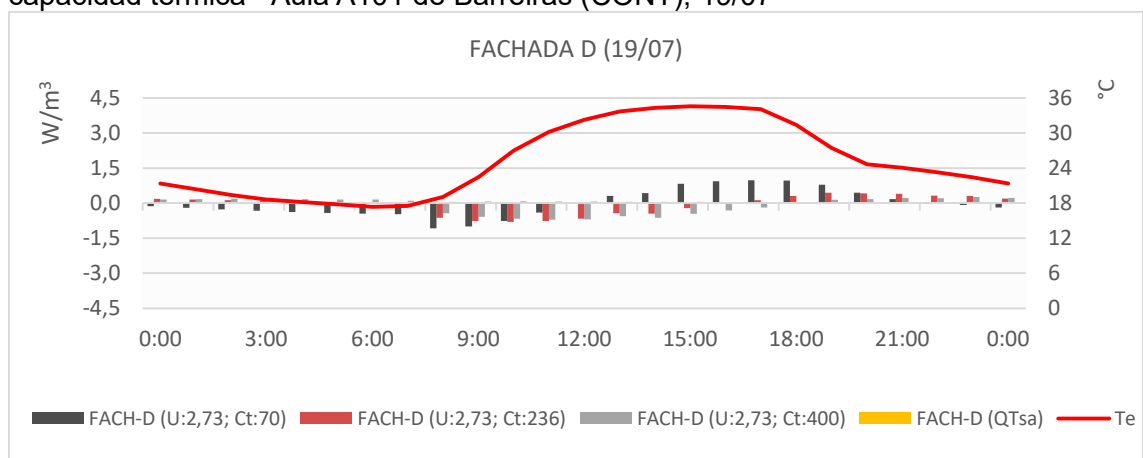


Figura 118: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07



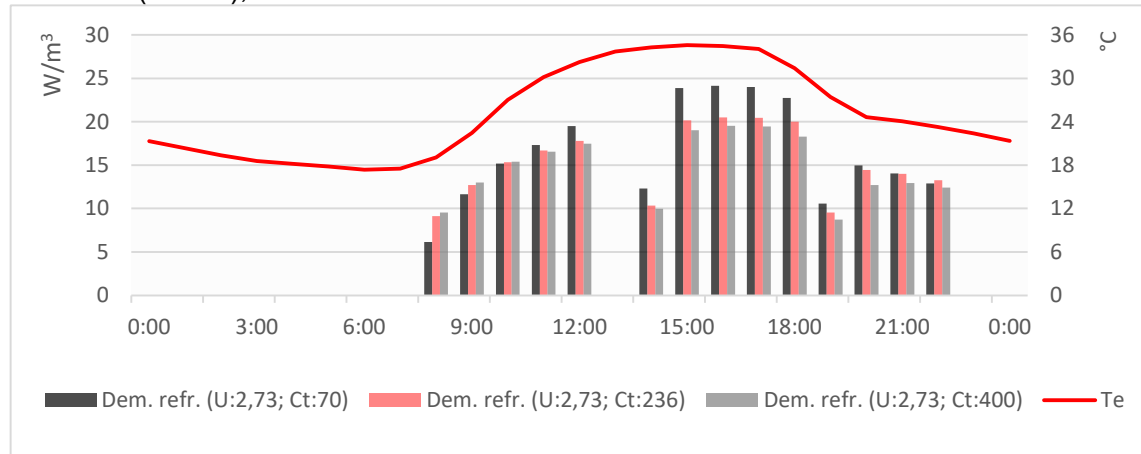
En la Fachada B (Figura 116), la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cambia la dirección del flujo de calor para ganancias térmicas a partir de las 12h y se extiende hasta las 20h. Mientras tanto, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo empieza a transmitir energía térmica hacia el ambiente interior a las 19h, mientras que la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) lo hace a las 17h. Sin embargo, esas dos paredes siguen transmitiendo ganancias térmicas hasta la madrugada del otro día, mientras que la pared menos pesada cambia la dirección del flujo de calor hacia el ambiente exterior a las 21h.

Las Fachadas C y D (Figura 117 - 118), así como en los balances energéticos diarios, también presentan comportamientos térmicos similares. La pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) transmite energía térmica hacia el ambiente interior entre 13h y 21h, mientras que la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) y la más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) lo hacen a partir de las 17h y las 19h, respectivamente. Ellas siguen registrando ganancias térmicas hasta la madrugada del otro día.

Sobre las demandas de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica, para ese día típico (Figura 119), la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 4,4%, mientras que la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 6,9%.

Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según la capacidad térmica, se demuestra que, por un lado, las mayores ganancias térmicas por la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo diurno impactan directamente el consumo energético con la climatización. Por otro lado, la pared más pesada ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo presenta reducciones en la demanda de refrigeración por la tarde y noche, debido principalmente a su mayor retraso térmico.

Figura 119: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07



Al adoptar la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en Barreiras (CONT), la potencia de los aparatos de climatización disminuye de 34.600 BTU/h para 32.300 BTU/h.

Con relación a la magnitud de las tasas de flujo de calor según la capacidad térmica de la pared, los resultados evidencian que la pared menos pesada ($Ct=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores pérdidas y mayores ganancias en función de la temperatura exterior alcanzar sus valores mínimo y máximo, respectivamente.

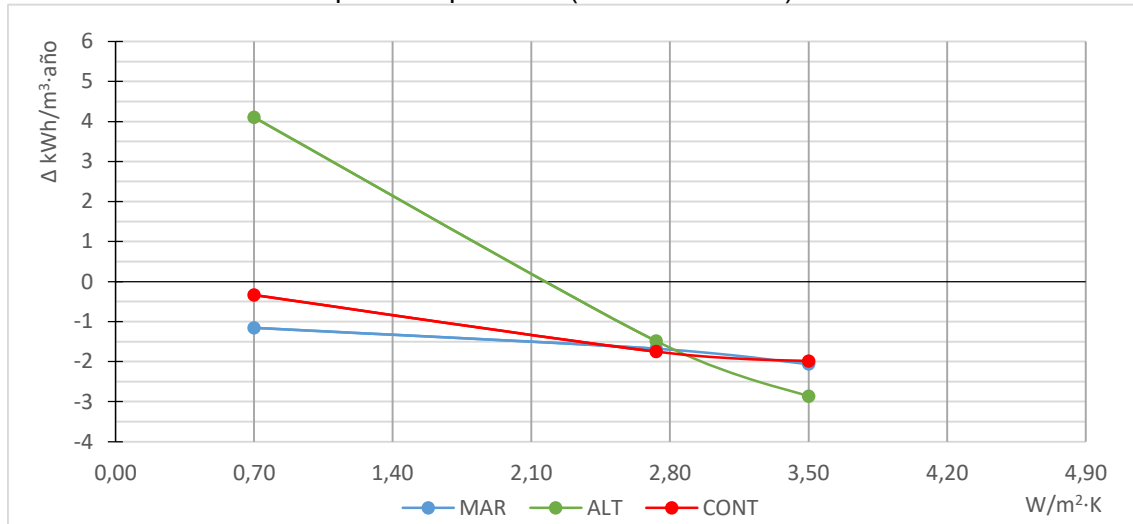
Mientras tanto, la pared más pesada ($Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) revela mayor estabilidad en su comportamiento térmico, tardando más en cambiar la dirección del flujo de calor si comparado con las otras dos paredes.

5.4 COEFICIENTE DE TRANSMITANCIA TÉRMICA EN PAREDES PESADAS

Como la adopción de las paredes externas pesadas demostró un buen desempeño térmico con relación a la demanda de refrigeración en todos los casos investigados, este trabajo académico decide evaluar las posibilidades de utilización de ese tipo de pared con distintos valores de coeficiente de transmitancia térmica: $0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y $3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. La Figura 120 presenta la variación de la demanda anual de refrigeración de esas paredes pesadas en conjunto con la configuración de

las paredes existentes en cada uno de los edificios investigados.

Figura 120: Variación de la demanda anual de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica en paredes pesadas ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en las tres aulas



Por un lado, a pesar de las diferencias climáticas, esas tres gráficas apuntan a una configuración de pared que presenta el mejor desempeño térmico: la pared pesada y poco aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Al utilizar esa configuración de pared, el ahorro en la demanda anual de refrigeración para Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT) es de 3,1%, 7,6% y 3,1%, respectivamente.

Por otro lado, al comparar la demanda de refrigeración de las paredes pesadas con la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), se destaca una diferencia entre el comportamiento térmico de las paredes en sus distintas ubicaciones: el consumo energético de la pared pesada y bien aislada en Vitória da Conquista (ALT) es peor que la pared existente, mientras que en Cruz das Almas (MAR) y Barreiras (CONT) las tres configuraciones de paredes pesadas consumen menos energía que las paredes existentes (Tabla 14).

Tabla 14: Porcentaje de reducción de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica para paredes pesadas

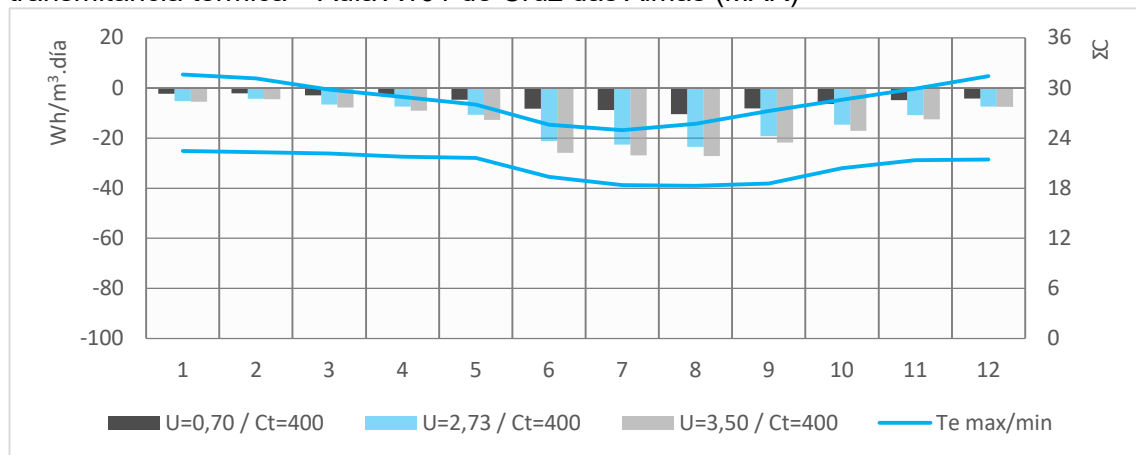
	MAR	ALT	CONT
Pared pesada 01 (U=0,70 W/m ² ·K/ Ct=400 kJ/m ² ·K)	+1,8%	-10,9%	+0,5%
Pared pesada 02 (U=2,73 W/m ² ·K/ Ct=400 kJ/m ² ·K)	+2,5%	+4,0%	+2,8%
Pared pesada 03 (U=3,50 W/m ² ·K/ Ct=400kJ/m ² ·K)	+3,1%	+7,6%	+3,1%

A fin de comprender de forma más detallada el comportamiento térmico de las paredes pesadas, se evalúa el impacto térmico del cambio de sus coeficientes de transmitancia térmica en sus cargas térmicas y en las demandas de refrigeración, tanto mensualmente cuanto en los días de mayor y menor demanda de refrigeración.

5.4.1 Análisis de las cargas térmicas de las paredes pesadas y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)

El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) (Figura 121) revela disipación del calor por todas las paredes evaluadas en todos los meses del año. Las pérdidas térmicas por la pared pesada menos aislada (U=3,50 W/m²·K; Ct=400 kJ/m²·K) son mayores que las otras dos paredes en todos los meses del año.

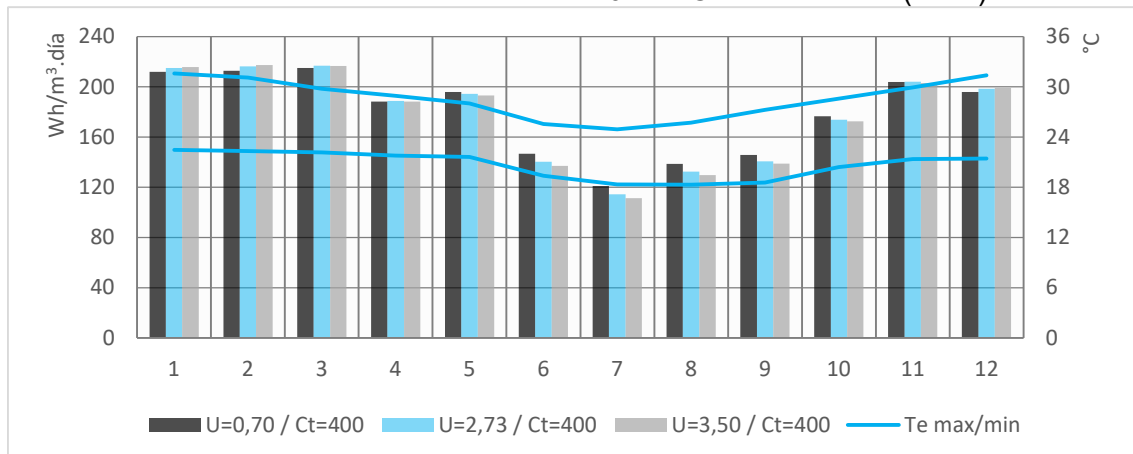
Figura 121: Carga térmica mensual de las paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)



La demanda mensual de refrigeración de esa aula (Figura 122) revela que la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) consigue ahorros energéticos entre marzo y noviembre, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), que varían de 0,1% (marzo) a 2,6% (julio).

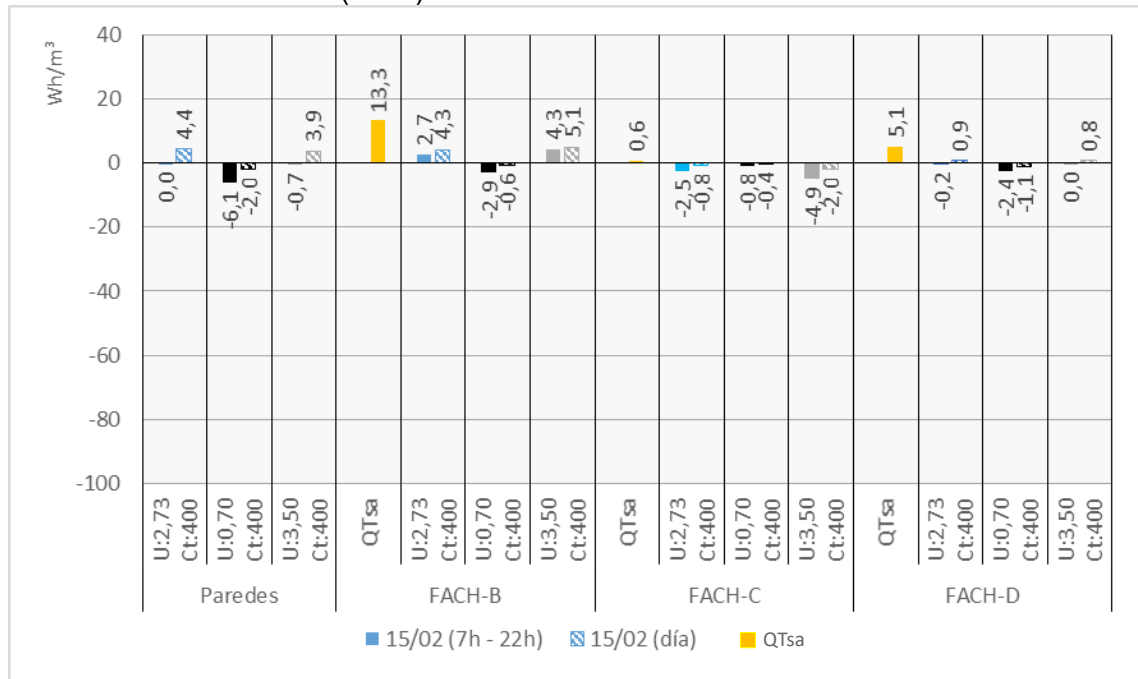
Sin embargo, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), a pesar de presentar mayor consumo energético anual, en algunos meses su consumo energético es el menor entre las tres paredes evaluadas: desde diciembre hasta marzo. Esos ahorros energéticos varían de 0,8% (marzo) a 1,7% (febrero), si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 122: Demanda mensual de refrigeración de las paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR)



En el día típico de mayor demanda de refrigeración, los balances energéticos diarios del conjunto de paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) presentan comportamientos térmicos distintos (Figura 123). La pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta un balance energético cero en el periodo de ocupación del aula. Mientras tanto, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta pérdidas térmicas de $0,7 \text{ Wh/m}^3$ y la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), $6,1 \text{ Wh/m}^3$, para el mismo periodo.

Figura 123: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) - 15/02



En la Fachada B, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un incremento de las ganancias térmicas de 59,3% en el periodo de ocupación del aula, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cambia las tasas de flujo de calor, de ganancias para pérdidas térmicas, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

En la Fachada C, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento de las pérdidas térmicas de 96,0% en el periodo de ocupación del aula, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las tasas de disipación del calor en 68,0%, al comparar con esa misma pared en ese periodo.

En la Fachada D, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra balance energético cero en el periodo de ocupación del aula. Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cambia las tasas de flujo de calor, de ganancias para pérdidas térmicas, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese periodo.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 124 – 126).

En la Fachada B (Figura 124), la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta pérdidas térmicas ocurren hasta las 18h. Mientras tanto, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ganancias térmicas a partir de las 15h. En esas dos paredes, la transmisión de energía térmica hacia el ambiente interior sigue hasta la madrugada del otro día.

En la Fachada C (Figura 125), la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta las mayores tasas de disipación del calor y registra ganancias térmicas a partir de las 19h. Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ganancias térmicas a partir de las 15h. En esas dos paredes, la transmisión de energía térmica hacia el ambiente interior sigue hasta la madrugada del otro día.

En la Fachada D (Figura 126), la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta pérdidas térmicas hasta las 19h. Mientras tanto, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ganancias térmicas a partir de las 16h. En esas dos paredes, la transmisión de energía térmica hacia el ambiente interior sigue hasta la madrugada del otro día.

Figura 124: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02

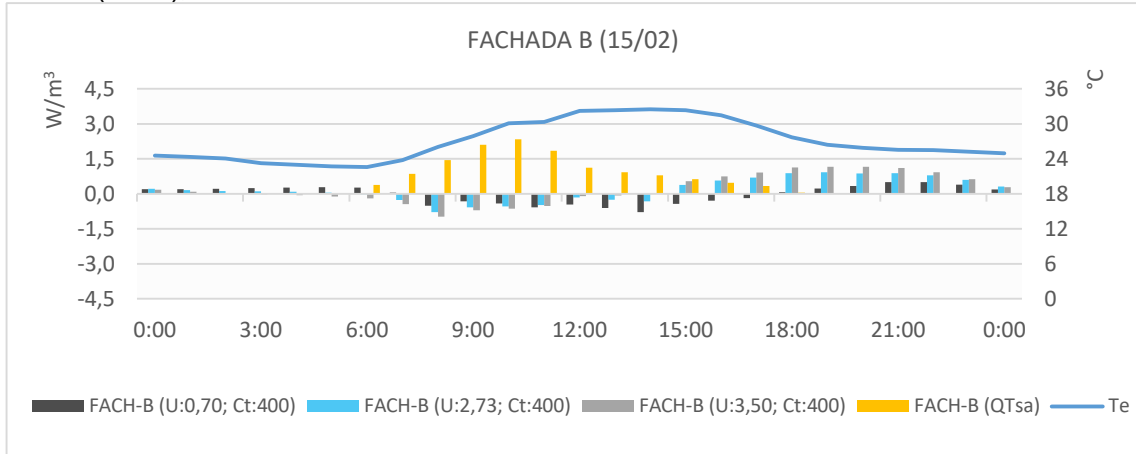


Figura 125: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02

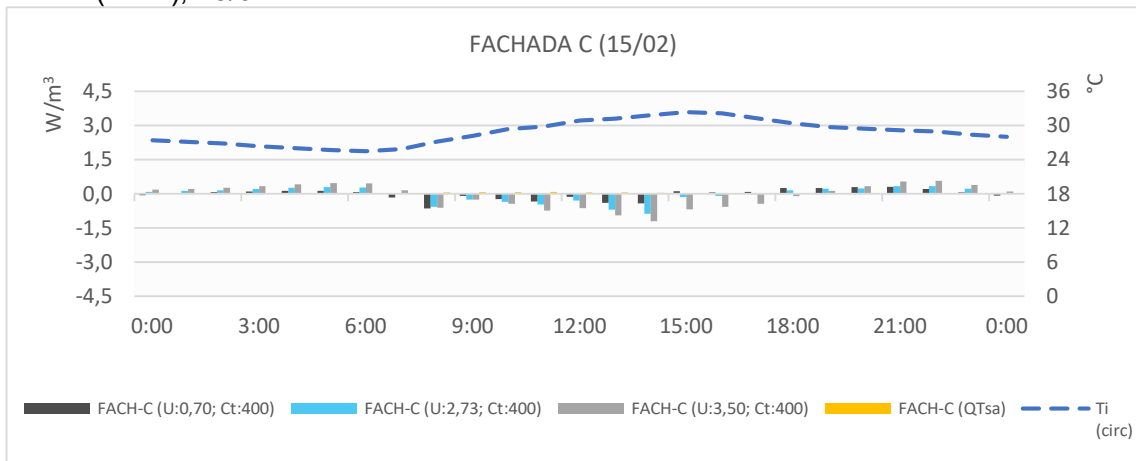
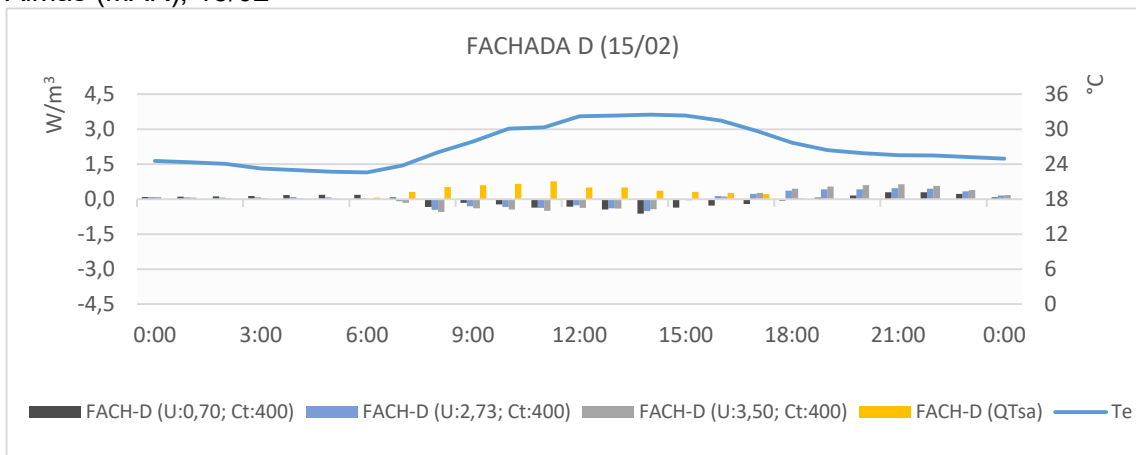
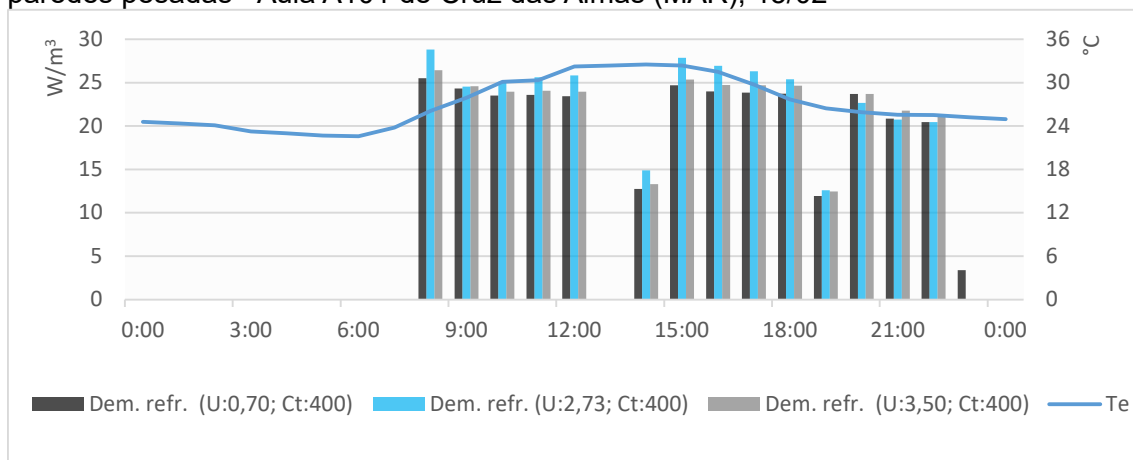


Figura 126: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02



Sobre las demandas de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica, para ese día típico (Figura 127), la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 3,9%, mientras que la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) la supera, registrando un ahorro energético de 5,5%. Ambos resultados consideran como referencia la demanda de refrigeración de la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 127: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02

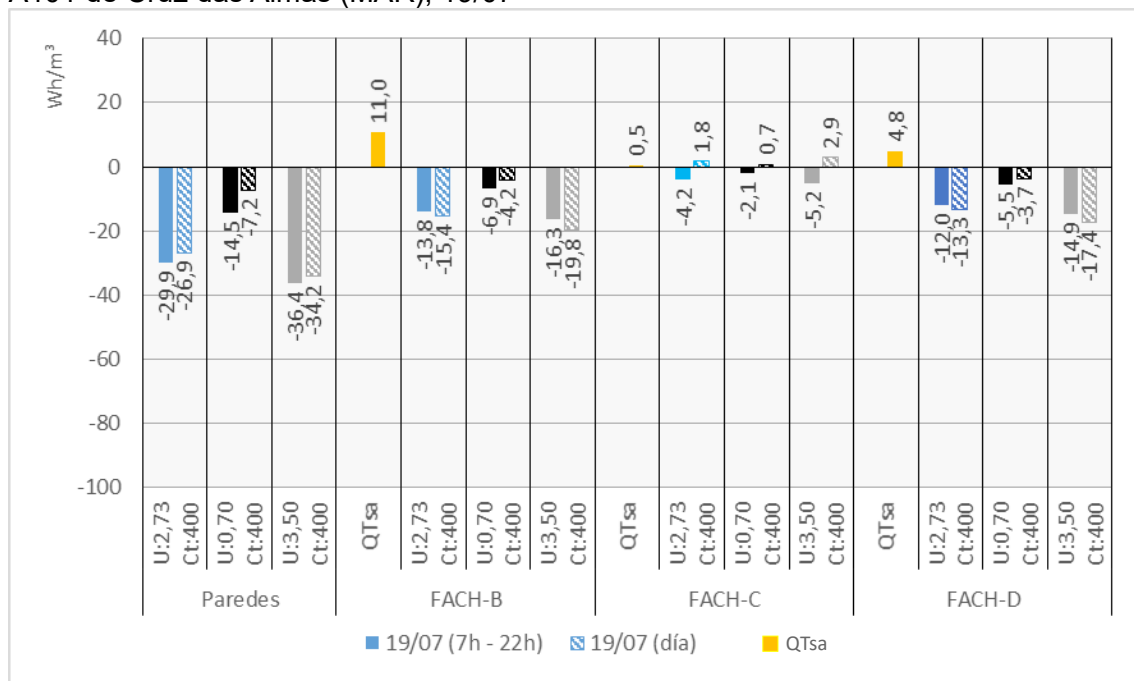


Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica para paredes pesadas, se revela que, por un lado, la estrategia de aislar las paredes logra mayores ahorros energéticos debido al comportamiento térmico de las paredes expuestas al ambiente exterior. Por otro lado, la estrategia de permitir mayores tasas de flujo de calor por las paredes también consigue ahorros energéticos debido al comportamiento térmico de la Fachada C. Vale destacar que, en ese caso, su mayor superficie por volumen habitable juega un papel fundamental en esa estrategia.

En el día típico de menor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) presentan pérdidas térmicas, cualquiera que sea el coeficiente de transmitancia térmica para paredes pesadas (Figura 128). La pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400$

$\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un incremento de las pérdidas térmicas de 21,7%, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) entre 7h y 22h. Con la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) hay una reducción de las pérdidas térmicas de 51,5%.

Figura 128: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07



En la Fachada B, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta un aumento de las pérdidas térmicas de 18,1% en el periodo de ocupación del aula, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las pérdidas térmicas en 50,0% si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

En la Fachada C, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento de las pérdidas térmicas de 23,8% en el periodo de ocupación del aula, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las tasas de disipación del calor en 50,0%, al comparar con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

En la Fachada D, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento en las tasas de disipación del calor de 24,2% entre 7h y 22h, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las pérdidas térmicas en 54,2% si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 129 – 131).

En la Fachada B (Figura 129), ninguna de las configuraciones de paredes registran ganancias térmicas en el periodo de ocupación del aula. La pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la que presenta las mayores tasas de disipación del calor, mientras que la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra las menores pérdidas térmicas entre 7h y 22h.

En la Fachada C (Figura 130), la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta las mayores tasas de disipación del calor y registra ganancias térmicas a partir de las 19h. Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) no presenta ganancias térmicas en el periodo de ocupación del aula.

Figura 129: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07

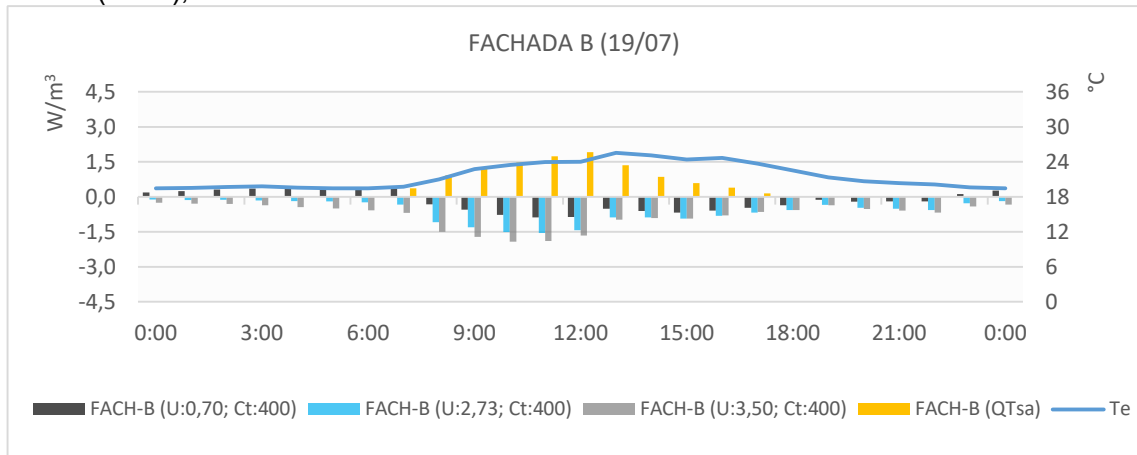


Figura 130: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07

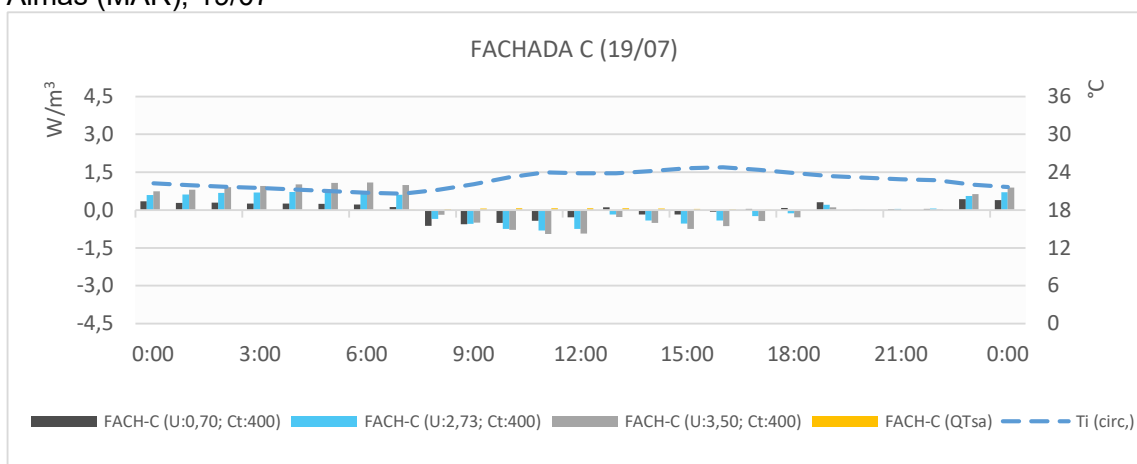
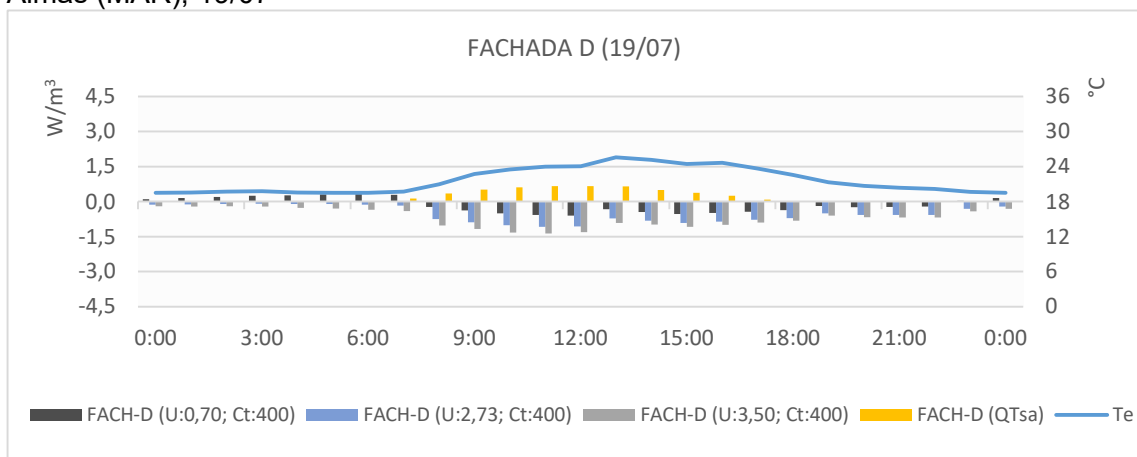


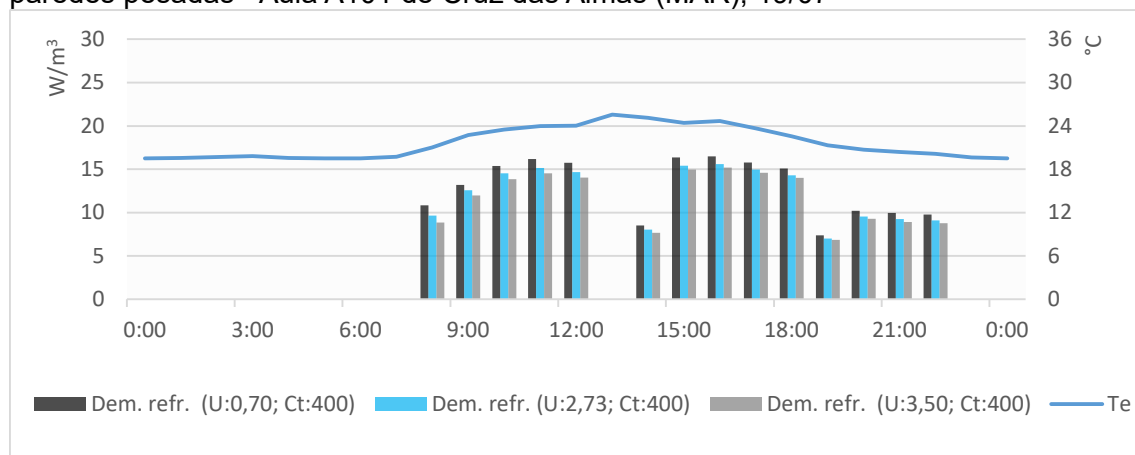
Figura 131: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07



En la Fachada D (Figura 131), al igual que en la Fachada B, ninguna de las configuraciones de paredes registran ganancias térmicas en el periodo de ocupación del aula. La pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la que presenta las mayores tasas de disipación del calor, mientras que la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra las menores pérdidas térmicas entre 7h y 22h.

Sobre las demandas de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica, para ese día típico (Figura 132), la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 3,7%, mientras que la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento del consumo energético con climatización de 6,6%. Ambos resultados consideran como referencia la demanda de refrigeración de la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 132: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07



Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica, se demuestra la influencia de la disipación del calor por las paredes en la reducción de la demanda de refrigeración. El ahorro energético promovido por la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) ocurre en todas las horas del día, debido a las

mayores pérdidas térmicas promovidas por esa pared en el periodo de ocupación del aula.

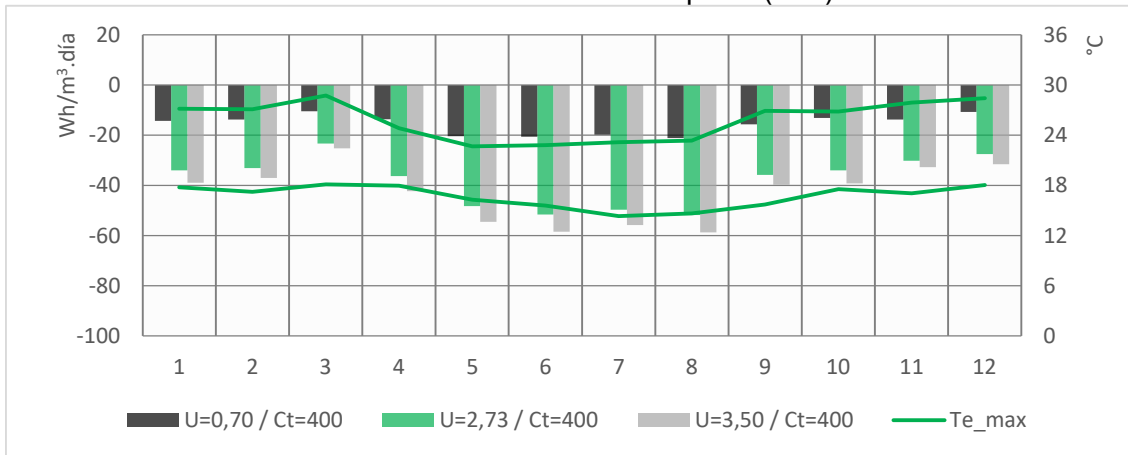
Al adoptar la pared pesada más aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), la potencia de los aparatos de climatización es similar al de la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$): 36.500 BTU/h y 36.700 BTU/h, respectivamente.

Con relación a la magnitud de las tasas de flujo de calor según el coeficiente de transmitancia térmica para la pared pesada, los resultados evidencian que cuanto mayor sea esa variable constructiva, mayores serán las tasas de flujo de calor. Eso queda claro en el día de menor demanda de refrigeración. Sin embargo, se revela que el mayor coeficiente de transmitancia térmica disminuye los efectos del retraso térmico, característico de las paredes con alta capacidad térmica, para el día de mayor demanda de refrigeración.

