

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES DE TERRASSA**

**ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO
RADIANTE POR CABLE ELECTRICO EN LA
CALEFACCION DE LOS EDIFICIOS
INDUSTRIALES**

Tesis Doctoral presentada por:
MONTSE SANCHEZ ROMERO
Ingeniero Industrial
por la E.T.S.I.I de Terrassa

Dirigida por:

PERE ALAVEDRA RIBOT
Dr. Ingeniero Industrial (U.P.C.)

Terrassa, Septiembre 1994

INDICE

A mis padres y
hermanos
por su paciencia,
comprensión y
continuo apoyo.

INDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

CAPITULO I

INTRODUCCION.....1

PRIMERA PARTE ESTADO DEL CONOCIMIENTO

CAPITULO II

OBJETIVOS Y CONTENIDO DE LA TESIS.....2

- 2.1.- REFERENCIA HISTORICA DE LA EVOLUCION DE LOS SISTEMAS DE CALEFACCION ELECTRICA.....2
- 2.2.- PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMATICA ACTUAL.....4
- 2.3.- OBJETIVOS Y CONTENIDO DE LA TESIS.....5

CAPITULO III

CALEFACCION ELECTRICA POR CABLE RADIANTE EN EDIFICIOS INDUSTRIALES....8

- 3.1.- CALEFACCION DE LOS EDIFICIOS INDUSTRIALES.....8
 - 3.1.1.- PARTICULARIDADES Y PROBLEMAS A RESOLVER.....8
 - 3.1.2.- DIFERENCIAS ENTRE LA PROBLEMATICA VIVIENDA E INDUSTRIA.....8
- 3.2.- EL AISLAMIENTO TERMICO.....12
 - 3.2.1.- CUBIERTAS.....14

3.2.2.-	MUROS.....	14
3.2.3.-	SUELOS.....	15
3.2.4.-	ACRISTALAMIENTOS.....	16
3.3.-	SUELOS CALEFACTORES	18
3.3.1.-	LOSA DE HORMIGON.....	18
3.3.2.-	SUELOS INDUSTRIALES.....	19
3.4.-	CABLES CALEFACTORES.....	20
3.4.1.-	DEFINICIONES.....	20
3.4.2.-	TIPOS.....	22
3.4.3.-	VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	24
3.4.4.-	DESIGNACION DE LOS CABLES CALEFACTORES..	25
3.4.5.-	LAS CONEXIONES FRIAS.....	25
3.5.-	FUNCIONAMIENTO DE LOS SUELOS CALEFACTORES.....	26
3.5.1.-	PRINCIPIO.....	26
3.5.2.-	CARACTERISTICAS DE LA EMISION.....	27
3.5.3.-	FUGAS TERMICAS.....	28
3.5.4.-	CONDICION DE CONFORT.....	29
3.6.-	REGULACION DE LOS SUELOS CALEFACTORES.....	30
3.6.1.-	OBJETIVO DE LA REGULACION.....	30
3.6.2.-	AUTORREGULACION DEL SUELO CALEFACTOR...	30
3.6.3.-	DISPOSITIVOS DE REGULACION DE LA CARGA..	31
3.6.4.-	ADVERTENCIAS.....	40
3.7.-	EL PROYECTO DEL SISTEMA DE CALEFACCION.....	40
3.7.1.-	SISTEMA DE CALEFACCION.....	42
3.7.2.-	EL CABLE.....	42
3.7.3.-	EL PAVIMENTO.....	42
3.7.4.-	EL EDIFICIO.....	43
3.7.5.-	EL CONJUNTO DE LA REGULACION.....	44
3.8.-	DIMENSIONADO DE UNA INSTALACION DE CABLE RADIANTE.....	44
3.8.1.-	CALCULO DE LA DEMANDA DE CALOR.....	44
3.8.2.-	CALCULO DE LA POTENCIA A INSTALAR.....	45
3.8.3.-	POTENCIA LIMITE DEL SUELO.....	47
3.8.4.-	ELECCION DE r_e Y POTENCIA A INSTALAR...	47
3.9.-	PUNTO DE VISTA ECONOMICO.....	48
3.9.1.-	COSTES DE INVERSION Y DE EXPLOTACION....	48
3.9.2.-	COMO EVALUAR LOS CONSUMOS Y SU COSTE....	50
3.9.2.1.-	CASO DE SOLO BASE.....	50
3.9.2.2.-	BASE Y APOYO.....	53
3.9.2.3.-	ADVERTENCIAS.....	53
3.9.2.4.-	DETERMINACION DEL COSTE DE LOS CONSUMOS PARA LA INDUSTRIA.....	54

3.10.-	FIJACION AL SUELO DE LAS MAQUINAS.....	55
3.10.1.-	MAQUINAS PEQUEÑAS Y MEDIANAS.....	55
3.10.2.-	MAQUINAS GRANDES.....	55
3.11.-	REALIZACION DE SUELOS CALEFACTORES.....	56
3.11.1.-	PRINCIPALES REGLAS A RESPETAR.....	56
3.11.2.-	VERIFICACION DEL AISLAMIENTO PERIFERICO.....	57
3.11.3.-	CONTROL DE LOS ELEMENTOS DE CALEFACCION A LA RECEPCION.....	57
3.11.3.1.-	VERIFICACION DE LA CONTINUIDAD ELECTRICA.....	57
3.11.3.2.-	MEDIDA RESISTENCIA.....	57
3.11.3.3.-	MEDIDA POTENCIA.....	58
3.11.4.-	PUESTA EN OBRA DE LOS CABLES CALEFACTORES.....	58
3.11.4.1.-	PASO DE JUNTAS.....	58
3.11.4.2.-	PLAN DE PUESTA.....	59
3.11.4.3.-	SUELOS DE HORMIGON.....	60
3.11.4.4.-	SUELO SEMIRRIGIDOS.....	61
3.11.5.-	PRECAUCIONES CONCERNIENTES A LAS CONEXIONES ELECTRICAS.....	62
3.12.-	PUESTA EN SERVICIO Y MANTENIMIENTO DE LAS INSTALACIONES.....	62
3.12.1.-	VERIFICACION DE LA REGULACION.....	62
3.12.2.-	PUESTA EN CALEFACCION.....	63
3.12.3.-	ENTREGA EN MANO. MODO DE EMPLEO.....	63
3.12.4.-	VERIFICACION REGLAJE CALEFACCION.....	63
3.12.5.-	MANTENIMIENTO. VERIFICACIONES.....	64
3.12.6.-	PATOLOGIAS.....	66
3.12.6.1.-	FISURACIONES.....	66
3.12.6.2.-	DURACION DE LOS CABLES.....	66
3.13.-	LISTA COMERCIAL.....	67
3.13.1.-	CABLES CALEFACTORES.....	67
3.13.2.-	REGULADORES.....	68
3.13.3.-	MATERIALES PARA LA VIGILANCIA DURANTE LA PUESTA EN OBRA.....	68
3.13.4.-	REPARACIONES.....	69
3.14.-	TARIFAS ELECTRICAS.....	69
3.14.1.-	COMPOSICION GENERAL DE LAS TARIFAS.....	69
3.14.2.-	COMPLEMENTOS DE TARIFA Y DISCRIMINACION HORARIA.....	69
3.14.3.-	APROVECHAMIENTO DE LA TARIFA ELECTRICA..	70
3.14.4.-	EVOLUCION DE LAS TARIFAS ELECTRICAS PRECIO DE LA ELECTRICIDAD.....	71
3.14.5.-	ANALISIS DEL CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA.....	73
3.14.6.-	ANALISIS DEL COSTE DE LA ENERGIA ELECTRICA.....	74

3.15.-	NORMATIVA.....	75
3.15.1.-	NORMAS.....	76
3.15.2.-	DOCUMENTOS TECNICOS UNIFICADOS.....	77
3.15.3.-	AVISOS TECNICOS, HOMOLOGACIONES Y APROVACIONES.....	78

CAPITULO IV

FUNDAMENTOS TEORICOS DEL MODELO.....79

4.1.-	INTRODUCCION.....	79
4.2.-	ECUACIONES BASICAS.....	79
4.3.-	SOLUCION POR EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS...82	
4.3.1.-	FORMULACION BASICA.....	82
4.3.2.-	DISCRETIZACION POR ELEMENTOS FINITOS...83	
4.3.3.-	ECUACIONES DE LA DISCRETIZACION.....83	
4.3.3.1.-	CASO ESTACIONARIO.....	84
4.3.3.2.-	CASO TRANSITORIO.....	84
4.4.-	CARACTERISTICAS DEL PROGRAMA.....86	
4.4.1.-	CARACTERISTICAS DEL MATERIAL.....86	
4.4.2.-	ELEMENTOS UTILIZABLES.....86	
4.4.3.-	CONDICIONES DE CONTORNO.....86	
4.5.-	ORGANIZACION GENERAL DEL PROGRAMA.....87	
4.5.1.-	ETAPAS BASICAS. DIAGRAMA DE FLUJO PRINCIPAL.....	87
4.5.2.-	SELECCION DE LOS NOMBRES DE LAS VARIABLES.....	89
4.5.3.-	TRANSMISION DE INFORMACION ENTRE SUBROUTINAS.....	90
4.5.4.-	LISTADO DE LA SUBROUTINA PRINCIPAL.....	91
4.6.-	DESCRIPCION DE LA SUBROUTINA DATOS.....93	
4.6.1.-	PARAMETROS DE CONTROL.....	93
4.6.2.-	DATOS GEOMETRICOS.....	94
4.6.3.-	CONDICIONES DE NODOS PRESCRITOS.....	94
4.6.4.-	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	95
4.6.5.-	CONDICIONES INICIALES DE TEMPERATURA...95	
4.6.6.-	CONDICIONES DE FLUJO CONVECCION-RADIACION.....	96
4.6.7.-	SUBROUTINA GAUSS.....	96
4.6.8.-	PREPARACION AUTOMATICA DE DATOS.....	96
4.6.9.-	SUBROUTINA DE CONTROL DE DATOS.....	97
4.7.-	DESCRIPCION DE LAS SUBROUTINAS DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ.....	97
4.7.1.-	MATRIZ DE RIGIDEZ SUBROUTINA RIGIMAT....97	
4.7.1.1.-	ESTACIONARIO.....	97

	4.7.1.2.-TRANSITORIO.....	98
4.7.2.-	MATRIZ DE RIGIDEZ SUBROUTINA CONVECC.....	99
4.8.-	SUBROUTINA FUERZAS.....	102
	4.8.1.- CONSIDERACIONES GENERALES.....	102
	4.8.2.- FLUJOS PUNTUALES NODALES.....	102
	4.8.3.- GENERACION INTERNA.....	103
	4.8.4.- TEMPERTAURA AMBIENTAL Y FLUJO EXTERIOR.....	104
4.9.-	SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES.....	104
4.10.-	CALCULO DE LOS FLUJOS ELEMENTALES. SUBRRUTINA TENSION.....	107