5.4.2 Análisis de las cargas térmicas de las paredes pesadas y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)

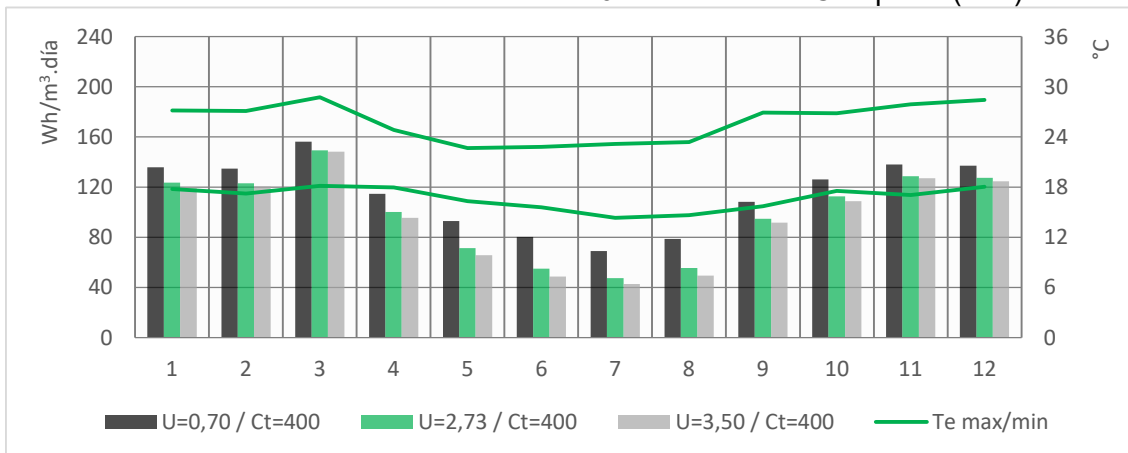
El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) (Figura 133) demuestra que la disipación del calor hacia el ambiente exterior ocurre en todos los meses del año, cualquiera que sea el coeficiente de transmitancia térmica para paredes pesadas adoptado. En ese caso, las pérdidas térmicas serán mayores cuanto mayor sea el coeficiente de transmitancia térmica. Eso ocurre de forma más acentuada cuando bajan las temperaturas mínimas, entre mayo y agosto. Vale destacar que la variación de las tasas de disipación del calor al adoptar las paredes pesadas más aisladas ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es muy pequeña, independiente de la variación de la temperatura exterior, si comparado con las otras dos paredes.

Figura 133: Carga térmica mensual de las paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)



La demanda mensual de refrigeración de esa aula (Figura 134) revela que la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) consigue ahorros energéticos en todos los meses del año, que varían de 0,6% (marzo) a 11,4% (junio) con relación a la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra incremento de los consumos energéticos con la climatización en todos los meses del año, que varían de 4,6% (marzo) a 45,8% (julio) con relación a la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

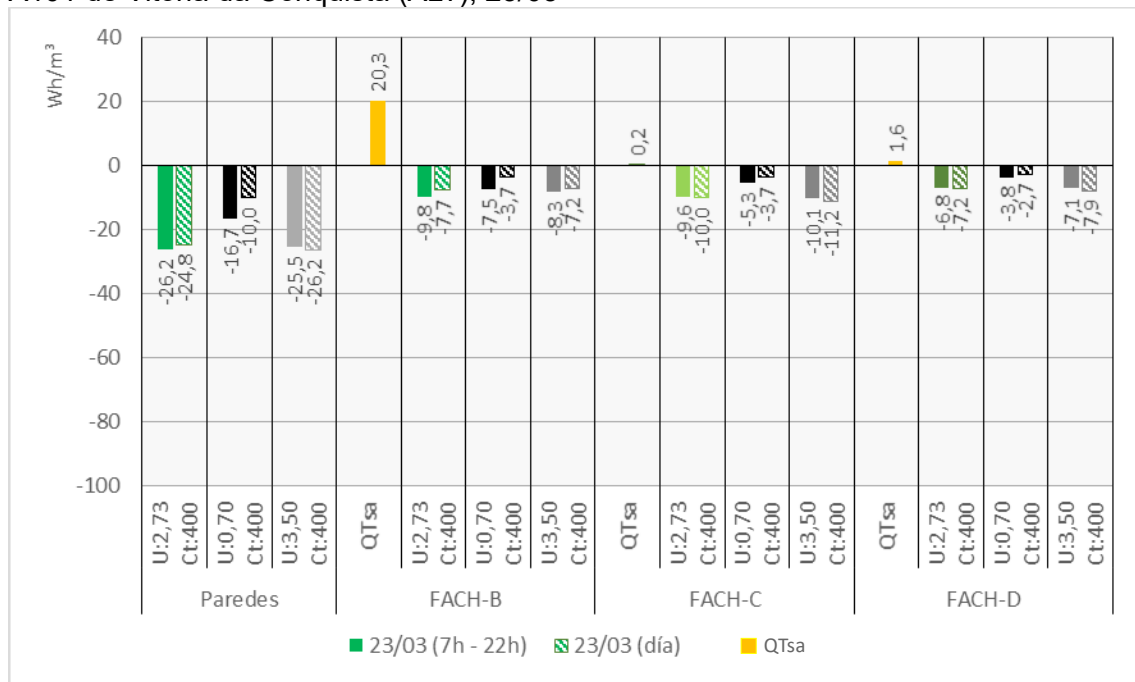
Figura 134: Demanda mensual de refrigeración de las paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT)



En el día típico de mayor demanda de refrigeración, los balances energéticos del

conjunto de paredes del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) presentan pérdidas térmicas, cualquier que sea el coeficiente de transmitancia térmica para paredes pesadas adoptado (Figura 135). Al comparar la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), se percibe una reducción de las pérdidas térmicas, entre 7h y 22h, de 2,7%. Del mismo modo, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) también presenta reducción de la tasa de disipación del calor, pero más significativa: 36,3%, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

Figura 135: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03



En la Fachada B, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra una reducción de las pérdidas térmicas de 15,3% en el periodo de ocupación del aula, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las tasas de disipación del calor en 23,5%, al comparado con la pared

pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

En la Fachada C, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento de las pérdidas térmicas de 5,2% en el periodo de ocupación del aula, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las tasas de disipación del calor en 44,8%, al comparar con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

En la Fachada D, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento de las pérdidas térmicas de 4,4% en el periodo de ocupación del aula, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las tasas de disipación del calor en 44,1%, al comparar con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 136 – 138).

En la Fachada B (Figura 136), la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta tasas de disipación del calor menores que las otras dos paredes, así como sus pérdidas térmicas ocurren hasta las 19h. Mientras tanto, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra tasas de flujo de calor similares a la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), pero sus ganancias térmicas empiezan a las 17h. En esas tres paredes, la transmisión de energía térmica hacia el ambiente interior sigue hasta la madrugada del otro día.

Figura 136: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03

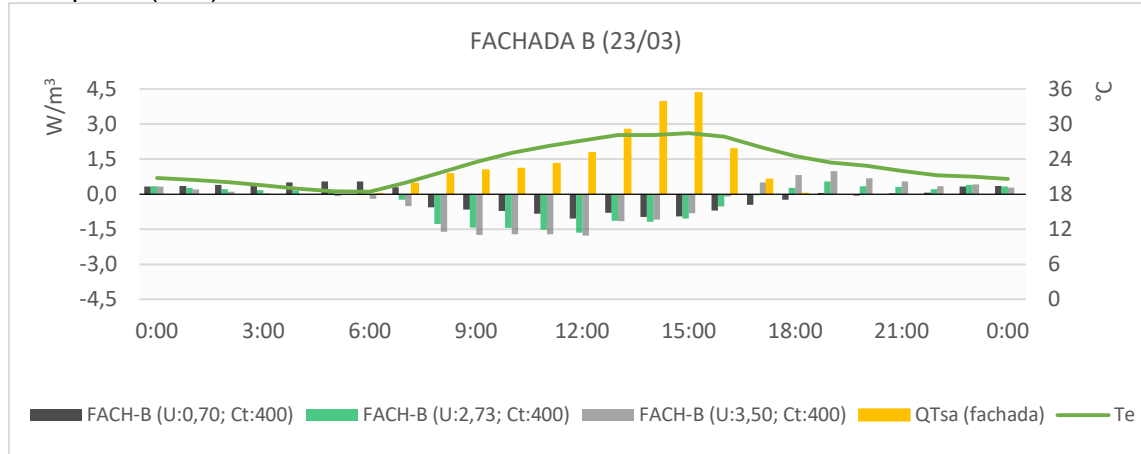


Figura 137: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03

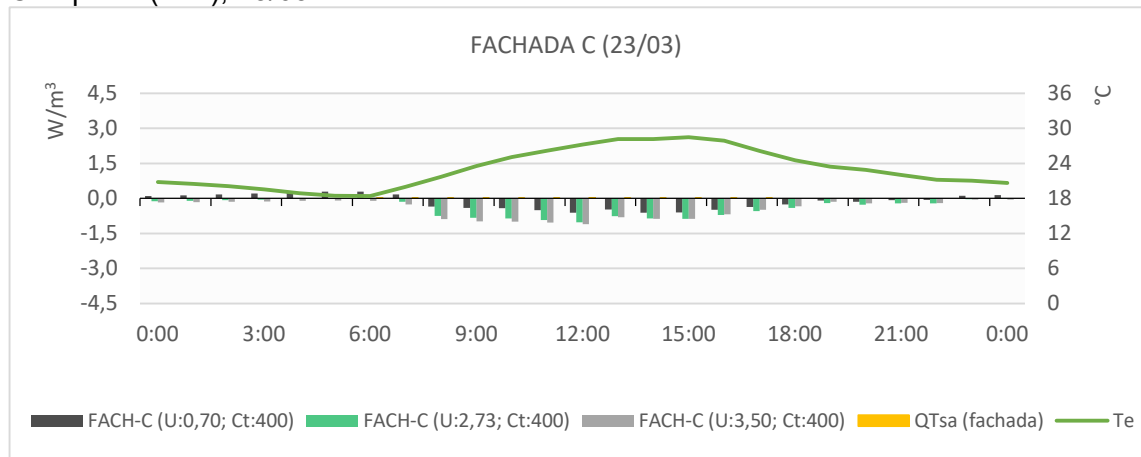
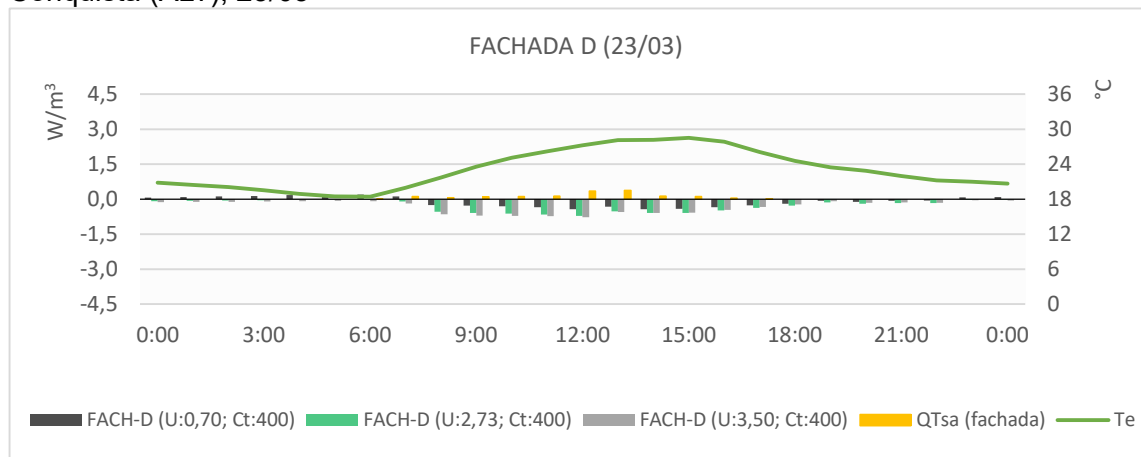


Figura 138: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03

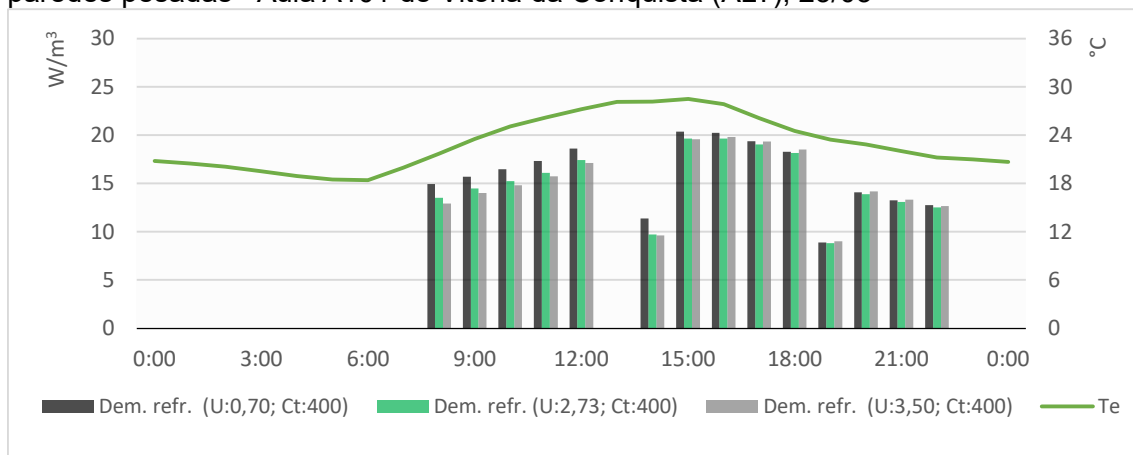


Las Fachadas C y D (Figuras 137 - 138) presentan comportamientos térmicos similares para la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Esa configuración de pared presenta tasas de disipación del calor menores que las otras dos paredes, así como sus pérdidas térmicas ocurren mientras el ambiente está ocupado, tanto en la Fachada C cuanto en la Fachada D.

La pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) de la Fachada C registra ganancias térmicas a partir de las 17h, mientras que, en la Fachada D, esa configuración de pared no presenta ganancias térmicas en el periodo de ocupación del aula.

Sobre las demandas de refrigeración para ese día típico según el coeficiente de transmitancia térmica, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 0,3%, mientras que la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 4,9% (Figura 139). Ambos resultados consideran como referencia la demanda de refrigeración de la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 139: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03

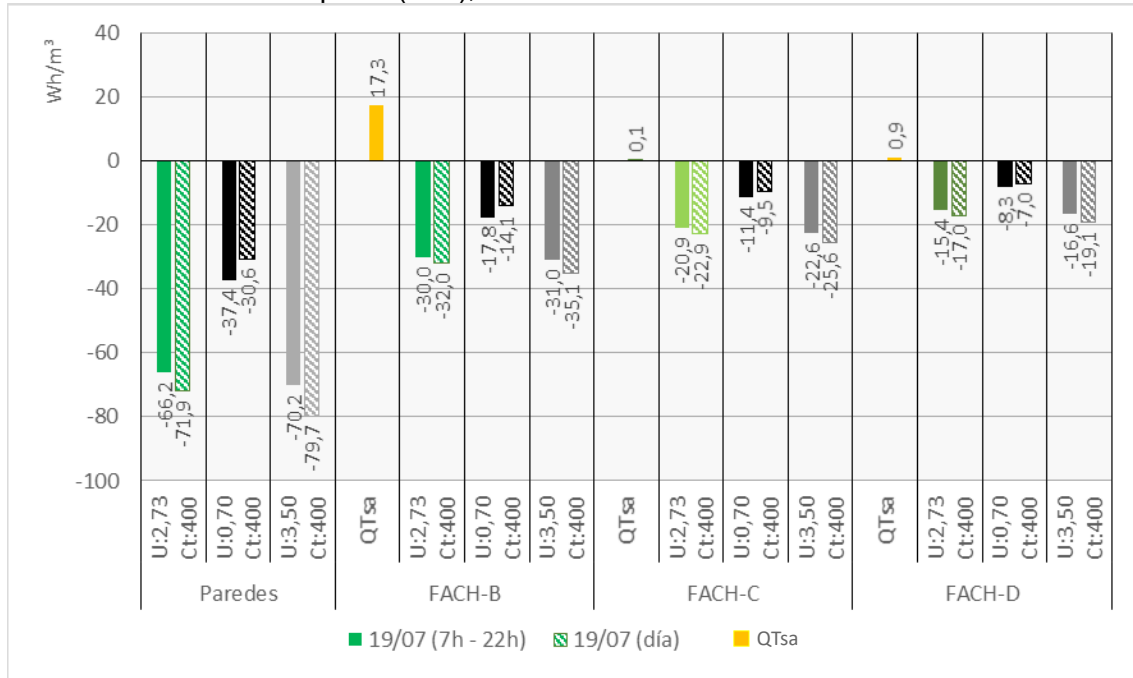


Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica, queda clara la influencia de la

disipación del calor por las paredes pesadas menos aisladas ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo matutino. La demanda de refrigeración de las paredes pesadas más aisladas ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo presenta consumos energéticos un poco menores que las otras dos paredes entre 18h y 22h, pero sin compensar los mayores consumos energéticos durante el día.

En el día típico de menor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) presentan pérdidas térmicas, cualquiera que sea el coeficiente de transmitancia térmica para paredes pesadas adoptado (Figura 140). Al comparar la pared menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), se percibe un aumento de las pérdidas térmicas, entre 7h y 22h, de 6,0%. Sin embargo, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta reducción de 43,5% de la tasa de disipación del calor, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

Figura 140: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07



En la Fachada B, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento de las pérdidas térmicas de 3,3% en el periodo de ocupación del aula, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las tasas de disipación del calor en 40,7%, al comparar con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

En la Fachada C, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento de las pérdidas térmicas de 8,1% en el periodo de ocupación del aula, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las tasas de disipación del calor en 45,5%, al comparar con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

En la Fachada D, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento de las pérdidas térmicas de 7,8% en el periodo de ocupación

del aula, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las tasas de disipación del calor en 46,1%, al comparar con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en ese mismo periodo.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 141 – 143).

Figura 141: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07

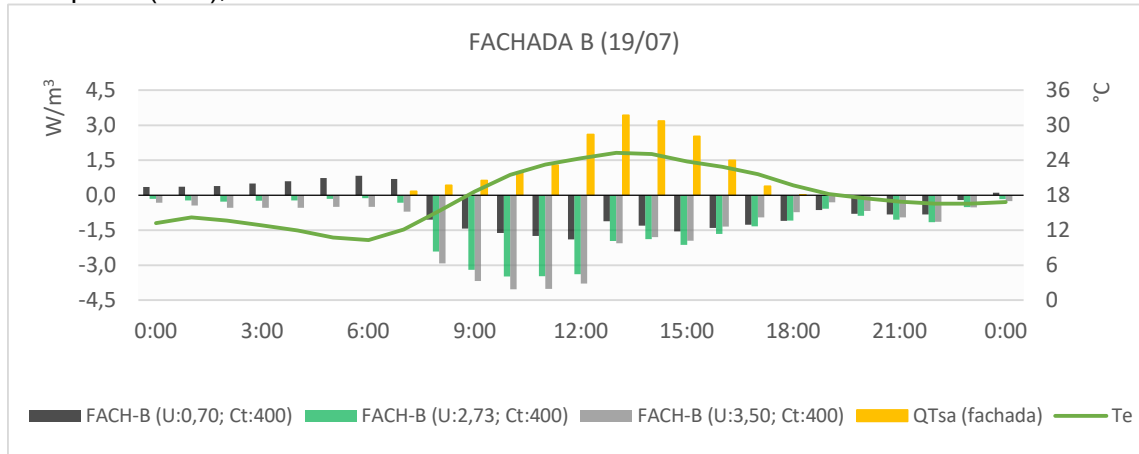


Figura 142: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07

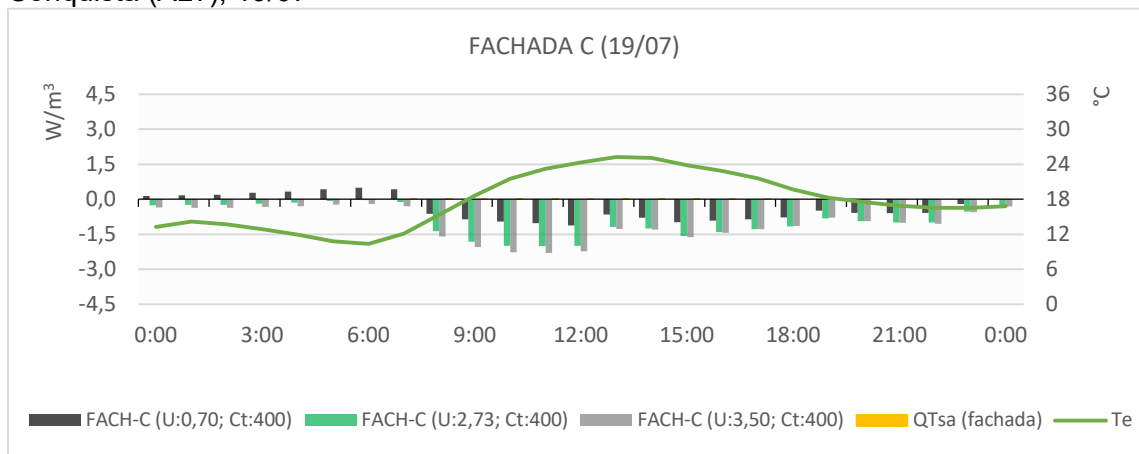
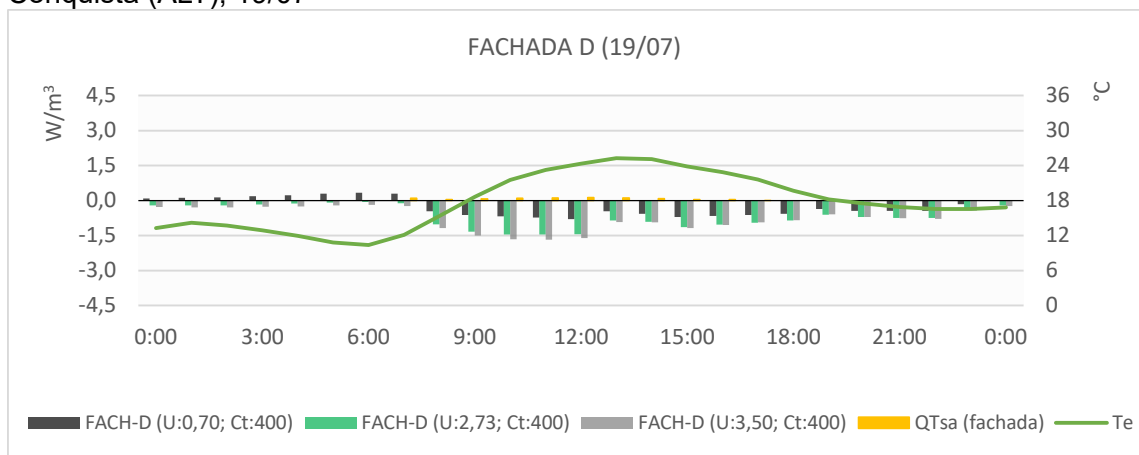


Figura 143: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07

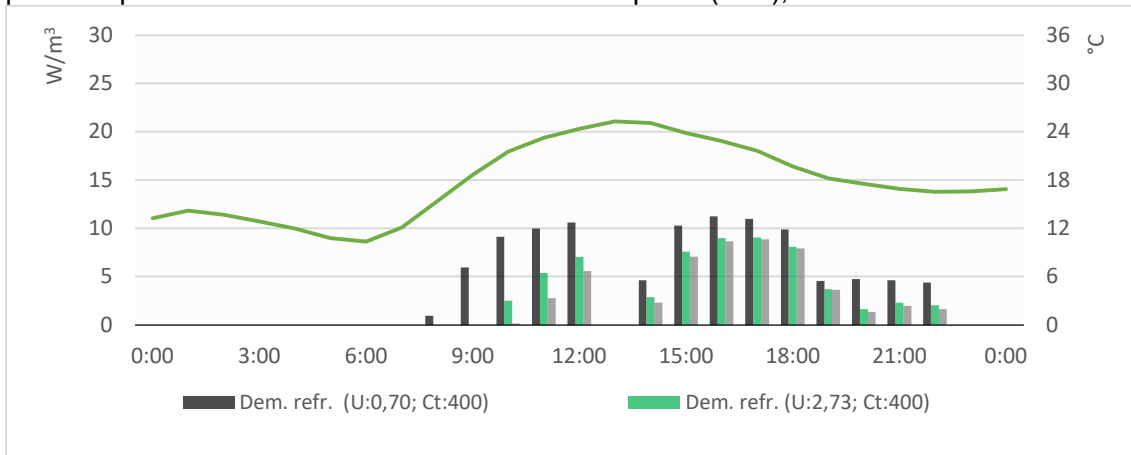


En la Fachada B (Figura 141), la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la que presenta las mayores tasas de disipación del calor entre 7h y 16h. A partir de ese momento, sus pérdidas térmicas registran valores similares a los de la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Ninguna de las tres configuraciones de paredes presenta ganancias térmicas en el periodo de ocupación del aula.

Las Fachadas C y D (Figuras 142 - 143) presentan comportamientos térmicos similares para las tres configuraciones de pared. La pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la que presenta las mayores tasas de disipación del calor en todas las horas en que el ambiente está ocupado. La pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta tasas de disipación del calor menores que las otras dos paredes, especialmente por las mañanas. Al igual que en la Fachada B, ninguna de las tres configuraciones de paredes presentan ganancias térmicas en el periodo de ocupación del aula.

Sobre las demandas de refrigeración para ese día típico según el coeficiente de transmitancia térmica, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 15,2%, mientras que la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético con la climatización en 66,6% (Figura 144). Ambos resultados consideran como referencia la demanda de refrigeración de la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 144: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07



Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica, queda clara una vez más la influencia de la disipación del calor por las paredes pesadas menos aisladas ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el consumo energético, especialmente en el periodo matutino. La demanda de refrigeración de las paredes pesadas más aisladas ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores consumos energéticos que las otras dos paredes a lo largo del día, debido a sus menores pérdidas térmicas.

Al adoptar la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), la potencia de los aparatos de climatización es similar al de la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$): 31.700 BTU/h y 31.800 BTU/h, respectivamente.

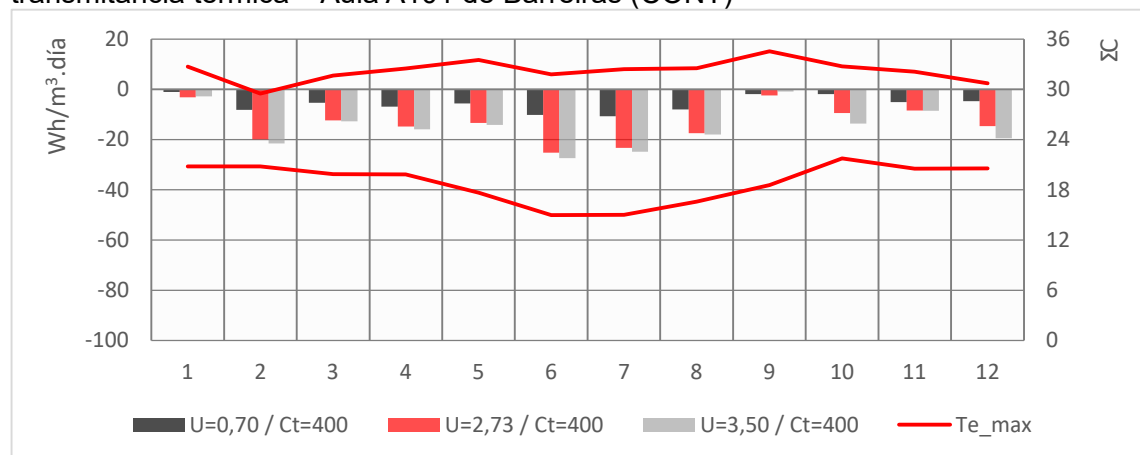
Con relación a la magnitud de las tasas de flujo de calor según el coeficiente de transmitancia térmica para pared pesada, los resultados evidencian que cuanto mayor sea esa variable constructiva, mayores serán las tasas de flujo de calor. Sin embargo, en el día de mayor demanda de refrigeración, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la única a presentar ganancias térmicas en la Fachada B.

5.4.3 Análisis de las cargas térmicas de las paredes pesadas y de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT)

El balance energético mensual de las cargas térmicas de las paredes del Aula A101 de Barreiras (CONT) (Figura 145) demuestra que hay pérdidas térmicas por todas las configuraciones de paredes, con menores tasas de disipación del calor hacia el ambiente exterior en los meses de enero y septiembre.

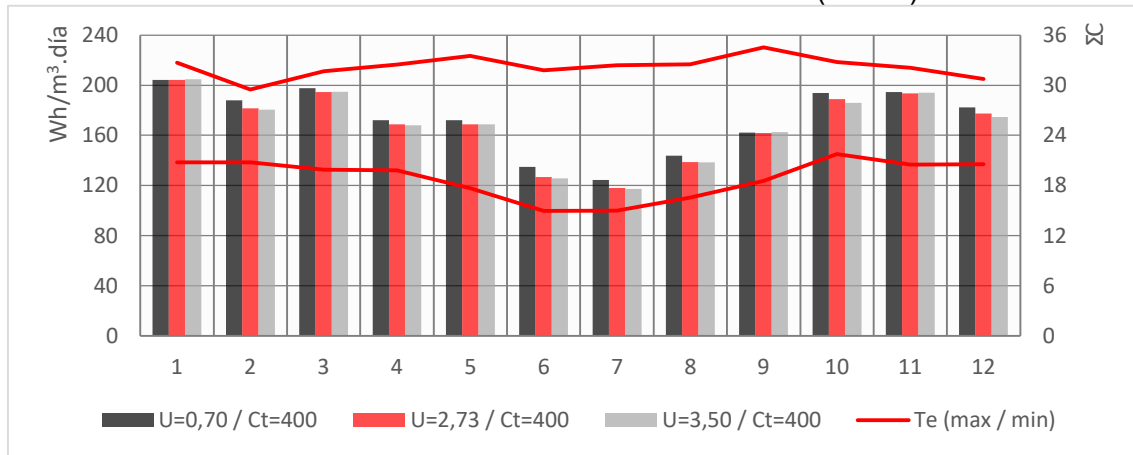
Los únicos meses en que la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) no presenta mayores pérdidas térmicas que las otras dos paredes son enero y septiembre, cuando las mayores tasas de disipación ocurren por la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 145: Carga térmica mensual de las paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT)



Al comparar esos resultados con la demanda mensual de refrigeración para cada configuración de pared (Figura 146), se percibe que la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta menores consumos energéticos con la climatización en casi todos los meses, que varía entre 0,1% (mayo) y 1,6% (octubre). Las excepciones son los meses de enero, marzo, septiembre y noviembre, cuando la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra las menores demandas de refrigeración.

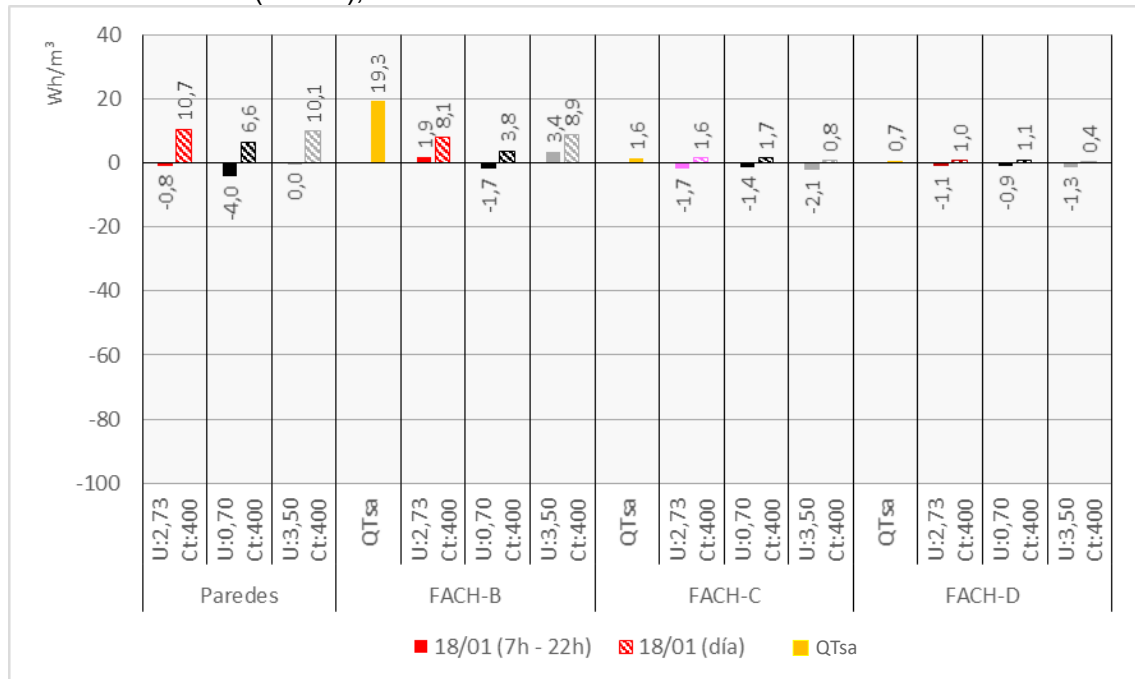
Figura 146: Demanda mensual de refrigeración de paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT)



En el día típico de mayor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Barreiras (CONT) presentan comportamientos térmicos distintos cuando el aula está ocupada (Figura 147). Mientras que la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra balance energético cero, la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta pérdidas térmicas cinco veces mayor que la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo de ocupación del aula.

En la Fachada B, la pared pesada aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) es la única a registrar pérdidas térmicas entre 7h y 22h. Mientras tanto, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra un aumento de las ganancias térmicas de 79,0% para ese mismo periodo, si comparada a la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 147: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01



Los balances energéticos de las Fachadas C y D presentan comportamientos similares. Entre 7h y 22h, todas las paredes presentan pérdidas térmicas. La pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce esas pérdidas en 17,7%, para la Fachada C, y 18,2%, para la Fachada D. Mientras tanto, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta las pérdidas térmicas en 23,5% y 18,2%, respectivamente.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 148 – 150).

Figura 148: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01

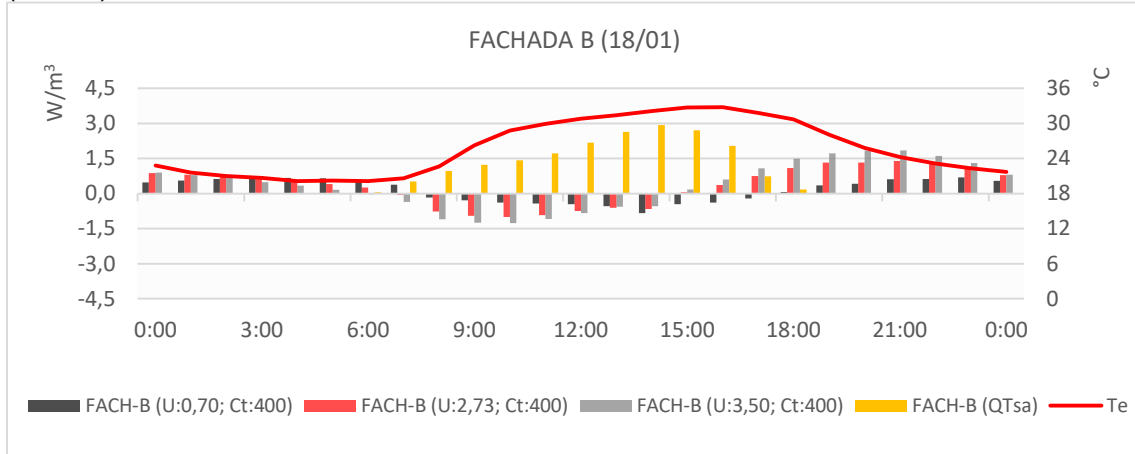


Figura 149: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01

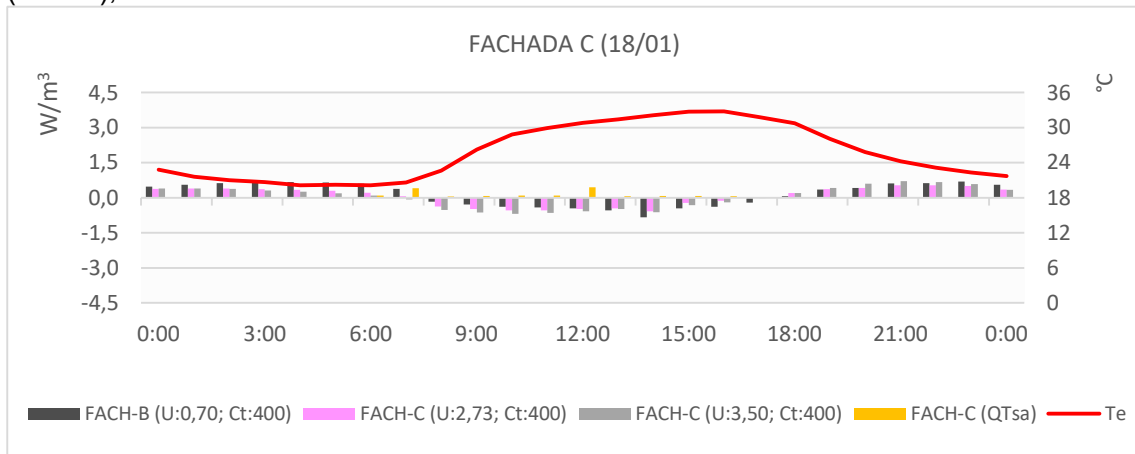
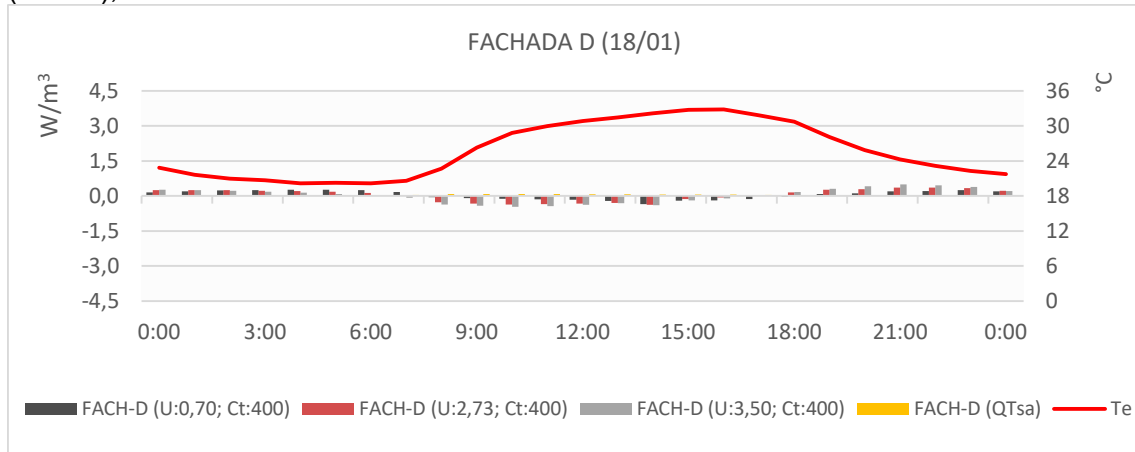


Figura 150: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01

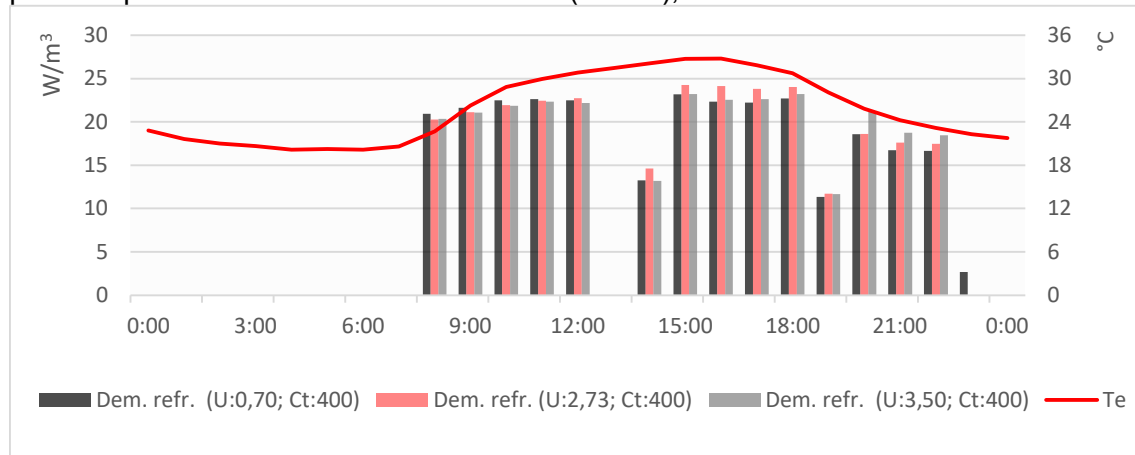


En la Fachada B (Figura 148), la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta tasas de disipación del calor menores que las otras dos paredes, así como sus pérdidas térmicas ocurren hasta las 18h. Mientras tanto, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra tasas de flujo de calor similares a la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), pero sus ganancias térmicas empiezan a las 15h. En esas dos paredes, la transmisión de energía térmica hacia el ambiente interior sigue hasta la madrugada del otro día.

Las Fachadas C y D (Figuras 149 - 150), así como en los balances energéticos diarios, también presentan comportamientos térmicos similares. La pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta tasas de disipación del calor menores que las otras dos paredes, así como sus pérdidas térmicas ocurren hasta las 19h, tanto en la Fachada C cuanto en la Fachada D. Mientras tanto, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra tasas de flujo de calor similares a la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), pero sus ganancias térmicas empiezan a las 18h, tanto en la Fachada C cuanto en la Fachada D.

Sobre las demandas de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica, para ese día típico (Figura 151), la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta ahorros energéticos de 1,7%, mientras que la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce el consumo energético con la climatización en 0,7%.

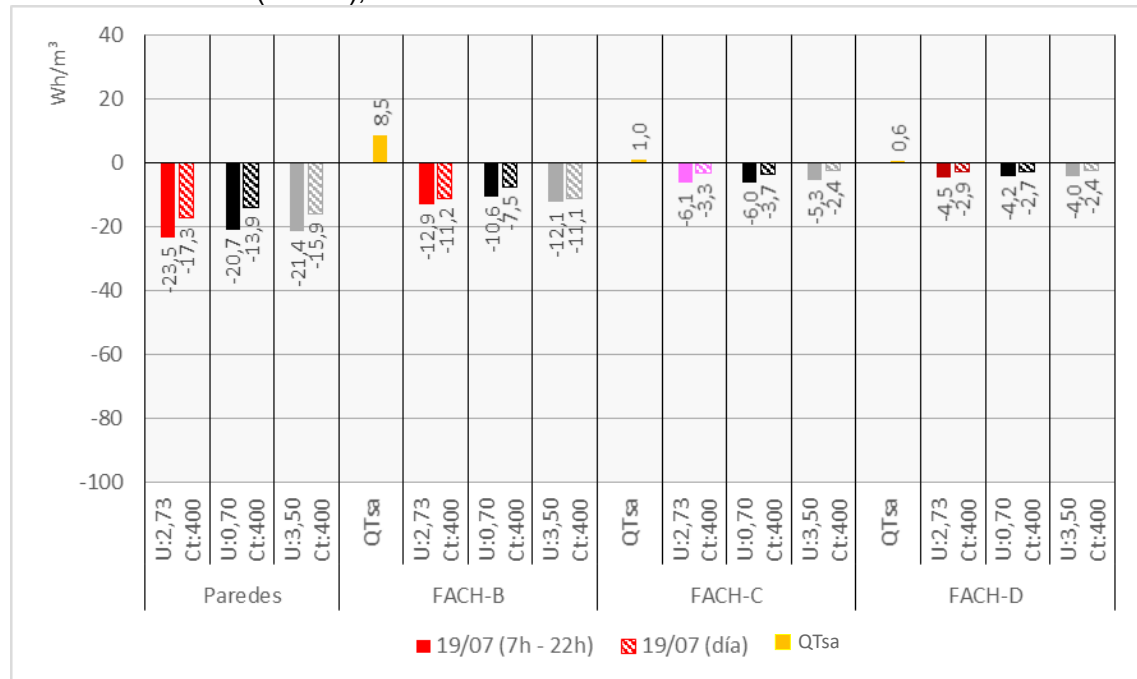
Figura 151: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01



Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica para las paredes pesadas, se demuestra el mayor ahorro energético de la pared pesada más aislada ($U=0,70$ $W/m^2\cdot K$; $Ct=400$ $kJ/m^2\cdot K$) ocurre por evitar las ganancias térmicas a lo largo del día, especialmente por la Fachada B, la pared más afectada por la radiación solar.

En el día típico de menor demanda de refrigeración, los balances energéticos del conjunto de paredes del Aula A101 de Barreiras (CONT) presentan pérdidas térmicas, cualquiera que sea el coeficiente de transmitancia térmica para paredes pesadas adoptado (Figura 152). Entre 7h y 22h, la pared pesada más aislada ($U=0,70$ $W/m^2\cdot K$; $Ct=400$ $kJ/m^2\cdot K$) disminuye las pérdidas térmicas en 11,9%, mientras que la pared pesada menos aislada ($U=3,50$ $W/m^2\cdot K$; $Ct=400$ $kJ/m^2\cdot K$) las reduce en 8,1%, si comparado con la pared pesada ($U=2,73$ $W/m^2\cdot K$; $Ct=400$ $kJ/m^2\cdot K$).

Figura 152: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07



En la Fachada B, la reducción de las pérdidas térmicas, promovida tanto por la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cuanto la pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), es de 17,8% y 6,2%, respectivamente, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en el periodo de ocupación del aula.

Los balances energéticos de las Fachadas C y D presentan pérdidas térmicas, tanto en el ciclo diario cuanto en el periodo de ocupación del aula. La pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) disminuye las pérdidas en 1,6%, para la Fachada C, y 6,7%, para la Fachada D, si comparado con la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Mientras tanto, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) reduce las pérdidas térmicas en 13,1% y 11,1%, respectivamente.

La evaluación del flujo de calor que atraviesa las Fachadas B, C y D en ese día pone en evidencia los momentos de ganancias y pérdidas térmicas por cada pared, según su capacidad térmica, así como las magnitudes de las tasas de flujo de calor por cada pared (Figuras 153 – 155).

En la Fachada B (Figura 153), la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo presenta ganancias térmicas cuando el aula está desocupada, a partir de las 23h. Mientras tanto, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) registra mayores tasas de disipación del calor por la mañana y por la tarde, así como sus ganancias térmicas se dan a partir de las 18h. En esas dos paredes, la transmisión de energía térmica hacia el ambiente interior sigue hasta la madrugada del otro día.

Las Fachadas C y D (Figuras 154 - 155), así como en los balances energéticos diarios, también presentan comportamientos térmicos similares. La pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) solo presenta ganancias térmicas cuando el aula está desocupada, a partir de las 23h, tanto en la Fachada C cuanto en la Fachada D. Mientras tanto, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presentan ganancias térmicas, a partir de las 18h, para las Fachadas C y D.

Figura 153: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07

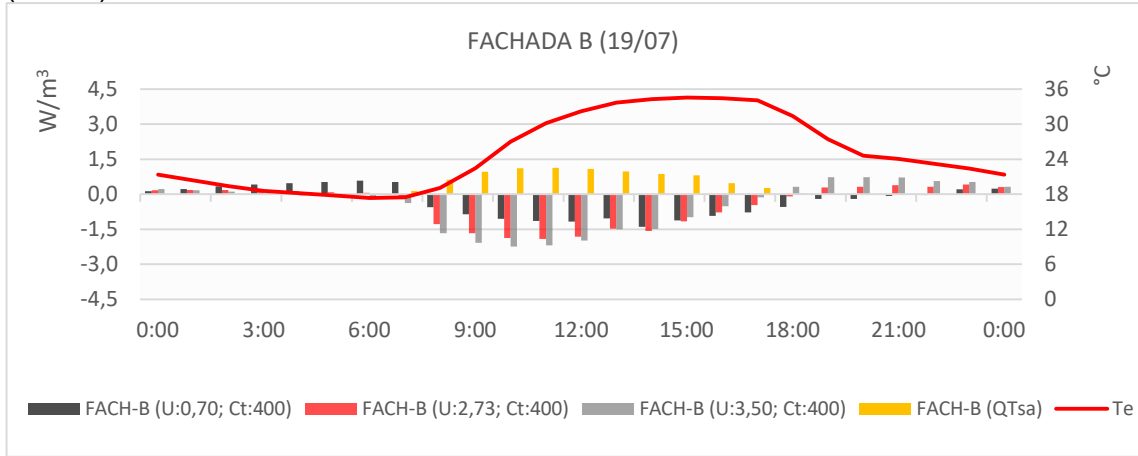


Figura 154: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07

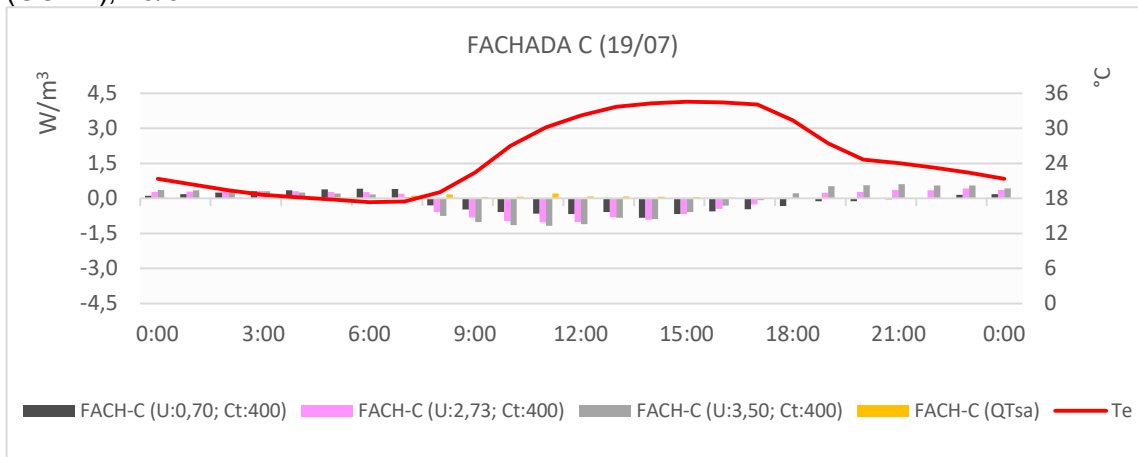
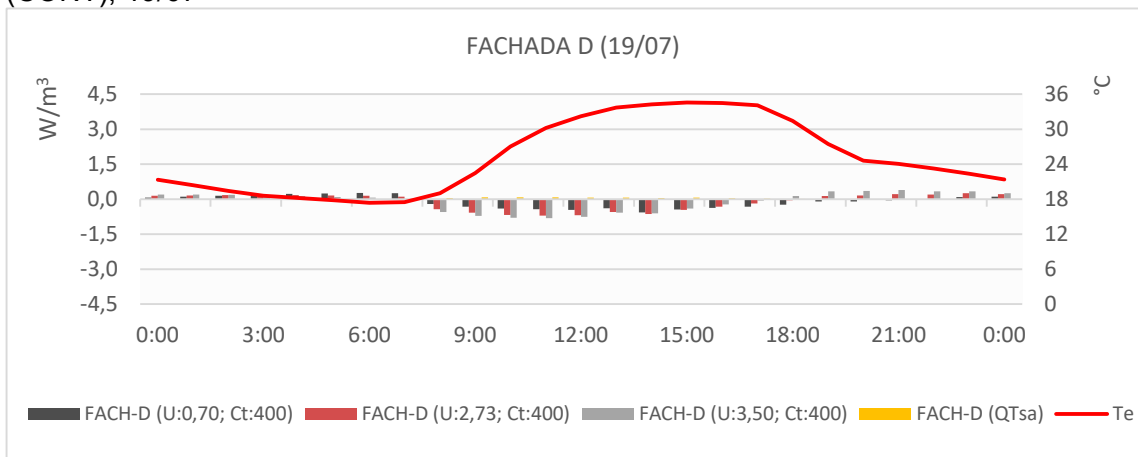
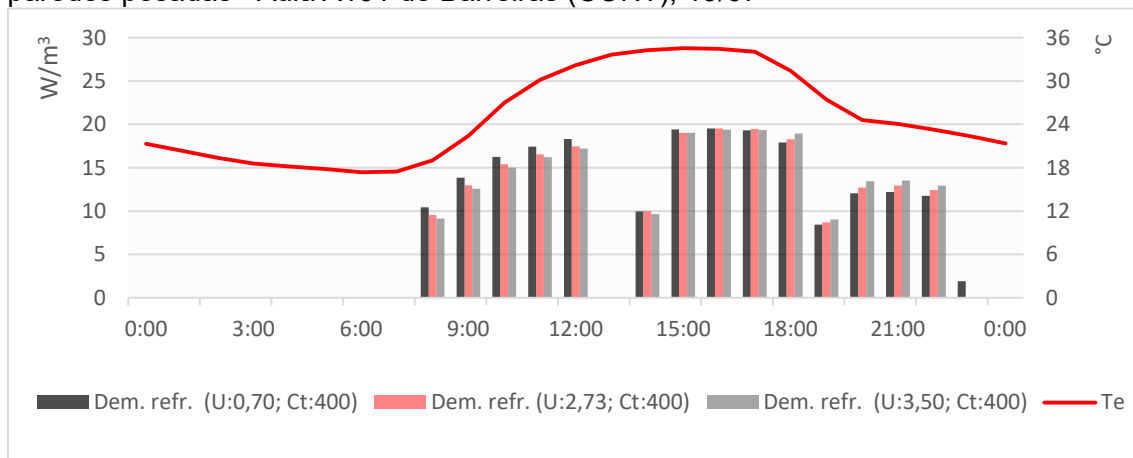


Figura 155: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07



Sobre las demandas de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica, para ese día típico (Figura 156), tanto la pared pesada más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) cuanto la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta mayores demandas energéticas: aumento de 1,9% y 0,2% en el consumo energético con la climatización.

Figura 156: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07



Comparando las demandas de refrigeración con las cargas térmicas del conjunto de paredes según el coeficiente de transmitancia térmica para las paredes pesadas, se demuestra que, tanto la estrategia en aislar cuanto la de permitir mayores tasas de flujo de calor no logran mejores consumos energéticos. Entre las paredes pesadas, la que consigue mejor balance entre pérdidas y ganancias térmicas es la pared con el coeficiente de transmitancia térmica intermedio.

La potencia de los aparatos de climatización para el Aula A101 de Barreiras (CONT), al adoptar la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) o la pared pesada ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), son próximos entre sí: 32.400 BTU/h y 32.300 BTU/h, respectivamente.

Con relación a la magnitud de las tasas de flujo de calor según el coeficiente de transmitancia térmica para pared pesada, los resultados evidencian que, cuanto

mayor sea esa variable constructiva, mayores serán las tasas de flujo de calor. Además, se evidencia que el mayor coeficiente de transmitancia térmica disminuye los efectos del retraso térmico, característico de las paredes con alta capacidad térmica.

5.5 CONCLUSIONES PRELIMINARES

Los casos investigados demuestran que, en conjunto con las variables constructivas, el flujo de calor por la piel del edificio es afectado por la variación de la temperatura exterior a lo largo del día, la radiación solar incidente en cada pared y las cargas térmicas generadas por los aportes internos.

A pesar de tres climas distintos, hay que destacar la relevancia de los altos aportes internos en los estudios de caso analizados. Ellos son la principal carga térmica para la demanda de refrigeración, tanto por su magnitud como también por el tiempo en que ocurre: entre 7h y 22h. Además, esos altos aportes internos también influyen en la tendencia a la disipación del calor por las paredes de las tres aulas investigadas.

Sobre las variables constructivas, las posibles optimizaciones de las paredes de los ambientes de enseñanza evaluados se basan en dos estrategias de enfriamiento pasivo (SANTAMOURIS y KOLOKOTSA, 2013): la reducción de las ganancias térmicas y la modulación del flujo de calor.

La primera variable constructiva investigada, el coeficiente de absorción, actúa en la reducción de las cargas térmicas por radiación solar por las paredes de cada aula.

De forma general, esa estrategia disminuye la demanda de refrigeración en todas las aulas evaluadas, en todos los meses del año, debido a la mayor disipación del calor por las paredes. O sea, al recibir menos carga térmica del ambiente exterior, ocurren mayores tasas de disipación de las cargas térmicas generadas internamente, cuando la temperatura exterior así lo permite.

Sobre ese aspecto, los distintos parámetros ambientales conllevan a diferentes tasas de disipación del calor y explican la diferencia entre los comportamientos térmicos de las paredes al reducir su coeficiente de absorción.

En Cruz das Almas (MAR), su clima tropical-ecuatorial presenta temperatura media anual de $24,0^{\circ}\text{C}$, así como la menor oscilación diaria de temperatura entre los tres casos estudiados, $7,9^{\circ}\text{K}$. Sus temperaturas mínimas solo registran valores menores que $20,0^{\circ}\text{C}$ entre junio y septiembre. Eso indica que esa ciudad presenta las mayores temperaturas mínimas entre los tres casos estudiados y, consecuentemente, la menor tendencia a la disipación del calor.

En Vitória da Conquista (ALT), su clima de latitudes medias presenta la menor temperatura media anual, de $20,7^{\circ}\text{C}$, y oscilación diaria de temperatura de $9,1^{\circ}\text{K}$. Sus temperaturas mínimas están por debajo de los $20,0^{\circ}\text{C}$ en todos los meses del año, lo que apunta a la mayor tendencia de disipación del calor por las paredes.

En Barreiras (CONT), su clima tropical de sabana presenta temperatura media anual de $25,0^{\circ}\text{C}$, pero con la mayor oscilación diaria de temperatura entre los tres casos estudiados, $13,3^{\circ}\text{K}$. O sea, a pesar de sus temperaturas máximas se sitúan siempre por encima de los $30,0^{\circ}\text{C}$, sus temperaturas mínimas alcanzan valores por debajo de los $20,0^{\circ}\text{C}$ en casi todos los meses del año.

Esos parámetros ambientales influyen decisivamente en las tasas de disipación del calor por las paredes y en el ahorro energético con la climatización del espacio al reducir el coeficiente de absorción.

En el día típico de mayor demanda de refrigeración, la reducción de las cargas térmicas por radiación solar en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) da como resultado la menor tasa de disipación del calor cuando el aula está ocupada entre los tres casos estudiados, $2,2 \text{ Wh/m}^3$. En ese día, su temperatura mínima registra $22,6^{\circ}\text{C}$.

Mientras tanto, la tasa de disipación del calor entre 7h y 22h en el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) es de 27,0 Wh/m³ y, en el Aula A101 de Barreiras (CONT), 5,9 Wh/m³. Sus temperaturas mínimas en ese día son 18,7°C y 20,2°C, respectivamente.

No obstante, vale destacar que, en el día típico de menor demanda de refrigeración, el aula que registra la menor tasa de disipación de calor es el Aula A101 de Barreiras (CONT): 18,2 Wh/m³. La principal razón es su temperatura elevada en ese día, cuando la máxima alcanza 34,5°C. Sus balances energéticos diarios indican disipación de calor por todas las paredes debido a las temperaturas mínimas registran 17,4°C.

Mientras tanto, en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), que registra 30,5 Wh/m³ de tasa de disipación del calor cuando el aula está ocupada, sus temperaturas máximas y mínimas en ese día son 25,6°C y 19,5°C, respectivamente.

En el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), que también presenta la mayor tasa de disipación en ese día, 63,7 Wh/m³, sus temperaturas máximas y mínimas en ese día son 25,3°C y 10,3°C, respectivamente.

Las menores temperaturas exteriores de Vitória da Conquista (ALT) también explican por qué los mayores ahorros energéticos al reducir el coeficiente de absorción ocurren en los meses de junio y julio. Esos meses son los que registran las menores temperaturas, tanto máxima cuanto mínima. Así, en un clima que favorece la disipación del calor generado internamente, la disminución de las cargas térmicas por radiación solar amplifican esa tendencia a las pérdidas térmicas.

Sin embargo, en Cruz das Almas (MAR) y Barreiras (CONT), sus temperaturas más altas no favorecen tanto las pérdidas térmicas por las paredes como Vitória da Conquista (ALT). En esos casos, el mayor ahorro energético ocurre en los meses

que registran la mayor radiación global en cada una de esas ciudades: enero y febrero, en Cruz das Almas (MAR); enero y septiembre, en Barreiras (CONT).

Por fin, vale destacar que la Fachada B de las tres aulas investigadas es la pared más impactada por las cargas térmicas por radiación solar. Por ese motivo, la reducción del coeficiente de absorción solo obtuvo efectos relevantes en esa pared.

La segunda variable investigada, el coeficiente de transmitancia térmica, actúa en la modulación de la cantidad de flujo de calor que atraviesa las paredes de cada aula.

Los resultados apuntan que no hay una única solución para todos los casos, debido a la influencia de las condiciones climáticas de cada sitio y los distintos coeficientes de transmitancia térmica evaluados.

Al igual que ocurre con la reducción del coeficiente de absorción, es necesario entender la variación de la temperatura exterior, tanto diaria cuanto a lo largo del año, para decidir sobre el coeficiente de transmitancia térmica de las paredes y sus posibilidades de ahorro energético. Como la temperatura de consigna del ambiente interior está definida en $24,0^{\circ}\text{C}$, ella será utilizada como dato para el análisis de todos los casos.

En Cruz das Almas (MAR), a pesar de su temperatura media anual ser de $24,0^{\circ}\text{C}$, su variación a lo largo del año indica periodos con temperaturas mayores que esa, así como periodos con temperaturas más bajas. O sea, periodos con mayor tendencia a las ganancias térmicas, así como temporadas con mayor tendencia a las pérdidas térmicas por las paredes.

Los análisis realizados en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) revelan que el coeficiente de transmitancia térmica que proporciona los mayores ahorros energéticos son diferentes según cada periodo. Cuando la temperatura media exterior está por

encima de 24°C, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) logra menor demanda de refrigeración. Sin embargo, cuando la temperatura media exterior está por debajo de 24°C, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) es la que consigue menor consumo energético con la climatización.

En términos de consumo energético anual, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) es la que presenta ahorro energético, de 0,9% si comparada con la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Sobre esa pequeña reducción del consumo energético, vale destacar que la pared con mayor superficie por volumen del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), la Fachada C, realiza su cambio térmico con un espacio secundario del edificio, la circulación. Así, a pesar de presentar pérdidas térmicas menores que las otras dos paredes, la Fachada C presenta disipación del calor a lo largo del año, incluso cuando la temperatura exterior está por encima de 24,0°C. Además, esas pérdidas térmicas se vuelven más relevantes en esa pared cuando se adopta la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

En Vitória da Conquista (ALT), su temperatura media anual es menor que 24,0°C, así como sus temperaturas mínimas están por debajo de los 20,0°C a lo largo del año. En esas condiciones de temperatura exterior, con mayor tendencia a la disipación del calor, la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) es la que logra mayores ahorros energéticos, tanto anual cuanto en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración.

En Barreiras (CONT), con temperatura media anual de 25,0°C, temperaturas máximas siempre por encima de los 30,0°C y oscilación diaria de temperatura de 13,3°K, ocurre en un mismo día momentos de ganancias térmicas como momentos de pérdidas térmicas. Debido a la intensa utilización del ambiente a lo largo del día, aumentar el flujo de calor con la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), por un lado, incrementa la demanda de refrigeración en 0,6%. Por otro lado, disminuir el flujo de calor con la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) aumenta el consumo energético

con la climatización en 1,4%.

Ese caso es más un ejemplo del comportamiento no lineal del coeficiente de transmitancia térmica (Signor, Westphal y Lamberts 2001; Carlo 2008). De forma similar a los resultados encontrados para el Aula A101 de Barreiras (CONT), los estudios realizados por esos autores indican que la adopción del coeficiente de transmitancia térmica entre 2,0 y 3,0 W/m²·K presenta una respuesta térmica más equilibrada a las variaciones climáticas y un menor consumo energético anual.

Los análisis realizados en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración en el Aula A101 de Barreiras (CONT) revelan que la pared más aislada (U=0,70 W/m²·K) logra ahorros energéticos de 1,9% en el día de mayor demanda de refrigeración, pero presenta consumo energético similar a la pared existente (U=2,73 W/m²·K) en el día de menor demanda de refrigeración.

Además de la temperatura exterior, es fundamental considerar la radiación solar incidente y, consecuentemente, las cargas térmicas por radiación solar que impactan las paredes. Conforme apuntado anteriormente, la Fachada B es la pared más impactada por las cargas térmicas por radiación solar. Por ese motivo, los cambios de coeficiente de transmitancia térmica apuntan a resultados distintos en esa pared con relación a las otras dos.

Por un lado, cuando la temperatura media exterior está por debajo de los 24,0°C, las cargas térmicas por radiación solar en la Fachada B disminuyen su capacidad de disipación del calor. Eso se hace más relevante cuando se adopta la pared menos aislada (U=4,20 W/m²·K).

Es lo que ocurre en el día típico de menor demanda de refrigeración en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), así como en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración en Vitória da Conquista (ALT). Los resultados de esos días revelan que la pared menos aislada (U=4,20 W/m²·K) aumenta la disipación térmica de todas

las paredes. Sin embargo, el incremento de las pérdidas térmicas por la Fachada B es relativamente menor si comparado con las pérdidas térmicas de las otras paredes y sus respectivas proporciones de superficie por volumen.

Por otro lado, cuando la temperatura media exterior está por encima de los 24,0°C, las cargas térmicas por radiación solar en la Fachada B aumentan sus ganancias térmicas.

Es lo que ocurre en el día típico de mayor demanda de refrigeración en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), así como en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración en Barreiras (CONT). Los resultados revelan un aumento significativo de las ganancias térmicas por la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) afectadas por la radiación solar.

Al adoptar la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) se reducen significativamente los efectos de la carga térmica por radiación solar en los días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración. Con ese coeficiente de transmitancia térmica ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), la Fachada B presenta pérdidas térmicas cuando el aula está ocupada, a pesar de las distintas condiciones de temperatura exterior y de las cargas térmicas por radiación solar. Vale destacar que, en esos casos, la dirección del flujo de calor hacia el ambiente exterior está condicionada por los altos aportes internos.

Sin embargo, la pared más aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) reduce también las tasas de disipación del calor, especialmente en el periodo nocturno, cuando las aulas están desocupadas, y al inicio de las actividades, por la mañana.

La tercera variable investigada, la capacidad térmica, actúa en la modulación del tiempo de transmisión del flujo de calor por las paredes, tanto en términos de ganancias como de pérdidas térmicas.

En todos los casos investigados en esta tesis, caracterizados por sus altos aportes internos y largo tiempo de utilización del espacio, la transmisión más lenta del flujo de calor por las paredes pesadas ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) da como resultado menores demandas de refrigeración.

A pesar de la tendencia en disminuir el consumo energético con la climatización, el comportamiento térmico de cada pared varía según las condiciones climáticas de cada sitio.

Por un lado, cuando las condiciones climáticas indican mayores tasas de disipación del calor, las paredes con mayor capacidad térmica ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presentan periodos más largos de pérdidas térmicas, especialmente cuando el aula está ocupada.

Eso es lo que ocurre en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), en el día de menor demanda de refrigeración, y en el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), en los días de mayor y menor demanda de refrigeración.

No obstante, al adoptar la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en esos casos, los periodos de pérdidas térmicas se vuelven más cortos debido al aumento de la temperatura exterior y al impacto de las cargas térmicas por radiación solar, especialmente en la Fachada B. Así, a pesar de los balances energéticos presentar pérdidas térmicas, las gráficas demuestran los momentos de ganancias térmicas por esas paredes y sus impactos en la demanda de refrigeración.

Por otro lado, cuando las condiciones climáticas indican mayores tasas de transmisión del calor hacia el ambiente interior, las paredes con mayor capacidad térmica ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presentan periodos más largos de ganancias térmicas cuando el aula está desocupada. Además, cuando el aula está ocupada, sus pérdidas térmicas son las que tardan más en cambiar para ganancias térmicas.

Eso es lo que ocurre en el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), en el día de mayor demanda de refrigeración, y en el Aula A101 de Barreiras (CONT), en los días de mayor y menor demanda de refrigeración.

Sin embargo, al adoptar la pared menos pesada ($C_t=70 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en esos casos, los periodos de ganancias térmicas ocurren a lo largo de casi todo el día, siendo más significativos en las paredes con altas cargas térmicas por radiación solar. Esas paredes siguen transmitiendo energía térmica hacia el ambiente interior hasta que la temperatura exterior baje de los $24,0^\circ\text{C}$. Por esos motivos, sus balances energéticos presentan ganancias térmicas elevadas, si comparado con los balances energéticos de la pared existente ($C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Por fin, al evaluar los cambios del coeficiente de transmitancia térmica en paredes pesadas ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), se revela una tendencia de mayor ahorro energético anual al adoptar la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), en las tres aulas evaluadas.

Ese tipo de pared externa ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) retarda el flujo de calor hacia el ambiente interior, disminuyendo su impacto cuando el aula está en uso y disipando parte de la energía térmica acumulada cuando el espacio está desocupado.

Sin embargo, en los casos de Cruz das Almas (MAR) y Barreiras (CONT), los promedios mensuales de demanda de refrigeración apuntan que, en los meses más cálidos, la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) no es la que logra la reducción del consumo energético.

Esa tendencia se confirma al analizar los resultados de los días típicos de mayor demanda de refrigeración en Cruz das Almas (MAR) y Barreiras (CONT), que indican que la mejor estrategia es aislar las paredes en lugar de permitir mayor

disipación del calor por las mismas.

Además, en el día de menor demanda de refrigeración en Barreiras (CONT), que presentan oscilación térmica de $17,2^{\circ}\text{K}$, los resultados indican que la pared que proporciona menor consumo energético con la climatización del aula es la pared pesada con el coeficiente de transmitancia térmica intermedio ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

La pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) funciona mejor cuando las condiciones climáticas permiten mayor disipación del calor, que es lo que ocurre en los días de menor demanda de refrigeración de Cruz das Almas (MAR) y Vitória da Conquista (ALT), así como en el día de mayor demanda de refrigeración en esa ciudad.

No obstante, vale resaltar que la radiación solar incidente en la Fachada B disminuye las tasas de disipación del calor por esa pared, mismo cuando las condiciones climáticas y las variables constructivas están a favor de las pérdidas térmicas.

Por fin, vale resaltar que ni todas paredes pesadas son la mejor solución para ambientes de enseñanza en todos los climas analizados. En el caso de Vitória da Conquista (ALT), la pared pesada y bien aislada ($U=0,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) demuestra gastar más energía que la pared existente ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $C_t=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Así, para reducir la demanda de refrigeración es necesario un análisis cuidadoso que relacione los parámetros climáticos, la rutina de ocupación y las variables constructivas de la pared.

6 CONCLUSIONES

Al elegir tres estudios de caso, similares entre sí pero implantados en climas distintos, esta tesis buscó destacar la relevancia de los parámetros ambientales para la definición de las variables constructivas de la pared y su impacto en el ahorro energético. Sin embargo, los resultados apuntan para una misma solución de pared, tanto para sus propiedades térmicas cuanto radiactivas.

Por un lado, los altos aportes internos generados por los ambientes de enseñanza inducen las estrategias pasivas a buscar soluciones para aumentar la disipación del calor por la piel del edificio en las tres zonas climáticas. Como consecuencia, los resultados indican la pared pesada y menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ / $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), con coeficiente de absorción de 0,15 en su acabado externo, para las paredes del edificio universitario implantado en las tres zonas climáticas.

Por otro lado, los análisis detallados indican que las propiedades térmicas y radiactivas no actúan de la misma forma en las nueve paredes analizadas. Las principales razones son los diferentes climas y las distintas exposiciones de cada pared al ambiente exterior.

Así, buscando sintetizar los principales resultados de esta tesis, las nueve paredes analizadas son clasificadas en tres tipos, utilizando como criterio su exposición al ambiente exterior:

- a) PARED EXTERNA: elemento constructivo vertical y opaco que divide el aula del ambiente exterior; totalmente expuesto al paso del aire y a la radiación solar; entre las paredes analizadas por la tesis, es la Fachada B de todas las aulas;
- b) PARED EXTERNA SOMBREADA: elemento constructivo vertical y opaco que divide el aula del ambiente exterior; totalmente expuesto al paso del aire pero parcialmente o totalmente protegida de la radiación solar; entre las paredes analizadas por la tesis, son la Fachada D de todas las aulas, así como la Fachada C de las Aulas A101 de Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT);
- c) PARED INTERNA: elemento constructivo vertical y opaco que divide el aula de otro ambiente interior; ese ambiente es caracterizado por: c.1) ocupación transitoria y bajos aportes internos; c.2) aberturas en la pared externa del otro ambiente que posibiliten el paso del aire pero que eviten cargas térmicas por radiación solar relevantes en la pared interna del aula; entre las paredes analizadas por la tesis, es la Fachada C del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR);

Vale destacar, en la definición de cada tipo de pared, que se tratan de paredes opacas. Así, están excluidas de los análisis las paredes construidas con elementos transparentes y/o perforados.

A partir de esa clasificación, es posible resumir las principales cuestiones abordadas en esta tesis.

La primera cuestión es la superficie por volumen habitable de cada pared y su impacto en la demanda de refrigeración. Cuando la **pared externa** es la pared con mayor superficie por volumen del ambiente de enseñanza, se disminuye de forma significativa la disipación del calor, cuando las temperaturas exteriores están por

debajo de los 24,0°C, así como aumentan las ganancias térmicas, cuando las temperaturas exteriores están por encima de los 24,0°C.

Sin embargo, cuando la **pared externa sombreada** o la **pared interna** es la elegida como la pared con mayor superficie por volumen, se incrementa la disipación del calor, cuando las temperaturas exteriores están por debajo de los 24,0°C, así como se reducen las ganancias térmicas, cuando las temperaturas exteriores están por encima de los 24,0°C.

El principal motivo para esos distintos comportamientos es la radiación solar incidente en los planos verticales, que añaden a las **paredes externas** cargas térmicas significativas.

No obstante, esas cargas térmicas pueden ser reducidas mediante la elección del coeficiente de absorción. Para la **pared externa**, cuanto más bajo sea esa variable constructiva, menores son las ganancias térmicas, con consecuente aumento de las tasas de disipación del calor y disminución de la demanda de refrigeración.

Para la **pared externa sombreada**, con menor exposición a la radiación solar directa, es posible elegir acabados con coeficientes de absorción más altos sin mayores impactos en las tasas de flujo de calor por esa pared. Sin embargo, hay que tener en cuenta la efectividad de los elementos de sombreado, así como la radiación difusa y la reflejada por otros elementos del entorno.

Por lo tanto, considerando el valor límite estipulado en la normativa brasileña (INMETRO 2013) para la **pared externa sombreada** ($\alpha \leq 0,50$), es posible adoptar colores distintos en los acabados externos sin mayores impactos en las tasas de flujo de calor por ese tipo de pared.

Para la **pared interna**, con exposición a la radiación solar nula o casi nula, se puede

elegir cualquier coeficiente de absorción, pues no tendrá efectos relevantes en su desempeño térmico.

Para las propiedades térmicas de las paredes, los diferentes valores del coeficiente de transmitancia térmica están vinculados a dos valores de capacidad térmica: valores próximos a $200 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ y a $400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$.

Debido a los resultados de esta investigación, las paredes con capacidades térmicas menores o igual a $80 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ (INMETRO 2013) deben ser evitadas en los ambientes de enseñanza, cualquier que sea el clima y/o factor de exposición de la pared al ambiente exterior.

Para las paredes con capacidad térmica alrededor de $200 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$, los resultados de esta investigación demuestran que las paredes expuestas al ambiente exterior presentan comportamiento térmico no lineal del coeficiente de transmitancia térmica para los climas de Cruz das Almas (MAR) y Barreiras (CONT).

Ese tipo de comportamiento térmico de las paredes ya fue analizado por otros estudios académicos (SIGNOR et. al. 2001; CARLO et. al. 2003; MELO 2007; CARLO 2008) y se caracteriza por la ausencia de una tendencia lineal de ahorro energético al aumentar o disminuir el coeficiente de transmitancia térmica.

Por ese motivo, tanto para la **pared externa** cuanto para la **pared externa sombreada** de ambientes de enseñanza construidos en las ciudades de Cruz das Almas (MAR) y Barreiras (CONT), se apunta que los mayores ahorros energéticos ocurren al adoptar el coeficiente de transmitancia térmica entre $2,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y $3,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Para la **pared externa** de ambientes de enseñanza construidos en Vitória da Conquista (ALT), los resultados indican la adopción de paredes con coeficiente de transmitancia térmica intermedio ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), debido a los altos valores de

radiación solar en ese sitio. Sin embargo, para la **pared externa sombreada** los resultados sugieren paredes menos aisladas, pues ellas permiten mayor disipación del calor y, consecuentemente, menor demanda de refrigeración.

Para la **pared interna**, debido a su intercambio de energía térmica con otro ambiente interior caracterizado por sus menores aportes internos, los resultados también indican la adopción de paredes menos aisladas en las tres zonas climáticas, a fin de promover mayores pérdidas térmicas.

Los resultados de esta investigación apuntan las paredes con capacidad térmica alrededor de $400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ como las que proporcionan los mayores ahorros energéticos, en las tres zonas climáticas estudiadas.

La indicación de una misma variable constructiva para distintas zonas climáticas se justifica por causa del retraso térmico promovido por las paredes pesadas. Ese retraso implica en transmisión de la energía térmica hacia el ambiente interior al final del día, o cuando el ambiente está desocupado. Del mismo modo, el retraso térmico permite que la disipación del calor hacia el ambiente exterior ocurra con menores tasas de flujo de calor, pero por más tiempo. En ese caso, las pérdidas térmicas ocurren mientras el aula está ocupada, disminuyendo el tiempo en que coinciden las ganancias térmicas con la ocupación del espacio.

Por esos motivos, se indica como directriz la adopción de paredes pesadas y menos aisladas para la **pared externa sombreada**, en las tres zonas climáticas.

Sin embargo, cuando la pared está totalmente expuesta a la radiación solar, la adopción de la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ / $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) disminuye los efectos del retraso térmico, característico de las paredes con alta capacidad térmica.

Así, la **pared externa** que demuestra mejor desempeño térmico en las tres ciudades es la pared pesada con el coeficiente de transmitancia térmica intermedio ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ / $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Esa configuración de pared presenta mayor balance energético, entre ganancias y pérdidas térmicas, en los días de mayor y menor demanda de refrigeración.

Vale destacar que, en Vitória da Conquista (ALT), los resultados de los balances energéticos para la **pared externa** demuestran que la pared pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ / $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) funciona mejor en el día de menor demanda de refrigeración, mientras que, en el día de mayor demanda de refrigeración, eso ocurre con la pared pesada con el coeficiente de transmitancia térmica intermedio ($U=2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ / $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Por esos motivos, la elección de una u otra configuración para la **pared externa** de ambientes de enseñanza en esa zona climática depende del análisis de otros aspectos (coeficiente de absorción del acabado externo; proporción de la superficie de la pared por volumen habitable del ambiente; orientación; etc), lo que supera los límites establecidos para esta investigación.

Para la **pared interna**, los resultados indican que la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ / $Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) presenta balances energéticos más favorables que las paredes pesadas en el día de menor demanda de refrigeración de Cruz das Almas (MAR). Además, en el día de mayor demanda de refrigeración en esa ciudad, la pesada menos aislada ($U=3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ / $Ct=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) logra balances energéticos similares al de la pared menos aislada ($U=4,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ / $Ct=236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$).

Junto a esos resultados, hay que destacar que la pared con capacidad térmica alrededor de $200 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ implica en menor peso a la estructura del edificio, si comparada con la pared con capacidad térmica alrededor de $400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$.

Por esos motivos, la investigación indica como directriz para la **pared interna** la adopción de pared menos aislada con capacidad térmica alrededor de $200 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$.