SEGUNDA PARTE MODELIZACION TEORICA

CAPITULO V

	FORMULACION DE LAS ECUACIONES.....	108
5.1.-	DEFINICION DE LA TIPOLOGIA DEL PROBLEMA.....	108
5.2.-	ESTUDIO TERMICO DE LA LOSA.....	109
	5.2.1.- INTRODUCCION.....	109
	5.2.2.- TRANSMISION DE CALOR POR CONVECCION Y RADIACION.....	110
5.3.-	CONDICION DE CONFORT.....	111
5.4.-	TEMPERATURA AMBIENTAL DEL RECINTO.....	113
5.5.-	TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO.....	113
5.6.-	TEMPERATURA MAXIMA DEL CABLE.....	114
5.7.-	TEMPERATURA EXTERIOR Y RADIACION SOLAR.....	114
5.8.-	DOMINIO A ANALIZAR.....	115
	5.8.1.- SUELOS INDUSTRIALES.....	115
	5.8.2.- RESISTENCIAS.....	115
	5.8.3.- CELDA TIPO.....	117
5.9.-	SELECCION DEL ELEMENTO.....	118
5.10.-	DISCRETIZACION DE LA GEOMETRIA.....	119
5.11.-	CONDICIONES DE CONTORNO.....	120

5.11.1.-	CONTORNOS AISLADOS TERMICAMENTE.....	120
5.11.2.-	CONTORNOS CONVECCION - RADIACION.....	121
5.11.3.-	CONTORNOS CON TEMPERATURA PRESCRITA....	121
5.11.4.-	TEMPERATURAS PUNTUALES NODALES.....	121
5.12.-	CONDICIONES INICIALES DE TEMPERATURA.....	121
5.13.-	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	122
5.14.-	EVOLUCION HORARIA DE LA TEMPERATURA EXTERIOR.....	122
5.15.-	CURVAS DE FRECUENCIA ACUMULADA.....	124
5.16.-	CALCULO DE LA DEMANDA DE CALOR EN REGIMEN PERMANTE.....	125
5.16.1.-	PERDIDAS POR LOS CERRAMIENTOS.....	125
5.16.2.-	PERDIDAS POR INFILTRACION.....	128
5.16.3.-	MARGENES DE SEGURIDAD.....	130
5.16.4.-	DEMANDA TOTAL DE CALOR.....	130
5.17.-	CALCULO DE LA POTENCIA INSTALADA.....	131
5.18.-	DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCION.....	135
5.18.1.-	ELECCION DEL CABLE CALEFACTOR.....	137
5.18.2.-	DISEÑO DE LA TRAMA CALEFACTORA.....	138
5.19.-	GENERACION DE CALOR.....	151
5.20.-	REGULACION DEL SISTEMA DE CALEFACCION.....	152
5.21.-	REGIMEN TRANSITORIO.....	152
5.21.1.-	PERIODO DE CARGA.....	153
5.21.2.-	PERIODO DE DESCARGA.....	153

CAPITULO VI

MODELIZACION TEORICA RESOLUCION DE LAS ECUACIONES Y OBTENCION DE RESULTADOS.....154

6.1.-	ELECCION DEL DOMINIO A ANALIZAR Y FORMA DE MODELIZACION.....	154
6.1.1.-	1ª PROPUESTA.AIRE NO DISCRETIZADO.....	155
6.1.2.-	2ª PROPUESTA.AIRE DISCRETIZADO.....	157
6.2.-	COMPARACION DE MODELIZACIONES.....	160
6.3.-	ELECCION DE LAS DIMENSIONES DE LA CELDA GENERADOR DE CALOR.....	161

6.4.-	ANALISIS DE LA INFLUENCIA EN LA DISTRIBUCION DE LA TEMPERATURA DE LA POTENCIA LINEAL Y DEL PASO DEL CABLE.....	163
6.4.1.-	CABLES CON LA MISMA POTENCIA LINEAL PERO DIFERENTES PASOS.....	163
6.4.2.-	CABLES CON DIFERENTE POTENCIA LINEAL...	164
6.5.-	INFLUENCIA DE LAS VARIABLES; DOSIFICACION DE LA LOSA Y PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO DEL CABLE.....	165
6.5.1.-	MODELIZACION 1ª VARIABLE DOSIFICACION HORMIGON.....	165
6.5.2.-	MODELIZACION 2ª VARIABLE EMBEBIDO CABLE CALEFACTOR.....	169
6.5.3.-	OBTENCION DE LA DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS UNA VEZ ESTABILIZADO EL SISTEMA.....	170

CAPITULO VII

CLASIFICACION RESULTADOS

MODELIZACION.....171

7.1.-	CLASIFICACION RESULTADOS EVOLUCION TEMPERATURA EN LOSAS MODELIZACION.....	171
7.1.1.-	CARACTERISTICAS DE LA MODELIZACION.....	171
7.1.2.-	TABLAS DE EVOLUCION DE TEMPERATURA.....	173
7.1.3.-	GRAFICOS DE EVOLUCION DE TEMPERATURA...	174
7.2.-	CLASIFICACION RESULTADOS ANALISIS 1ª VARIABLE:DOSIFICACION HORMIGON.....	175
7.2.1.-	TABLAS EVOLUCION TEMPERATURA SEGUN DOSIFICACION.....	176
7.2.1.-	GRAFICOS EVOLUCION TEMPERATURA SEGUN DOSIFICACION.....	176
7.3.-	CLASIFICACION RESULTADOS ANALISIS 2ª VARIABLE:PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO.....	177
7.3.1.-	TABLAS EVOLUCION TEMPERATURA SEGUN PROFUNDIDAD.....	177
7.3.2.-	GRAFICOS EVOLUCION TEMPERATURA SEGUN PROFUNDIDAD.....	178

TERCERA PARTE

PARTE EXPERIMENTAL

CAPITULO VIII

METODOLOGIA DE LA PARTE EXPERIMENTAL.....179

8.1.-	INTRODUCCION.....	179
8.2.-	VARIABLES A CONSIDERAR.....	179
8.2.1.-	DOSIFICACION Y PROPIEDADES TERMICAS DE LA LOSA.....	179
8.2.2.-	PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO DEL CABLE CALEFACTOR.....	187
8.3.-	PARAMETROS SIGNIFICATIVAS EN EL ESTUDIO COMPARATIVO.....	187
8.3.1.-	TIEMPO DE CARGA DEL SISTEMA DE CALEFACCION.....	187
8.3.2.-	TIEMPO DE DESCARGA DEL SISTEMA DE CALEFACCION.....	188
8.3.3.-	TEMPERATURA MAXIMA EN LA SUPERFICIE DEL SUELO.....	188
8.3.4.-	TEMPERATURA MAXIMA EN EL PLANO DE LAS RESISTENCIAS.....	188
8.3.5.-	OSCILACION TEMPERATURA AMBIENTE.....	188
8.3.6.-	EVOLUCION TEMPERATURA LOSA.....	188
8.4.-	DISEÑO DE LA LOSA DE HORMIGON.....	189
8.4.1.-	TAMAÑO DE LA LOSA.....	189
8.4.2.-	AISLAMIENTO DE LA LOSA.....	190
8.4.3.-	ELECCION DEL CABLE CALEFACTOR.....	190
8.4.4.-	DETERMINACION DEL NUMERO DE ENSAYOS....	194
8.4.5.-	APARATOS E INSTRUMENTAL NECESARIO.....	194
8.5.-	PROCESO DE EJECUCION.....	200
8.5.1.-	PROCESO.....	202
8.5.2.-	CABLE CALEFACTOR.....	202
8.5.3.-	MALLA ELECTROSOLDADA.....	202
8.5.4.-	SONDAS.....	203
8.5.5.-	HORMIGONADO.....	204
8.5.6.-	AISLAMIENTO PERIFERICO.....	205
8.5.7.-	REGISTRO DE DATOS.....	205
8.6.-	PROCESO DE ANALISIS.....	205
8.6.1.-	CONDICIONES DE TRABAJO.....	205
8.6.2.-	ANALISIS DE RESULTADOS.....	206

CAPITULO IX

**CLASIFICACION RESULTADOS
EXPERIMENTALES242**

9.1.- CLASIFICACION RESULTADOS EVOLUCION TEMPERATURA
EN LOSAS TIPO (INTERVALO 1HORA).....242

9.1.1.- TABLAS DE EVOLUCION DE TEMPERATURA.....243

9.1.2.- GRAFICOS DE EVOLUCION DE TEMPERATURA...243

9.2.- CLASIFICACION RESULTADOS EVOLUCION TEMPERATURA
EN LOSAS TIPO (INTERVALO 10 MINUTOS).....244

**CUARTA PARTE
CONCLUSIONES**

CAPITULO X

VALIDACION EXPERIMENTAL.....246

10.1.- VALIDACION EXPERIMENTAL DEL MODELO.....246

10.2.- INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DEL ENSAYO.....246

10.2.1.- CONDICIONES DEL ENSAYO.....246

10.2.2.- INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES
DEL ENSAYO EN EL ANALISIS DE LA 1ª
VARIABLE:DOSIFICACION.....249

10.2.3.- INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES
DEL ENSAYO EN EL ANALISIS DE LA 2ª
VARIABLE:PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO.....252

10.3.- DETERMINACION DE LA DOSIFICACION OPTIMA
DE LA LOSA RADIANTE.....255

10.4.- DETERMINACION DE LA POSICION OPTIMA
DEL CABLE CALEFACTOR.....257

CAPITULO XI

**CLASIFICACION DE RESULTADOS VALIDACION
EXPERIMENTAL.....259**

11.1.- COMPARACION EVOLUCION TEMPERATURA
EXPERIMENTAL-TEORICA.....259

11.2.- CLASIFICACION RESULTADOS INFLUENCIA DE
LAS CONDICIONES DEL ENSAYO.....262

11.2.1.- ANALISIS PRIMERA VARIABLE:
DOSIFICACION DE HORMIGON.....263

11.2.2.- ANALISIS SEGUNDA VARIABLE:
PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO.....264

CAPITULO XII

CONCLUSIONES. DESARROLLO FUTURO.....267

12.1.- CONCLUSIONES.....267

12.1.1.- CONCLUSIONES REFERENTES AL
MODELO TEORICO DE ANALISIS.....267

12.1.2.- CONCLUSIONES REFERENTES AL
MODELO EXPERIMENTAL.....270

12.1.3.- CONCLUSIONES REFERENTES A LA
INFLUENCIA DE LA DOSIFICACION
DE HORMIGON.....273

12.1.4.- CONCLUSIONES REFERENTES A LA
INFLUENCIA DE LA PROFUNDIDAD
DE EMBEBIDO.....275

12.1.5.- CONCLUSIONES REFERENTES A LA
INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES
DEL ENSAYO.....277

12.1.6.- CONCLUSIONES REFERENTES
A LA DOSIFICACION Y PROFUNDIDAD
DE EMBEBIDO OPTIMAS.....279

12.2.- DESARROLLO FUTURO.....280

SIMBOLOGIA.....282

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....288

ANEJO I

RESULTADOS MODELIZACION.

ANEJO II

RESULTADOS EXPERIMENTALES

ANEJO III

RESULTADOS VALIDACION EXPERIMENTAL

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

La realización de una Tesis Doctoral no sólo requiere un importante trabajo personal de formación e investigación, sino que también necesita un ambiente propicio y un Director que guíe, ayude y motive al doctorando. Ambas condiciones, en su máxima expresión se han dado en mi caso.

Por un lado, el ambiente, tanto profesional como humano que se vive en el Departamento de Ingeniería de la Construcción es inmejorable.

En cuanto al Director de la Tesis, Pere Alavedra Ribot, debo agradecerle su interés, su preocupación y, lo que es más importante, la confianza depositada en ésta doctorando.

A mis compañeros de departamento, Cecilia Gaete, Maida Alavedra y Miquel Casals por su dedicación y amistad.

A los profesores Angel C. Aparicio y Antonio Aguado de la Sección de Tecnología de Estructuras por el tiempo, interés y apoyo que me han dedicado.

Debo también agradecer al Centro Internacional de Métodos numéricos, al departamento de Resistencias de Materiales y Estructuras y a su director Eugenio Oñate, por haberme proporcionado las herramientas básicas para el desarrollo del trabajo. Igualmente, a Francisco Zarate por el tiempo e interés que me ha dedicado para ayudarme a resolver cuantos problemas le he consultado.

Mi agradecimiento a las empresas CEILHIT S.A y PREFABRICADOS DEL SOLSONES S.A. por proporcionarme el material y el lugar para realizar los ensayos experimentales. Así como al laboratorio de Tecnología de Estructuras, a su director Ravindra Gettu y al personal técnico por poner a mi disposición la instrumentación necesaria que me ha permitido llevar a buen término esta Tesis Doctoral.

Asimismo a los que han sido compañeros y amigos durante estos años, por su infinita paciencia y comprensión.

Por último, destacar que este trabajo ha sido posible merced a la beca de formación de investigadores que me fue concedida por parte de la Dirección General d'Universitats de la Generalitat de Catalunya. Así como a las ayudas económicas concedidas por el Colegio de Ingenieros Industriales de Catalunya y la Universidad Politécnica de Catalunya.

Muchas gracias a todos.

RESUMEN

RESUMEN

En este trabajo se ha desarrollado un ESTUDIO del COMPORTAMIENTO TERMICO del SUELO RADIANTE por CABLE ELECTRICO en su aplicación a los EDIFICIOS INDUSTRIALES.

Se ha analizado la influencia en la evolución de la temperatura en el interior de la Losa Radiante de las variables:

- DOSIFICACION DE HORMIGON utilizada en la construcción de la LOSA, considerando como variables las proporciones de cemento, agua, arena y tamaño de arido.
- PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO del ELEMENTO CALEFACTOR (CABLE RADIANTE) dentro de la Losa.

Se ha MODELIZADO el Suelo radiante mediante una formulación basada en el método de los ELEMENTOS FINITOS que resuelve la ecuación de Poisson en regimen transitorio.

Se han realizado ENSAYOS EXPERIMENTALES para la VALIDACION EXPERIMENTAL del MODELO. Para ello se han diseñado y construido losas prototipo en las que se ha variado la dosificación de hormigón y la profundidad de embebido del elemento calefactor. Se ha medido la evolución de la temperatura en su interior durante periodos de carga (cable calefactor en funcionamiento) y periodos de descarga (cable desconectado).

De todo lo anterior, se han extraido CONCLUSIONES referentes al COMPORTAMIENTO TERMICO del SUELO RADIANTE, así como consideraciones respecto a las DOSIFICACIONES y PROFUNDIDADES DE EMBEBIDO OPTIMAS para un correcto funcionamiento de este tipo de sistemas de calefacción.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Capítulo 1

INTRODUCCION

Los edificios industriales por sus especiales características de amplitud, altura de techo, entradas de aire, etc. y por su función, requieren de unas técnicas de calefacción determinadas apropiadas a estas condiciones, las cuales son muy distintas de las que actualmente se utilizan en vivienda o en locales con otras funciones.

Cada vez son más amplios los sectores de la industria española que necesitan sistemas de calefacción en los que se exige la máxima calidad en el ambiente con la finalidad de evitar la contaminación de los productos, la reducir la contaminación acústica de la zona de trabajo ó el simple análisis económico del sistema.

La falta de análisis e investigación y la creencia de que la tecnología usada en la calefacción de viviendas puede ser fácilmente extrapolable a los edificios industriales, ponen de manifiesto la falta de una tecnología fiable que puede producir el fracaso en dichas instalaciones (1).

Ante la falta de estudios del comportamiento de los sistemas de calefacción eléctrica por Suelo Radiante en base exclusivamente a la acumulación, se debe ser extremadamente escrupuloso en el diseño y cálculo de las mismas.

Las actuaciones que parecen más urgentes y aconsejables:

- **NECESIDAD DE AJUSTAR LOS COEFICIENTES DE SEGURIDAD.**
En los edificios industriales debido a las potencias en juego no pueden utilizarse coeficientes de seguridad muy elevados.
- **ESTUDIO DE LAS RESPUESTAS DEL ENTORNO.**
El desconocimiento de la reacción del entorno puede provocar el no funcionamiento de la calefacción eléctrica por cable radiante en edificios industriales.
- **ESTUDIO E INVESTIGACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA CALEFACCION ELECTRICA POR CABLE RADIANTE EN EDIFICIOS INDUSTRIALES.**
La falta de estudio e investigación hace que no haya modelos aplicables al diseño de este tipo de instalaciones.
- **MEJORA DE LA POLITICA TARIFARIA EN ESPAÑA.**
Los aspectos derivados de la política tarifaria inciden de forma sustancial en el diseño de la instalación.

PRIMERA PARTE

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

OBJETIVOS Y CONTENIDO DE LA TESIS

Capítulo 2

OBJETIVOS Y CONTENIDO DE LA TESIS

2.1 REFERENCIA HISTORICA DE LA EVOLUCION DE LOS SISTEMAS DE CALEFACCION ELECTRICA

Al igual que en muchos otros sistemas la producción de Energía Eléctrica, por medio de combustibles sólidos en base a la tecnología nuclear ha tenido que pasar su marcha por el desierto.

Esta singladura ha estado alentada desde posiciones de simple estrategia económica o ideológica que convergían o divergían según la evolución de la Política Mundial.

Fruto de este doble frente ha sido el parón en España del Plan Energético Nacional que ha supuesto la inmovilización de un volumen importante de recursos en aras a lograr un tiempo necesario para definir el futuro de la producción de energía eléctrica por medio de centrales nucleares.

Ha sido en la celebración de la Conferencia Internacional del Medio Ambiente cuando se ha indicado que el primer y más grave problema que tiene la Humanidad en la última década del siglo XX y principios del siglo XXI es el aumento del efecto invernadero de la atmosfera, derivado de la presencia de productos de combustión de los combustibles fósiles, en concreto el carbón, petróleo y gas natural.

Por todo ello resulta evidente que a finales de esta década recibirá un nuevo impulso la producción de energía eléctrica, y que se llegará a un equilibrio entre los distintos sistemas suministradores de energía existentes en el país.

La necesidad de plantear el balance energético con una componente adicional que es la protección del medio ambiente y de manera clara y específica la desaparición de vertidos a la atmosfera, implicará el reestudio de los sistemas de balance energético actualmente en vigor.

Por lo que hace referencia a los sistemas eléctricos, las empresas productoras y suministradoras de energía deberán potenciar la utilización de la energía fuera de las horas punta, por varias razones:

- a) aprovechamiento integral de la red de distribución
- b) mejora de la gestión en los medios de producción de energía

c) Imposibilidad de almacenar energía eléctrica

Si a todo ello añadimos otros factores como calidad de vida, seguridad en el diseño y funcionamiento de las instalaciones además de la existencia de una cultura amplia y difundida de la utilización de la energía eléctrica, se llega a la conclusión de la necesidad de ampliar las áreas de estudio de Climatización por Energía Eléctrica y de forma específica en los Sistemas de Acumulación.

En origen, los sistemas de calefacción mediante la radiación por suelo (2) ya lo practicaban los pueblos primitivos de Corea y luego los Romanos e incluso en épocas recientes tenemos un claro ejemplo de las Glorietas Castellanas, siempre en base a hacer circular por conductos o por falso suelos, aire caliente procedente de la combustión de distintos materiales. Otro sistema es el de circulación de agua caliente por tubería empotrada en el suelo.

La alta electrificación alcanzada por los países desarrollados, ha ofrecido la solución más práctica, limpia y sencilla de las adoptadas hasta el momento. Efectivamente a las ventajas del sistema de radiación, se unen las propias de una calefacción eléctrica (3).

Las argumentaciones a favor de la calefacción eléctrica (4) han sido siempre válidas, si bien los defectos constructivos de determinados aparatos y sobre todo, el bajo nivel de aislamiento en la edificación durante unos cuantos años, fueron causa de una injusta "leyenda negra" que ha remitido gracias fundamentalmente a las nuevas Normativas que desde el año 1975 vienen controlando el aislamiento térmico de las viviendas de nueva construcción, y gracias también a la nueva Política de las Empresas Eléctricas con su apoyo comercial y sobre todo con las tarifas discriminatorias.

Dentro del campo de los estudios ambientales referentes a la habitabilidad, se ha desarrollado entre otras actividades la Higrotérmia, referente tanto al aislamiento térmico y a las variaciones de humedad a través de los cerramientos, como a las condiciones ideales de temperatura y humedad relativa para la obtención del debido confort ambiental (5).

Por otra parte, la crisis energética, derivada principalmente de la subida de los crudos del petróleo a partir de 1973, ha incidido poderosamente en la aplicación de los citados conocimientos de higrotérmia, con objeto de ahorrar energía en usos de calefacción y climatización, ya que hasta entonces los aislamientos se descuidaban, al disponer de unas técnicas muy sofisticadas de acondicionamiento artificial y de una energía barata.

Desde el punto de vista Normativo, el Decreto sobre Ahorro de Energía de 1975, primero, y la Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas de 1975, después, han obligado a los facultativos y directores de obra, en España, a tomar en consideración una serie de estudios higrotérmicos para su aplicación directa en los proyectos de edificación, en los campos de aislamiento térmico y de la regulación higrotérmica de los elementos que configuran la piel o cerramiento del edificio.

Las bases teóricas de los sistemas de calefacción por elementos radiantes a baja temperatura (6) se desarrollan durante la tercera y cuarta década de este siglo, después su resultado ha sido diverso en función de las necesidades y políticas energéticas de cada país.

De los diferentes tipos de tarificación existentes en la C.E.E., cabe destacar las diferencias existentes entre España y otros países mediterráneos como Francia e Italia, siendo Francia el país donde el coste de la energía eléctrica es menor y pionero en la aplicación de sistemas de calefacción eléctrica por acumulación nocturna.

En España las Jornadas Nacionales de Estudio sobre Calefacción y Climatización, celebradas en el marco de ELECTROTERMIA 84, marcan la consolidación de la voluntad de las compañías eléctricas para diversificar y potenciar el consumo de la energía eléctrica.

El sistema de calefacción por acumulación aprovechando la tarifa nocturna, mejorará su posición en el futuro con los aumentos generales de las tarifas eléctricas, ya que previsiblemente aunque la relación precios día/noche se mantenga constante, su diferencia en valor absoluto, que es lo que incide en el ahorro energético adicional, aumentará.