Por fin, se indica como futuras investigaciones la búsqueda por materiales locales con propiedades térmicas que promuevan el ahorro energético apuntado por esta tesis. Así, mediante nuevos trabajos académicos, será posible apuntar soluciones constructivas para los nuevos edificios de enseñanza que se plantean construir en los *campi* universitarios implantados en las ciudades del interior de Bahía / Brasil.

Otra línea de investigación posible es utilizar esa metodología para edificios con otras rutinas de ocupación, en distintas zonas climáticas. Desafortunadamente, la decisión de elegir proyectos estándar para la construcción de edificios públicos es una práctica corriente en Brasil. Así, poner en valor las decisiones de diseño, las condiciones climáticas de cada sitio y la eficiencia energética de esos edificios, puede sensibilizar los gestores públicos en la toma de decisiones sobre la construcción de edificios públicos en Brasil.

ANEXOS

ANEXO I ELABORACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES PARA LAS SIMULACIONES ENERGÉTICAS

Este apartado se centra en la descripción de la recogida de datos, tanto *in situ* cuanto en plataformas *online*, y en la elaboración de modelos computacionales para las simulaciones energéticas utilizadas como método de investigación en esta tesis.

I.1 RECOGIDA DE DATOS

En los meses de agosto y septiembre de 2016 fueron realizadas visitas técnicas a los tres *campi* universitarios, ubicados en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT), con el objetivo de recoger datos sobre los tres edificios y realizar mediciones de temperatura interior en algunas aulas de cada pabellón. Fue establecido un periodo de nueve días en cada ciudad para poder recoger una semana completa de actividades. El periodo de realización de cada visita técnica está indicado en la Tabla 15.

Tabla 15: Periodo de recogida de datos *in situ* de cada pabellón de aulas

MAR	31/08/2016 – 08/09/2016
ALT	01/08/2016 – 09/08/2016
CONT	22/08/2016 - 30/08/2016

Fueron realizadas las siguientes actividades en cada una de las ciudades:

a) Recogida de datos constructivos sobre los tres pabellones de aulas

Fueron consultados los departamentos de arquitectura e ingeniería de cada universidad para solicitar los siguientes datos constructivos de cada edificio: planos arquitectónicos y especificaciones técnicas de materiales; características de los sistemas de iluminación; aparatos instalados en cada aula; características de los equipos de climatización; consumo energético de cada edificio.

Los datos de implantación de cada pabellón de aulas, así como los datos constructivos de cada edificio, están organizados en las Tablas 16 y 17, respectivamente.

Tabla 16: Datos sobre la implantación de cada Pabellón de Aulas (MAR; ALT; CONT)

	MAR	ALT	CONT
Latitud	12°40'S	14°52'S	12°09'S
Longitud	39°06'W	40°50'W	44°59'W
Elevación (m.s.n.m.)	224m	923m	452m
Orientación (Acceso principal)	17°N	223°N	113°N
Área (m ²)	4.284,60	4.284,60	4.284,60
N° plantas	2	2	2

Fuente: (UFRB 2006; UFBA 2006; UFOB 2006)

Tabla 17: Características constructivas del Aula A101 de cada Pabellón de Aulas (MAR; ALT; CONT)

			MAR	ALT	CONT
Área (m ²)			87,26	78,11	78,11
Volumen (m ³)			266,52	242,14	242,14
Tasa de acristalamiento (%)			24,90	22,87	22,87
Funcionamiento de las ventanas externas y sus respectivos porcentajes de abertura			corredera; 50%	corredera; 40%	corredera; 50%
Funcionamiento de las ventanas internas y sus respectivos porcentajes de abertura			proyectante; 30%	-	-
PARED	U (W/m ² .K)	bloque hueco de hormigón (e=0,11m); mortero en las dos caras (e=0,02m); pintura acrílica externa.	2,73	2,73	2,73
	Ct (kJ/m ² .K)		236,00	236,00	236,00
	α (0 -1)		0,37	0,26	0,22
SUELO	U (W/m ² .K)	losa en hormigón armado (e=0,15m); acabado del piso en terrazo estándar color gris	1,74	1,74	1,74
	Ct (kJ/m ² .K)		520,50	520,50	520,50
TECHO	U (W/m ² .K)	falso techo en fibra mineral (e=0,04m); color blanco	1,84	1,84	1,84
	Ct (kJ/m ² .K)		1,70	1,70	1,70

Fuente: (UFRB 2006; UFBA 2006; UFOB 2006)

Sobre la dimensión de las aulas, es importante destacar que ellas fueron diseñadas para grupos de 45 alumnos, cuya densidad de ocupación varía entre 1,5 pers./m² y 2,0 pers./m².

Sobre los acabados, hay que añadir que la Fachada B de cada edificio posee acabado externo con revestimiento cerámico (Figura 157). La adopción de ese tipo de acabado cambia las propiedades radiactivas y térmicas de la pared externa de esa fachada de la siguiente manera:

- aumento del coeficiente general de absorción del Aula A101, ya que ese revestimiento cerámico posee coeficiente de absorción igual a 0,40, mientras

que los colores utilizados en las otras paredes están siempre por debajo de 0,30;

- ligera disminución del coeficiente de transmitancia térmica, de $2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ para $2,68 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$;
- ligero incremento de la capacidad térmica, de $236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ para $251 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$.

Figura 157: Fachadas con revestimiento cerámico en los tres pabellones de aulas (MAR; ALT; CONT)



Vale destacar que, a pesar de esos cambios, los análisis realizados en esta tesis consideraron valores estandarizados del coeficiente de transmitancia térmica y de la capacidad térmica, $2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y $236 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$, respectivamente, para todas las paredes externas, pues la magnitud de esos cambios son despreciables con relación al desempeño térmico de las mismas.

Sin embargo, fue considerado el coeficiente de absorción del revestimiento cerámico de 0,40 al calcular el coeficiente de absorción general de las paredes externas, pues esa diferencia de valores afecta el desempeño térmico de las paredes externas.

A cerca del sistema de iluminación artificial y de los aparatos instalados, las tres aulas evaluadas poseen la misma cantidad de luminarias y los mismos aparatos instalados (Tabla 18), a pesar del Aula A101 del edificio de Cruz das Almas (MAR) tener dimensiones distintas de las otras dos.

Tabla 18: Características de los sistemas de iluminación artificial y de otros aparatos existentes en las Aulas A101 de cada edificio

	MAR	ALT	CONT
Sistema de iluminación artificial	12 luminarias con 2 lámparas fluorescentes de 32W cada una; potencia lumínica total de 768W		
Otros aparatos existentes	Un ordenador y un proyector; potencia total de 250W		

Fuente: (UFRB 2006; UFBA 2006; UFOB 2006)

Sobre los equipos de climatización (Tabla 5), solo los técnicos de la universidad implantada en Barreiras (CONT) poseían informaciones sobre la marca y la potencia de los aparatos, pero ellos no sabían indicar el coeficiente de eficiencia energética (EER) de los mismos. No obstante, fue posible definir el EER de esos aparatos consultando una lista organizada por INMETRO¹² que indica el coeficiente de eficiencia energética a partir de las informaciones de marca y modelo. Ese dato del pabellón de aulas de Barreiras (CONT) también fue utilizado en los otros dos edificios.

Los técnicos del campus universitario de Cruz das Almas (MAR) estaban involucrados en la adquisición de aparatos de climatización artificial para las aulas, pues la obra fue finalizada sin esos aparatos. A la época, las aulas funcionaban con ventiladores y era motivo de queja de profesores y estudiantes. En Vitória da Conquista (ALT), los técnicos tenían la potencia de los aparatos, pero sin la marca de cada uno de ellos, lo que imposibilitó la búsqueda sobre el EER de los mismos. La Tabla 19 presenta esos datos para cada Aula A101 de los edificios evaluados.

¹²Tabla disponible en <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores.asp> (acceso en diciembre/2016).

Tabla 19: Características de los sistemas climatización artificial existentes en las Aulas A101 de cada edificio

	MAR	ALT	CONT
Aparatos instalados	-	2 aparatos <i>split</i> , sin renovación del aire	2 aparatos <i>split</i> , sin renovación del aire
Potencia (BTU)	-	30.000 BTU's 18.000 BTU's	36.000 BTU's 36.000 BTU's
EER	-	-	3,20

Fuente: (UFRB 2006; UFBA 2006; UFOB 2006)

Antes de las visitas técnicas, se imaginaba acceder a los consumos energéticos mensuales de cada uno de los pabellones de aulas. Sin embargo, los tres edificios no poseen lectura de consumos individualizados. Fueron construidas pocas subestaciones y cada una alimenta a un conjunto de edificios, en general tres por cada subestación. Además, la lectura de energía no distingue el consumo energético de cada edificio. Así, desafortunadamente, esa información no está disponible ni para la gestión energética de cada edificio ni para actividades de investigación.

b) Recogida de datos sobre la rutina de ocupación de las aulas

Esa actividad consistió en medir la temperatura ambiente de algunas aulas del edificio en conjunto con la rutina de ocupación de cada uno de esos espacios, a fin de tener datos suficientes para la calibración del modelo computacional utilizado para las simulaciones energéticas.

Para las mediciones de temperatura interior fue utilizado un *datalogger* Testo 174H, instalado a la altura de 1,20m. Él fue configurado para registrar la temperatura en un intervalo de diez minutos, durante el periodo de recogida de datos en cada ciudad.

Fueron seleccionadas dos aulas en la primera planta¹³ de cada pabellón para la medición de temperatura interior y para evaluar las cargas térmicas por las paredes

¹³ Ver Anexo V para identificar las aulas utilizadas para la colecta de datos en cada pabellón de aulas.

externas y por la cubierta.

A cerca de la rutina de ocupación, fue elaborada una ficha solicitando las siguientes informaciones: identificación del aula; la fecha; horario en qué ocurre la clase; número de alumnos; funcionamiento de las ventanas (abierto / cerrado); funcionamiento de los aparatos (proyector; lámparas; aire acondicionado y su respectiva temperatura de consigna). Esa ficha fue rellena por los profesores de cada clase. La Figura 158 presenta una ficha rellena en Barreiras (CONT).

Figura 158: Modelo de ficha utilizada para la recogida de datos

PESQUISA SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS PAVILHÕES DE AULA (UFBA / UFOB / UFRB)			
SALA	25/08/11	DATA	25/08
HORÁRIO DA AULA	07:30	Nº ALUNOS	25
JANELA PRINCIPAL ABERTA	sim	JANELA LATERAL ABERTA	sim
	não <input checked="" type="checkbox"/>		não <input checked="" type="checkbox"/>
APARELHOS UTILIZADOS NA AULA	PROJETOR	sim	não <input checked="" type="checkbox"/>
	LÂMPADAS	sim <input checked="" type="checkbox"/>	não
	AR-CONDICIONADO 01	sim <input checked="" type="checkbox"/>	não
	TEMP. AR-COND. 01 (maior)		25'
	AR-CONDICIONADO 02	sim <input checked="" type="checkbox"/>	não
	TEMP. AR-COND. 02 (menor)		25'

Fue posible recoger esos datos para Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT). Desafortunadamente, no hubo clases en Cruz das Almas (MAR) durante el periodo de recogida de datos debido a una huelga de profesores y alumnos.

1.2 ELABORACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES PARA SIMULACIÓN ENERGÉTICA

Para las simulaciones energéticas fue utilizado el programa Designbuilder v. 4.02. por causa de las siguientes características: permite utilizar los archivos climáticos de ciudades brasileñas; es capaz de simular 8.760 horas por año, con variaciones horarias de ocupación y funcionamiento de aparatos; simula los efectos de la inercia

térmica de los materiales en los ambientes interiores.

Antes de las visitas técnicas se imaginaba que era posible elaborar solo un modelo computacional para hacer las simulaciones energéticas de los tres pabellones de aulas, pues los mismos fueron construidos con base en un mismo proyecto estándar. Sin embargo, hay diferencias constructivas significativas entre ellos que impusieron la realización de tres modelos:

- La posición de la circulación varía entre los pabellones: en Cruz das Almas (MAR) y en Vitória da Conquista (ALT) el pasillo se sitúa a la izquierda, con relación a la entrada principal, mientras que en Barreiras (CONT) está a la derecha;
- El módulo estructural del pabellón de Cruz das Almas (MAR) es distinto de los otros dos edificios, implicando en dimensiones distintas tanto de la circulación como de las aulas.

Por lo tanto, fueron construidos tres modelos computacionales, uno para cada pabellón. Sin embargo, las plantillas de configuración de la edificación (actividades, materiales constructivos, aberturas y sistemas de acondicionamiento del aire) fueron compartidas entre tres los modelos computacionales, solo cambiando elementos específicos de cada edificación, como los colores de los acabados externos.

I.2.1 Calibración de los modelos computacionales

A partir de los datos recogidos y de la definición del objetivo de la tesis, se eligió el Aula A101 para calibrar los modelos computacionales por las siguientes razones:

- Sus tres paredes externas le dejan más superficie expuesta al ambiente exterior;

- Posibilidad de evaluar la influencia de la cubierta sobre el desempeño térmico del ambiente interior, conforme análisis realizada en el Capítulo 4.

Esa actividad consistió en realizar simulaciones de calibración de cada archivo con base en los siguientes datos:

- las mediciones de temperatura interior realizadas;
- los datos meteorológicos de cada ciudad en el periodo de cada medición, consultados en el sitio del *Instituto de Meteorologia* (INMET);
- las rutinas de ocupación registradas en las fichas durante la recogida de datos.

La variable utilizada para las calibraciones fue la temperatura interior. Fue utilizada la fórmula estadística de Pearson (Chi-cuadrado) para comparar las temperaturas interiores registradas por las mediciones y las obtenidas mediante simulación (Ec. 01). Para eso, fue establecido un intervalo de 30 minutos para la comparación de los datos y un margen de error aceptable de 0,5.

$$x^2 = \sum_i \left(\frac{(\text{observada}_i - \text{teórica}_i)^2}{\text{teórica}_i} \right) \quad \text{Ec. 01}$$

A partir de las calibraciones, fue posible definir las siguientes variables: infiltración (renov./h); tasas de ventilación natural (renov./h); temperatura de consigna de los aparatos de climatización; la densidad de carga térmica determinado por la ocupación, por el sistema de iluminación artificial y otros aparatos utilizados en las aulas.

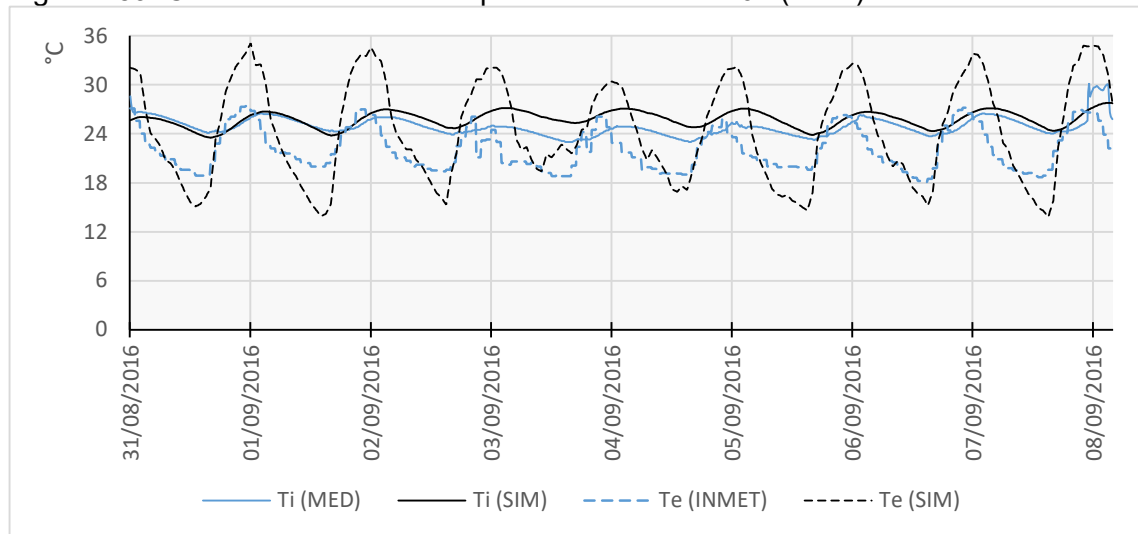
Primeramente, se muestra la calibración del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).

Conforme comentado anteriormente, en la semana de recogida de datos no hubo clases en ese edificio. Así, la principal variable definida en esa etapa fue la infiltración (renov./h) (Tabla 20 y Figura 159).

Tabla 20: Calibración del Aula A101 del pabellón de aulas de Cruz das Almas (MAR)

Aula A101 (MAR)	MEDICIÓN	CALIBRACIÓN
Periodo de evaluación	31/08/2016 a 08/09/2016	28/08/2002 a 05/09/2002 (archivo climático)
Tasa de Infiltración	-	0,80 ac/h
Horarios de ocupación	*la edificación estuvo desocupada durante las mediciones por causa de la huelga de funcionarios	Sin ocupación
Densidad de ocupación	-	0,67 personas/m ² Sin ocupación
Cantidad de personas	-	-
Sistema de Refrigeración	Todavía no hay aparatos de climatización en las aulas	Sin configuración
Ventilación natural	Ventanas siempre cerradas	OFF (sin ocupación)
Sistema de iluminación	24 lámparas fluorescentes 32W OFF(sin ocupación)	Lámparas tubulares fluorescentes; 10,20 W/m ² OFF (sin ocupación)
Otros aparatos	1 ordenador; 1 proyector	2,70 W/m ² OFF (sin ocupación)

Figura 159: Calibración modelo computacional - Aula A101 (MAR)



En la semana de recogida de datos en Vitória da Conquista (ALT), debido a las temperaturas exteriores más suaves, el sistema de climatización no fue encendido en ningún momento. En general, las clases estaban con las puertas y ventanas cerradas por la mañana y, por la tarde, con las puertas cerradas y las ventanas un poco abiertas. Además, los cursos nocturnos todavía no habían sido creados en ese campus y, por lo tanto, el edificio no funcionaba por la noche.

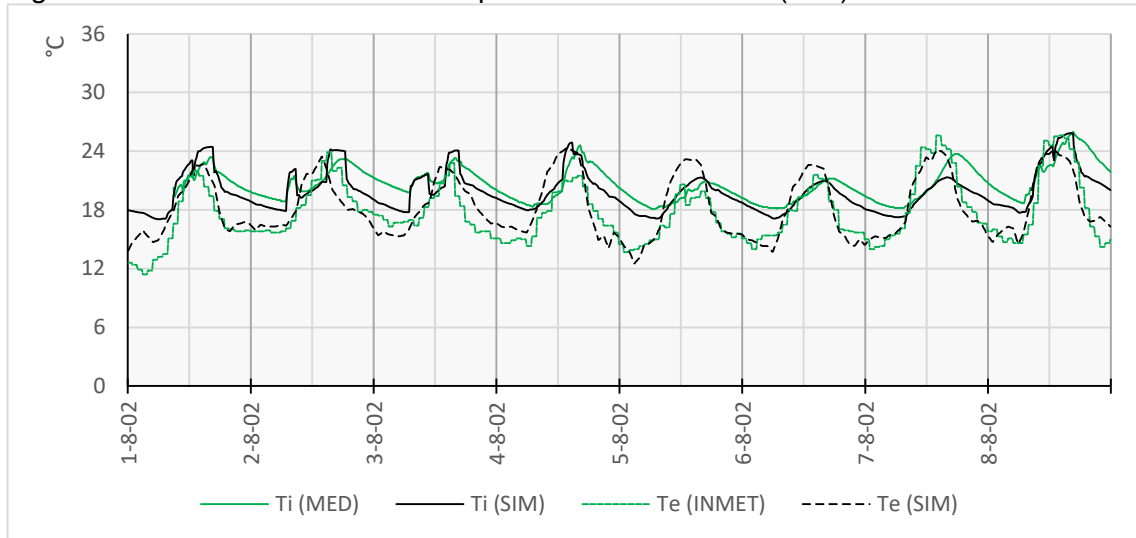
Así, las variables calibradas en esa etapa fue la infiltración (renov./h), los aportes internos (W/m^2) y las tasas de ventilación (renov./h). Sobre esa última variable, vale destacar que los valores presentados en la Tabla 21 son una aproximación, basada en los datos recogidos y calibrados, pues sus valores varían según la densidad de ocupación del espacio y de las temperaturas exteriores de cada día (Figura 160).

El sistema de iluminación artificial funciona de dos maneras: o 100% encendidas, cuando la clase está basada en exposición oral y en la utilización de la pizarra; 33% encendidas, cuando el profesor utiliza el proyector y el ordenador para su exposición. La configuración más utilizada fue esa última.

Tabla 21: Calibración del Aula A101 del pabellón de aulas de Vitória da Conquista (ALT)

Aula A101 (ALT)	MEDICIÓN	CALIBRACIÓN
Periodo de evaluación	01/08/2016 a 08/08/2016	31/07/2002 a 07/08/2002 (archivo climático)
Tasa de Infiltración	-	0,80 ac/h
Horarios de ocupación	mañana: 07:00 –12:30 tarde: 13:50 –18:50	Según datos colectados
Densidad de ocupación	0,67 personas/ m ²	0,67 personas/m ²
Cantidad de personas	Variable	Según datos colectados
Sistema de climatización	2 aparatos Split (18.000 BTU; 30.000 BTU) Sistema apagado en el periodo de mediciones	Sistema HVAC: Autosize; IdealLoads Sistema apagado en el periodo de calibración
Ventilación natural	Abertura de ventanas según la intervención del usuario	0,15 ac/h (con ocupación; mañana) 1,50 ac/h (con ocupación; tarde) OFF (sin ocupación)
Sistema de iluminación	24 lámparas fluorescentes 32W -33% de utilización: 268,8W (con otros aparatos encendidos); -100% de utilización: 768W (otros aparatos apagados)	Lámparas tubulares fluorescentes; 10,20 W/m ² -35%de utilización: 3,57 W/m ² (con otros aparatos encendidos); -100% de utilización: 10,20 W/m ² (otros aparatos apagados)
Otros aparatos	1 ordenador; 1 proyector	2,70 W/m ² (con ocupación)

Figura 160: Calibración modelo computacional - Aula A101 (ALT)



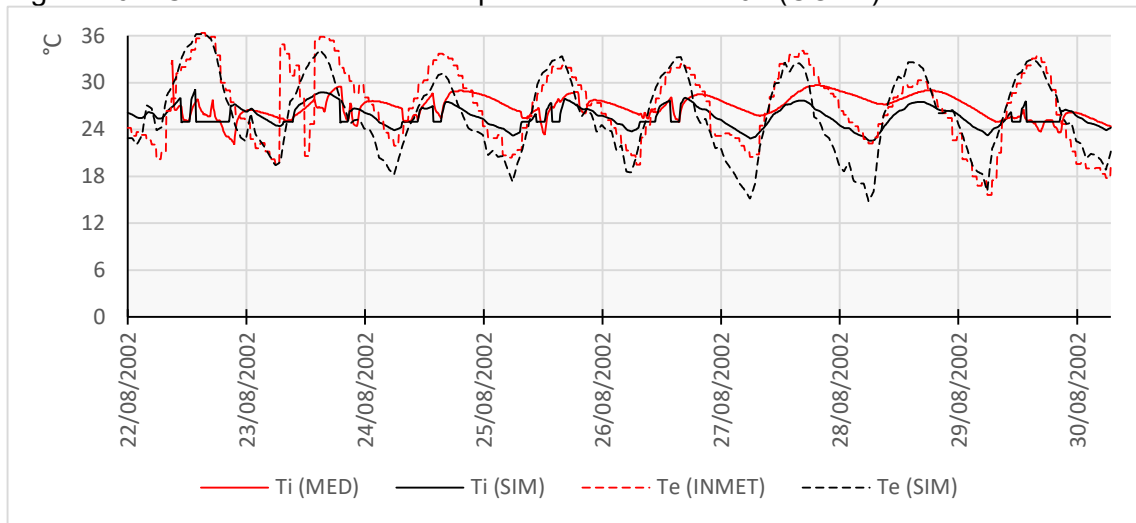
En Barreiras (CONT), las aulas estaban siempre climatizadas y con las ventanas cerradas. En ese campus ya habían sido implantados los cursos nocturnos, cuyas clases se extendían hasta las 22:00h. Así, las variables calibradas en esa etapa fue la infiltración (renov./h), los aportes internos (W/m^2) y las tasas de ventilación (renov./h). Sobre esa última variable, su configuración solo fue necesaria cuando el ambiente estaba ocupado, debido a la abertura de puertas antes, durante y después de las clases.

La configuración de los aparatos de climatización del Aula A101 de Barreiras (CONT) también fue simplificada para la opción de auto-dimensionado con cargas ideales (*HVAC Autosize; IdealLoads*). Contribuye para esa decisión el hecho de que el objetivo de la tesis es el análisis del desempeño térmico de las paredes externas. Además, sin los datos de consumo energético de los edificios, la calibración de los sistemas de climatización es una tarea imposible.

Tabla 22: Calibración del Aula A101 del pabellón de aulas de Barreiras (CONT)

Aula A101 (CONT)	MEDICIÓN	CALIBRACIÓN
Periodo de evaluación	22/08/2016 a 29/08/2016	28/08/2002 a 05/09/2002 (archivo climático)
Tasa de Infiltración	-	0,80 ac/h
Horarios de ocupación	mañana: 07:30 –12:30 tarde: 13:50 –18:50 noche: 19:00 –22:20	Según datos colectados
Densidad de ocupación	0,67 personas/ m ²	0,67 personas/m ²
Cantidad de personas	Variable	Según datos colectados
Sistema de climatización	2 aparatos Split (36.000 BTU) Temperatura de consigna: variable (en general, 22°C)	Sistema HVAC: Autosize; IdealLoads Temperatura de consigna: 25°C
Ventilación natural	Ventanas siempre cerradas	0,15 ac/h (con ocupación) OFF (sin ocupación)
Sistema de iluminación	24 lámparas fluorescentes 32W -33% de utilización: 268,8W (con otros aparatos encendidos); -100% de utilización: 768W (otros aparatos apagados)	Lámparas tubulares fluorescentes; 10,20 W/m ² -35%de utilización: 3,57 W/m ² (con otros aparatos encendidos); -100% de utilización: 10,20 W/m ² (otros aparatos apagados)
Otros aparatos	1 ordenador; 1 proyector	2,70 W/m ² (con ocupación)

Figura 161: Calibración modelo computacional - Aula A101 (CONT)



I.2.2 Características de los modelos computacionales para las simulaciones energéticas

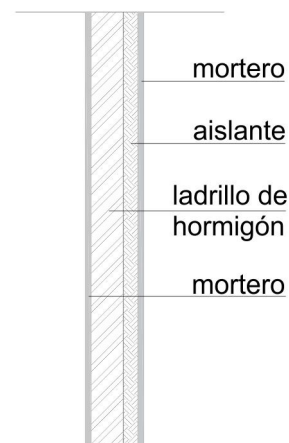
A partir de los modelos computacionales calibrados, fue adoptada la misma rutina de ocupación para las tres aulas evaluadas (Tabla 23), considerando que: todas las aulas son ocupadas en los tres turnos (mañana, tarde y noche); mayor ocupación durante el día que por la noche, según datos recogidos del Pabellón de Aulas de Barreiras (CONT); adopción de la temperatura de consigna de 24°C, siguiendo los parámetros normativos, las referencias bibliográficas consultadas y la práctica profesional de proyectos de climatización artificial en Brasil; la densidad lumínica adoptada considera la utilización de los aparatos en todas las clases y, por eso, solo 33% de las lámparas están encendidas.

Tabla 23: Rutina de ocupación para el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT)

Horarios de ocupación	mañana: 07:00 –12:00 tarde: 13:30 –18:30 noche: 19:00 – 22:00
Densidad de ocupación	- 0,67 personas/ m ² - 70% de ocupación (mañana / tarde) - 50% de ocupación (noche)
Sistema de Refrigeración	- Sistema HVAC: Autosize; IdealLoads - EER: 3,20 - Temperatura de consigna (refrigeración): 24°C - Ventilación natural: 0,15 ac/h (con ocupación) OFF (sin ocupación)
Tasa de Infiltración	0,80 ac/h
Sistema de iluminación	Lámparas tubulares fluorescentes; - 35% de utilización: 3,57 W/m ² (otros aparatos encendidos); - OFF (sin ocupación)
Otros aparatos	- 1 ordenador; 1 proyector (2,70 W/m ²) - OFF (sin ocupación)

Para la configuración de los diversos tipos de paredes externas simuladas, fue utilizado como base la estructura de la pared de bloque hueco de hormigón existente (Figura 162). Sus propiedades térmicas están indicadas en la Tabla 24, mientras que las propiedades térmicas de las diversas configuraciones utilizadas para evaluar las posibilidades de optimización están indicadas en la Tabla 25.

Figura 162: Sección estándar pared



Para la creación de las distintas configuraciones de optimización, fue añadida una capa de aislante de fibra mineral y fue disminuido el espesor de las capas de mortero, en las superficies exterior e interior de la pared externa, a fin de mantenerlo constante para todas las configuraciones adicionales.

Tabla 24: Propiedades térmicas de la pared externa construida en los tres pabellones de aulas

CAPAS	e (m)	λ (W/m·K)	ρ (kg/m ³)	Ce (J/kg·K)	U (W/m ² ·K)	Ct (kJ/m ² ·K)
mortero externo	0,02	1,15	2.000,00	1.000,00	2,73	236
bloque de hormigón	0,11	0,75	1.200,00	1.000,00		
mortero interno	0,02	1,15	2.000,00	1.000,00		

Tabla 25: Configuración de los espesores y de las propiedades térmicas de las paredes externas utilizadas para las simulaciones de optimización

PAREDES EXTERNAS	Espesor del material (m)				Propiedad térmica	
	mortero externo	aislante	bloque de hormigón	mortero interno	U (W/m ² ·K)	Ct (kJ/m ² ·K)
Existente	0,0200	-	0,1100	0,0200	2,73	236
Pared 01	0,0100	0,0535	0,0792	0,0100	0,70	236
Pared 02	0,0100	0,0215	0,0810	0,0100	1,40	236
Pared 03	0,0100	0,0109	0,0813	0,0100	2,10	236
Pared 04	0,0100	0,0023	0,0815	0,0100	3,50	236
Pared 05	0,0100	0,0002	0,0815	0,0100	4,20	236
Pared 06	0,0100	0,0078	0,0121	0,0100	2,73	70
Pared 07	0,0100	0,0042	0,1500	0,0100	2,73	400
Pared 08	0,0100	0,0521	0,1475	0,0100	0,70	400
Pared 09	0,0100	0,0006	0,1500	0,0100	3,50	400

ANEXO II DATOS CLIMÁTICOS

II.1 DATOS CLIMÁTICOS DE CRUZ DAS ALMAS (MAR)

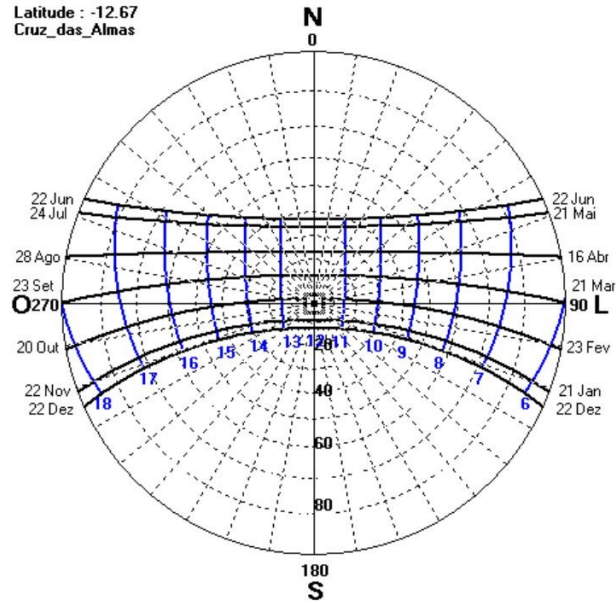
Tabla 26: Medias anuales de datos meteorológicos para Cruz das Almas (MAR)

Radiación Global Horizontal (kWh/m ² .día)	4,9
Nubosidad media (décimas)	0,7
Temperatura máxima (°C)	28,6
Temperatura media (°C)	24,0
Temperatura mínima (°C)	20,7
Oscilación diaria (°C)	7,9
Oscilación anual (°C)	5,1
HR media (%)	79,6
Precipitaciones (mm)	1.136,0
Vientos - velocidad media (m/s)	2,9

Fuente: INMET (2016); Climate Data (2017a); Wilson y Jetz (2016)

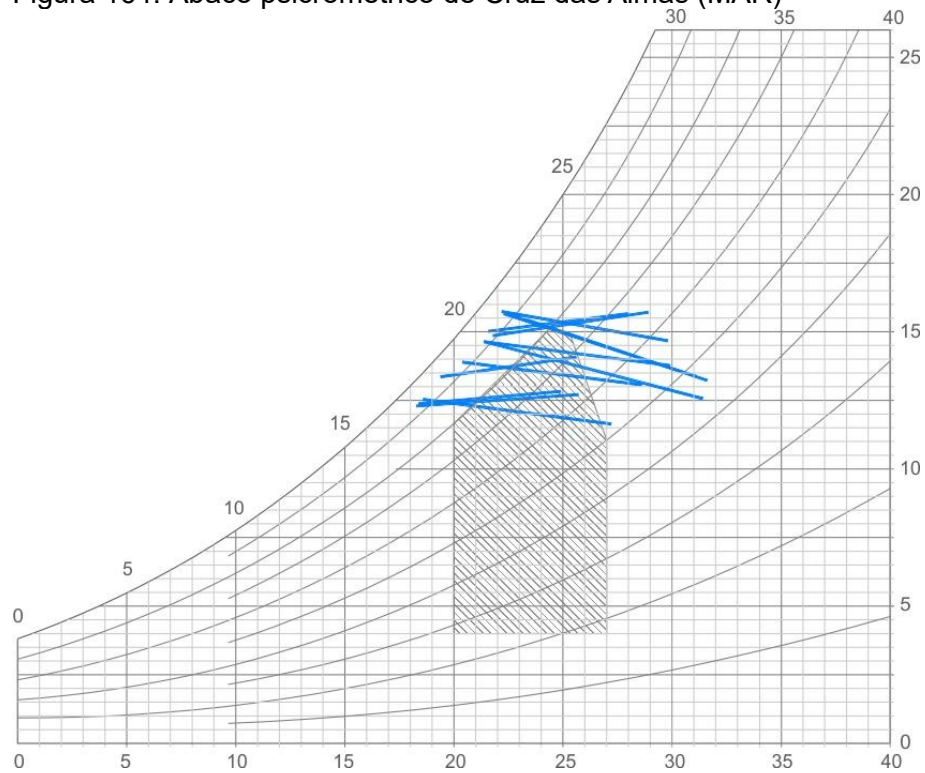
Figura 163: Carta estereográfica de Cruz das Almas (MAR)

Latitude : -12.67
Cruz_das_Almas



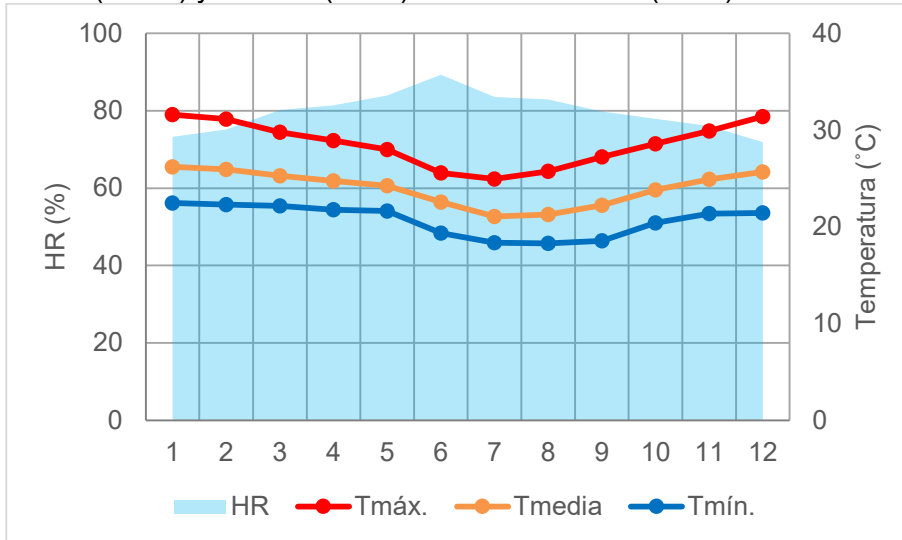
Fuente: software SOL-AR (LabEEE)

Figura 164: Ábaco psicrométrico de Cruz das Almas (MAR)



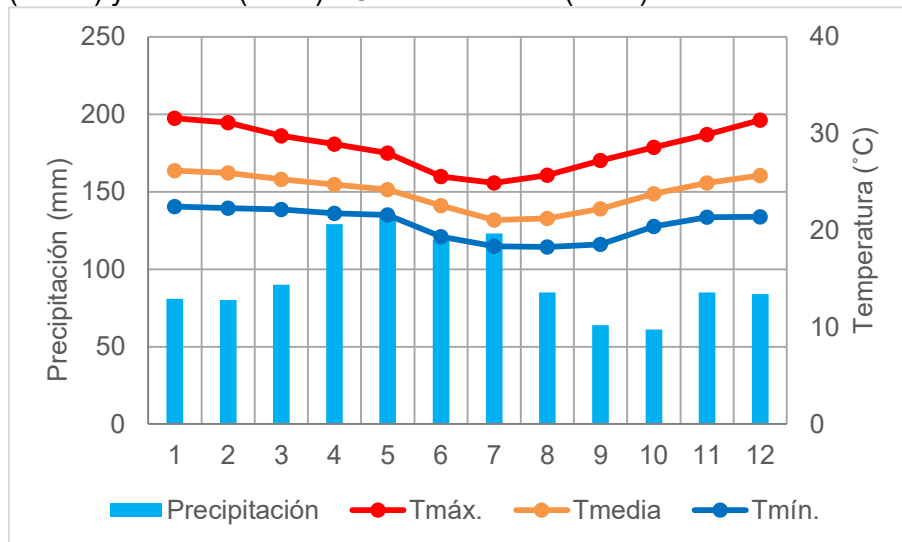
Fuente: INMET (2016)

Figura 165: Humedad relativa (HR) x Temperaturas máxima (Tmáx), media (Tmed) y mínima (Tmín) - Cruz das Almas (MAR)



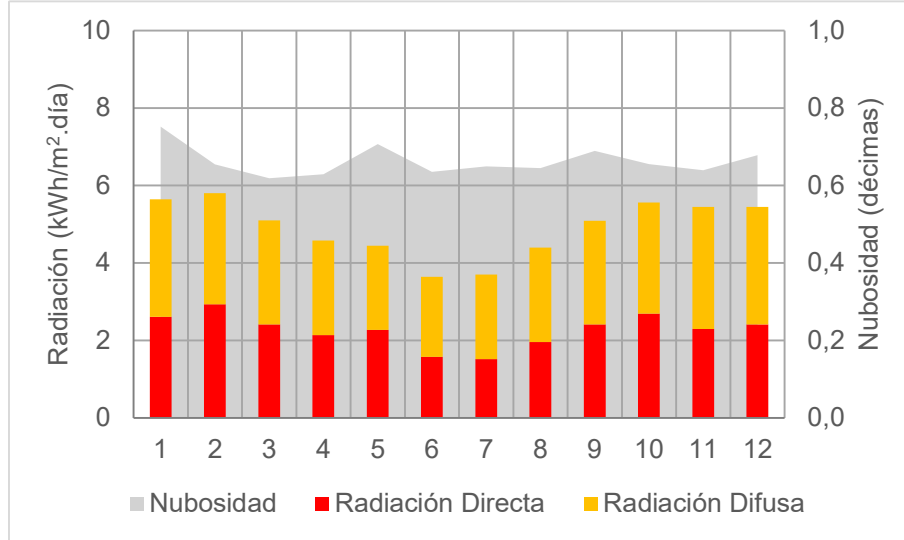
Fuente: INMET (2016)