2.2 PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA ACTUAL

En múltiples industrias, en las que el polvo es un elemento nocivo, no pueden emplearse para calefaccionar los edificios destinados a la fabricación elementos que generen corrientes de aire (7) (como son los clásicos aerotermos), en otras, el uso de fuel-oil o gas-oil para la calefacción en instalaciones no muy fiables por su poca conservación, hacen que aumente la contaminación atmosférica del entorno.

La calefacción eléctrica por cable radiante es conocida en su aplicación para edificios tipo vivienda y administrativos, pero no se han desarrollado en España muchas instalaciones de tipo industrial (8).

Una de las primeras impresiones, es que la tecnología de la utilización de la calefacción por Suelo Radiante está actualmente al alcance de cualquier instalador cualificado, cuando la realidad diaria nos demuestra que esto no es así por las siguientes razones (9):

EN LA VIVIENDA

- La persona que contrata la instalación es el promotor y por ello obtiene múltiples ventajas por la instalación de todo el edificio.
- El usuario no lleva en general control exacto del coste de la calefacción.
- Habitualmente se trabaja con coeficientes de utilización que se exceden del lado de la seguridad.

EN LA INDUSTRIA

- El contratante es el propio industrial con una instalación perfectamente definida.
- El usuario ha ponderado de forma exhaustiva el coste de la calefacción.
- Por las potencias necesarias no puede excederse con coeficientes de seguridad excesivos.

La necesidad de ajustar los coeficientes de seguridad y el desconocimiento de la reacción del entorno frente a una calefacción con alta inercia térmica, puede y de hecho ha provocado el funcionamiento no adecuado de la calefacción por Suelo Radiante en edificios industriales (10).

De un primer análisis se derivan las siguientes proposiciones:

- a) El pavimento industrial típico es un suelo de hormigón monolítico de 20 cm de espesor, que se halla cortado por ; juntas de dilatación, juntas de trabajo y juntas de retracción.
- b) El pavimento industrial, de manera habitual, realiza las funciones de cimentación, por tanto, la maquinaria se halla anclada en el mismo
- c) Debe estudiarse la capacidad de acumulación de calor del pavimento y su velocidad de enfriamiento.

2.3 OBJETIVOS Y CONTENIDO DE LA TESIS

El OBJETIVO global del presente trabajo es la utilización de un modelo numérico capaz de representar, con la máxima precisión posible, el comportamiento del Suelo Radiante por cable eléctrico en la calefacción de los edificios industriales, para su posterior validación experimental.

Conocer el comportamiento térmico de los sistemas de calefacción eléctrica por Suelo Radiante en base exclusivamente a la acumulación permitirá realizar proyectos más fiables, lo cual repercutirá en el coste y duración de los mismos.

Por ello se plantean los siguientes OBJETIVOS:

- Realizar una exhaustiva RECOPIACION BIBLIOGRAFICA, a fin de obtener una visión de conjunto del tema, estableciendo el punto de partida y las lagunas a cubrir.

En el CAPITULO III se analizan con detalle las características, funcionamiento, dimensionado y regulación de los suelos calefactores, así como los aspectos a considerar para la realización del proyecto del sistema de calefacción. Finalmente se realiza un repaso de la Normativa existente para este tipo de instalaciones.

- Disponer de un MODELO TEORICO capaz de representar el comportamiento del Suelo Radiante por cable eléctrico.

En el CAPITULO IV se establecen las bases matemáticas para la resolución de la ecuación de Poisson transitoria mediante Métodos Numéricos por Elementos Finitos, haciendo mención de las hipótesis matemáticas, irrenunciables, en este tipo de métodos.

- Definición de la TIPOLOGIA DEL PROBLEMA.

El CAPITULO V se dedica a la definición del problema a modelizar, obtención de las ecuaciones diferenciales de los puntos interiores del

dominio de trabajo e implementación de las condiciones de contorno.

- Definición y rango de las **VARIABLES** a analizar;

DOSIFICACION DE HORMIGON en la losa radiante

PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO del elemento calefactor

- Elección del **DOMINIO** a analizar y de la **MODELIZACION** de las variables de estudio.

- **RESOLUCION** de las **ECUACIONES** y obtención de **RESULTADOS**

El **CAPITULO VI** se dedica a definir la modelización y al análisis de la influencia sobre la distribución de temperatura de las variables; dosificación de hormigón y profundidad de embebido.

- **OBTENCION Y CLASIFICACION** de **RESULTADOS MODELIZACION**

En el **CAPITULO VII** se refleja la forma en que se han clasificado los resultados obtenidos con la modelización definida en el capítulo VI.

El **ANEXO I** se dedica a la representación gráfica de estos resultados.

- Definición de la **METODOLOGIA** de la parte **EXPERIMENTAL**

En el **CAPITULO VIII** se define la metodología utilizada en la parte experimental; variables a utilizar, determinación de número de ensayos, aparatos e instrumental necesario, etc.

- **OBTENCION y CLASIFICACION** de los **RESULTADOS EXPERIMENTALES**

En el **CAPITULO IX** se refleja la forma en que se han clasificado los resultados experimentales.

El **ANEXO II** se dedica a la representación gráfica de los resultados experimentales.

- **COMPARACION** de **RESULTADOS TEORICOS y EXPERIMENTALES** y **VALIDACION EXPERIMENTAL** del **MODELO**

En el **CAPITULO X** se indica la forma y los criterios de clasificación de los resultados teóricos y experimentales para la validación experimental del modelo propuesto.

El **ANEXO III** se dedica a la representación gráfica de estos resultados.

- Extraer **CONCLUSIONES** respecto al comportamiento térmico del Suelo Radiante según las variables; dosificación y profundidad de embebido del cable calefactor.

- Consideraciones respecto a los **VALORES OPTIMOS** de **CONDUCTIVIDAD** y **PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO**

- Realizar **RECOMENDACIONES** sobre **FUTURAS LINEAS** de **INVESTIGACION** que puedan completar este trabajo y que ayuden al mejor conocimiento del comportamiento de los sistemas de calefacción eléctricos por acumulación en su aplicación en edificios industriales.

En el **CAPITULO XI** se extraen las **CONCLUSIONES** y aportaciones mas relevantes de esta Tesis.

CAPITULO 3

**CALEFACCION ELECTRICA POR CABLE
RADIANTE EN EDIFICIOS INDUSTRIALES**

Capítulo 3

CALEFACCION ELECTRICA POR CABLE RADIANTE EN EDIFICIOS INDUSTRIALES

3.1 CALEFACCION EN LOS EDIFICIOS INDUSTRIALES

3.1.1 PARTICULARIDADES Y PROBLEMAS A RESOLVER

La elección de un sistema de calefacción depende de un gran número de factores:

- Tamaño y forma de los edificios
- Naturaleza de la construcción y de los materiales empleados
- Importancia de las aportaciones internas de calor
- Temperatura deseada
- Reglamentación, etc.

Estos factores dependen así mismo de la actividad de producción prevista y de su posible evolución (11).

TAMAÑO Y FORMA DE LOS EDIFICIOS

La forma básica es generalmente un rectángulo, lo cual facilita a la vez las modificaciones de implantación interior y exterior del edificio por simple prolongación de una de sus dimensiones.

Las superficies del suelo varían entre algunos cientos hasta algunos miles de metros cuadrados, con dos alturas bajo techo generalmente de 6 a 8 m, a veces incluso de 10 a 12 m ó más. En consecuencia, el coeficiente de pérdidas volumétricas (G_1) de estos edificios se beneficia de un factor de forma tanto más favorable cuanto más grandes son.

Los coeficientes G_1 (TABLA 3.1) a los que se ha hecho referencia son por tanto pequeños, pero el punto fundamental es que la influencia de la cubierta es preponderante. De la elección de la cubierta (forma, nivel de insolación etc.) dependerá una gran parte de los consumos anuales de calefacción de un edificio. No hay que olvidar por ejemplo el hecho de que una cubierta inclinada presenta una superficie de pérdida de 1,5 a 2,5 veces más importante que una cubierta plana.

G1: coeficiente representativo	
hipótesis de cálculo: - KG de todas las paredes opacas = 1 W/m ² °C - 10 % de superficie acristalada simple en cubierta y muros. - cubierta plana	
EDIFICIO A :	S= 1500 m ² (30x50) (h=6m) V= 9000 m ³
EDIFICIO B :	S= 10000 m ² (80x125) (h=8m) V= 80000 m ³

	CUBIERTA			MUROS			SUELO	G1
	OPACA	ACRIS	TOTAL	OPACA	ACRIS	TOTAL		
A	0,15	0,11	0,26	0,10	0,06	0,16	0,03	0,45
	32%	26%	58%	22%	14%	36%	6%	100%
B	0,11	0,08	0,19	0,04	0,02	0,06	0,01	0,26
	42%	31%	73%	15,4%	7,6%	23%	4%	100%

Influencia de los diferentes cerramientos en el coeficiente G1 para los edificios tipo.

TABLA 3.1

NATURALEZA DE LA CONSTRUCCION Y MATERIALES EMPLEADOS

En la mayoría de los casos, se utilizan las estructuras modulares metálicas, en hormigón ó mixtas, con las fachadas aligeradas para ser rápidamente montadas y desmontadas.

La elección de estas técnicas (12) en función de los imperativos funcionales del edificio; luces entre apoyos, cargas soportadas por la estructura, etc. , deberá igualmente tener en cuenta las cualidades térmicas de los materiales.

LAS RENOVACIONES DE AIRE

Las renovaciones de aire en el interior de los locales industriales son a menudo responsables de la mayoría de pérdidas térmicas (13). Estas pérdidas son a su vez función de la actividad y de la concepción de los edificios.

Distinguimos entre las renovaciones de aire específicas y las no específicas, debido las más frecuentes a la ventilación mecánica y necesaria para la evacuación de humos, vapores, polvo, e incluso a veces calor (operaciones necesarias para asegurar la salubridad del aire).

Para limitar las renovaciones de aire no específicas (Infiltraciones), hay que velar por la estanqueidad del aire dentro del edificio, ya que, el tiraje térmico (efecto de chimenea) será muy importante. Será necesario pues :

- Elegir un tipo de cubierta bien estanca al aire
- Tener mucho cuidado con las juntas de estanqueidad para evitar las fugas de calor en la parte alta y baja.
- Evitar las puertas dispuestas sobre dos fachadas enfrentadas y expuestas a viento dominante.
La mejor solución consiste en disponer las puertas grandes sobre una sola fachada opuesta al viento dominante o sobre dos fachadas adyacentes
- Evitar que las puertas permanezcan abiertas, etc.

Cuando estas disposiciones son puestas en práctica, la tasa de renovación de aire no específica es aceptable. Sin embargo su evolución presenta algunas dificultades.

De todas formas, la experiencia ha demostrado (14) que la utilización del ratio:

Tasa de renovación de aire no específica media

$$\left(\frac{vo}{h}\right) = \frac{80}{\sqrt{V}}$$

siendo V el volumen del local en m³

será en este caso siempre suficiente.

La limitación de las renovaciones de aire específicas debe igualmente ser seriamente examinada.