Figura 166: Precipitación x Temperaturas máxima (Tmáx), media (Tmed) y mínima (Tmín) - Cruz das Almas (MAR)



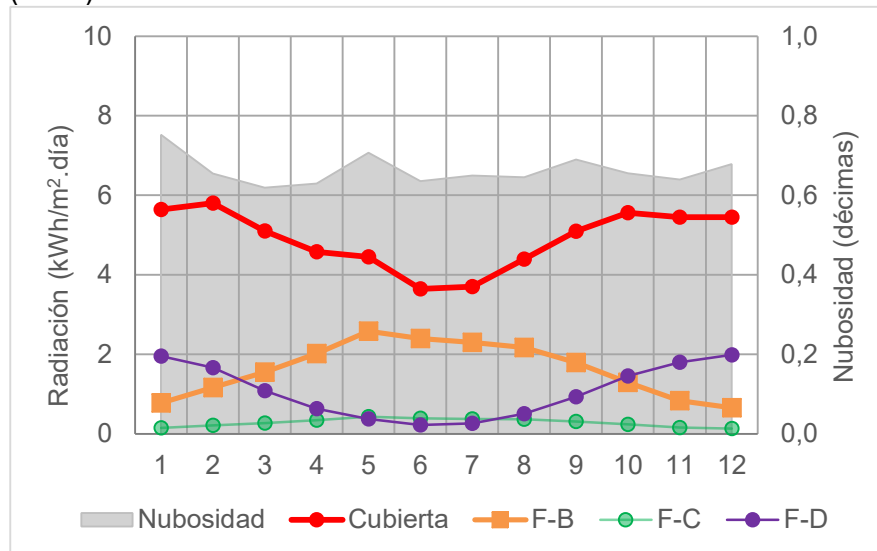
Fuente: INMET (2016)

Figura 167: Radiación directa y difusa x Nubosidad - Cruz das Almas (MAR)



Fuente: INMET (2016); Wilson y Jetz (2016)

Figura 168: Radiación en los planos de la cubierta y de las fachadas x Nubosidad - Pabellón de Aulas de Cruz das Almas (MAR)



INMET (2016); Wilson y Jetz (2016); Beckers y Masset (2003)

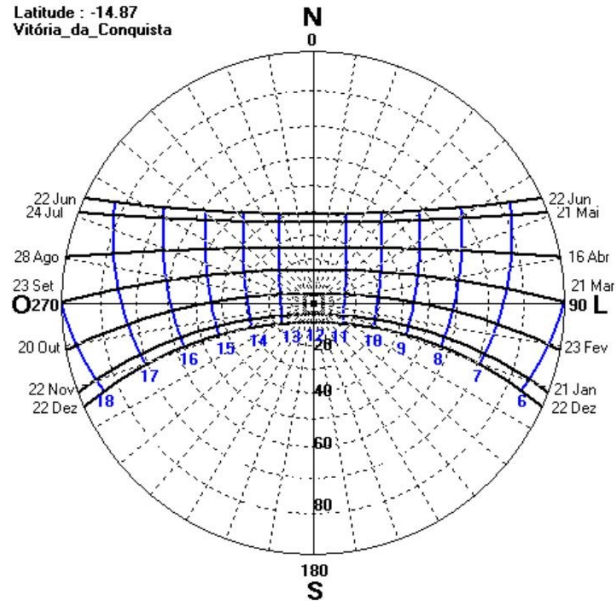
II.2 DATOS CLIMÁTICOS DE VITÓRIA DA CONQUISTA (ALT)

Tabla 27: Medias anuales de datos meteorológicos para Vitória da Conquista (ALT)

Radiación Global Horizontal (kWh/m ² .día)	6,0
Nubosidad media (décimas)	0,7
Temperatura máxima (°C)	25,8
Temperatura media (°C)	20,7
Temperatura mínima (°C)	16,7
Oscilación diaria (°C)	9,1
Oscilación anual (°C)	4,7
HR media (%)	80,1
Precipitaciones (mm)	712,0
Vientos - velocidad media (m/s)	2,5

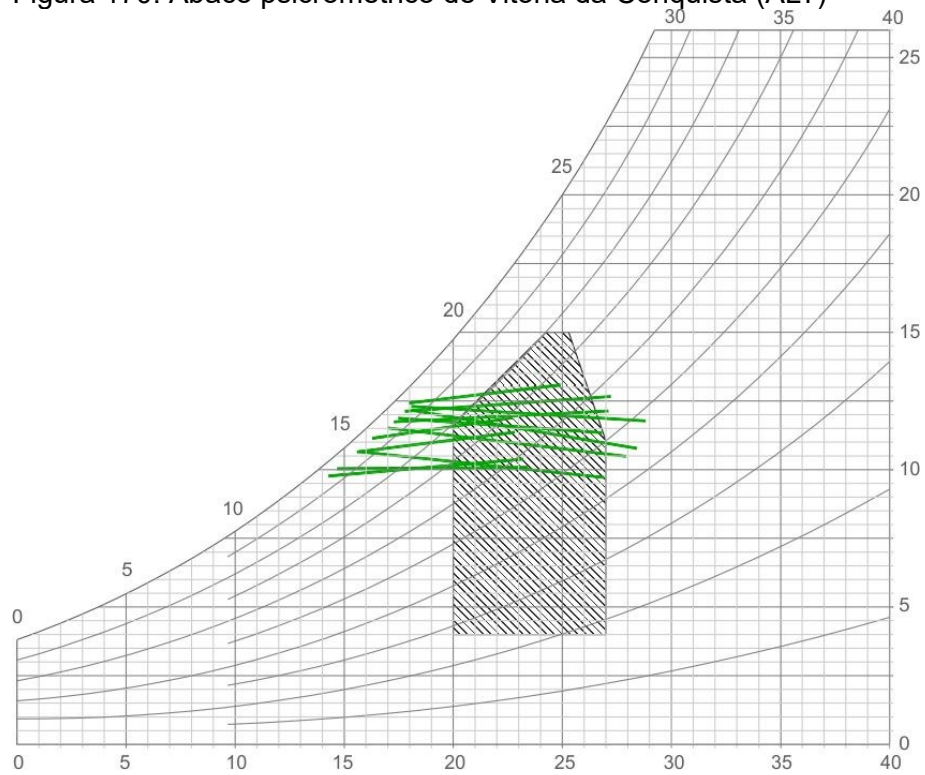
Fuente: INMET (2016); Climate Data (2017b); Wilson y Jetz (2016)

Figura 169: Carta estereográfica de Vitória da Conquista (ALT)



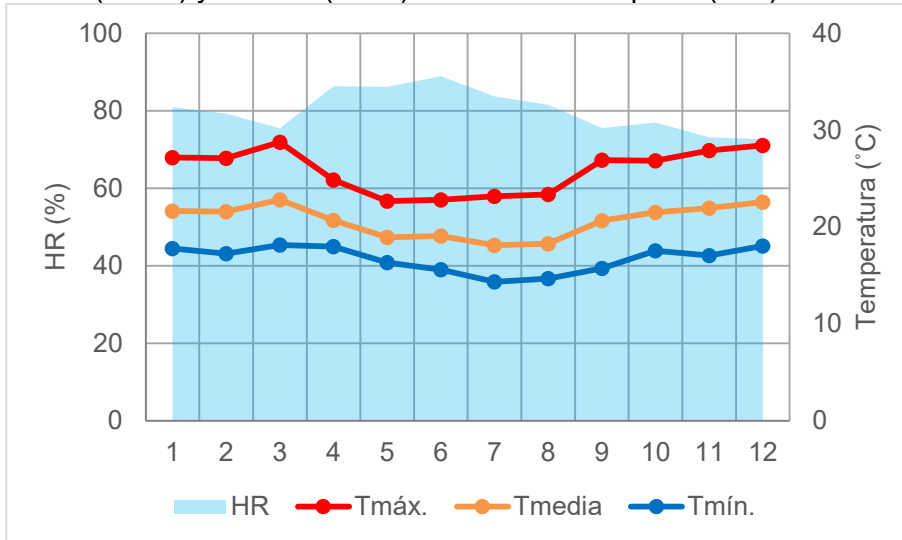
Fuente: software SOL-AR (LabEEE)

Figura 170: Ábaco psicrométrico de Vitória da Conquista (ALT)



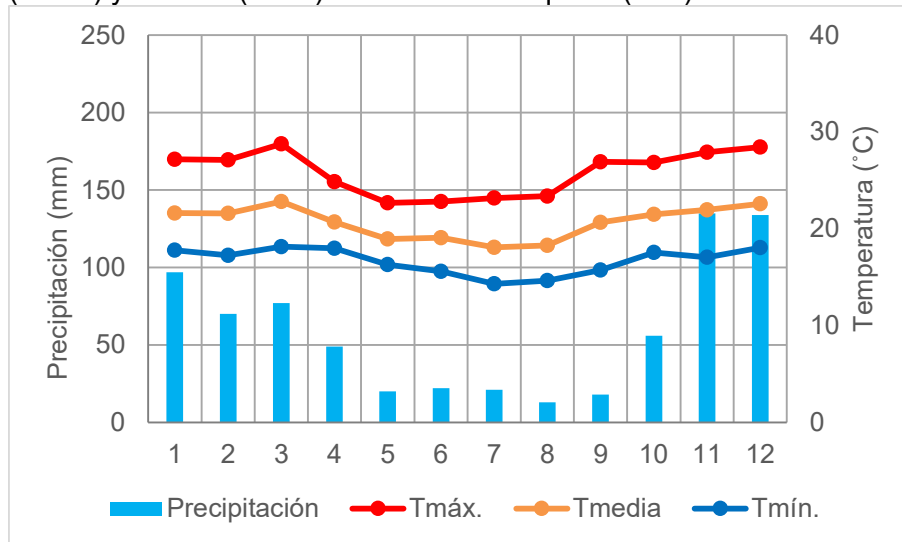
Fuente: INMET (2016)

Figura 171: Humedad relativa (HR) x Temperaturas máxima (Tmáx), media (Tmed) y mínima (Tmín) - Vitória da Conquista (ALT)



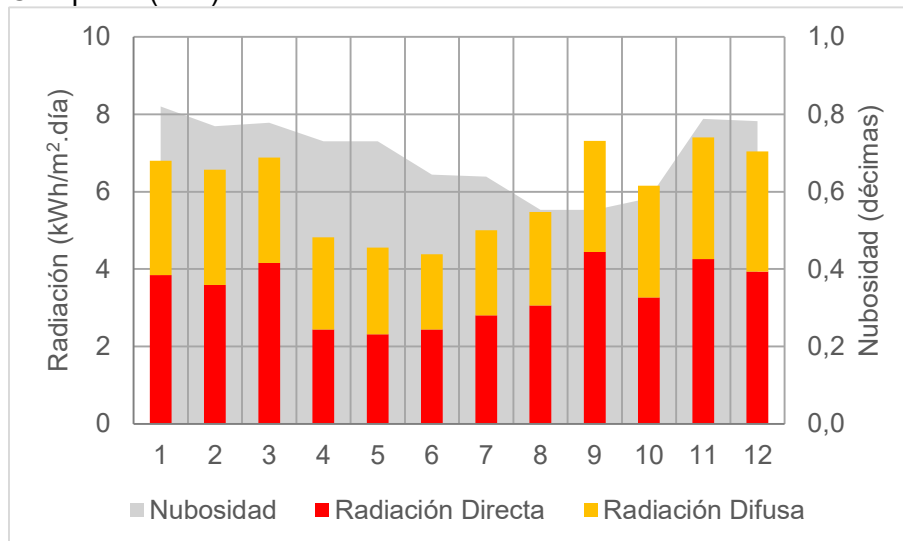
Fuente: INMET (2016)

Figura 172: Precipitación x Temperaturas máxima (Tmáx), media (Tmed) y mínima (Tmín) - Vitória da Conquista (ALT)



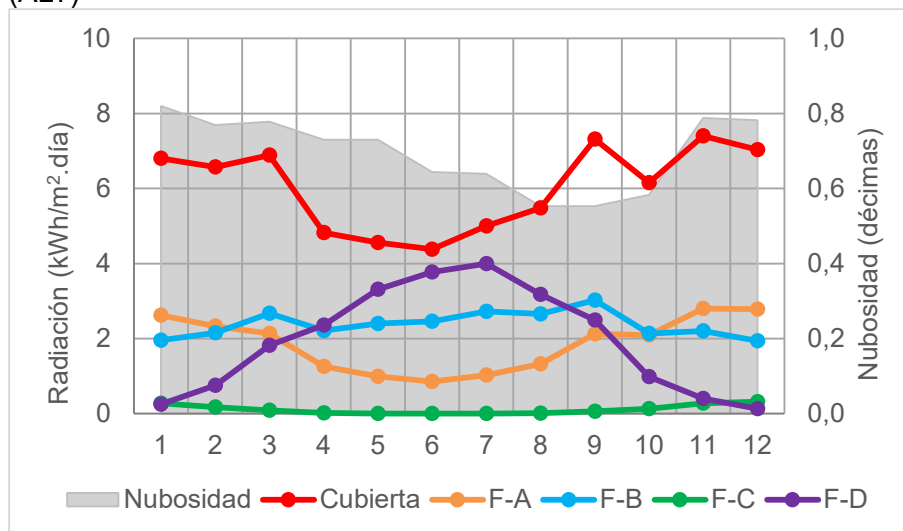
Fuente: INMET (2016); Climate Data (2017b)

Figura 173: Radiación directa y difusa x Nubosidad - Vitória da Conquista (ALT)



Fuente: INMET (2016); Wilson y Jetz (2016)

Figura 174: Radiación directa en los planos de la cubierta y de las fachadas x Nubosidad - Pabellón de Aulas de Vitória da Conquista (ALT)



Fuente: INMET (2016); Wilson y Jetz (2016); Beckers y Masset (2003)

II.3 DATOS CLIMÁTICOS DE BARREIRAS (CONT)

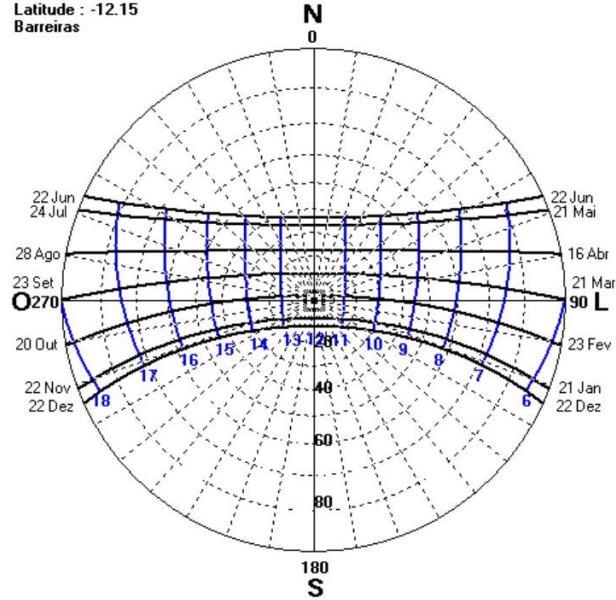
Tabla 28: Medias anuales de datos meteorológicos para Barreiras (CONT)

Radiación Global Horizontal (kWh/m ² .día)	5,7
Nubosidad (décimas)	0,5
Temperatura máxima (°C)	32,2
Temperatura media (°C)	25,0
Temperatura mínima (°C)	18,9
Oscilación diaria (°C)	13,3
Oscilación anual (°C)	3,7
HR media (%)	60,3
Precipitaciones (mm)	1.045,0
Vientos - velocidad media (m/s)	1,7

Fuente: INMET (2016); Climate Data (2017c); Wilson y Jetz (2016)

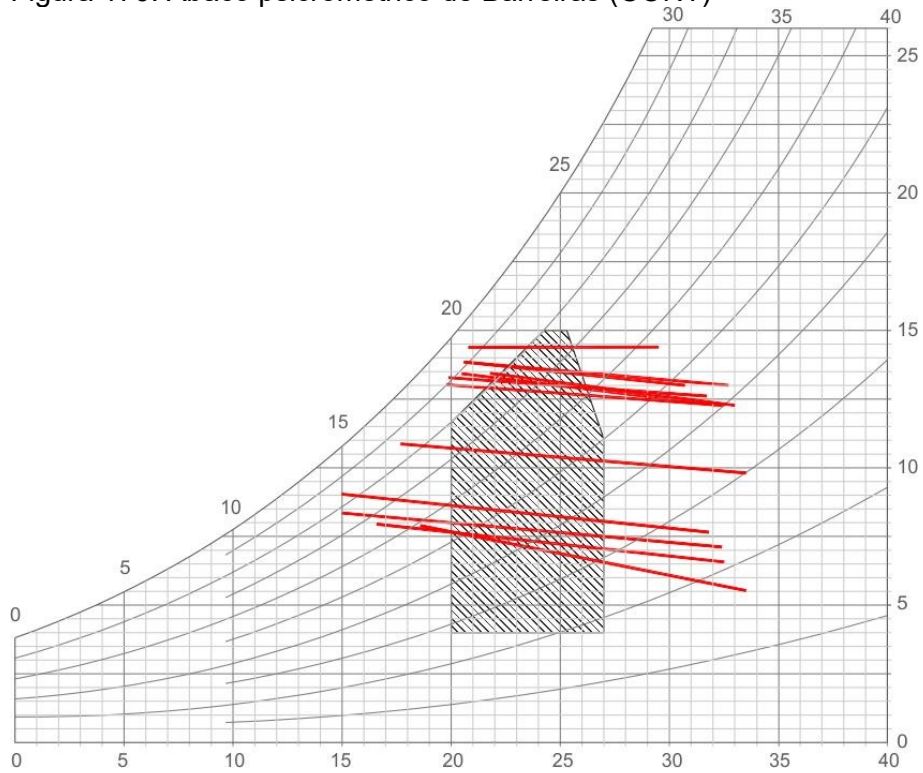
Figura 175: Carta estereográfica de Barreiras
(CONT)

Latitude : -12.15
Barreiras



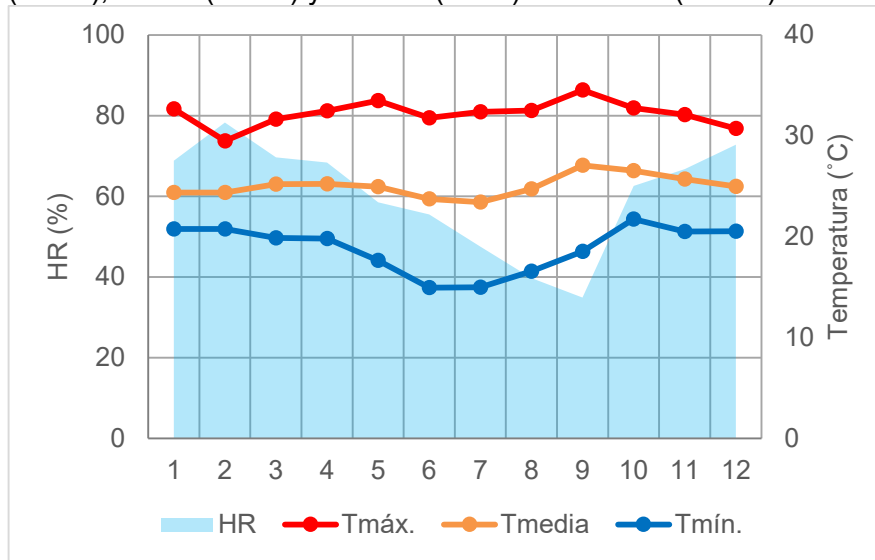
Fuente: software SOL-AR (LabEEE)

Figura 176: Ábaco psicrométrico de Barreiras (CONT)



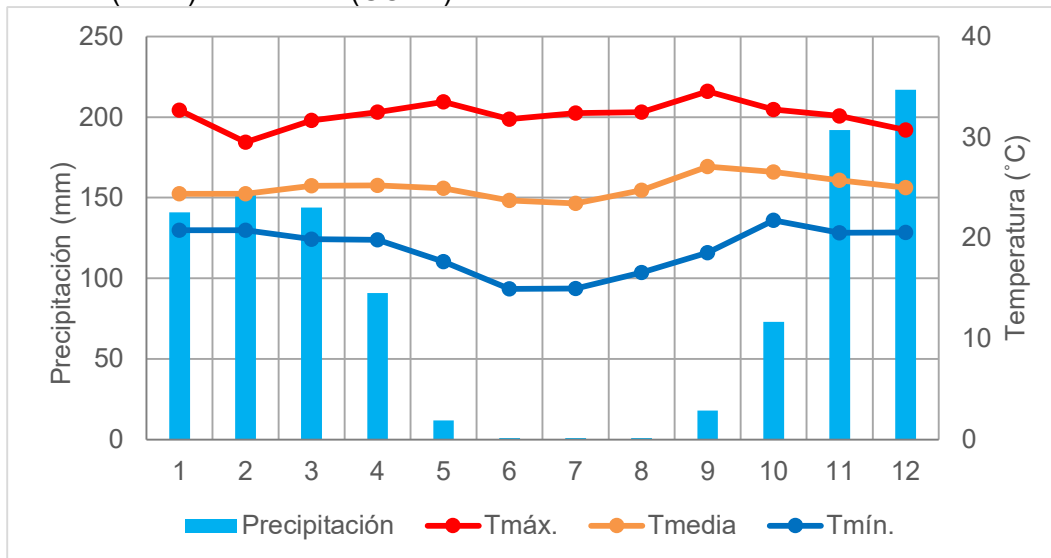
Fuente: INMET (2016)

Figura 177: Humedad relativa (HR) x Temperaturas máxima (Tmáx), media (Tmed) y mínima (Tmín) - Barreiras (CONT)



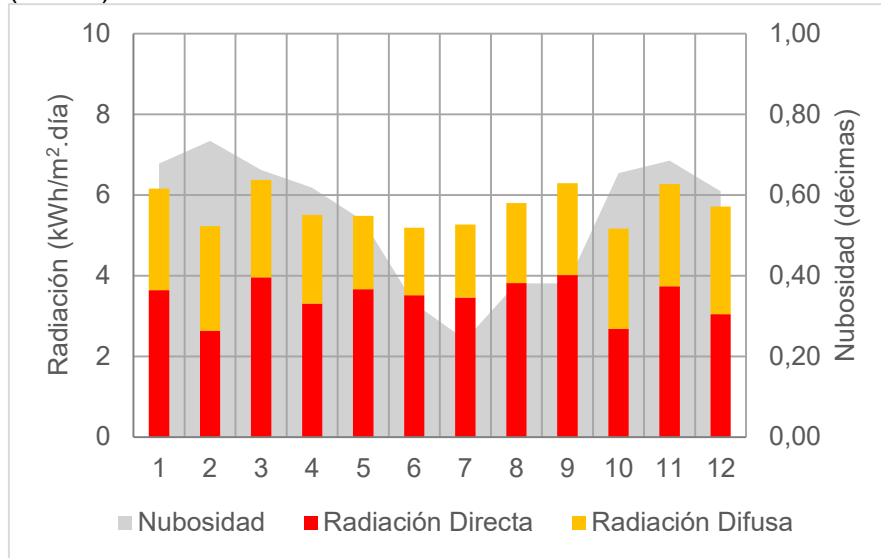
Fuente: INMET (2016)

Figura 178: Precipitación x Temperaturas máxima (Tmáx), media (Tmed) y mínima (Tmín) - Barreiras (CONT)



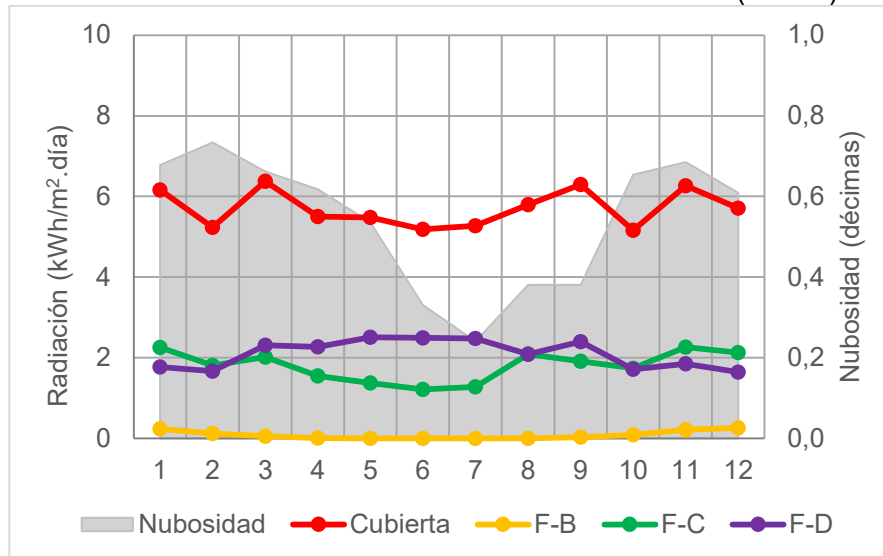
Fuente: INMET (2016); Climate Data (2017c)

Figura 179: Radiación directa y difusa x Nubosidad - Barreiras (CONT)



Fuente: INMET (2016); Wilson y Jetz (2016)

Figura 180: Radiación directa en los planos de la cubierta y de las fachadas x Nubosidad - Pabellón de Aulas de Barreiras (CONT)



Fuente: INMET (2016); Wilson y Jetz (2016); Beckers y Masset (2003)

ANEXO III VENTILACIÓN NATURAL

Este apartado presenta un primer planteamiento a las condiciones de confort térmico del Aula A101 de cada pabellón de aulas si se adopta la ventilación natural en esos ambientes. El objetivo es exponer las condiciones climáticas de cada sitio e indicar dónde y cuándo la ventilación natural puede ser utilizada como estrategia pasiva. Además, al destacar las condiciones climáticas de cada sitio, se explica también porque hay una diferencia significativa entre la demanda anual de refrigeración de Vitória da Conquista (ALT) para las otras dos ciudades, Cruz das Almas (MAR) y Barreiras (CONT).

Esa estrategia pasiva no fue utilizada en las simulaciones de análisis de esta tesis porque fue adoptada como parámetro de análisis para medir los desempeños térmicos de las paredes externas la demanda de refrigeración del ambiente interior. Para eso, las ventanas fueron configuradas como cerradas todo el día y se estableció que el sistema de refrigeración funcione tan pronto como la temperatura interior alcance los 24°C

Para evaluar la ventilación natural fueron realizadas las siguientes actividades:

- a) cálculos de ventilación natural, según datos climáticos y constructivos de cada Aula A101;
- b) simulaciones energéticas utilizando la ventilación natural como única estrategia de enfriamiento del ambiente interior;

- c) análisis de los datos de confort térmico indicados por las simulaciones según la normativa brasileña en vigor (ABNT 2008) y la revisión de la misma (Lamberts et al. 2013), pues la discusión académica reciente de los parámetros de confort térmico en Brasil consideran esos dos documentos.

III.1 CÁLCULOS DE VENTILACIÓN NATURAL DE LAS AULAS A101

Los cálculos de ventilación natural fueron realizados para los meses de verano (enero) e invierno (julio), para las tres Aulas A101 ubicadas en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT). Para esos cálculos, fueron consultados los datos climáticos de cada una de las ciudades (INMET 2016b) y utilizadas las fórmulas para situaciones de ventilación cruzada indicadas por (Mermet 2005).

Sobre la velocidad de los vientos en las tres ciudades, ella no sobrepasa los 3,0 m/s en ninguna de ellas, siendo caracterizadas como brisas (Figura 181). Sin embargo, la frecuencia y dirección de los vientos cambia según la ciudad y las estaciones del año, conforme presentado en la Figura 182. En Cruz das Almas (MAR) y Vitória da Conquista (ALT), hay una predominancia de los vientos provenientes del Océano Atlántico por el cuadrante Este. En Barreiras (CONT), las orientaciones con mayor frecuencia de vientos son el Este y Oeste.

Figura 181: Velocidad de los vientos (m/s) en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT)

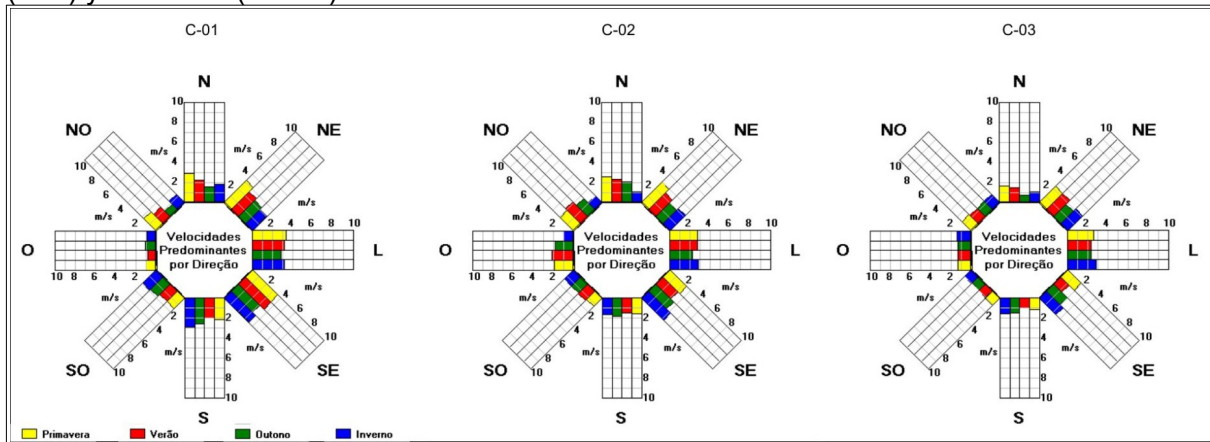
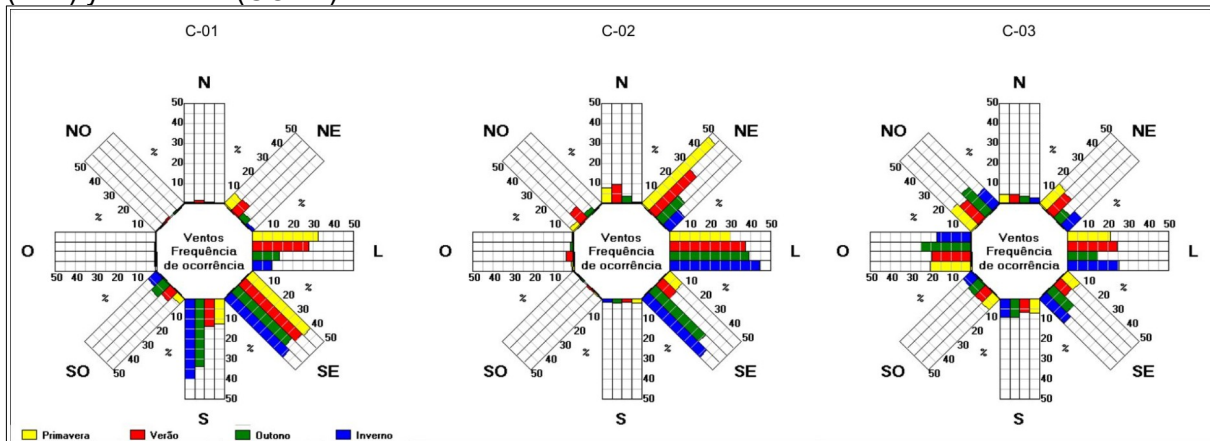


Figura 182: Frecuencia de los vientos (%) en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT)



Basado en esos datos y en la orientación de cada edificio, fueron realizados cálculos para estimar la tasa de ventilación natural cruzada en cada Aula A101, a partir de las fórmulas presentadas por (Mermet 2005) para la ventilación cruzada (Ec 01 - 03).

$$Q = C_d \times A_w \times V_z \times \sqrt{\Delta C_p} \tag{Ec. 01}$$

$$\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} \tag{Ec. 02}$$

$$V_z = V_{z_0} \times \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha \tag{Ec. 03}$$

Q: tasa de ventilación (m^3/s);
 C_d : coeficiente de descarga (adimensional)
 A_w : área equivalente de ventanas (m^2)
 A_1 : área de las ventanas de la fachada 1 (m^2)
 A_2 : área de las ventanas de la fachada 2 (m^2)
 ΔC_p : coeficiente de presión (adimensional)
 V_z : velocidad del viento a una altura Z (m/s)
 V_{z_0} : velocidad del viento a una altura de referencia Z_0 (m/s)
 α : exponente que depende del terreno

Fue adoptado valores estándar para el coeficiente de descarga y para el exponente que depende del terreno, 0,60 y 0,20, respectivamente. Para el coeficiente de presión, fueron adoptados valores indicados por (Mermet 2005, p. 55-56) que considera la velocidad del viento, el ángulo de incidencia del viento con relación a la normal de la fachada y la relación entre largo y ancho del edificio. Las áreas equivalentes de las ventanas consideran el área de cada ventana abierta y, por eso, sus valores son distintos para cada aula. Esas y todas las otras variables de las fórmulas utilizadas están indicadas en la Tabla 29.

Tabla 29: Cálculo de ventilación natural cruzada en las Aulas A101 de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT)

	MAR	ALT	CONT
C_d	0,60	0,60	0,60
A_w (m^2)	1,28	1,64	2,73
Δc_p - verano	1,20	1,20	1,20
Δc_p - invierno	1,20	0,52	1,20
V_z (m/s) - verano	2,64	2,16	1,92
V_z (m/s) - invierno	2,28	2,09	1,75
Q (m^3/s) - verano	2,23	2,32	3,45
Q (renov/h) - verano	30,14	34,50	51,29
Q (m^3/s) - invierno	1,92	1,48	3,14
Q (renov/h) - invierno	25,95	22,02	46,68

III.2 SIMULACIONES ENERGÉTICAS DE VENTILACIÓN NATURAL

Las simulaciones energéticas de las Aulas A101 fueron configuradas para permitir la ventilación natural con tasa constante de 10 renov/h siempre que el ambiente esté ocupado y que la temperatura ambiente esté por encima de los 24°C (Figuras 183 - 185). La adopción de esos valores se basan en los siguientes criterios:

Los valores encontrados en los cálculos consideran que los vientos están siempre a la misma velocidad y dirección, hecho que no refleja la realidad y que es difícil de ser adoptada en una simulación energética horaria;

Los cálculos también no consideran el obstáculo proporcionado por las lamas horizontales, instaladas delante de las ventanas exteriores, y por las celosías presentes en la circulación del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR). Esos obstáculos disminuyen la tasa de ventilación en las aulas, cuyo grado de reducción solo es posible saber mediante simulaciones energéticas más complejas y/o mediciones *in situ*;

Al utilizar la tasa de ventilación de 10 renov/h, no solo se respeta el mínimo aceptable recomendado por la normativa (7,4 renov/h, considerando el aula ocupada por 50 personas), como también se adopta un valor similar a otras investigaciones académicas que se dedican a la ventilación natural en climas cálidos.

Fue adoptada la temperatura ambiente de 24°C a partir de la cual se utiliza la ventilación natural como estrategia de enfriamiento pasivo. Con eso, el ambiente empieza a estar ventilado antes de alcanzar la temperatura límite establecida por la normativa, de 25,5°C.

Figura 183: Temperatura interior del Aula A101 (MAR) con tasa de ventilación natural de 10 renov/h

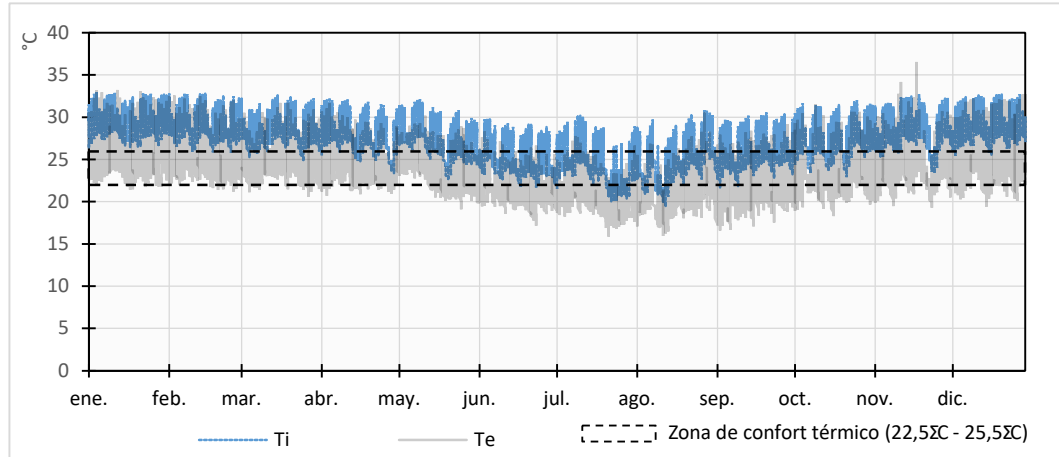


Figura 184: Temperatura interior del Aula A101 (ALT) con tasa de ventilación natural de 10 renov/h

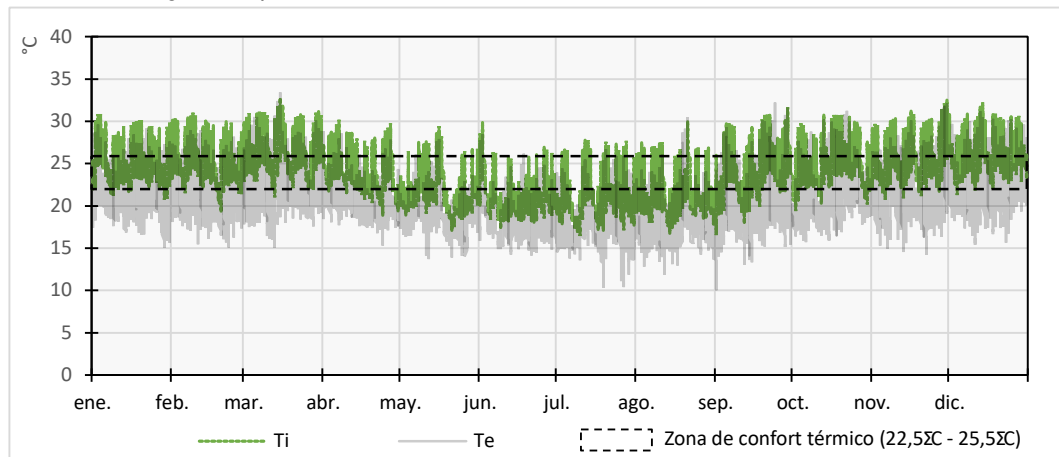
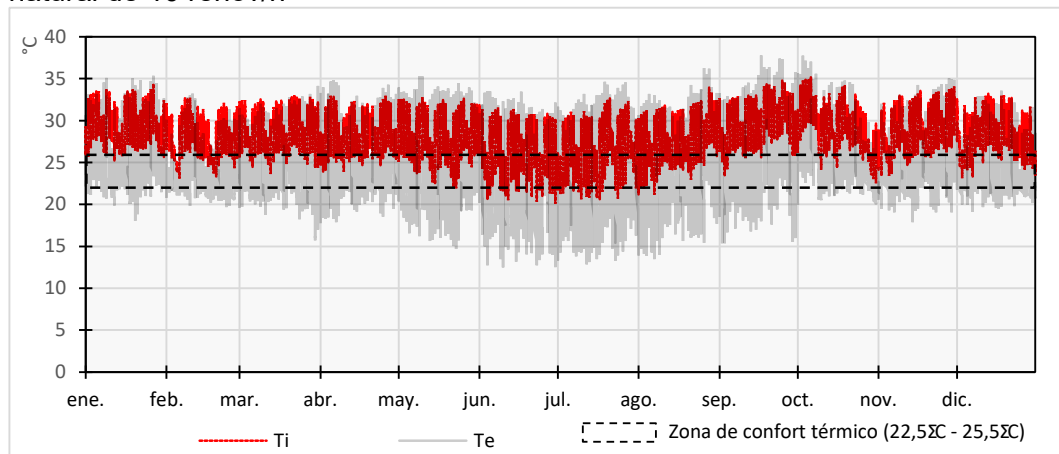


Figura 185: Temperatura interior del Aula A101 (CONT) con tasa de ventilación natural de 10 renov/h



En esas gráficas también están indicadas las temperaturas límites para ambientes interiores ocupados, entre 22,5°C y 25,5°C, con humedad relativa de 65%, definidas por la normativa NBR 16401/2008 (ABNT 2008). Según esos parámetros, queda claro que las temperaturas interiores en las Aulas A101 de Cruz das Almas (MAR) y Barreiras (CONT) están casi siempre por encima del límite máximo establecido. Mientras tanto, en Vitória da Conquista, entre los meses de mayo y agosto, las temperaturas máximas interiores están muy próximas del límite establecido por la normativa, y las temperaturas mínimas se encuentran por debajo del límite mínimo establecido, de 22,5°C.

La lectura de esas gráficas demuestran porque la demanda de refrigeración del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) es más baja que las demás (Tabla 30). Con temperaturas exteriores más bajas que las otras dos ciudades, las aulas ubicadas en Vitória da Conquista (ALT) pueden ser ocupadas durante algunos meses del año sin la necesidad de climatización artificial.

Tabla 30: Demanda anual de refrigeración del Aula A101

	MAR	ALT	CONT
Demanda anual de refrigeración (kWh/m ³ ·año)	66,55	37,60	63,27

En el caso de Cruz das Almas (MAR), la gráfica demuestra que el periodo en que la temperatura interior se sitúa en el rango definido por la normativa es más corto, entre junio y agosto.

Para Barreiras (CONT), la gráfica indica que las temperaturas interiores máximas diarias están siempre por encima del límite máximo establecido, pero las temperaturas interiores mínimas se sitúan por debajo del límite mínimo establecido entre los meses de junio y julio, indicando temperaturas nocturnas más suaves en el ambiente interior.

Ese hecho explica por qué su demanda de refrigeración es un poco menor que la de

Cruz das Almas (MAR): la demanda de refrigeración para las clases nocturnas es menor en Barreiras (CONT) que en Cruz das Almas (MAR) en algunos meses del año.

III.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE CONFORT TÉRMICO

La evaluación de las condiciones de confort térmico en las Aulas A101 utiliza las simulaciones energéticas realizadas con ventilación natural y los nuevos parámetros normativos para los climas de Brasil, que todavía no están vigentes pero ya están presentes en la discusión académica (Lamberts et al. 2013).

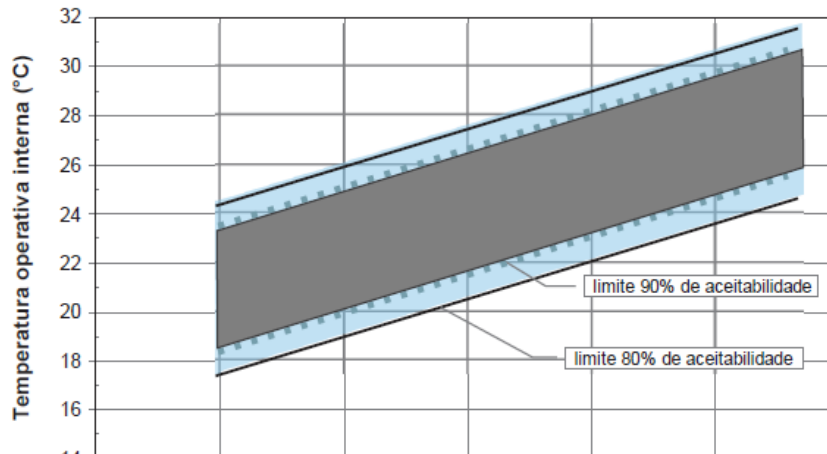
La normativa vigente (NBR 16401/2008) no considera la utilización de variables de confort térmico establecidas en el ámbito internacional (ISO 7730/2005; ASHRAE 55/2013). Ella solo establece parámetros térmicos según la humedad relativa y estipula un valor máximo para la velocidad de los vientos, de 0,2 m/s. Se admite un aumento del límite máximo de la temperatura interior, desde que aliado a un incremento de la velocidad del aire. Sin embargo, el aumento de la temperatura no debe sobrepasar 3°C y la velocidad del aire, 0,8 m/s (ABNT 2008).

La revisión de la normativa amplía los parámetros térmicos para casos de ambientes interiores ventilados naturalmente, así como permite valores mayores de velocidad de los vientos. Además, esa revisión busca incorporar algunas variables de confort térmico que pueden ser extraídas de simulaciones energéticas: Voto Medio Estimado (PMV, sigla en inglés) y Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD, sigla en inglés), elaborados por (Fanger 1970) e incorporados en la normativa ISO 7730/2005 (ISO 2005).

Sobre los parámetros térmicos para ambientes ventilados naturalmente, la revisión de la normativa brasileña busca establecer un parámetro más flexible, que considera las condiciones climáticas de cada sitio, el proceso de aclimatación de los usuarios a sus climas y clasifica las condiciones de confort térmico del ambiente interior a los

niveles de eficiencia energética. La Figura 186 presenta los rangos de temperatura interior operativa aceptable según la temperatura media exterior.

Figura 186: Rango de temperatura interior operativa aceptable para ambientes condicionados naturalmente



El rango de temperatura interior operativa ya considera los efectos de desconfort térmico generados por las altas humedades y velocidad del aire por encima de 0,2 m/s. Además de la gráfica, las temperaturas operativas interiores pueden ser calculadas según la Ec. 01 y Ec. 02:

$$T_{i_{max}} = (0,31 \times T_{e_{med}}) + 21,3 \quad \text{Ec. 01}$$

$$T_{i_{min}} = (0,31 \times T_{e_{med}}) + 14,3 \quad \text{Ec. 02}$$

Considerando esos parámetros térmicos, las gráficas de temperatura interior para Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT) están presentadas en las Figuras 187 - 189, respectivamente, con sus respectivos límites promedios anuales de temperatura operativa interior.

Figura 187: Temperatura interior del Aula A101 (MAR) y los límites de temperatura operativa interior

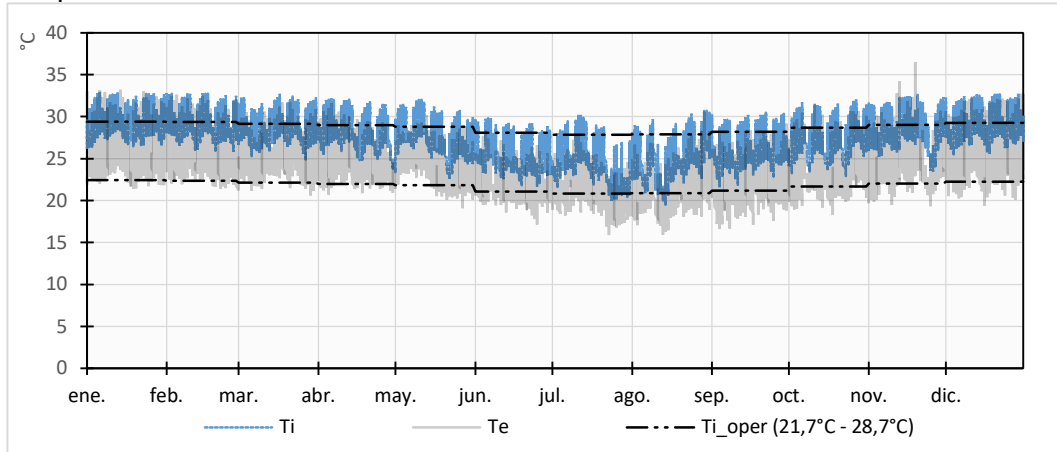


Figura 188: Temperatura interior del Aula A101 (ALT) y los límites de temperatura operativa interior

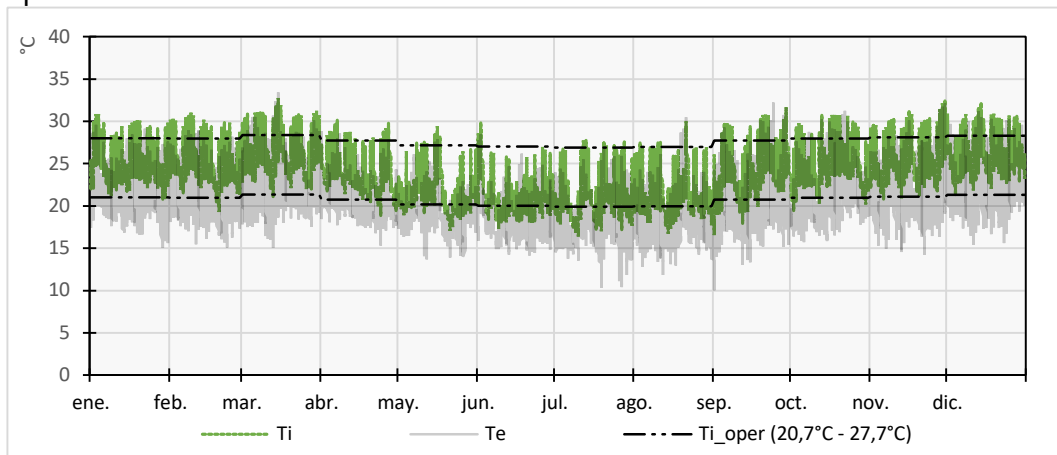
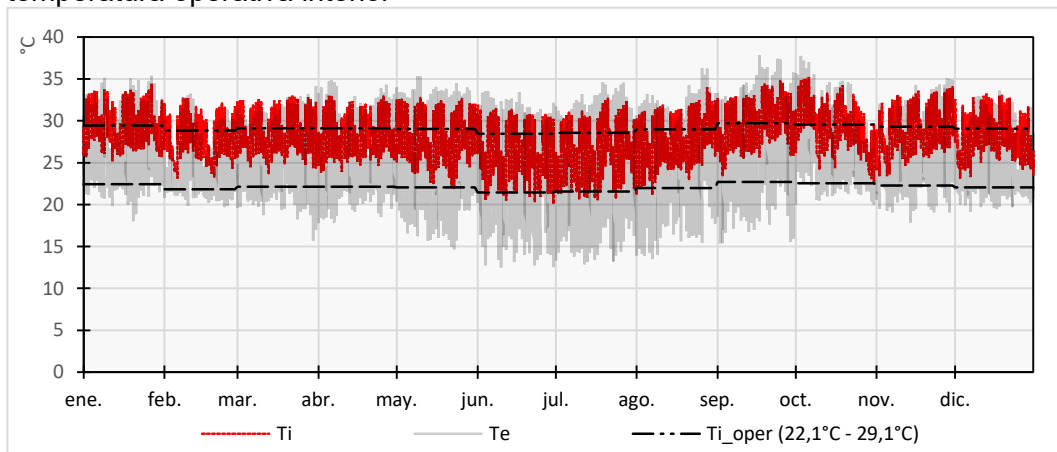


Figura 189: Temperatura interior del Aula A101 (CONT) y los límites de temperatura operativa interior



Estas tres gráficas demuestran un rango de temperatura más alto para las tres ciudades, alrededor de 7°K, al mismo tiempo que sus límites máximo y mínimo son distintos para cada ciudad, pues están determinados según el clima de cada sitio. Además, ese nuevo parámetro normativo, todavía en análisis, permite un uso más amplio de esa aula mediante estrategias pasivas de condicionamiento ambiental, principalmente en Vitória da Conquista (ALT).

Sobre las variables de confort térmico elaboradas por Fanger, la revisión de la normativa brasileña establece que el PMV esté entre -0,50 y +0,50 y que el PPD esté por debajo de 10%. Los valores anuales de esas variables para cada Aula A101, calculados por las simulaciones energéticas, están presentadas en la Tabla 31.

Tabla 31: PMV y PPD anual para las Aulas A101 condicionadas naturalmente (10 renov/h)

	MAR	ALT	CONT
Voto medio estimado (PMV)	+0,77	-0,36	+0,97
Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD)	27,5%	12,4%	29,3%

Según los datos anuales de PMV, solo el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT) se sitúa dentro del rango de los valores establecidos por la revisión de la normativa. Sin embargo, al evaluar esos datos mensualmente se percibe que la variación mensual de las condiciones de confort térmico permiten un uso más amplio de la ventilación natural como estrategia de acondicionamiento térmico (Figuras 190 - 192).

Figura 190: Voto medio estimado mensual (PMV) - Aula A101 (MAR)

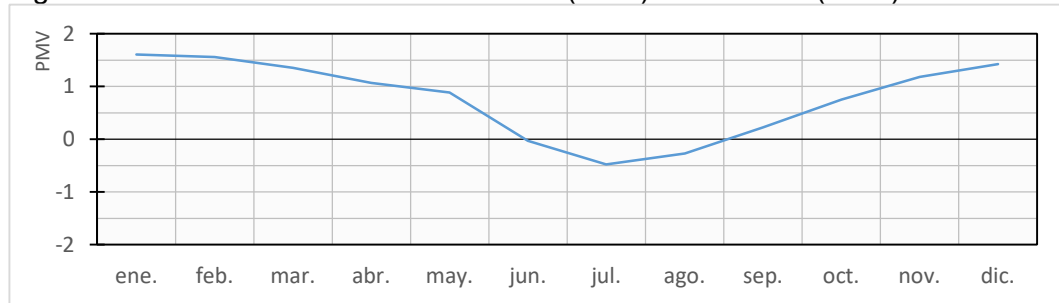


Figura 191: Voto medio estimado mensual (PMV) - Aula A101 (ALT)

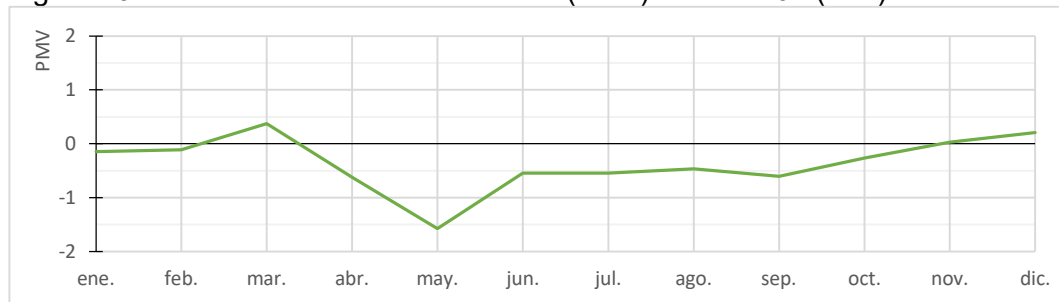
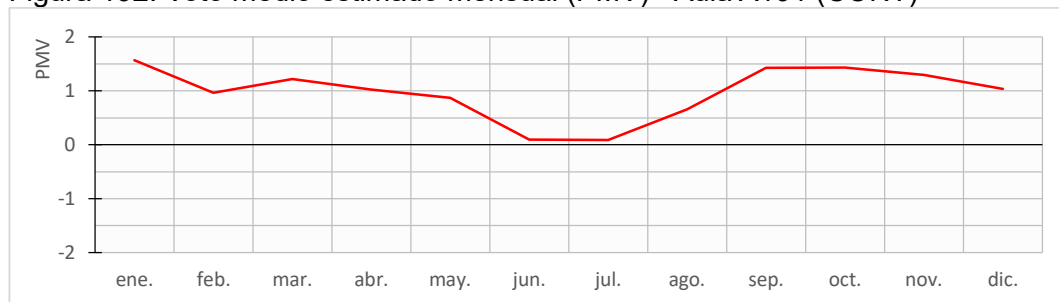


Figura 192: Voto medio estimado mensual (PMV) - Aula A101 (CONT)



Según este parámetro, el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) se encuentra en situación de confort térmico con ventilación natural entre los meses de abril y octubre; para el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), solo en el mes de mayo el aula está fuera de la zona de confort térmico; y el Aula A101 de Barreiras (MAR) está casi todo el año en situación de desconfort térmico, excepto en los meses de junio y julio.

Para los datos anuales de PPD, todas las aulas están fuera del rango establecido por la revisión de la normativa. Sin embargo, al evaluar sus datos mensualmente se revela un panorama similar al análisis realizado con los datos mensuales de PMV

para las tres aulas: la variación mensual indica situaciones de confort térmico durante el año con el uso de la ventilación natural (Figuras 193 - 195).

Figura 193: Porcentaje de personas insatisfechas (PPD) - Aula A101 (MAR)

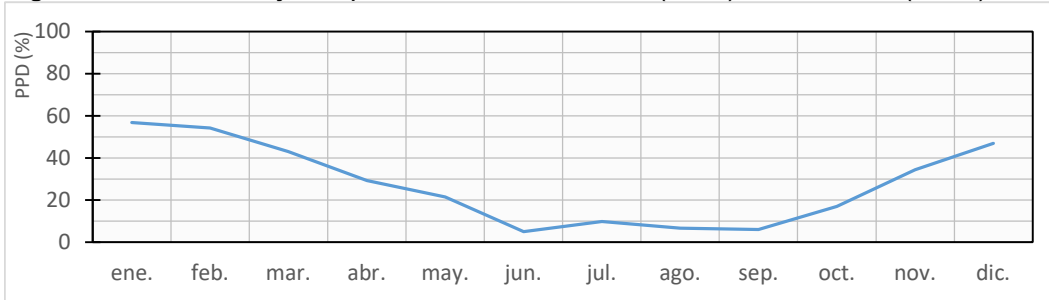


Figura 194: Porcentaje de personas insatisfechas (PPD) - Aula A101 (ALT)

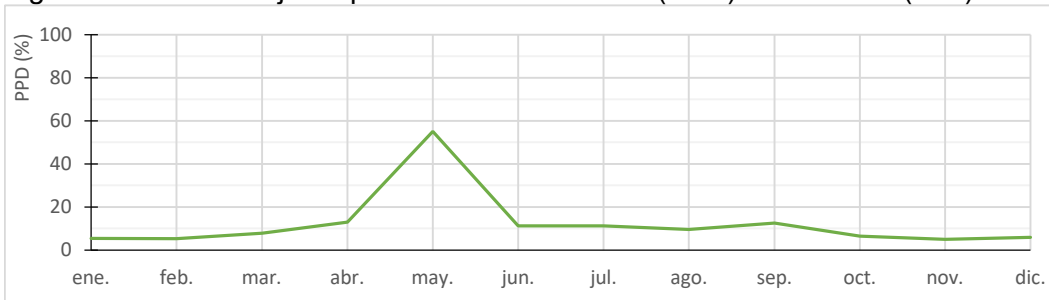
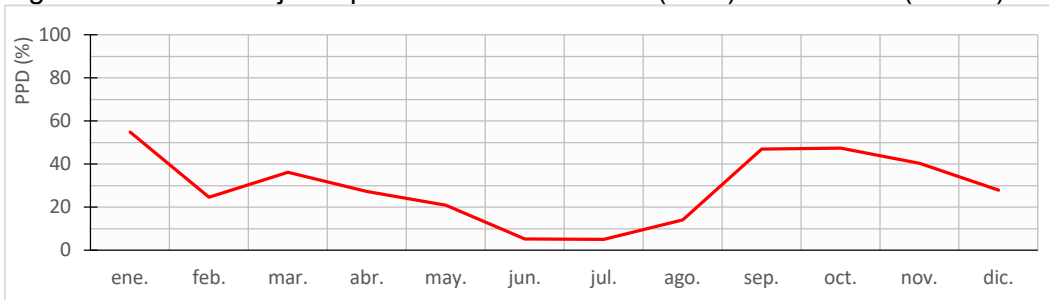


Figura 195: Porcentaje de personas insatisfechas (PPD) - Aula A101 (CONT)



Según este parámetro, el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) se encuentra en situación de confort térmico con ventilación natural entre los meses de julio y septiembre; para el Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), entre los meses de abril y julio, así como en septiembre; y el Aula A101 de Barreiras (MAR) está casi todo el año en situación de desconfort térmico, excepto en los meses de junio y julio.

Comparando los resultados de PMV y PPD para las tres ciudades, ese último

parámetro presenta resultados más rigurosos para las aulas de los edificios implantados en Cruz das Almas (MAR) y Vitória da Conquista (ALT), mientras que en Barreiras (CONT) los meses en situación de confort térmico coinciden en los dos parámetros.

III.4 SÍNTESIS

El objetivo principal de ese apartado es demostrar que las distintas condiciones climáticas de cada ciudad es la principal razón para los distintos valores de demanda de refrigeración indicados por las simulaciones energéticas utilizadas en esta tesis.

Como el objetivo de la tesis es evaluar el desempeño térmico de las paredes externas, fue utilizada la demanda de refrigeración como parámetro de análisis de esos elementos opacos. Para eso, los modelos computacionales fueron configurados para mantener la temperatura siempre por debajo de los 24°C mediante el sistema de climatización, con las ventanas siempre cerradas. Con esa configuración fue posible evaluar las cargas térmicas que atraviesan las paredes externas y su impacto en la demanda de refrigeración del ambiente interior.

Sin embargo, las simulaciones energéticas de ventilación natural demuestran que es posible mantener condiciones de confort térmico en el ambiente interior en algunos periodos del día y/o del año, según las condiciones climáticas de cada sitio. Así, en estudios académicos que busquen evaluar el funcionamiento óptimo de los sistemas de climatización, aliado a las condiciones de confort térmico, un análisis más apurado de las condiciones de ventilación natural sería necesario.

Sin embargo, hay que destacar que la correcta definición de las estrategias de acondicionamiento ambiental para cada aula, según sus respectivos climas, necesitaría de estudios más profundizados en el tema de la ventilación natural, lo que sobrepasa los límites establecido para esta tesis.

ANEXO IV FOTOS

IV.1 REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PABELLÓN DE AULAS DE CRUZ DAS ALMAS (MAR)

Figura 196: Vista general del edificio



Figura 197: Vista general del edificio



Figura 198: Vista general del edificio



Figura 199: Entrada principal



Figura 200: Fachada lateral izquierda



Figura 201: Fachada lateral derecha



Figura 202: Fachadas lateral izquierda y del fondo



Figura 203: Fachada del fondo



Figura 204: Aula A101



Figura 205: Aula A101



Figura 206: Aula A101: ventana y lamas exteriores



Figura 207: Detalle lamas exteriores

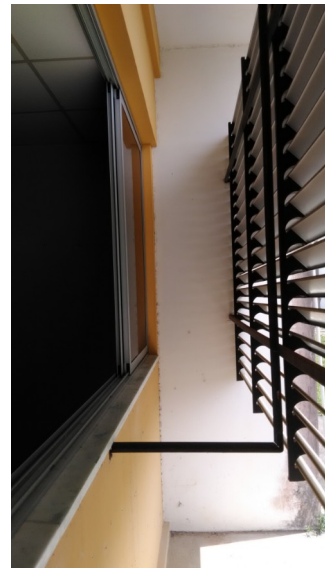


Figura 208: Circulación central, planta baja

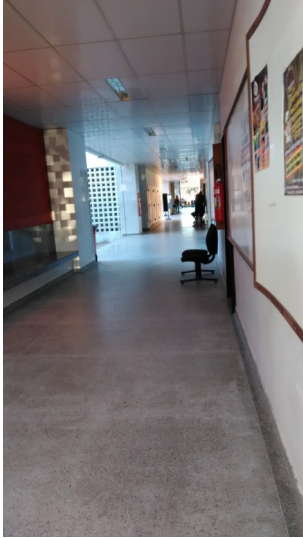


Figura 209: Circulación central, planta baja

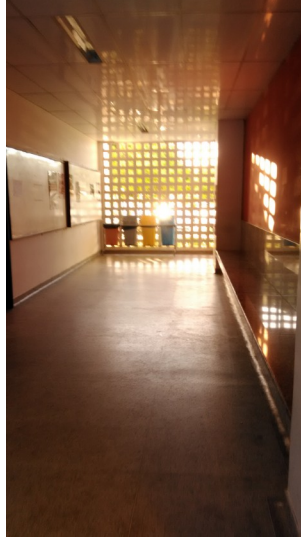


Figura 210: Circulación central, planta superior

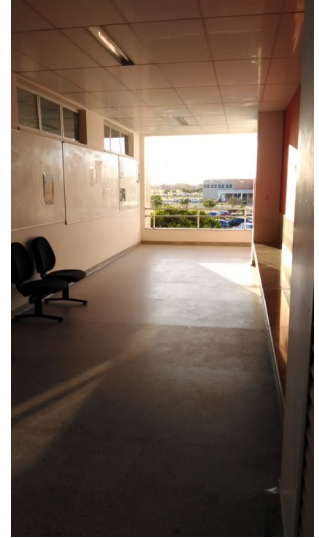


Figura 211: Circulación Aulas



Figura 212: Jardín interno



Figura 213: Jardín interno



IV.2 REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PABELLÓN DE AULAS DE VITÓRIA DA CONQUISTA (ALT)

Figura 214: Vista general de la edificación



Figura 215: Entrada principal



Figura 216: Fachada principal



Figura 217: Fachada del fondo



Figura 218: Fachadas principal y lateral izquierda



Figura 219: Fachadas principal y lateral derecha



Figura 220: Circulación central - planta baja



Figura 224: Circulación central - planta superior



Figura 225: Jardín interno



Figura 221: Jardín interno



Figura 222: Circulación Aulas

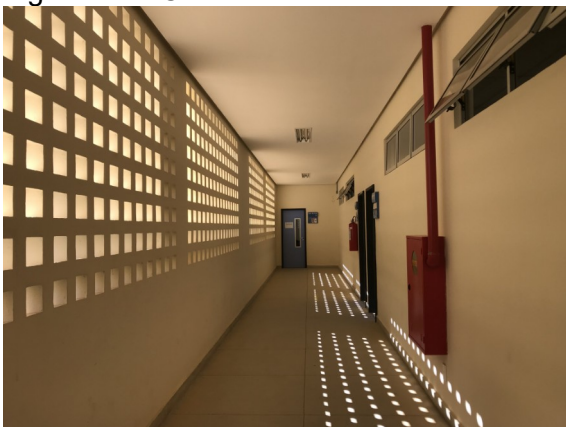


Figura 223: Circulación Aulas

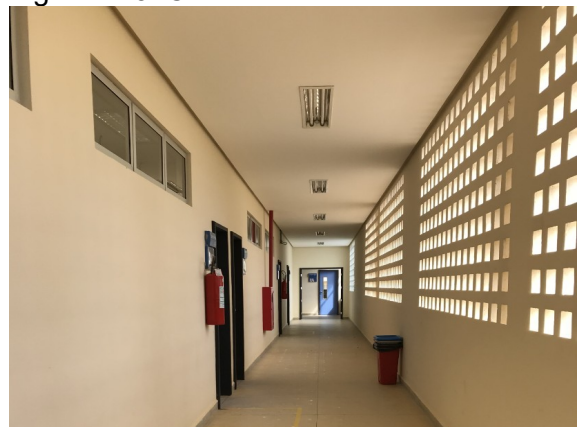


Figura 226: Aula A101



Figura 227: Aula A101



Figura 228: Aula A101



Figura 229: Aula A101



Figura 230: Detalle de las lamas



Figura 231: Detalle de las lamas y la ventana



IV.3 REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PABELLÓN DE AULAS DE BARREIRAS (CONT)

Figura 232: Fachada principal



Figura 233: Fachada lateral izquierda



Figura 234: Fachada de fondo



Figura 235: Fachada lateral derecha



Figura 236: Jardín interno



Figura 237: Jardín interno



Figura 238: Entrada Principal



Figura 239: Entrada Principal



Figura 241: Aula A001



Figura 240: Circulación central, planta superior

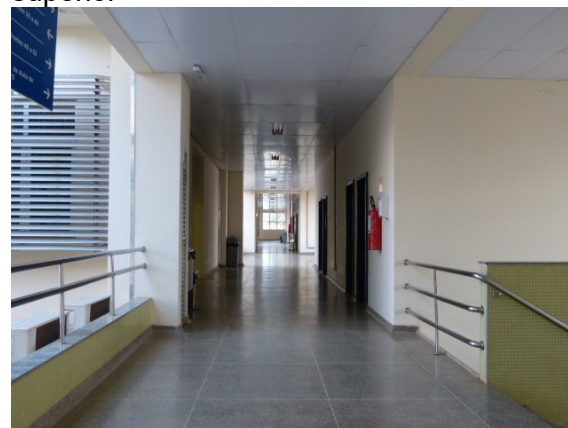


Figura 243: Circulación Aulas



Figura 244: Circulación Aulas



Figura 245: Aula A001



Figura 246: Aula A001



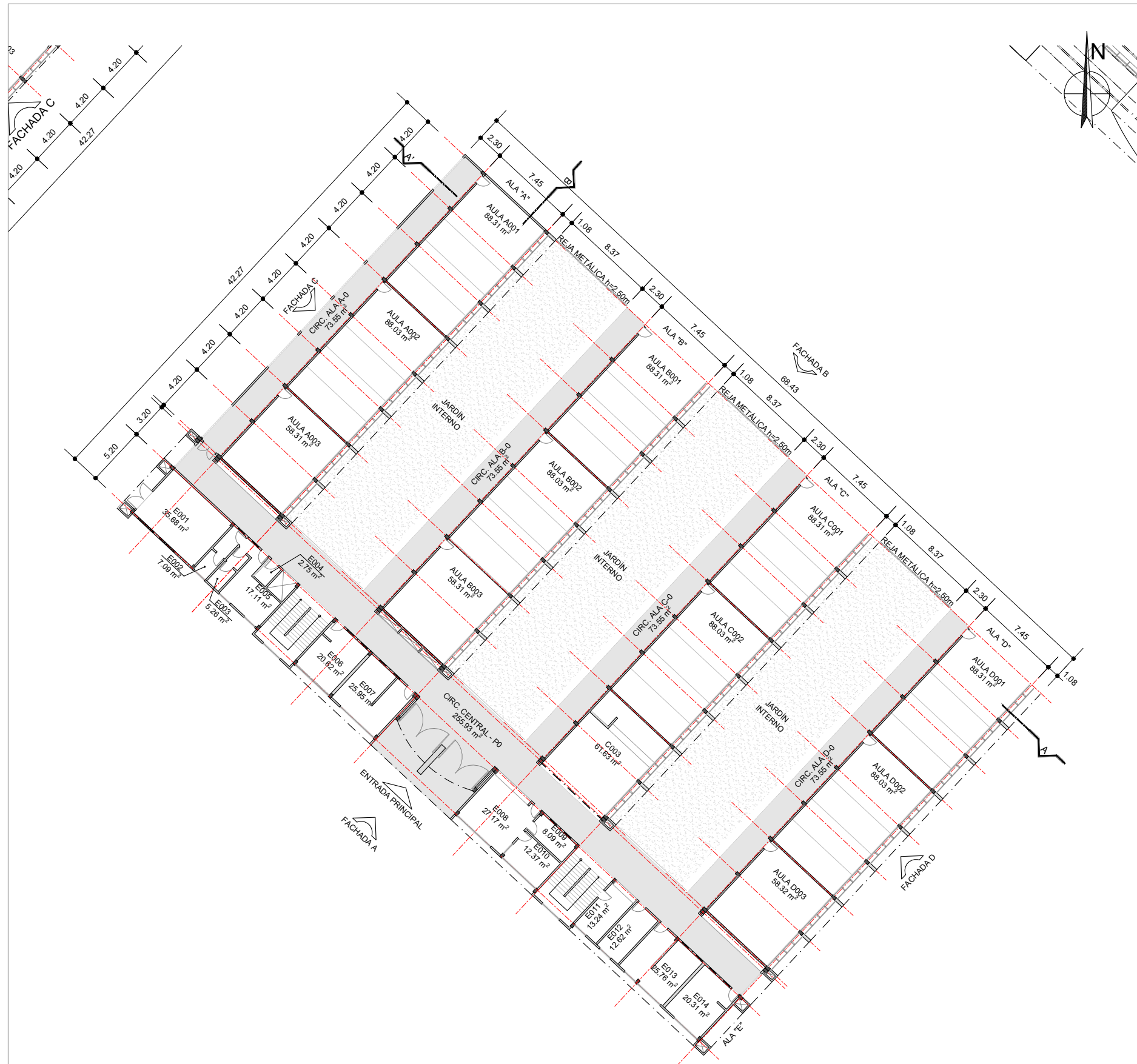
Figura 247: Aula A101



Figura 248: Aula A101



ANEXO V PLANOS TÉCNICOS

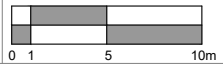


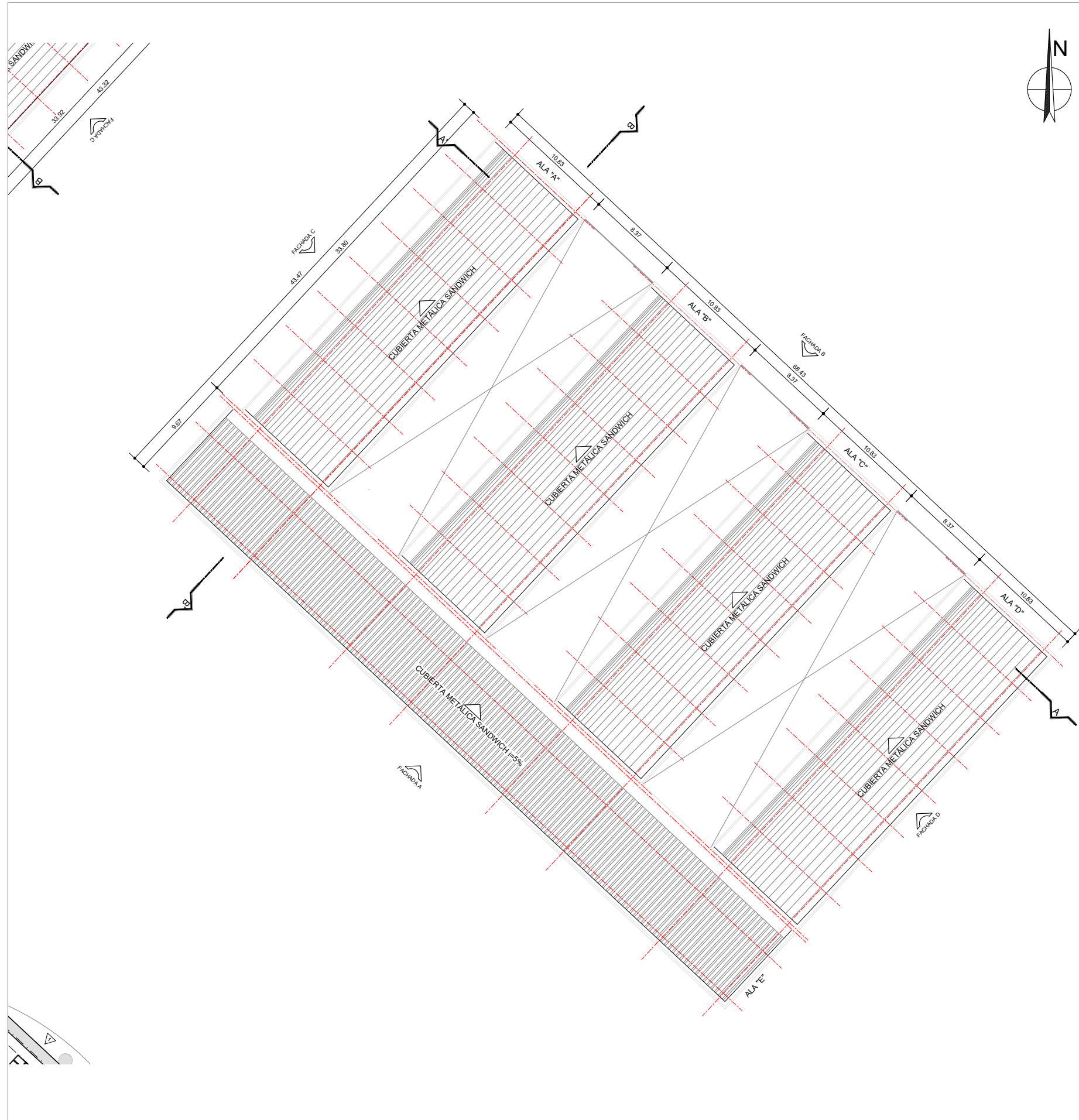
■ CIRCULACIÓN

TESIS DOCTORAL
 Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en
 edificios universitarios de Bahia (Brasil)
 UPC (Barcelona, 2021)

autor: Bruno Oliveira Santana directora: Helena Coch
 ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Cruz das Almas (MAR)

PLANTA BAJA





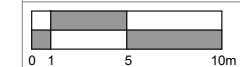
TESIS DOCTORAL
Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en
edificios universitarios de Bahia (Brasil)
UPC (Barcelona, 2021)

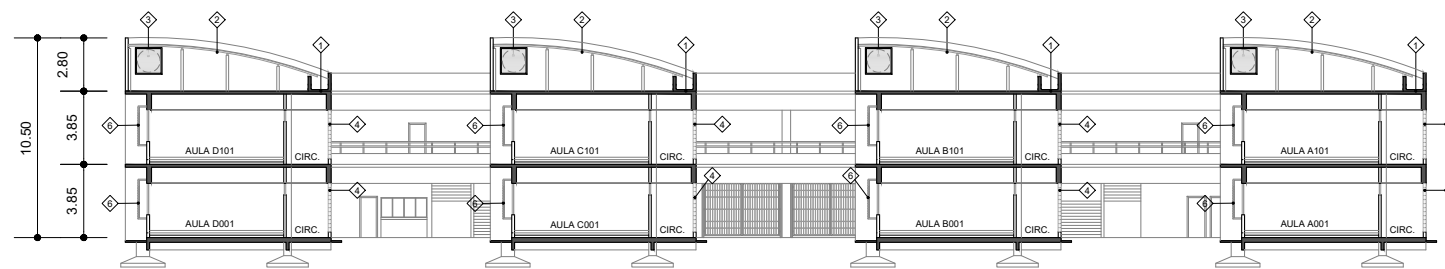
autor: Bruno Oliveira Santana

directora: Helena Coch

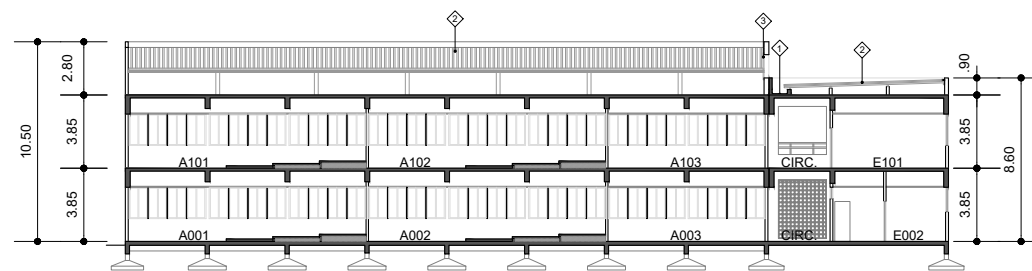
ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Cruz das Almas (MAR)

PLANTA DE CUBIERTA





SECCIÓN A - A'
PABELLÓN DE AULAS - CRUZ DAS ALMAS



SECCIÓN B - B'
PABELLÓN DE AULAS - CRUZ DAS ALMAS

1 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LA ENVOLVENTE

1. COLECTOR DE ÁGUAS PLUVIALES EN HORMIGÓN REVESTIDO CON MANTA ASFÁLTICA
2. CUBIERTA METÁLICA SANDWICH COLOR BLANCO
3. PUERTA DE ALUMÍNIO
4. BLOQUES DE CELOSIA EN HORMIGÓN (20x20cm)
5. BLOQUES DE VIDRIO TRANSLÚCIDO (20x20cm)
6. LAMAS HORIZONTALES EN ALUMÍNIO DELANTE DE VENTANA DE VIDRIO 6mm Y ALUMÍNIO

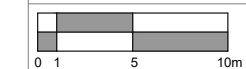
TESIS DOCTORAL
Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en edificios universitarios de Bahia (Brasil)
UPC (Barcelona, 2021)