La mayoría de las veces, las fuentes de polución están localizadas. La extracción en cubierta de una gran cantidad de aire en el cual se ha dejado diluir los productos polucionantes, es una solución irracional; ello conlleva grandes pérdidas de calefacción y de ventilación sin impedir que todos los puestos de trabajo soporten las emanaciones mas o menos inconfortables o nocivas.

Las extracciones localizadas evitarán la dispersión de la polución en el ambiente asegurando una evacuación y dilución al exterior de las mismas.

Habrà por tanto que evitar las corrientes de aire y las ventanas en las fachadas con viento dominante (figura 3.1)

APORTACIONES INTERNAS

Este tipo de aportaciones pueden ser continuas ó discontinuas, pero deben tenerse en cuenta tanto al dimensionar la instalación de calefacción como para evaluar las condiciones de confort del local calefactado.

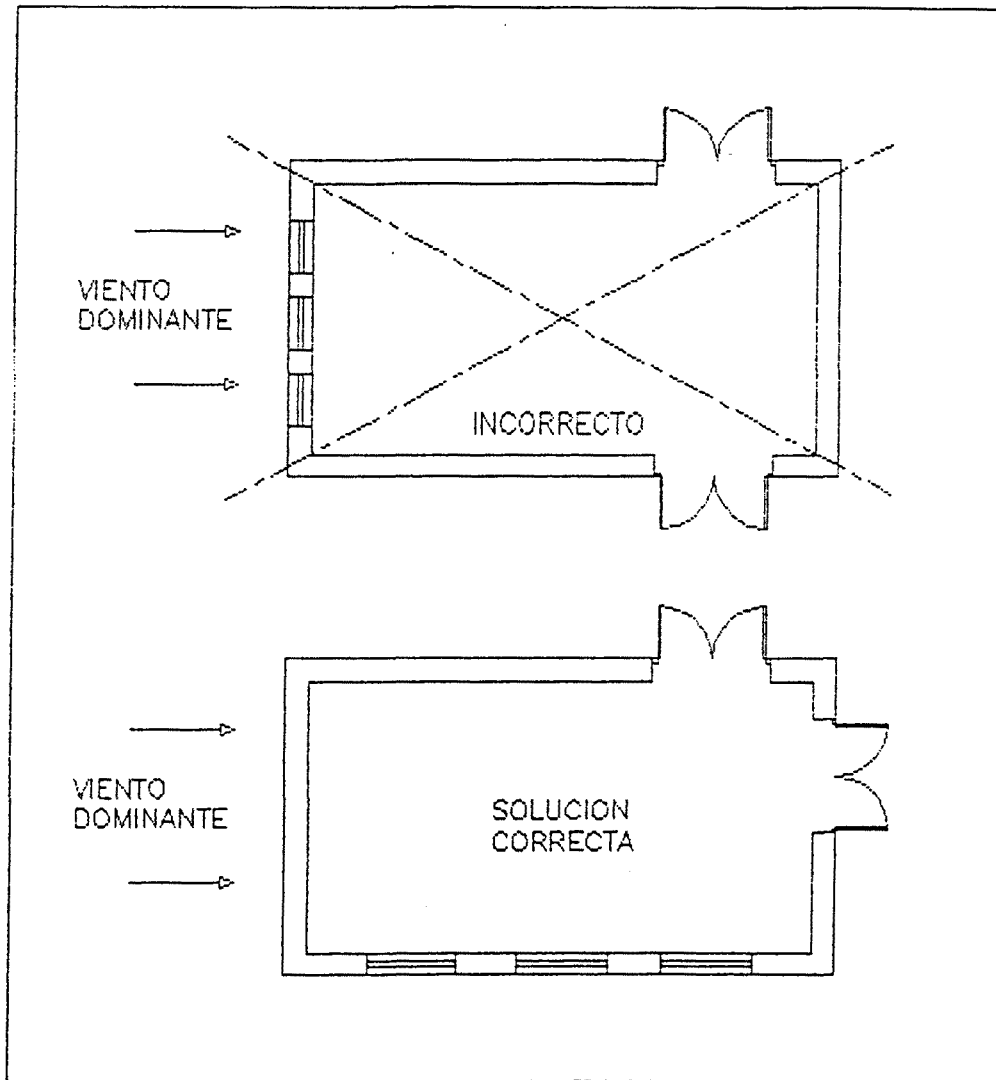


fig 3.1

TEMPERATURA DEL AIRE Y TEMPERATURA RESULTANTE

Desde 1933, los estudios de las condiciones de confort térmico de un cuerpo humano (15) a conducido a M. Missenard a definir la temperatura resultante objetivo en el interior de un recinto. Esta temperatura resultante objetivo será aquella que para un rango de humedad relativa normal produce el confort térmico en el local (16).

Se admite:

$$T_r = \frac{(T_a + T_p)}{2}$$

donde:

T_r = temperatura resultante

T_a = temperatura del aire del local

T_p = temperatura media ponderada de las paredes del local

Hay que destacar pues la importancia de la temperatura media de las paredes.

Tomando como ejemplo un taller en el cual, en función de la actividad de los ocupantes, sea preciso una temperatura de 16°C.

- Si el local no está aislado, la temperatura media ponderada de las paredes será, para tiempo de frío, del orden de 10°C. Será pues necesario calefactar el aire del local a 22°C para disponer de 16°C.
- Si el local está aislado, la temperatura media ponderada de las paredes será, para tiempo de frío, del orden de 17°C, y solo será necesario calefactar el aire del local hasta 15°C.

Estos ejemplos son válidos siempre que el aire del local esté en calma, es decir, siempre que la velocidad del aire sea inferior a 0,1 m/s. Cuando esta velocidad es más importante (cuando el sistema de calefacción sea por aire caliente; aerotermos, etc) la ventaja que aporta el aislar las paredes es todavía más importante (17).

3.1.2 DIFERENCIAS ENTRE LA PROBLEMÁTICA VIVIENDA-INDUSTRIA

Una de las primeras impresiones, es que la tecnología de la utilización de la calefacción por suelo radiante está actualmente al alcance de cualquier instalador cualificado, cuando la realidad diaria nos demuestra que esto no es así por las siguientes razones:

EN LA VIVIENDA

- La persona que contrata la instalación es el promotor y por ello obtiene múltiples ventajas por la instalación de todo el edificio.
- El usuario no lleva en general control exacto del coste de la calefacción.
- Habitualmente se trabaja con coeficientes de utilización que se exceden en el lado de la seguridad.

EN LA INDUSTRIA

- El contratante es el propio industrial con una instalación perfectamente definida.
- El usuario ha ponderado de forma exhaustiva el coste de la calefacción.
- Por las potencias necesarias no puede excederse con coeficientes de seguridad elevados.

La necesidad de ajustar los coeficientes de seguridad y el desconocimiento de la reacción del entorno frente a una calefacción con alta inercia térmica, puede y de hecho ha provocado el funcionamiento no adecuado de la calefacción por suelo radiante en edificios industriales.

3.2 EL AISLAMIENTO TÉRMICO

La necesidad del aislamiento térmico en los edificios industriales está aceptada por todos, sin embargo no parece que muchos industriales sean conscientes de la economía que esta medida les puede aportar.

El coste de la energía necesaria para calefactar un edificio es proporcional a su coeficiente G, suma de:

- coeficiente G0, representativo de las pérdidas debidas a las renovaciones de aire, las cuales pueden minimizarse con una disposición adecuada de ventanas y puertas.
- coeficiente G1, representativo de las pérdidas por las paredes. El aislamiento de las paredes permitirá reducirlo a su valor óptimo.

De todas formas, el Decreto del 12 de Mayo de 1976 y la Disposición del 12 de Marzo de 1976 completada por la del 20 de Julio de 1977 aplicable a los edificios destinados a un uso diferente al de la vivienda, imponen un valor límite al coeficiente G1 (18).

En la TABLA 3.1 se resalta para dos edificios tipo, la importancia en los diferentes porcentajes de pérdidas de:

- la influencia de la cubierta
- la incidencia considerable de la presencia de acristalamiento en la cubierta, los cuales estan limitados a un 10% de la superficie del suelo.

En el aislamiento de la cubierta será pues donde se requerirá de un esfuerzo prioritario al realizar el aislamiento del edificio.

¿ Hasta que punto debe ser este aislamiento ?

La formula siguiente permite, para un edificio dado, estimar de forma económica la mejora del coeficiente K de una pared; proporciona el tiempo de retorno de la inversión suplementaria:

$$n_r = \frac{[(\bar{C}_{se} - C_{se}) - C_m s (K - \bar{K}) (T_i - T_{eb})]}{\left[24 \left(\frac{D_j (T)}{1000} \right) (K - \bar{K}) \left(\frac{F}{r_m} \right) \right]}$$

con:

- | | | |
|-------------------------|---|--|
| n_r | = | tiempo de retorno de la inversión suplementaria expresado en años |
| $\bar{C}_{se} - C_{se}$ | = | diferencia del coste de suministro y explotación de la pared, expresado en pts/m ² de pared |
| $K - \bar{K}$ | = | diferencia de los coeficientes de transmisión térmica global correspondientes en W/m ² °C |
| C_m | = | coste marginal de KW instalados en la instalación de calefacción, expresado en pts/KW |
| $s = \pi i / D$ | = | relación entre la potencia instalada y las pérdidas de base. |
| $T_i - T_{eb}$ | = | diferencia entre la temperatura interior deseada |

y la temperatura mínima de base utilizada para el cálculo de las pérdidas de la base D

$D_j(T)$	=	grados-día del lugar considerado, para la temperatura T
F	=	precio marginal de la energía bruta, expresado en pts/KWh
r_m	=	rendimiento medio anual de explotación del sistema de calefacción.

Esta fórmula confirma lo que ya es sabido de que el aislamiento es tanto más rentable cuando:

- La temperatura interior deseada es elevada ; $T_i - T_{eb}$ es grande.
- El clima es riguroso; $T_i - T_{eb}$ y $D_j(T)$ son grandes
- La energía utilizada es cara; F/r es grande

Las técnicas utilizadas para el aislamiento varían según los cerramientos; cubiertas, muros, ventanas, suelo.

3.2.1 CUBIERTAS

SOPORTE PLANCHA DE ACERO + AISLAMIENTO 30 ó 40 mm + IMPERMEABILIZACIÓN MULTICAPA

Esta técnica presenta grandes ventajas desde el punto de vista de la supresión de puentes térmicos y de la estanqueidad del aire.

El aumento a 60 mm del espesor del aislamiento es amortizable en algunos años.

CUBIERTA SECA + AISLAMIENTO INTERIOR DE 50 ó 60 mm

Para que esta técnica sea eficaz debe asegurarse una buena estanqueidad del aire so pena de que el aislamiento se "cortocircuite" por las fugas de aire caliente.

CUBIERTA TERRAZA EN HORMIGÓN ORDINARIO O EN HORMIGÓN CELULAR + AISLAMIENTO + IMPERMEABILIZACIÓN MULTICAPA

Este sistema es mucho menos frecuente que los anteriores.