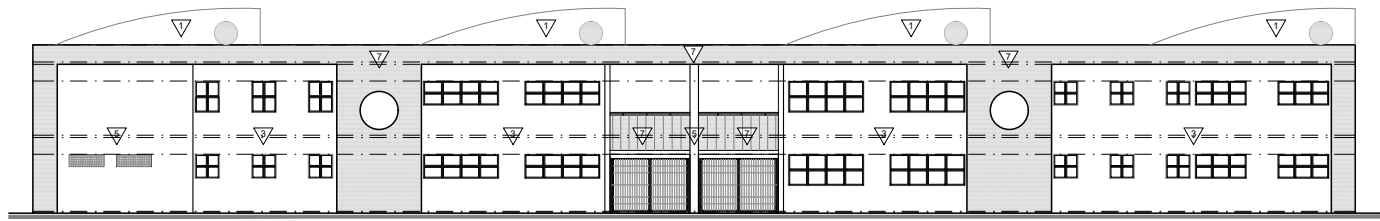
autor: Bruno Oliveira Santana

directora: Helena Coch

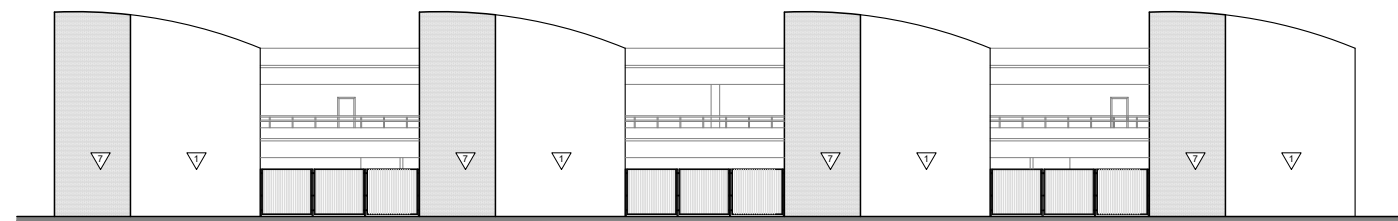
ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Cruz das Almas (MAR)

SECCIONES

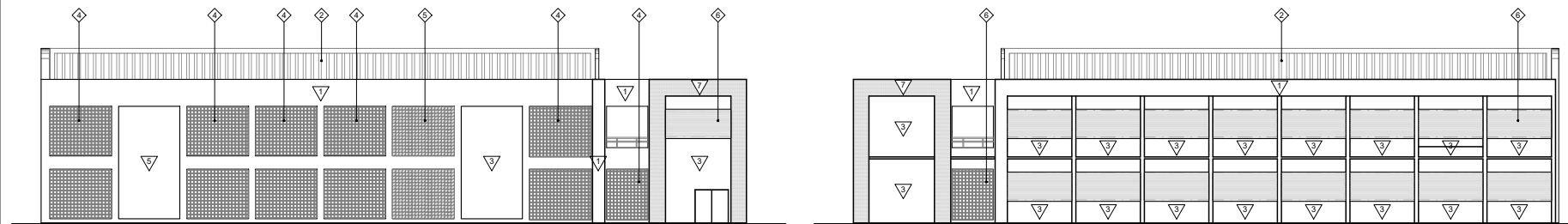




FACHADA A
PABELLÓN DE SALAS - CRUZ DAS ALMAS



FACHADA B
PABELLÓN DE AULAS - CRUZ DAS ALMAS



FACHADA C
PABELLÓN DE AULAS - CRUZ DAS ALMAS

FACHADA D
PABELLÓN DE AULAS - CRUZ DAS ALMAS

1 PAREDES EXTERNAS

1. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR BLANCO ($\alpha=0,158$)
2. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR PERLA ($\alpha=0,221$)
3. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR AMARILLO ($\alpha=0,367$)
4. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR SALMON ($\alpha=0,495$)
5. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR ROJO ($\alpha=0,642$)
6. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR TERRACOTA ($\alpha=0,646$)
7. BALDOSA CERÁMICA COLOR CANELA ($\alpha=0,400$)

1 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LA ENVOLVENTE

1. COLECTOR DE ÁGUAS PLUVIALES EN HORMIGÓN REVESTIDO CON MANTA ASFÁLTICA
2. CUBIERTA METÁLICA SANDWICH COLOR BLANCO
3. PUERTA DE ALUMÍNIO
4. BLOQUES DE CELOSIA EN HORMIGÓN (20x20cm)
5. BLOQUES DE VIDRIO TRANSLÚCIDO (20x20cm)
6. LAMAS HORIZONTALES EN ALUMÍNIO DELANTE DE VENTANA DE VIDRIO 6mm Y ALUMÍNIO

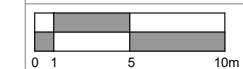
TESIS DOCTORAL
Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en
edificios universitarios de Bahia (Brasil)
UPC (Barcelona, 2021)

autor: Bruno Oliveira Santana

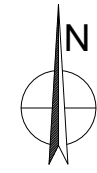
directora: Helena Coch

ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Cruz das Almas (MAR)

FACHADAS



05/18



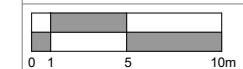
■ CIRCULACIÓN

TESIS DOCTORAL
 Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en
 edificios universitarios de Bahia (Brasil)
 UPC (Barcelona, 2021)

autor: Bruno Oliveira Santana directora: Helena Coch

ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Vitória da Conquista (ALT)

PLANTA BAJA



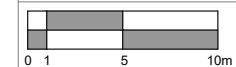


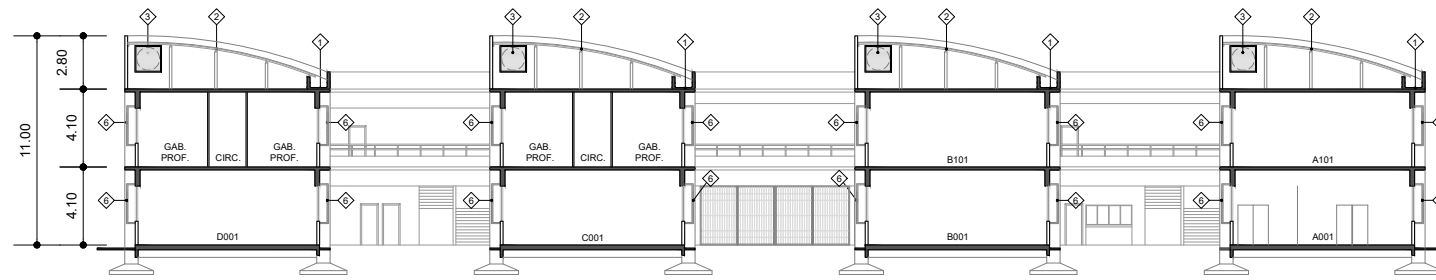
- CIRCULACIÓN
- AULA MONITORADA
- AULA MONITORADA Y EVALUADA

TESIS DOCTORAL
 Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en
 edificios universitarios de Bahía (Brasil)
 UPC (Barcelona, 2021)

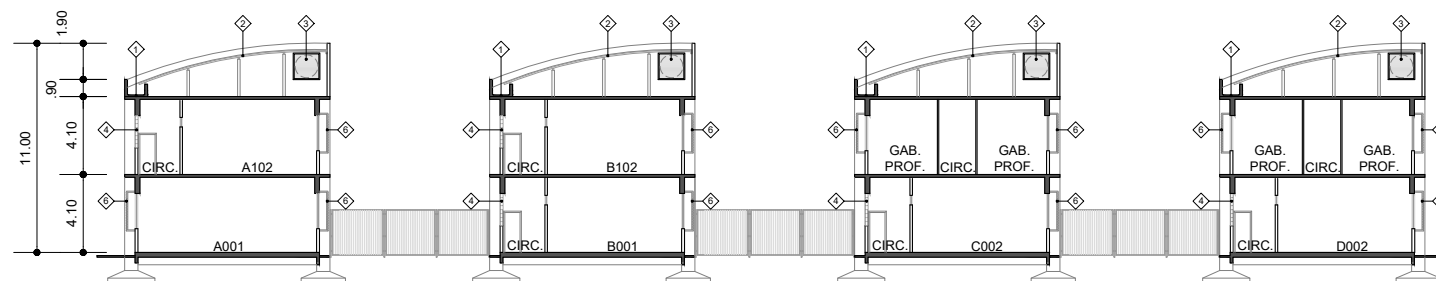
autor: Bruno Oliveira Santana directora: Helena Coch
 ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Vitória da Conquista (ALT)

PLANTA SUPERIOR

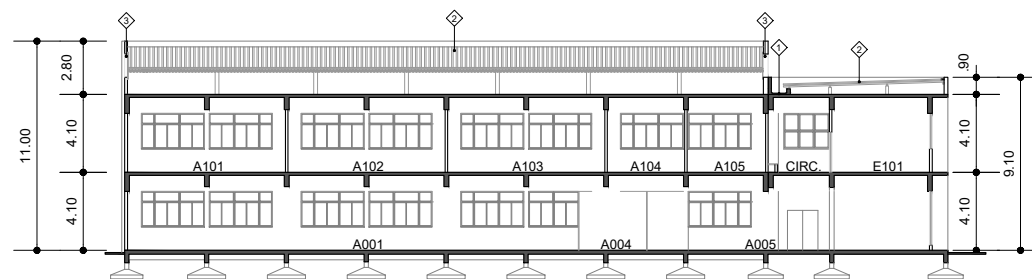




SECCIÓN A - A'
PABELLÓN DE AULAS - VITÓRIA DA CONQUISTA



SECCIÓN B - B'
PABELLÓN DE AULAS - VITÓRIA DA CONQUISTA



SECCIÓN C - C'
PABELLÓN DE AULAS - VITÓRIA DA CONQUISTA

1 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LA ENVOLVENTE

1. COLECTOR DE ÁGUAS PLUVIALES EN HORMIGÓN REVESTIDO CON MANTA ASFÁLTICA
2. CUBIERTA METÁLICA SANDWICH COLOR GRIS
3. PUERTA DE ALUMÍNIO
4. BLOQUES DE CELOSIA EN HORMIGÓN (20x20cm)
5. BLOQUES DE VIDRIO TRANSLÚCIDO (20x20cm)
6. LAMAS HORIZONTALES EN ALUMÍNIO DELANTE DE VENTANA DE VIDRIO 6mm Y ALUMÍNIO

TESIS DOCTORAL
Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en edificios universitarios de Bahia (Brasil)
UPC (Barcelona, 2021)

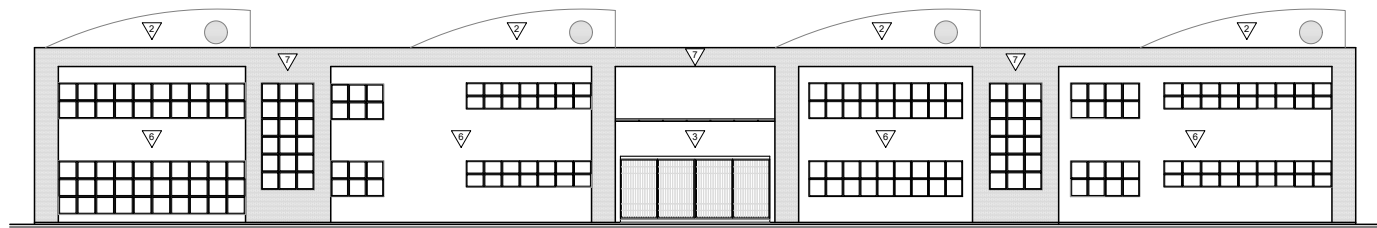
autor: Bruno Oliveira Santana

directora: Helena Coch

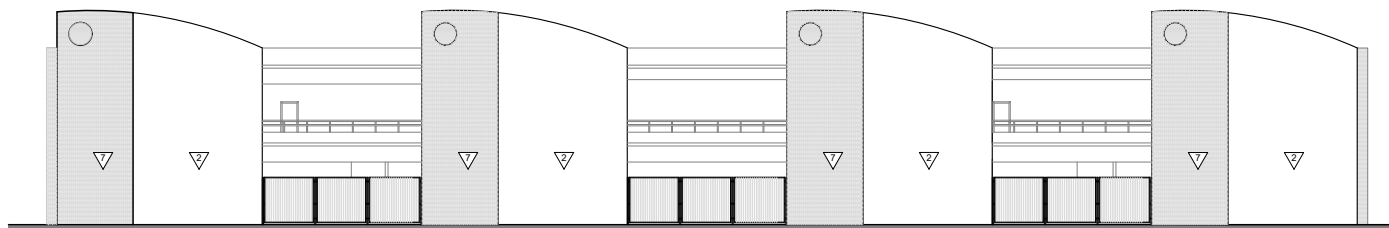
ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Vitória da Conquista (ALT)

SECCIONES

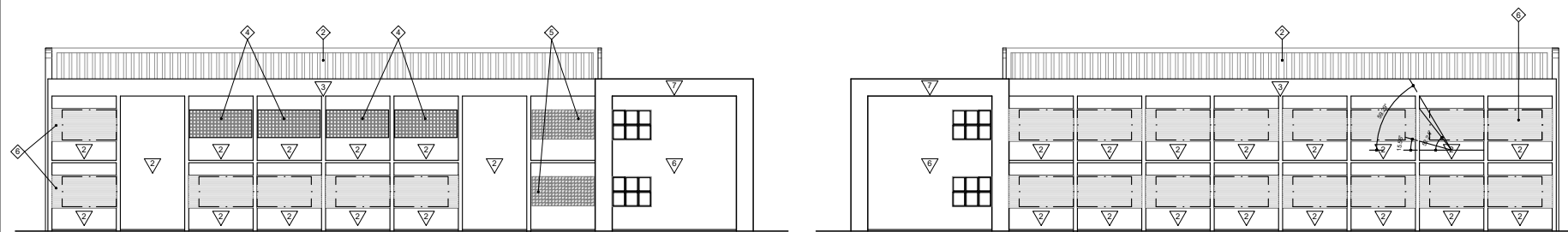




FACHADA A
PABELLÓN DE AULAS - VITÓRIA DA CONQUISTA



FACHADA B
PABELLÓN DE AULAS - VITÓRIA DA CONQUISTA



FACHADA C
PABELLÓN DE AULAS - VITÓRIA DA CONQUISTA

FACHADA D
PABELLÓN DE AULAS - VITÓRIA DA CONQUISTA

1 PAREDES EXTERNAS

1. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR BLANCO ($\alpha=0,158$)
2. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR PERLA ($\alpha=0,221$)
3. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR AMARILLO ($\alpha=0,367$)
4. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR SALMON ($\alpha=0,495$)
5. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR ROJO ($\alpha=0,642$)
6. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR TERRACOTA ($\alpha=0,646$)
7. BALDOSA CERÁMICA COLOR CANELA ($\alpha=0,400$)

1 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LA ENVOLVENTE

1. COLECTOR DE ÁGUAS PLUVIALES EN HORMIGÓN REVESTIDO CON MANTA ASFÁLTICA
2. CUBIERTA METÁLICA SANDWICH COLOR BLANCO
3. PUERTA DE ALUMÍNIO
4. BLOQUES DE CELOSIA EN HORMIGÓN (20x20cm)
5. BLOQUES DE VIDRIO TRANSLÚCIDO (20x20cm)
6. LAMAS HORIZONTALES EN ALUMÍNIO DELANTE DE VENTANA DE VIDRIO 6mm Y ALUMÍNIO

TESIS DOCTORAL

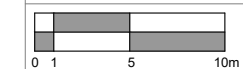
Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en edificios universitarios de Bahía (Brasil)
UPC (Barcelona, 2021)

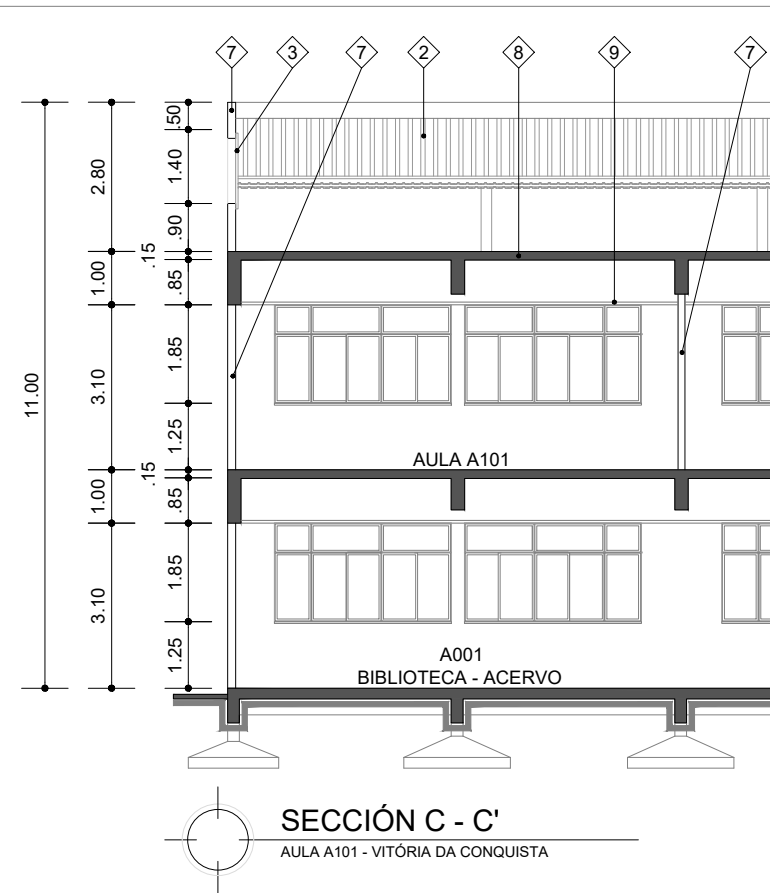
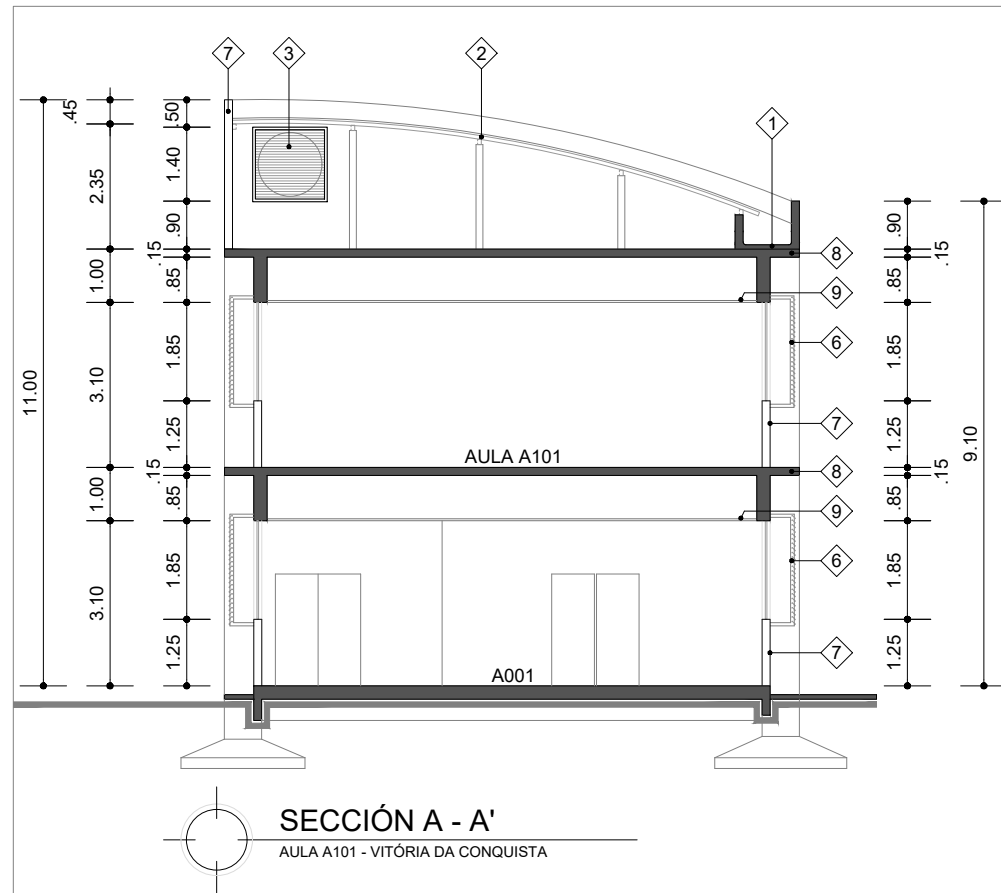
autor: Bruno Oliveira Santana

directora: Helena Coch

ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Vitória da Conquista (ALT)

FACHADAS





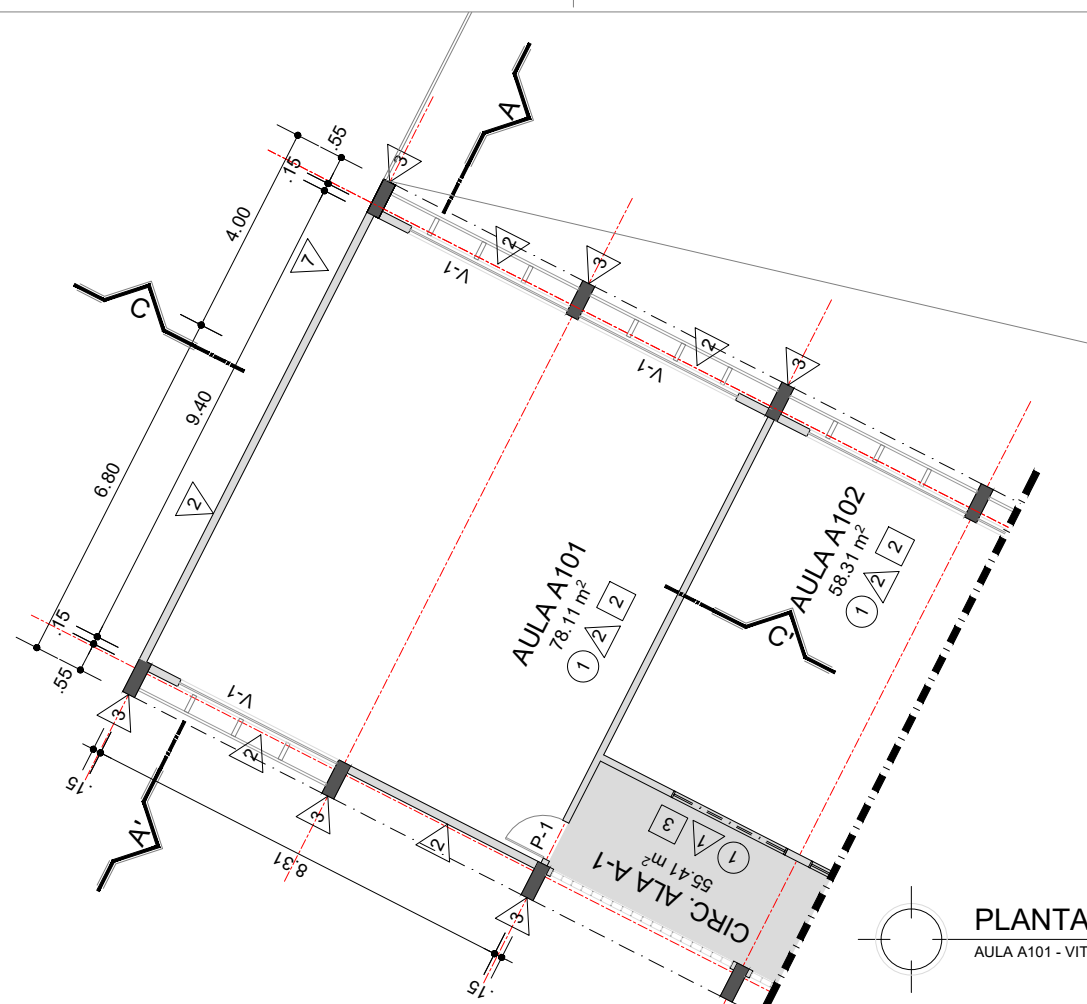
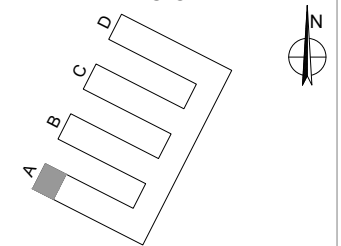
- 1 PISO**
 - 1. TERRAZO ESTÁNDAR COLOR GRIS
 - 2. BALDOSA CERÁMICA COLOR BLANCO
 - 3. BALDOSA CERÁMICA COLOR GRIS
 - 4. LOSETA DE VINILO COLOR PERLA
- 1 PAREDES INTERNAS**
 - 1. PINTURA LÁTEX MATE COLOR BLANCO ($\alpha=0,162$)
 - 2. PINTURA LÁTEX MATE COLOR CREMA ($\alpha=0,264$)
 - 3. PINTURA LÁTEX MATE COLOR GRIS ($\alpha=0,716$) HASTA 1.50m; PINTURA LÁTEX MATE COLOR BLANCO ($\alpha=0,162$)
 - 4. BALDOSA CERÁMICA COLOR BLANCO ($\alpha=0,200$)
 - 5. PANELES DE DIVISÓRIAS COLOR BEIGE ($\alpha=0,300$)
- 1 TECHO**
 - 1. LOSA DE HORMIGÓN ARMADO, SIN PINTURA
 - 2. FALSO TECHO EN PLACAS DE FIBRA MINERAL, COLOR BLANCO
 - 3. FALSO TECHO EN PLACAS DE YESO, COLOR BLANCO
- 1 PAREDES EXTERNAS**
 - 1. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR BLANCO ($\alpha=0,158$)
 - 2. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR PERLA ($\alpha=0,221$)
 - 3. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR AMARILLO ($\alpha=0,367$)
 - 4. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR SALMON ($\alpha=0,495$)
 - 5. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR ROJO ($\alpha=0,642$)
 - 6. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR TERRACOTA ($\alpha=0,646$)
 - 7. BALDOSA CERÁMICA COLOR CANELA ($\alpha=0,400$)
- 1 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LA ENVOLVENTE**
 - 1. COLECTOR DE AGUAS PLUVIALES EN HORMIGÓN REVESTIDO CON MANTA ASFÁLTICA
 - 2. CUBIERTA METÁLICA SANDWICH, COLOR GRIS
 - 3. PUERTA DE ALUMÍNIO
 - 4. BLOQUES DE CELOSIA EN HORMIGÓN (20x20cm)
 - 5. BLOQUES DE VIDRIO TRANSLÚCIDO (20x20cm)
 - 6. LAMAS HORIZONTALES EN ALUMÍNIO DELANTE DE VENTANA DE VIDRIO 6mm Y ALUMÍNIO
 - 7. PARED EN BLOQUE HUECO DE HORMIGÓN; MORTERO EN AMBAS CARAS (e=15cm)
 - 8. LOSA EN HORMIGÓN ARMADO
 - 9. FALSO TECHO EN PLACAS DE FIBRA MINERAL, COLOR BLANCO

CÓDIGOS (puertas y ventanas)

P-1: puerta de madera; 0.80x2.10m

V-1: ventana en vidrio 6mm y aluminio; 3.32x1.85m, h=1.25m

UBICACIÓN DEL AULA A101 EN EL EDIFICIO



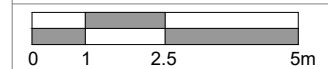
TESIS DOCTORAL
Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en edificios universitarios de Bahía (Brasil)
UPC (Barcelona, 2021)

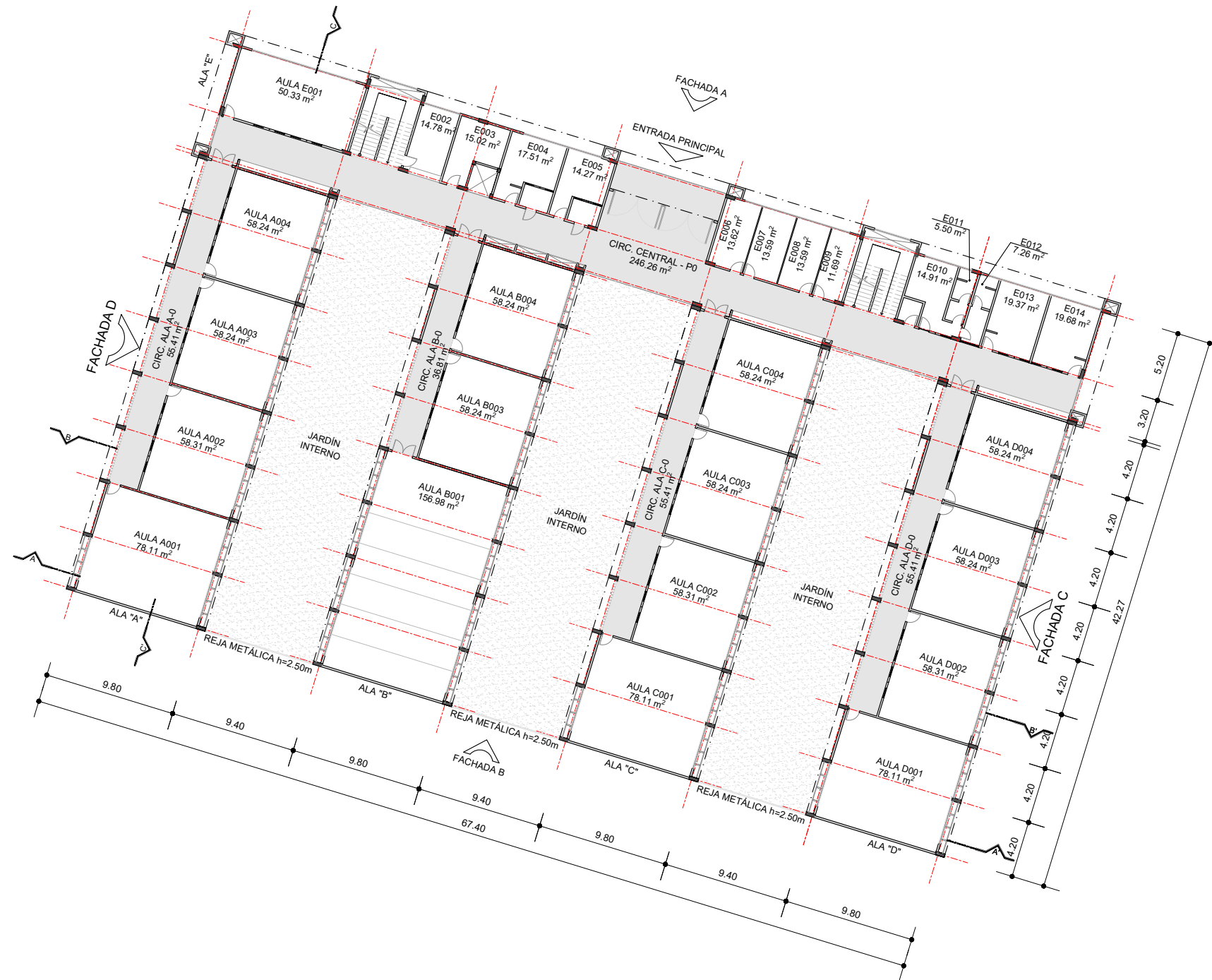
autor: Bruno Oliveira Santana

directora: Helena Coch

ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Vitória da Conquista (ALT)

PLANTA BAJA / SECCIONES - AULA A101





 CIRCULACIÓN

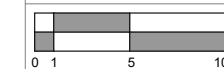
TESIS DOCTORAL
Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en
edificios universitarios de Bahia (Brasil)
UPC (Barcelona, 2021)

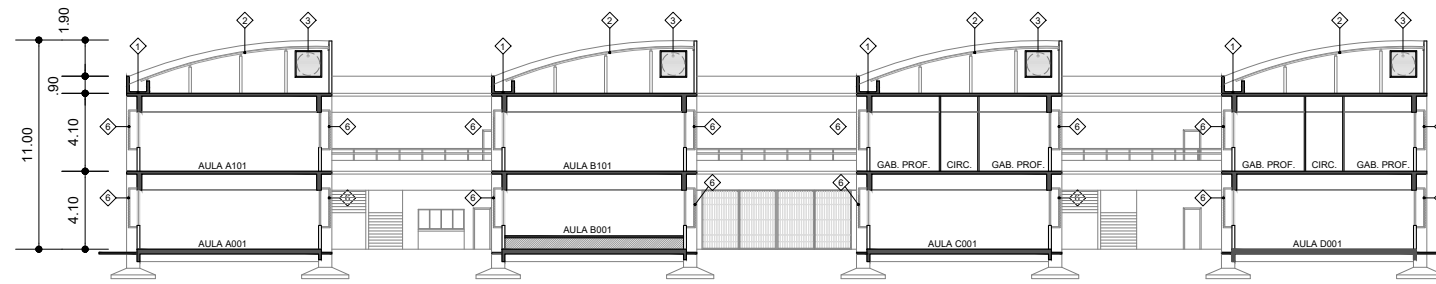
autor: Bruno Oliveira Santana

directora: Helena Coch

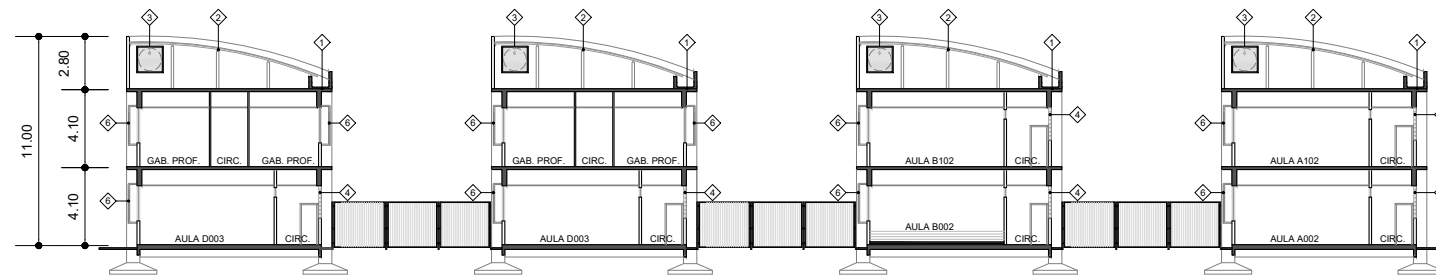
ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Barreiras (CONT)

PLANTA BAJA

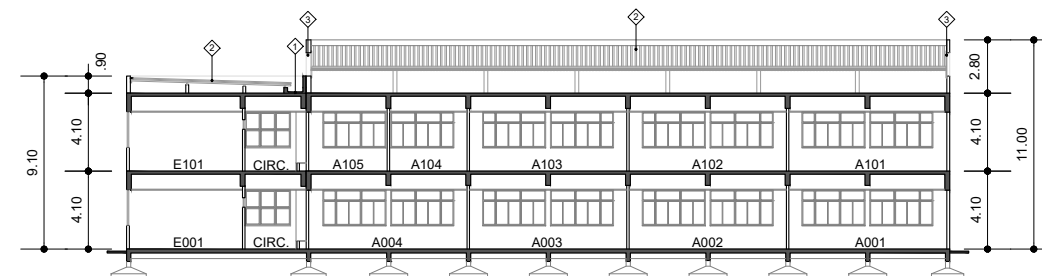




SECCIÓN A - A'
PABELLÓN DE AULAS - BARREIRAS



SECCIÓN B - B'
PABELLÓN DE AULAS - BARREIRAS



SECCIÓN C - C'
PABELLÓN DE AULAS - BARREIRAS

1 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LA ENVOLVENTE

1. COLECTOR DE ÁGUAS PLUVIALES EN HORMIGÓN REVESTIDO CON MANTA ASFÁLTICA
2. CUBIERTA METÁLICA SANDWICH COLOR GRIS
3. PUERTA DE ALUMÍNIO
4. BLOQUES DE CELOSIA EN HORMIGÓN (20x20cm)
5. BLOQUES DE VIDRIO TRANSLÚCIDO (20x20cm)
6. LAMAS HORIZONTALES EN ALUMÍNIO DELANTE DE VENTANA DE VIDRIO 6mm Y ALUMÍNIO

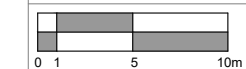
TESIS DOCTORAL
Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en
edificios universitarios de Bahia (Brasil)
UPC (Barcelona, 2021)

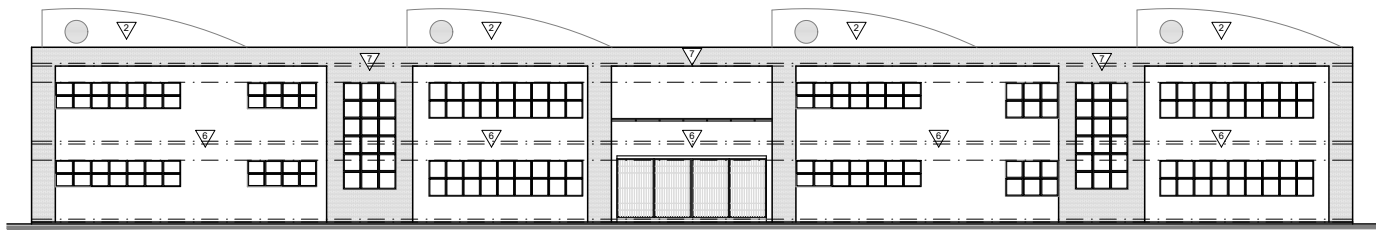
autor: Bruno Oliveira Santana

directora: Helena Coch

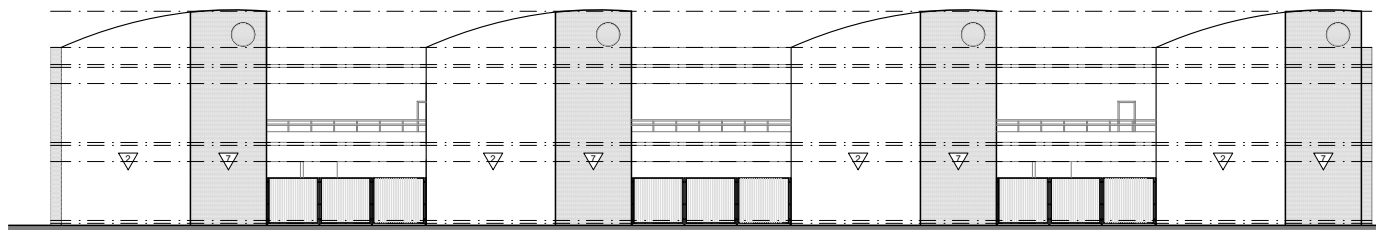
ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Barreiras (CONT)

SECCIONES

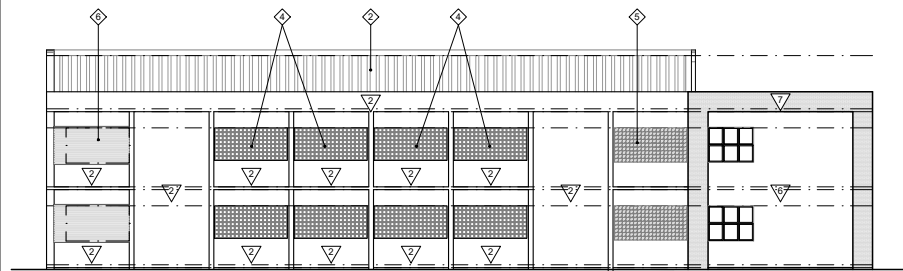




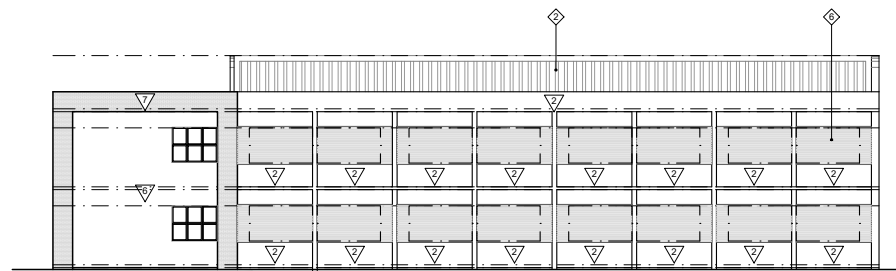
FACHADA A
PABELLÓN DE AULAS - BARREIRAS



FACHADA B
PABELLÓN DE AULAS - BARREIRAS



FACHADA C
PABELLÓN DE AULAS - BARREIRAS



FACHADA D
PABELLÓN DE AULAS - BARREIRAS

1 PAREDES EXTERNAS

1. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR BLANCO ($\alpha=0,158$)
2. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR PERLA ($\alpha=0,221$)
3. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR AMARILLO ($\alpha=0,367$)
4. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR SALMON ($\alpha=0,495$)
5. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR ROJO ($\alpha=0,642$)
6. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR TERRACOTA ($\alpha=0,646$)
7. BALDOSA CERÁMICA COLOR CANELA ($\alpha=0,400$)

1 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LA ENVOLVENTE

1. COLECTOR DE ÁGUAS PLUVIALES EN HORMIGÓN REVESTIDO CON MANTA ASFÁLTICA
2. CUBIERTA METÁLICA SANDWICH COLOR BLANCO
3. PUERTA DE ALUMÍNIO
4. BLOQUES DE CELOSIA EN HORMIGÓN (20x20cm)
5. BLOQUES DE VIDRIO TRANSLÚCIDO (20x20cm)
6. LAMAS HORIZONTALES EN ALUMÍNIO DELANTE DE VENTANA DE VIDRIO 6mm Y ALUMÍNIO

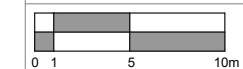
TESIS DOCTORAL
Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en
edificios universitarios de Bahia (Brasil)
UPC (Barcelona, 2021)

autor: Bruno Oliveira Santana

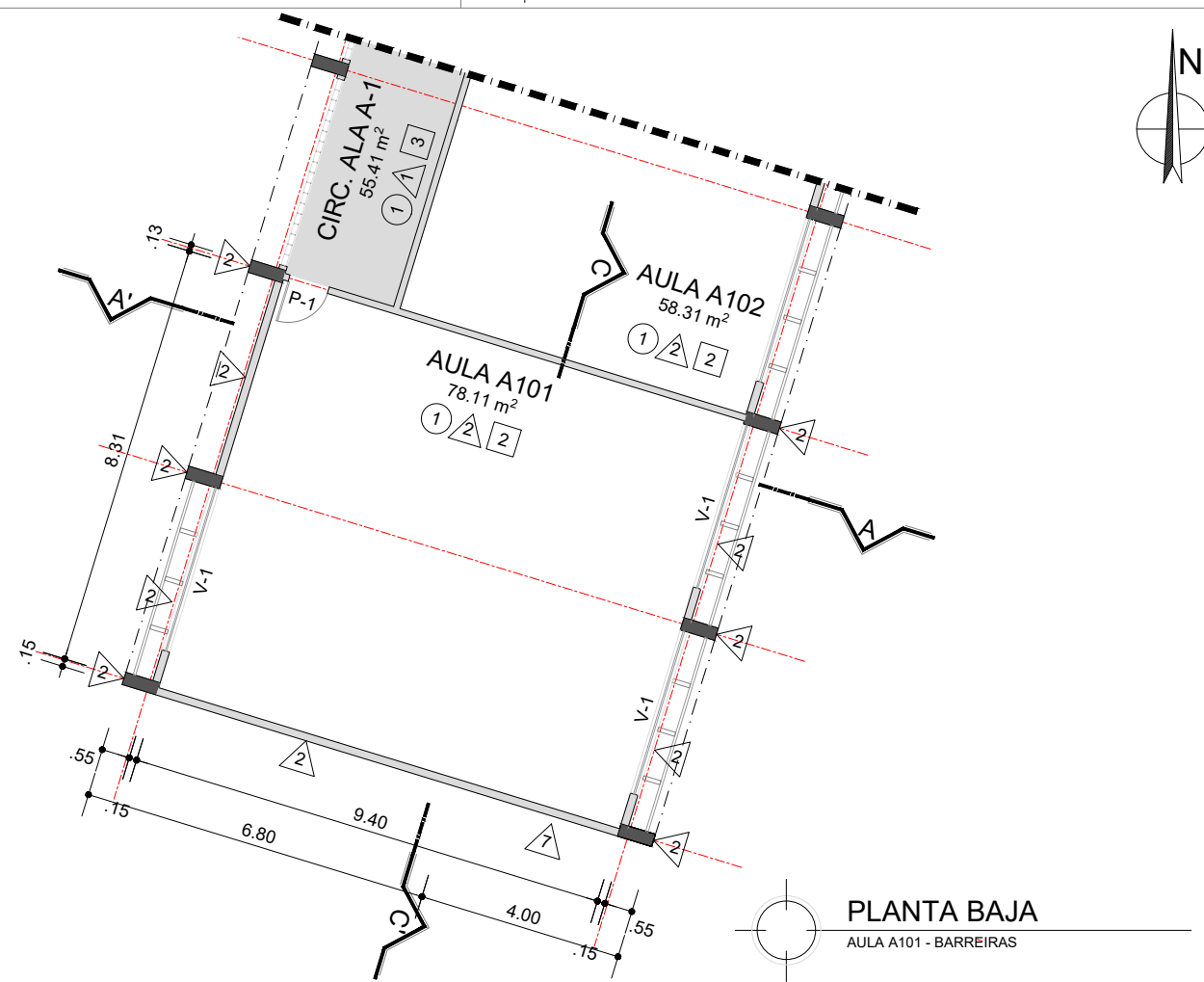
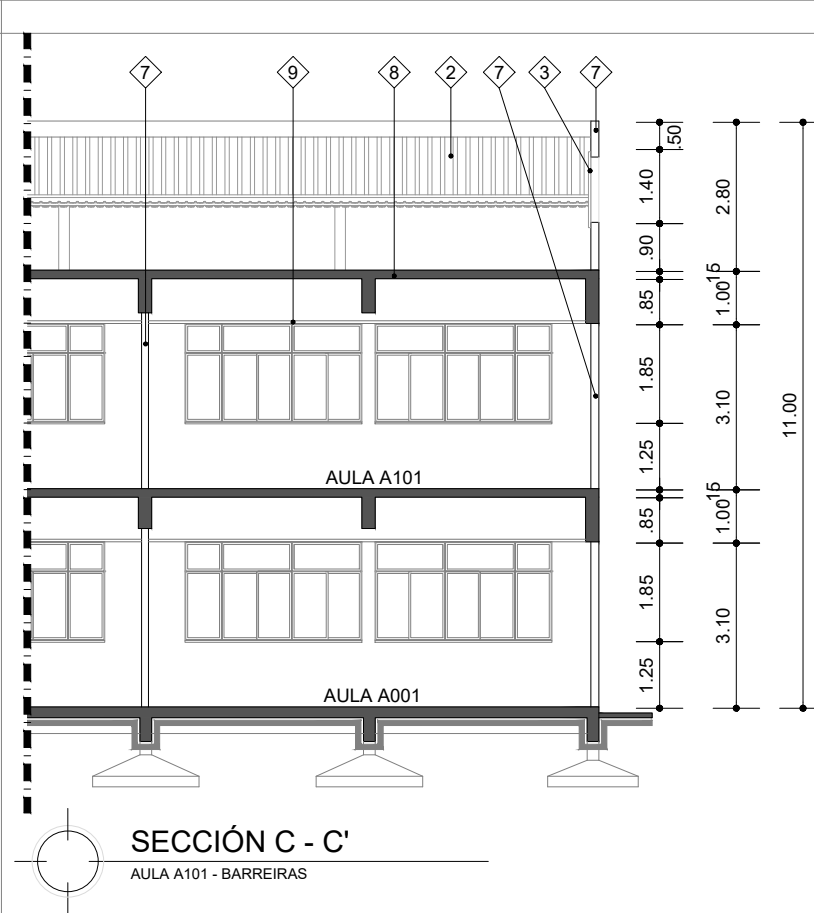
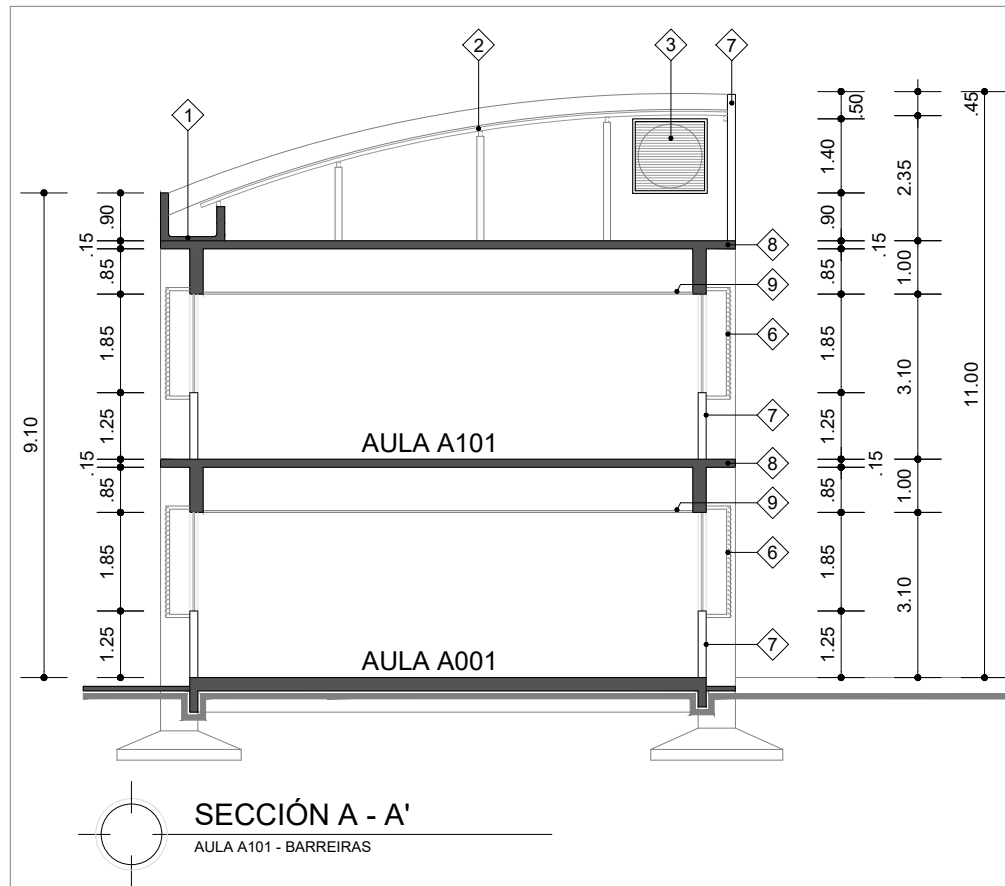
directora: Helena Coch

ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Barreiras (CONT)

FACHADAS



17/18



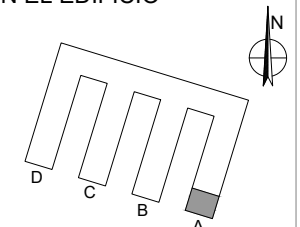
- 1 PISO**
1. TERRAZO ESTÁNDAR COLOR GRIS
 2. BALDOSA CERÁMICA COLOR BLANCO
 3. BALDOSA CERÁMICA COLOR GRIS
 4. LOSETA DE VINILO COLOR PERLA
- 1 PAREDES INTERNAS**
1. PINTURA LÁTEX MATE COLOR BLANCO ($\alpha=0,162$)
 2. PINTURA LÁTEX MATE COLOR CREMA ($\alpha=0,264$)
 3. PINTURA LÁTEX MATE COLOR GRIS ($\alpha=0,716$) HASTA 1.50m; PINTURA LÁTEX MATE COLOR BLANCO ($\alpha=0,162$)
 4. BALDOSA CERÁMICA COLOR BLANCO ($\alpha=0,200$)
 5. PANELES DE DIVISÓRIAS COLOR BEIGE ($\alpha=0,300$)
- 1 TECHO**
1. LOSA DE HORMIGÓN ARMADO, SIN PINTURA
 2. FALSO TECHO EN PLACAS DE FIBRA MINERAL, COLOR BLANCO
 3. FALSO TECHO EN PLACAS DE YESO, COLOR BLANCO
- 1 PAREDES EXTERNAS**
1. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR BLANCO ($\alpha=0,158$)
 2. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR PERLA ($\alpha=0,221$)
 3. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR AMARILLO ($\alpha=0,367$)
 4. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR SALMON ($\alpha=0,495$)
 5. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR ROJO ($\alpha=0,642$)
 6. PINTURA ACRÍLICA MATE COLOR TERRACOTA ($\alpha=0,646$)
 7. BALDOSA CERÁMICA COLOR CANELA ($\alpha=0,400$)
- 1 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LA ENVOLVENTE**
1. COLECTOR DE AGUAS PLUVIALES EN HORMIGÓN REVESTIDO CON MANTA ASFÁLTICA
 2. CUBIERTA METÁLICA SANDWICH, COLOR GRIS
 3. PUERTA DE ALUMÍNIO
 4. BLOQUES DE CELOSIA EN HORMIGÓN (20x20cm)
 5. BLOQUES DE VIDRIO TRANSLÚCIDO (20x20cm)
 6. LAMAS HORIZONTALES EN ALUMÍNIO DELANTE DE VENTANA DE VIDRIO 6mm Y ALUMÍNIO
 7. PARED EN BLOQUE HUECO DE HORMIGÓN; MORTERO EN AMBAS CARAS (e=15cm)
 8. LOSA EN HORMIGÓN ARMADO
 9. FALSO TECHO EN PLACAS DE FIBRA MINERAL, COLOR BLANCO

CÓDIGOS (puertas y ventanas)

UBICACIÓN DEL AULA A101 EN EL EDIFICIO

P-1: puerta de madera; 0.80x2.10m

V-1: ventana en vidrio 6mm y aluminio; 3.32x1.85m, h=1.25m



TESIS DOCTORAL
Comportamiento térmico de cerramientos opacos verticales en edificios universitarios de Bahía (Brasil)
UPC (Barcelona, 2021)

autor: Bruno Oliveira Santana

directora: Helena Coch

ANEXO V: Planos del Pabellón de Aulas - Barreiras (CONT)

PLANTA BAJA / SECCIONES - AULA A101



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, 2003. *NBR 15220: Desempenho térmico de edificações*. 2003. Rio de Janeiro: s.n.
- AMOS-ABANYIE, AKUFFO y KUTIN-SANWU, 2013. Effects of thermal mass, window size and night-time ventilation on peak indoor air temperature in the warm-humid climate of Ghana. *The Scientific World Journal* [en línea], pp. 1-9. ISSN 1537-744X. DOI 10.1155/2013/621095.
- ASHRAE, 2009. *Handbook of fundamentals*. Atlanta: ASHRAE.
- ATEM, C. Fachadas ventiladas: hacia un diseño eficiente en Brasil.
- BALARAS, C., 1996. Cooling in buildings. *Passive cooling of buildings*. New York: James&James (Science Publishers) Ltd, pp. 1-30. ISBN 978-1-873936-47-4.
- BARRIOS, G., HUELSZ, G. y ROJAS, J., 2012. Thermal performance of envelope wall/roofs of intermittent air-conditioned rooms. *Applied Thermal Engineering* [en línea], vol. 40, pp. 1-7. ISSN 13594311. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.051.
- BECKERS, B. y MASSET, L., 2003. *HeliodonTM_2.6-1 software*. 2003. S.I.: s.n. 2.6-01.
- BRASIL, 2014. *Instrução Normativa nº 02/2014*. 2014. S.I.: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão.
- BRASIL, 2011. *Plano Nacional de Eficiência Energética. Premissas e diretrizes básicas* [en línea]. Brasília: MME.
- CARLO, J.C., GHISI, E. Y LAMBERTS, R., 2003. The use of computer simulation to establish energy efficiency parameters for a building code of a city in Brazil. *8th International IBPSA Conference*. Eindhoven, Netherlands: s.n., pp. 131-138.
- CARLO, J.C., 2008. *Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais*. S.I.: Universidade

Federal de Santa Catarina.

CHENG, V., NG, E. y GIVONI, B., 2005. Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate. *Solar Energy* [en línea], vol. 78, no. 4, pp. 528-534. ISSN 0038092X. DOI 10.1016/j.solener.2004.05.005.

CHIRARATANANON, S. y HIEN, V.D., 2011. Thermal performance and cost effectiveness of massive walls under thai climate. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 43, no. 7, pp. 1655-1662. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.03.010.

CHIRARATTANANON, S., HIEN, V.D. y TUMMU, P., 2012. Thermal performance and cost effectiveness of wall insulation under Thai climate. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 45, pp. 82-90. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.10.025.

DEKAY, M. y BROWN, G.Z., 2014. *Sun, wind & light: architectural design strategies*. 3rd. USA: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-94578-0.

DORNELLES, K.A., 2008. *Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex e PVA*. S.I.: Universidade Estadual de Campinas.

DORNELLES, K.A. y RORIZ, M., 2007. Influência das tintas imobiliárias sobre o desempenho térmico e energético de edificações. *10º Congresso Internacional de Tintas - ABRAFATI 2007*. São Paulo: s.n.,

EPE, 2007. *Plano Nacional de Energia 2030* [en línea]. Rio de Janeiro: EPE. ISBN 9788560025022.

FROTA, A.B., 2004. *Geometria da insolação*. 1. São Paulo: Geros. ISBN 85-902193-3-X.

GRANJA, A.D. y LABAKI, L.C., 2004. Paredes orientadas a leste e a oeste: uma abordagem crítica em relação ao conforto e à eficiência energética. *Ambiente Construído*, vol. 4, pp. 65-75.

HOLMAN, J.P., 1999. *Transferencia de calor*. México, DF: Companhia Editorial Continental.

IDRIS, Y.M. y MAE, M., 2017. Anti-insulation mitigation by altering the envelope layers' configuration. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 141, pp. 186-204. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.02.025.

INMET, 2016. *Arquivos climáticos de cidades brasileiras para simulação de desempenho energético de edificações* [en línea]. 2016. S.I.: s.n. Disponible en:

- <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>.
- INMETRO, 2013. *Portaria nº 50/2013*. 2013. Brasil: s.n.
- LECHNER, N., 2000. *Heating, cooling, lighting : design methods for architects* [en línea]. New York : John Wiley. [Consulta: 30 mayo 2016]. ISBN 0471241431. Disponible en: http://catalog.upc.edu/record=b1307481~S1*cat.
- MASOSO, O.T. y GROBLER, L.J., 2008. A new and innovative look at anti-insulation behaviour in building energy consumption. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 40, no. 10, pp. 1889-1894. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2008.04.013.
- MELO, A.P., 2007. *Análise da influência da transmitância térmica no consumo de energia de edificações comerciais*. S.I.: Universidade Federal de Santa Catarina.
- MUSCIO, A. y AKBARI, H., 2017. An index for the overall performance of opaque building elements subjected to solar radiation. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 157, pp. 184-194. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.01.010.
- OLGYAY, V., LYNDON, D. y REYNOLDS, J., 1963. *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. New York: Princeton University Press. ISBN 9781400873685.
- OLIVEIRA, W.D. y FIALHO, E.S., 2017. A influência de fatores geomorfológicos na análise da temperatura do município de Cariacica-ES. *Geografia, Ciência e Política: do pensamento à ação, da ação ao pensamento - ENANPEGE 2017*. Porto Alegre: s.n.,
- RIVERO, R., 1986. *Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural*. 2ª ed. rev. Porto Alegre: D. C. Luzzatto Editores. ISBN 85-85038-44-6.
- SANTAMOURIS, M. y ASIMAKOPOULOS, D., 1996. *Passive cooling of buildings*. New York: Earthscan. ISBN: 978-1-873936-47-4.
- SANTAMOURIS, M. y KOLOKOTSA, D., 2013. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: the state of the art. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 57, pp. 74-94. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.11.002.
- SEI, 2014. *Tipologia climática Koppen para o Estado da Bahia* [en línea]. 2014. Salvador: s.n. Disponible en: http://www.sei.ba.gov.br/site/geoambientais/mapas/pdf/tipologia_climatica_segundo_koppen_2014.pdf.
- SERRA, R. y COCH, H., 1995. *Arquitectura y energía natural*. Barcelona: Edicions

UPC. ISBN 8476535058.

- SIGNOR, R., WESTPHAL, F.S. y LAMBERTS, R., 2001. Regression analysis of electric energy consumption and architectural variables of conditioned commercial buildings in 14 Brazilian cities. *7th International IBPSA Conference*. Rio de Janeiro: s.n., pp. 1373-1379.
- SILVA, A.M.M., CALLEJAS, I.J.A. y DURANTE, L.C., 2016. A influência da inércia térmica nas paredes externas em clima quente: uma revisão sistemática. *SBE16 Brazil & Portugal: Sustainable Urban Communities towards a Nearly Zero Impact Built Environment*. Vitoria, Brazil: s.n., pp. 1063-1072.
- SZOKOLAY, S. V, 2008. *Introduction to architectural science: the basis of sustainable design*. 2 ed. S.l.: Elsevier/Architectural Press. ISBN 9780750687041.
- UFBA, 2006. *Projeto arquitetônico do Pavilhão de Aulas I - Campus Anísio Teixeira*. 2006. Salvador: s.n.
- UFOB, 2006. *Projeto arquitetônico do Pavilhão de Aulas II - Campus Edgar Santos*. 2006. Barreiras: s.n.
- UFRB, 2006. *Projeto arquitetônico do Pavilhão de Aulas II - Campus Cruz das Almas*. 2006. Cruz das Almas: s.n.
- VENANCIO, R. y PEDRINI, A., 2009. Envelope Design, energy consumption and thermal performance: a case study at UFRN Campus, Brazil. *PLEA2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Quebec, Canada: s.n.,
- VERBEKE, S. y AUDENAERT, A., 2018. Thermal inertia in buildings: a review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 82, no. August, pp. 2300-2318.

1. LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espectro de radiación electromagnética.....	18
Figura 2: Flujos de calor por la pared.....	22
Figura 3: Comparación de los flujos de calor en paredes con capacidad térmica y sin capacidad térmica.....	26
Figura 4: Zonificación climática de Brasil para análisis de eficiencia energética de edificios	27
Figura 5: Temperatura superficial según el coeficiente de absorción del acabado exterior...	35
Figura 6: Formas del edificio simuladas para evaluar sus impactos en el consumo energético	37
Figura 7: Capacidad térmica óptima y su influencia en el desempeño térmico del ambiente en Sydney (34°S).....	53
Figura 8: Demanda de refrigeración según los usos y la capacidad térmica de la pared para edificios simulados en Bangkok (14°N).....	57
Figura 9: Modelo de ficha utilizada para la recogida de datos.....	64
Figura 10: Ubicación del Aula A101 en la primera planta del pabellón de aulas.....	67
Figura 11: Sección estándar pared.....	69
Figura 12: Zonas climáticas de Brasil y ubicación de las ciudades investigadas.....	70
Figura 13: Comparación de los datos meteorológicos mensuales de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT).....	73
Figura 14: Planta tipo del pabellón de aulas.....	75
Figura 15: Sección transversal - 1ª planta y cubierta del Pabellón de Aulas.....	77
Figura 16: Distintos módulos estructurales entre los pabellones de aulas.....	77
Figura 17: Fachada C - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....	78
Figura 18: Distintos formatos del Aula A101 entre los pabellones de aulas.....	78
Figura 19: Colores utilizados en las fachadas de los pabellones de aulas de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT).....	80
Figura 20: Pabellones de Aulas de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT) y sus entornos inmediatos.....	81

Figura 21: Orientación de los pabellones de aulas en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT).....	81
Figura 22: Radiación solar incidente en cada fachada del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....	82
Figura 23: Radiación solar incidente en cada fachada del Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....	83
Figura 24: Radiación solar incidente en cada fachada del Aula A101 de Barreiras (CONT)..	85
Figura 25: Temperatura exterior y cargas térmicas mensuales para: demanda de refrigeración, aportes internos, ganancias solares directas y paredes externas (MAR).....	87
Figura 26: Temperatura exterior y cargas térmicas mensuales para: demanda de refrigeración, aportes internos, ganancias solares directas y paredes externas (ALT).....	87
Figura 27: Temperatura exterior y cargas térmicas mensuales para: demanda de refrigeración, aportes internos, ganancias solares directas y paredes externas (CONT).....	87
Figura 28: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 15/02 - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....	89
Figura 29: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 19/07 - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....	91
Figura 30: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 23/03 - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....	93
Figura 31: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 19/07 - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....	94
Figura 32: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 18/01 - Aula A101 de Barreiras (CONT).....	96
Figura 33: Balance energético de las paredes y las cargas térmicas por radiación solar en 19/07 - Aula A101 de Barreiras (CONT).....	97
Figura 34: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de absorción – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....	106
Figura 35: Demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de absorción - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....	107
Figura 36: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	108
Figura 37: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	109
Figura 38: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de absorción – Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....	111
Figura 39: Demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de absorción - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....	111
Figura 40: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03. .	112

Figura 41: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07..	113
Figura 42: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de absorción – Aula A101 de Barreiras (CONT).....	115
Figura 43: Demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de absorción - Aula A101 de Barreiras (CONT).....	115
Figura 44: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Barreiras (CONT).....	116
Figura 45: Balance energético de las paredes y de las cargas térmicas por radiación solar con distintos coeficientes de absorción - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	117
Figura 46: Variación de la demanda anual de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica en las tres aulas.....	120
Figura 47: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de transmitancia térmica (MAR).....	121
Figura 48: Demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica (MAR).....	122
Figura 49: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	123
Figura 50: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	124
Figura 51: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	124
Figura 52: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	124
Figura 53: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	126
Figura 54: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	127
Figura 55: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	129
Figura 56: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	129
Figura 57: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	129
Figura 58: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	130
Figura 59: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....	132

Figura 60: Demanda mensual de refrigeración de las paredes según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....	132
Figura 61: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	133
Figura 62: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 23/03.....	135
Figura 63: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 23/03.....	135
Figura 64: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 23/03.....	135
Figura 65: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	136
Figura 66: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07.....	137
Figura 67: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07.....	139
Figura 68: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07.....	139
Figura 69: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07.....	139
Figura 70: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07.....	141
Figura 71: Carga térmica mensual de las paredes según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT).....	142
Figura 72: Demanda mensual de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT).....	143
Figura 73: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras, 18/01.....	144
Figura 74: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01.....	145
Figura 75: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01.....	145
Figura 76: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01.....	145
Figura 77: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01.....	147
Figura 78: Balance energético de las paredes con distintos coeficientes de transmitancia	

térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	148
Figura 79: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	149
Figura 80: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	149
Figura 81: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	149
Figura 82: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	150
Figura 83: Variación de la demanda anual de refrigeración según la capacidad térmica en las tres aulas.....	152
Figura 84: Carga térmica mensual de las paredes según la capacidad térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....	153
Figura 85: Demanda mensual de refrigeración según la capacidad térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....	154
Figura 86: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) - 15/02.....	155
Figura 87: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	157
Figura 88: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	157
Figura 89: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	157
Figura 90: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	158
Figura 91: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07	159
Figura 92: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	161
Figura 93: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	161
Figura 94: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	161
Figura 95: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	162
Figura 96: Carga térmica mensual de las paredes según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....	163

Figura 97: Demanda mensual de refrigeración de las paredes según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....	164
Figura 98: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	165
Figura 99: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	167
Figura 100: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	167
Figura 101: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	167
Figura 102: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	168
Figura 103: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista, 19/07	169
Figura 104: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07.....	171
Figura 105: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07.....	171
Figura 106: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07.....	171
Figura 107: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07.....	172
Figura 108: Carga térmica mensual de las paredes según la capacidad térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT).....	173
Figura 109: Demanda mensual de refrigeración según la capacidad térmicas – Aula A101 de Barreiras (CONT).....	174
Figura 110: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01..	175
Figura 111: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01.....	176
Figura 112: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01.....	176
Figura 113: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01.....	176
Figura 114: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01.....	178
Figura 115: Balance energético de las paredes con distintas capacidades térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07..	179

Figura 116: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	180
Figura 117: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	180
Figura 118: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	180
Figura 119: Demanda de refrigeración según la capacidad térmica - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	182
Figura 120: Variación de la demanda anual de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica en paredes pesadas ($C_t=400 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) en las tres aulas.....	183
Figura 121: Carga térmica mensual de las paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....	184
Figura 122: Demanda mensual de refrigeración de las paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Cruz das Almas (MAR).....	185
Figura 123: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmicas y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR) - 15/02.....	186
Figura 124: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	188
Figura 125: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	188
Figura 126: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	188
Figura 127: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 15/02.....	189
Figura 128: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	190
Figura 129: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	192
Figura 130: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	192
Figura 131: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	192
Figura 132: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de	

paredes pesadas - Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), 19/07.....	193
Figura 133: Carga térmica mensual de las paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....	195
Figura 134: Demanda mensual de refrigeración de las paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT).....	195
Figura 135: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	196
Figura 136: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	198
Figura 137: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	198
Figura 138: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	198
Figura 139: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 23/03.....	199
Figura 140: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07.....	201
Figura 141: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07.....	203
Figura 142: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07.....	203
Figura 143: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07.....	203
Figura 144: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Vitória da Conquista (ALT), 19/07.....	205
Figura 145: Carga térmica mensual de las paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT).....	206
Figura 146: Demanda mensual de refrigeración de paredes pesadas según el coeficiente de transmitancia térmica – Aula A101 de Barreiras (CONT).....	207
Figura 147: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01.....	208
Figura 148: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficien-	

te de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01	209
Figura 149: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01	209
Figura 150: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01	209
Figura 151: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 18/01.....	211
Figura 152: Balance energético de las paredes pesadas con distintos coeficientes de transmitancia térmica y sus respectivas cargas térmicas por radiación solar - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	212
Figura 153: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada B según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07	214
Figura 154: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada C según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07	214
Figura 155: Cargas térmicas (total y por radiación solar) en la Fachada D según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07	214
Figura 156: Demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica de paredes pesadas - Aula A101 de Barreiras (CONT), 19/07.....	215
Figura 157: Fachadas con revestimiento cerámico en los tres pabellones de aulas (MAR; ALT; CONT).....	237
Figura 158: Modelo de ficha utilizada para la recogida de datos.....	240
Figura 159: Calibración modelo computacional - Aula A101 (MAR).....	244
Figura 160: Calibración modelo computacional - Aula A101 (ALT).....	246
Figura 161: Calibración modelo computacional - Aula A101 (CONT).....	248
Figura 162: Sección estándar pared.....	249
Figura 163: Carta estereográfica de Cruz das Almas (MAR).....	252
Figura 164: Ábaco psicrométrico de Cruz das Almas (MAR).....	252
Figura 165: Humedad relativa (HR) x Temperaturas máxima (T _{máx}), media (T _{med}) y mínima (T _{mín}) - Cruz das Almas (MAR).....	253
Figura 166: Precipitación x Temperaturas máxima (T _{máx}), media (T _{med}) y mínima (T _{mín}) - Cruz das Almas (MAR).....	253
Figura 167: Radiación directa y difusa x Nubosidad - Cruz das Almas (MAR).....	254
Figura 168: Radiación en los planos de la cubierta y de las fachadas x Nubosidad - Pabellón de Aulas de Cruz das Almas (MAR).....	254
Figura 169: Carta estereográfica de Vitória da Conquista (ALT).....	256
Figura 170: Ábaco psicrométrico de Vitória da Conquista (ALT).....	256
Figura 171: Humedad relativa (HR) x Temperaturas máxima (T _{máx}), media (T _{med}) y mínima	

(T _{mín}) - Vitória da Conquista (ALT).....	257
Figura 172: Precipitación x Temperaturas máxima (T _{máx}), media (T _{med}) y mínima (T _{mín}) - Vitória da Conquista (ALT).....	257
Figura 173: Radiación directa y difusa x Nubosidad - Vitória da Conquista (ALT).....	258
Figura 174: Radiación directa en los planos de la cubierta y de las fachadas x Nubosidad - Pabellón de Aulas de Vitória da Conquista (ALT).....	258
Figura 175: Carta estereográfica de Barreiras (CONT).....	260
Figura 176: Ábaco psicrométrico de Barreiras (CONT).....	260
Figura 177: Humedad relativa (HR) x Temperaturas máxima (T _{máx}), media (T _{med}) y mínima (T _{mín}) - Barreiras (CONT).....	261
Figura 178: Precipitación x Temperaturas máxima (T _{máx}), media (T _{med}) y mínima (T _{mín}) - Barreiras (CONT).....	261
Figura 179: Radiación directa y difusa x Nubosidad - Barreiras (CONT).....	262
Figura 180: Radiación directa en los planos de la cubierta y de las fachadas x Nubosidad - Pabellón de Aulas de Barreiras (CONT).....	262
Figura 181: Velocidad de los vientos (m/s) en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT).....	265
Figura 182: Frecuencia de los vientos (%) en Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT).....	265
Figura 183: Temperatura interior del Aula A101 (MAR) con tasa de ventilación natural de 10 renov/h.....	268
Figura 184: Temperatura interior del Aula A101 (ALT) con tasa de ventilación natural de 10 renov/h.....	268
Figura 185: Temperatura interior del Aula A101 (CONT) con tasa de ventilación natural de 10 renov/h.....	268
Figura 186: Rango de temperatura interior operativa aceptable para ambientes condicionados naturalmente.....	271
Figura 187: Temperatura interior del Aula A101 (MAR) y los límites de temperatura operativa interior.....	272
Figura 188: Temperatura interior del Aula A101 (ALT) y los límites de temperatura operativa interior.....	272
Figura 189: Temperatura interior del Aula A101 (CONT) y los límites de temperatura operativa interior.....	272
Figura 190: Voto medio estimado mensual (PMV) - Aula A101 (MAR).....	274
Figura 191: Voto medio estimado mensual (PMV) - Aula A101 (ALT).....	274
Figura 192: Voto medio estimado mensual (PMV) - Aula A101 (CONT).....	274
Figura 193: Porcentaje de personas insatisfechas (PPD) - Aula A101 (MAR).....	275

Figura 194: Porcentaje de personas insatisfechas (PPD) - Aula A101 (ALT).....	275
Figura 195: Porcentaje de personas insatisfechas (PPD) - Aula A101 (CONT).....	275
Figura 196: Vista general del edificio.....	278
Figura 197: Vista general del edificio.....	278
Figura 198: Vista general del edificio.....	278
Figura 199: Entrada principal.....	278
Figura 200: Fachada lateral izquierda.....	278
Figura 201: Fachada lateral derecha.....	278
Figura 202: Fachadas lateral izquierda y del fondo.....	279
Figura 203: Fachada del fondo.....	279
Figura 204: Aula A101.....	279
Figura 205: Aula A101.....	279
Figura 206: Aula A101: ventana y lamas exteriores.....	279
Figura 207: Detalle lamas exteriores.....	279
Figura 208: Circulación central, planta baja.....	280
Figura 209: Circulación central, planta baja.....	280
Figura 210: Circulación central, planta superior.....	280
Figura 211: Circulación Aulas.....	280
Figura 212: Jardín interno.....	280
Figura 213: Jardín interno.....	280
Figura 214: Vista general de la edificación.....	281
Figura 215: Entrada principal.....	281
Figura 216: Fachada principal.....	281
Figura 217: Fachada del fondo.....	281
Figura 218: Fachadas principal y lateral izquierda.....	281
Figura 219: Fachadas principal y lateral derecha.....	281
Figura 220: Circulación central - planta baja.....	282
Figura 221: Jardín interno.....	282
Figura 222: Circulación Aulas.....	282
Figura 223: Circulación Aulas.....	282
Figura 224: Circulación central - planta superior.....	282
Figura 225: Jardín interno.....	282

Figura 226: Aula A101.....	283
Figura 227: Aula A101.....	283
Figura 228: Aula A101.....	283
Figura 229: Aula A101.....	283
Figura 230: Detalle de las lamas.....	283
Figura 231: Detalle de las lamas y la ventana.....	283
Figura 232: Fachada principal.....	284
Figura 233: Fachada lateral izquierda.....	284
Figura 234: Fachada de fondo.....	284
Figura 235: Fachada lateral derecha.....	284
Figura 236: Jardín interno.....	284
Figura 237: Jardín interno.....	284
Figura 238: Entrada Principal.....	285
Figura 239: Entrada Principal.....	285
Figura 240: Circulación central, planta superior.....	285
Figura 241: Aula A001.....	285
Figura 242: Circulación central, planta baja.....	285
Figura 243: Circulación Aulas.....	285
Figura 244: Circulación Aulas.....	285
Figura 245: Aula A001.....	286
Figura 246: Aula A001.....	286
Figura 247: Aula A101.....	286
Figura 248: Aula A101.....	286

2. LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Expansión de las universidades públicas federales brasileñas 2003 - 2012.....	12
Tabla 2: Límites para el coeficiente de absorción de las superficies externas.....	28
Tabla 3: Límites para el coeficiente de transmitancia térmica (U, en $W/m^2 \cdot K$) y capacidad térmica (Ct, en $kJ/m^2 \cdot K$) de las paredes externas.....	28
Tabla 4: Coeficientes de absorción y de transmitancia térmica de paredes y cubierta para cada tipo de envolvente.....	37
Tabla 5: Rutinas de ocupación por uso y periodo de la semana.....	56
Tabla 6: Espesor, resistencia térmica y capacidad térmica de las paredes de edificios simulados en Bangkok ($14^{\circ}N$).....	59
Tabla 7: Características de la rutina de ocupación del aula utilizada para las simulaciones..	67
Tabla 8: Semana elegida para las simulaciones horarias.....	68
Tabla 9: Variables constructivas de las paredes existentes.....	69
Tabla 10: Proporción de las paredes externas con relación al volumen del Aula A101.....	79
Tabla 11: Coeficientes de absorción de las paredes del Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT).....	80
Tabla 12: Días típicos de mayor y menor demanda de refrigeración del Aula A101.....	88
Tabla 13: Coeficientes de absorción de las paredes y la reducción de la demanda anual de refrigeración.....	104
Tabla 14: Porcentaje de reducción de la demanda de refrigeración según el coeficiente de transmitancia térmica para paredes pesadas.....	184
Tabla 15: Periodo de recogida de datos <i>in situ</i> de cada pabellón de aulas.....	234
Tabla 16: Datos sobre la implantación de cada Pabellón de Aulas (MAR; ALT; CONT).....	235
Tabla 17: Características constructivas del Aula A101 de cada Pabellón de Aulas (MAR; ALT; CONT).....	236
Tabla 18: Características de los sistemas de iluminación artificial y de otros aparatos existentes en las Aulas A101 de cada edificio.....	238
Tabla 19: Características de los sistemas climatización artificial existentes en las Aulas A101 de cada edificio.....	239

Tabla 20: Calibración del Aula A101 del pabellón de aulas de Cruz das Almas (MAR).....	243
Tabla 21: Calibración del Aula A101 del pabellón de aulas de Vitória da Conquista (ALT) ..	245
Tabla 22: Calibración del Aula A101 del pabellón de aulas de Barreiras (CONT).....	247
Tabla 23: Rutina de ocupación para el Aula A101 de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT).....	249
Tabla 24: Propiedades térmicas de la pared externa construida en los tres pabellones de aulas.....	250
Tabla 25: Configuración de los espesores y de las propiedades térmicas de las paredes externas utilizadas para las simulaciones de optimización.....	250
Tabla 26: Medias anuales de datos meteorológicos para Cruz das Almas (MAR).....	251
Tabla 27: Medias anuales de datos meteorológicos para Vitória da Conquista (ALT).....	255
Tabla 28: Medias anuales de datos meteorológicos para Barreiras (CONT).....	259
Tabla 29: Cálculo de ventilación natural cruzada en las Aulas A101 de Cruz das Almas (MAR), Vitória da Conquista (ALT) y Barreiras (CONT).....	266
Tabla 30: Demanda anual de refrigeración del Aula A101.....	269
Tabla 31: PMV y PPD anual para las Aulas A101 condicionadas naturalmente (10 renov/h)	273