3.2.2 MUROS

CERRAMIENTO METÁLICO DE DOBLE PIEL CONTENIENDO 45 ó 60 mm DE LANA DE ROCA (figura 3.2)

Es una técnica muy empleada, pero necesita para ser eficaz:

- de un ligero recubrimiento para evitar huecos
- que la lana mineral cubra los huecos de la piel interior

- que los nervios de la piel interior sean enrollados por la lana mineral de forma que la superficie de aislamiento pinchada en el cruce de nervaduras sea mínima.

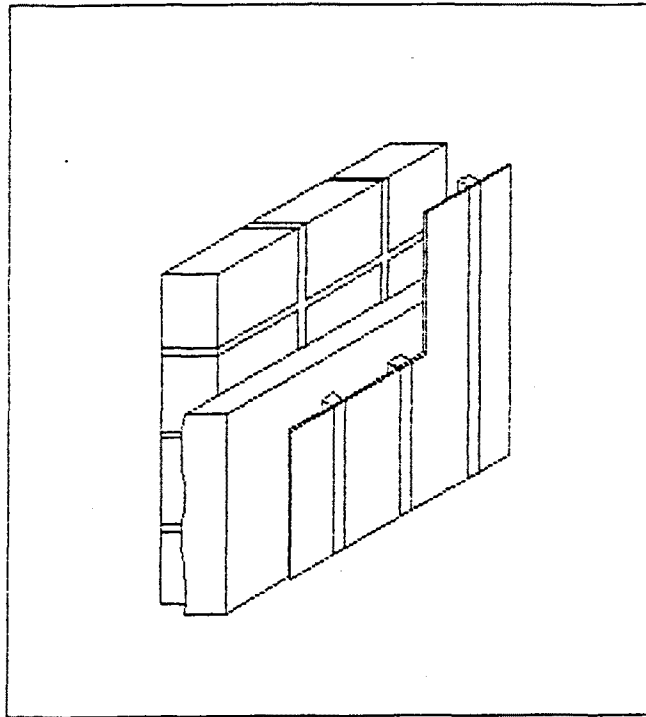


fig 3.2

3.2.3 SUELOS

Las pérdidas de un suelo industrial se producen no tanto por su superficie como por su perímetro (19).

Será pues necesario un aislamiento periférico al realizar una instalación de calefacción por cables eléctricos empotrados en el suelo, a fin de mantener el beneficio de la radiación para los ocupantes que tengan su puesto de trabajo en la periferia del local.

AISLAMIENTO PERIFERICO VERTICAL (figura 3.3)

Esta técnica es la más extendida y sin duda la mejor; un lecho aislante (4 ó 5 cm de poliestireno expandido ó equivalente) se dispone verticalmente sobre todo el perímetro con una altura de 0,60 a 1 m .

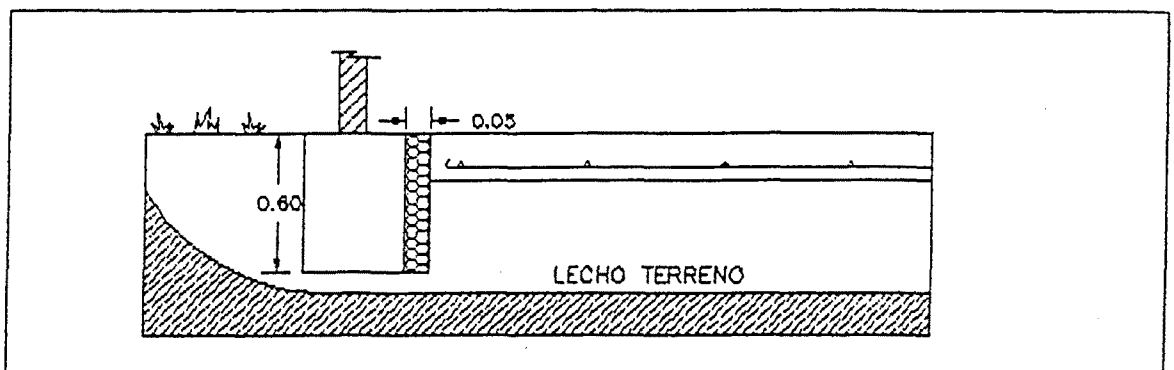


fig 3.3

Para una misma calidad de aislante esta técnica no presenta los riesgos de las dos siguientes.

AISLAMIENTO PERIFERICO BAJO LA LOSA (figura 3.4)

Con un retorno vertical a lo largo del espesor de la losa.

La resistencia de la losa se debilita a la derecha del aislamiento.

Además, es muy raro que el aislante no reduzca el espesor de la losa, lo cual agrava el riesgo de fisura.

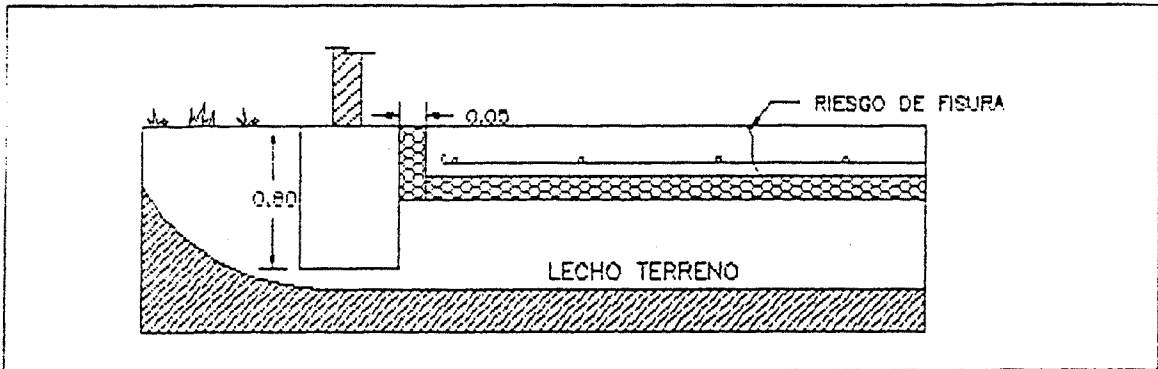


fig 3.4

AISLAMIENTO PERIFERICO EXTERIOR (figura 3.5)

La realización de la loseta de protección encarece el coste de esta técnica, la cual presenta además un riesgo de deterioro.

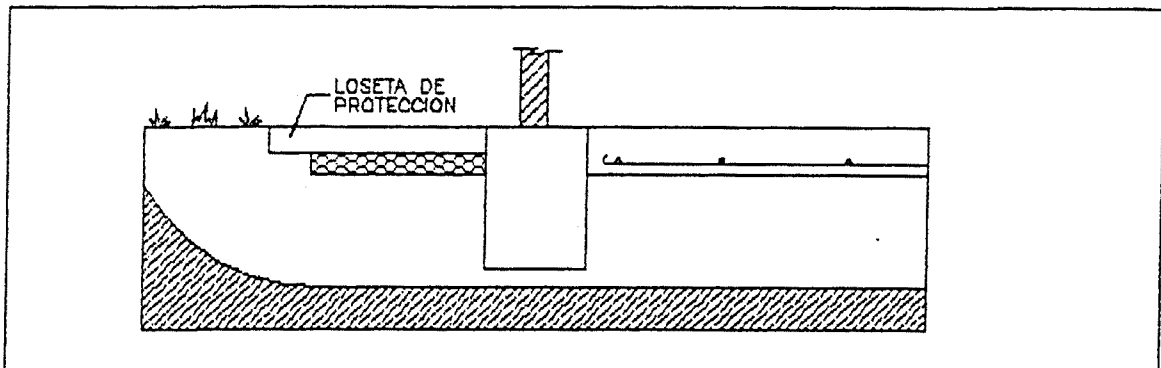


fig 3.5

3.2.4 ACRISTALAMIENTOS

De una manera general, los acristalamientos presentan unos coeficientes K importantes, de la misma forma que en una cámara de aire encerrada entre dos paredes transparentes ó traslúcidas, estos coeficientes pueden ser reducidos.

Conviene pues, desde el punto de vista de economía de energía y de economía de calefacción, reducir la importancia de estas superficies.

En la industria, la luz natural se obtiene bien sea por las ventanas ó bien sea por la cubierta.

En este segundo caso nos encontramos con dos disposiciones tipo:

- La cubierta con dientes de sierra, donde una de las pendientes es traslúcida; orientada al norte, proporciona una luz uniforme, pero esta orientación óptima no siempre será respetada, por tanto, este tipo de cubierta, de un coste elevado, es la menos utilizada.
- Cubierta clásica con simple ó doble pendiente en la cual se insertan placas traslúcidas ó claraboyas.
Se obtiene una luz mal repartida; para una iluminación exterior de 5000 lux por ejemplo (parcialmente cubierto) en el interior se obtendrán solamente 250 lux, en el caso de que un 12% de la superficie de cubierta sea traslúcida; esta cifra pasa a un 20% si se utiliza un plástico transparente.

Un nivel de 250 lux es muy débil para una gran mayoría de trabajos; para obtener una iluminación conveniente será necesario que un 25% en la superficie de cubierta sea acristalada.

Ahora bien, para una superficie traslúcida así de importante en cubierta, durante los días de verano soleados, se registrarían en el interior temperaturas intolerables, del orden de 45°C.

Para evitar esto, habrá que eliminar superficie traslúcida hasta obtener el objetivo buscado en cada instalación.

Desde el punto de vista económico e independientemente del sistema de instalación utilizado, tanto una técnica como la otra, llevan consigo pérdidas caloríficas muy importantes a través de las superficies acristaladas, aumentando considerablemente el coste de la instalación.

En la práctica, para los edificios pequeños y medios (hasta 4000 m² aproximadamente) la solución más económica consiste en preveer:

- una cubierta clásica con simple ó doble pendiente
- en las paredes verticales, las oberturas acristaladas necesarias para evitar un sentimiento de claustrofobia en el personal
- un buen alumbrado artificial

Esta solución produce una iluminación regular y constante, más eficaz y más confortable, además el ahorro obtenido en el sistema de calefacción es superior al coste suplementario del alumbrado artificial.

Para los grandes edificios, deberá iluminarse sobre todo la parte central, además de lo indicado para los edificios más pequeños, una iluminación cenital moderada; la cifra de un 8% de la superficie del suelo será en este caso un máximo.

3.3 SUELOS CALEFACTORES

Los suelos calefactores eléctricos son aplicables a edificios dotados de un buen aislamiento térmico.

Se adapta tanto a edificios nuevos como a edificios para rehabilitar.

Si el suelo asegura él solo la calefacción del edificio, la renovación de aire total no debe en general sobrepasar 1 volumen/hora en promedio diario. Podrá ser superior en el caso de que el aire renovado mecánicamente sea a una temperatura por lo menos igual a la temperatura ambiente deseada.

Las aportaciones internas diarias no deben exceder el 30% de las necesidades diarias del edificio.

La temperatura del local debe mantenerse constante permanentemente. Una disminución de la temperatura puede ser programada, pero el aumento de temperatura deberá realizarse en horas valle (8 antes de las 6 de la mañana después de una parada del fin de semana)

En la industria, la gran mayoría de suelos se realizan sobre terreno (20). Para ello se utilizan principalmente dos técnicas:

3.3.1 LOSA DE HORMIGÓN SOBRE SUELO (figura 3.6)

El suelo está constituido por:

- un lecho de suelo natural ó de relleno
- un lecho de zahorras naturales ó artificiales
- una lámina de geotextil
- una losa de hormigón armado
- un lecho de acabado superficial

Los cables calefactores se fijan a la malla de la losa y quedan embebidos en el hormigón durante la construcción.

Es importante que la colocación de los cables calefactores dentro del hormigón se realice correctamente, para ello es necesario asegurar:

- un espesor mínimo de 8 a 10 cm por encima del cable
- un espesor de hormigón de 4 a 5 cm por debajo del cable, y un buen vibrado del hormigón.

El espesor mínimo de la losa será del orden de 12 a 15 cm; el cual es perfectamente compatible con los espesores generalmente utilizados, que son del orden de 15 cm.

La capacidad de acumulación no depende del espesor del hormigón. En efecto, el calor se acumula sobre todo en el terreno.

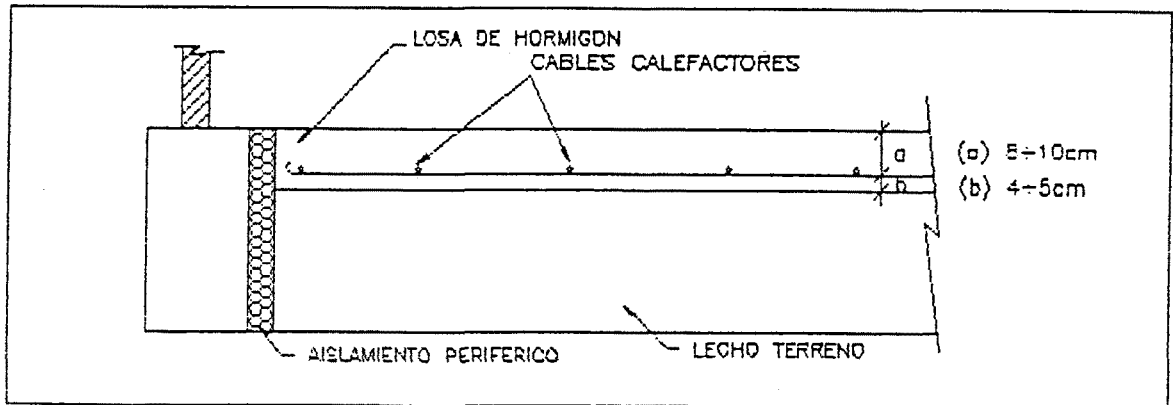


fig 3.6

3.3.2 SUELOS INDUSTRIALES SEMIRIGIDOS (figura 3.7)

Están constituidos por:

- un lecho de suelo natural ó relleno
- un lecho de base de 20 a 25 cm de espesor de grava-cemento 0/20 ó 0/15 dosificado alrededor del 4% de cemento
- un lecho de superficie semirígida de 3 a 5 cm de espesor, el cual confiere al suelo cualidades particulares antiprosas, antideslizantes, antifisuras, etc.

En este caso, los cables calefactores se incorporan en la grava-cemento, que será extendida y compactada en dos pasos.

Esta técnica se utiliza cada vez más por sus cualidades de ausencia de juntas, suelo antideslizante y sin riesgo de fisuración.

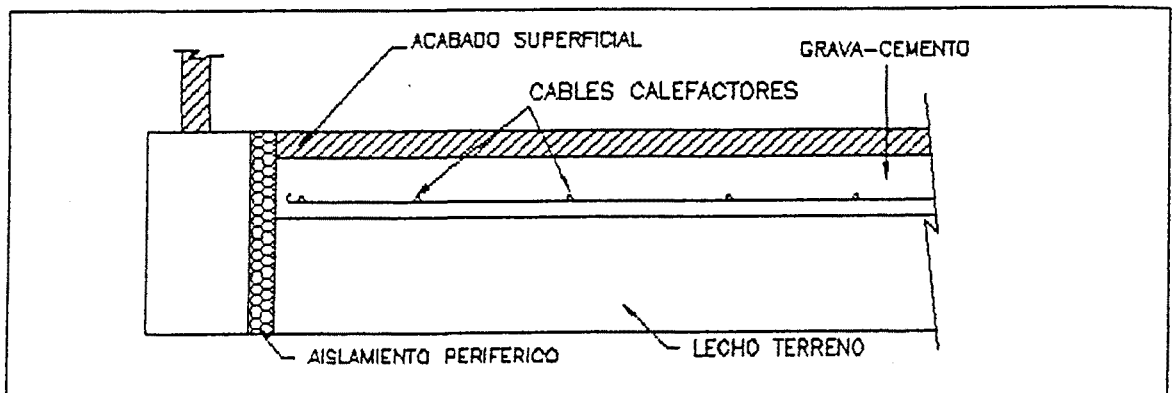


fig 3.7

3.4 CABLES CALEFACTORES

3.4.1 DEFINICIONES

CONDUCTOR O CABLE CALEFACTOR (figura 3.8)

Es un conductor ó cable que puede llevar ó no una pantalla metálica y que está destinado a suministrar el calor, principalmente por efecto Joule.

TEMPERATURA ESPECIFICA DE UN CABLE CALEFACTOR

Es la temperatura máxima en la superficie del alma conductora. Esta temperatura se determina de forma que cuando el cable calefactor está en servicio, ni el revestimiento aislante, ni la funda externa esten sometidas a acciones térmicas subceptibles de dañar el cable.

Esto no implica limitaciones de temperatura debido a exigencias del medio ambiente

COLA FRIA (CABLE CONDUCTOR) (figura 3.9)

Es un conductor ó cable cuya función es llevar el cable calefactor a una canalización fija, donde la sección es tal que no se produce liberación de calor apreciable.

UNION DE UNA EXTREMIDAD DE UN CABLE CALEFACTOR (UNION FRIA) (UNION ENTRE EL CABLE CALEFACTOR Y EL CABLE CONDUCTOR)

Conexión entre una extremidad del alma conductora del cable calefactor y de su unión fria en el revestimiento metálico y el conductor de protección, comprendido su aislamiento y su ó sus revestimientos de protección.

ELEMENTO DE CALEFACCION (figura 3.10)

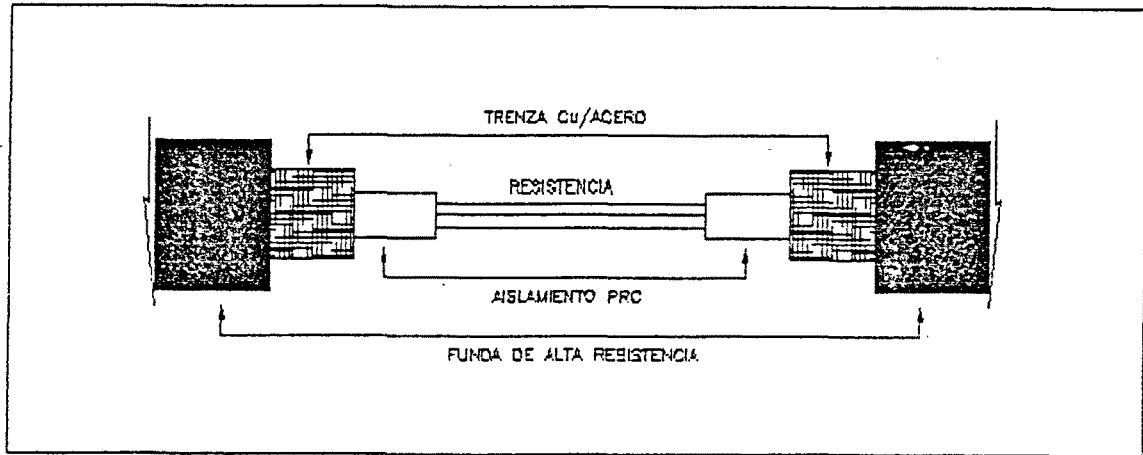
Se compone de un conductor ó cable calefactor propiamente dicho y de sus colas frias.

CIRCUITO DE ALIMENTACION ELECRICA

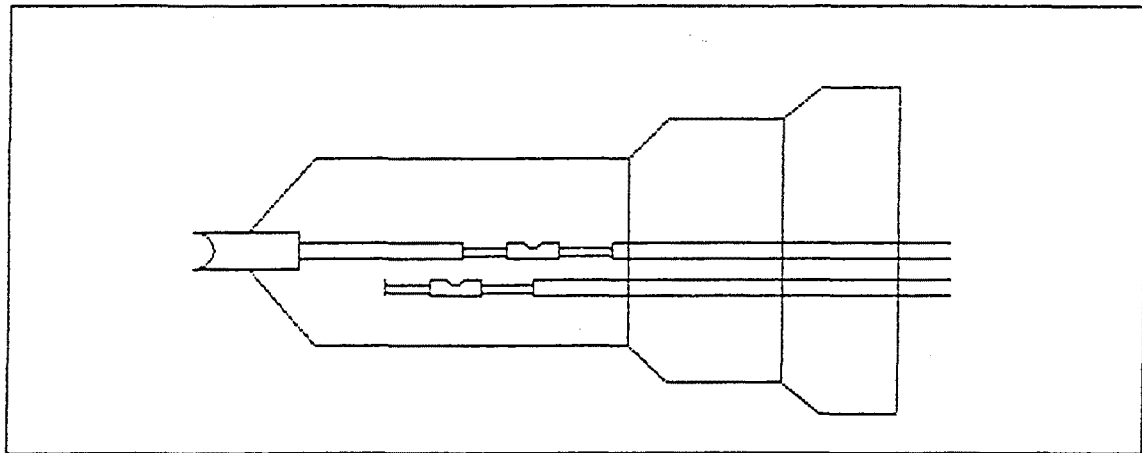
Formado por la canalización comprendida entre el dispositivo de protección contra las sobreintensidades

EQUIPO DE CALEFACCION (figura 3.11)

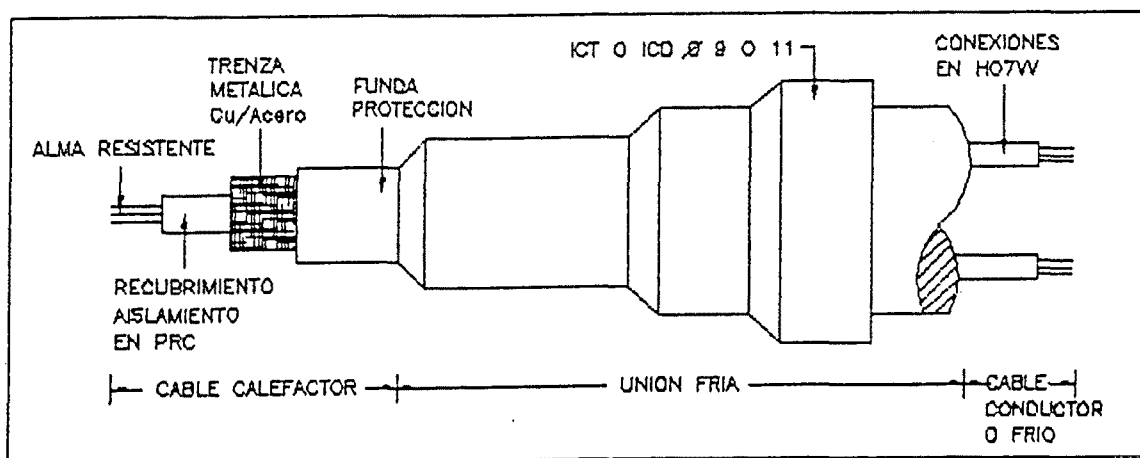
Conjunto formado por un elemento de calefacción y su circuito de alimentación eléctrica.



Esquema de un cable calefactor
fig 3.8



Esquema de una unión fría
fig 3.9



Esquema de un cable calefactor y su unión fría
fig 3.10

DOMINIO NFC 32-330	CABLE CALEFACTOR	ELEMENTO DE CALEFACCION	EQUIPO DE CALEFACCION
	ENLACE		
	UNION FRIA		
DOMINIO NFC 15-100	CONEXION		
	CIRCUITO ALIMENTACION		

NFC 32-330 Norma relativa a cables calefactores monoconductores sin revestimiento metálico y a equipos de calefacción realizados a partir de estos cables.

Se definen las características, reglas de construcción y ensayos de verificación correspondientes que deben satisfacer estos materiales por separado, para asegurar la seguridad de las personas y un empleo satisfactorio, a reserva de una instalación conforme con las reglas en vigor.

NFC 15-100 Norma relativa a las instalaciones eléctricas en baja tensión, particularmente en lo que corresponde a los valores de resistencia de aislamiento mínimo que las instalaciones deben satisfacer.

DTU N°65-7 Reglas relativas a las condiciones de empleo y puesta en obra en lo que concierne a las instalaciones de los suelos de hormigón.

Esquema de un equipo de calefacción
fig 3.11

3.4.2 TIPOS DE CABLES CALEFACTORES

Los diferentes tipos de cables calefactores utilizados para la realización de Suelos Radiantes (21) son:

A) CABLES CON PANTALLA METALICA

- A1) CON AISLANTE MINERAL
- A2) CON AISLANTE ORGANICO

B) CABLES SIN PANTALLA METALICA ALIMENTADOS A BAJA TENSION

A1) CABLES CON PANTALLA METALICA CON AISLAMIENTO MINERAL

Están constituidos por un alma resistente de cobre ó de KUMANAL cubierta por un aislamiento de magnesio y todo ello en el interior de una funda metálica puesta a tierra, y esta a su vez recubierta por una envoltura de PVC.

La potencia lineal máxima para este tipo de cables es de 33W/m.

Son distribuidos:

- en Francia; por " Câbles de Lyon" que proponen el cable "piroténax" y por la "Société Deleage" que propone el cable fabricado por "British Insulated Callenders Cables Ltd".
- en España; por CHEIHIT S.L.

A2) CABLES CON PANTALLA METALICA Y AISLAMIENTO ORGANICO

Están constituidos por un alma resistente cableada, una vaina aislante (de material sintético del tipo E.P.R., P.R.C., S ó P.V.C.), de un trenzado metálico formando una pantalla puesta a tierra y de una envoltura aislante (en materia aislante del tipo P.V.C., P.C.S., P.C.R., P.E.H.D. ó E.P.R.).

La potencia lineal máxima utilizable con este tipo de cables es de 33W/m.

Estos cables deben estar recogidos en un Aviso Técnico favorable de C.S.T.B.;

- cable "tresitherm" de la Sociedad Tréfirmetaux.
Aviso Técnico N^o14/7504
- cable "senowatt" de las Câbleries de Sens (C.G.F.)
Aviso Técnico N^o14/7614
- cable "flextherm" tipo 5001 de la Société Dätwyles (Suiza)
Aviso Técnico N^o14/7945

B) CABLES SIN PANTALLA METALICA, DE ALUMINIO, ALIMENTADOS A MUY BAJA TENSION

Están constituidos por un alma maciza de aluminio recocido de 7,5 mm de diámetro, recubierto de una envoltura aislante de P.V.C. de 1,6 mm de espesor (Aviso Técnico N^o14/7503).

Contrariamente a los otros dos tipos de cables citados, los cuales son alimentados a baja tensión (220 V ó 380 V), estos cables se alimentan a muy baja tensión a través de un transformador donde los devanados son igualmente de aluminio.

Admiten una potencia lineal máxima de 35W/m.

En la figura 3.12 se observa como está constituido cada uno de los diferentes tipos de cables calefactores;

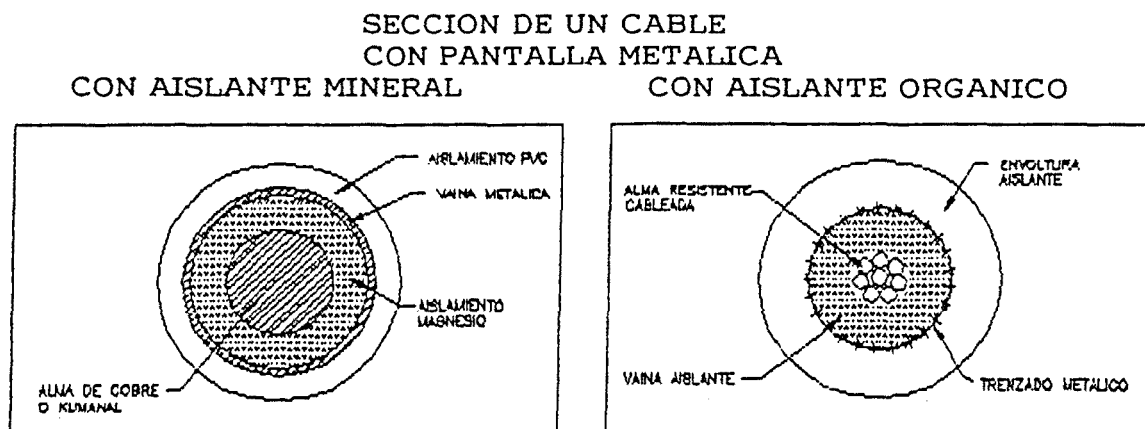


fig 3.12

SECCION DE UN CABLE
SIN PANTALLA METALICA

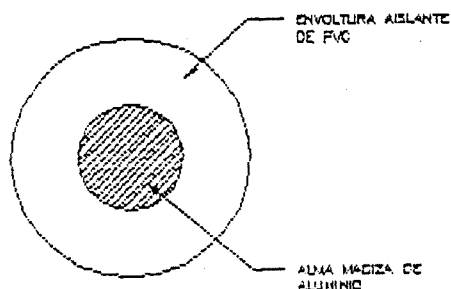


fig 3.12

3.4.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES

En la TABLA 3.2 se indican las ventajas e inconvenientes de los diferentes tipos de cables calefactores.

TIPO DE CABLE	
CABLE CON PANTALLA METALICA Y AISLAMIENTO MINERAL	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Gran resistencia al aplastamiento Potencia máxima 33W/m Alimentación en baja tensión	Sensible a choques contundentes y a torsiones repetidas durante la puesta en obra
CABLE CON PANTALLA METALICA Y AISLAMIENTO ORGANICO	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Gran flexibilidad Potencia máxima 33W/m Alimentación a baja tensión	Sensible al aplastamiento
CABLE SIN PANTALLA METALICA ALIMENTADO A MUY BAJA TENSION Y CABLES TRENZADOS	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Gran flexibilidad Potencia máxima 35 W/m Reparaciones muy fiables	Necesita de un transformador BT/MBT

TABLA 3.2

3.4.4 DESIGNACION DE LOS CABLES CALEFACTORES

Un CABLE según Normativa se designa por:

- La denominación "cable calefactor" seguido de la denominación elegida por el fabricante y patentada por él.
- Su tensión nominal en voltios
- La resistencia lineal nominal del alma conductora a 20°C, en ohms por metro.
- El índice de la Norma, es decir NFC 32-330

Un ELEMENTO DE CALEFACCION se designa por :

- La denominación "elemento de calefacción" seguido de la marca de identificación del fabricante.
- Su tensión nominal en voltios
- Su potencia total nominal en watios
- La longitud del cable calefactor en metros

3.4.5 LAS CONEXIONES FRIAS

Los cables eléctricos son enlazados a la instalación eléctrica de calefacción por dos conductores de naturaleza y sección tales que no se produzca una liberación de calor apreciable.

Las uniones entre el cable calefactor y las conexiones frias denominadas uniones frias deben estar embebidas en la masa acumuladora.

Al conjunto constituido por un cable calefactor y sus conexiones frias se le denomina "elemento de calefacción".

Los elementos de calefacción alimentados a 220 V ó 380 V se confeccionan en fábrica; bien sea en tramos prefabricados preparados para ser colocados en obra, ó bien sea en corona. En este segundo caso, el estudio de un modelo de puesta en obra ó la confección en tramos separados antes de la puesta en obra, facilitará la coordinación en obra y reducirá el tiempo de colocación.

Los elementos de calefacción alimentados a muy baja tensión son confeccionados en obra. El cable calefactor se entrega en rueda, y es recomendable también el estudio de un modelo de puesta en obra ó de fabricación en tramos separados para reducir así el tiempo de colocación. Las conexiones frias estan constituidas por la puesta en paralelo de un segundo cable.

Los cables eléctricos destinados a ser incorporados dentro del hormigón son definidos por la Norma NF 32-330 de Marzo de 1985 y las Condiciones Técnicas que debe satisfacer la ejecución de los suelos calefactores utilizando estos cables estan definidas en la DTU N°65-7 de Enero de 1986

3.5 FUNCIONAMIENTO DE LOS SUELOS CALEFACTORES

3.5.1 PRINCIPIO

El sistema de calefacción por cables radiantes permite aprovechar la inercia térmica del edificio para acumular calor durante las horas-valle (tarifa reducida), integrando dichos cables en las estructuras horizontales del edificio (suelos) para ser restituído, sin consumir energía, durante los periodos del día con tarifa más elevada: horas-llanas y horas-punta.

En un sistema de calefacción por acumulación, se ha de calcular la profundidad a que se coloca el cable dentro de la masa del suelo y calcular esta última en función de la cantidad de calor que habrá de acumular el sistema durante las 8 horas-valle y que deberá restituir, a su vez, durante el resto del día, en función de las pérdidas de calor del edificio en 24 horas (22).

El sistema regulador, por tanto, deberá calcular y adecuar el tiempo de funcionamiento del sistema a fin de cubrir dichas pérdidas, en función de la temperatura exterior y del salto térmico fijado por los usuarios durante el periodo de tarifa reducida (8 horas-valle) (23).

Este procedimiento puede ser utilizado "solo" (el más frecuente) ó estar asociado a una calefacción de apoyo por aerotermos.

En el caso de que sea necesario un apoyo, y en el caso de locales industriales, se utiliza un sistema de regulación que asegure un funcionamiento de la instalación denominado "con base prioritaria", es decir que la calefacción es asegurada prioritariamente por la base, el apoyo solo intervendrá en las horas más frías ó si se produce una importante reducción de las aportaciones internas del edificio (paro prolongado de máquinas).

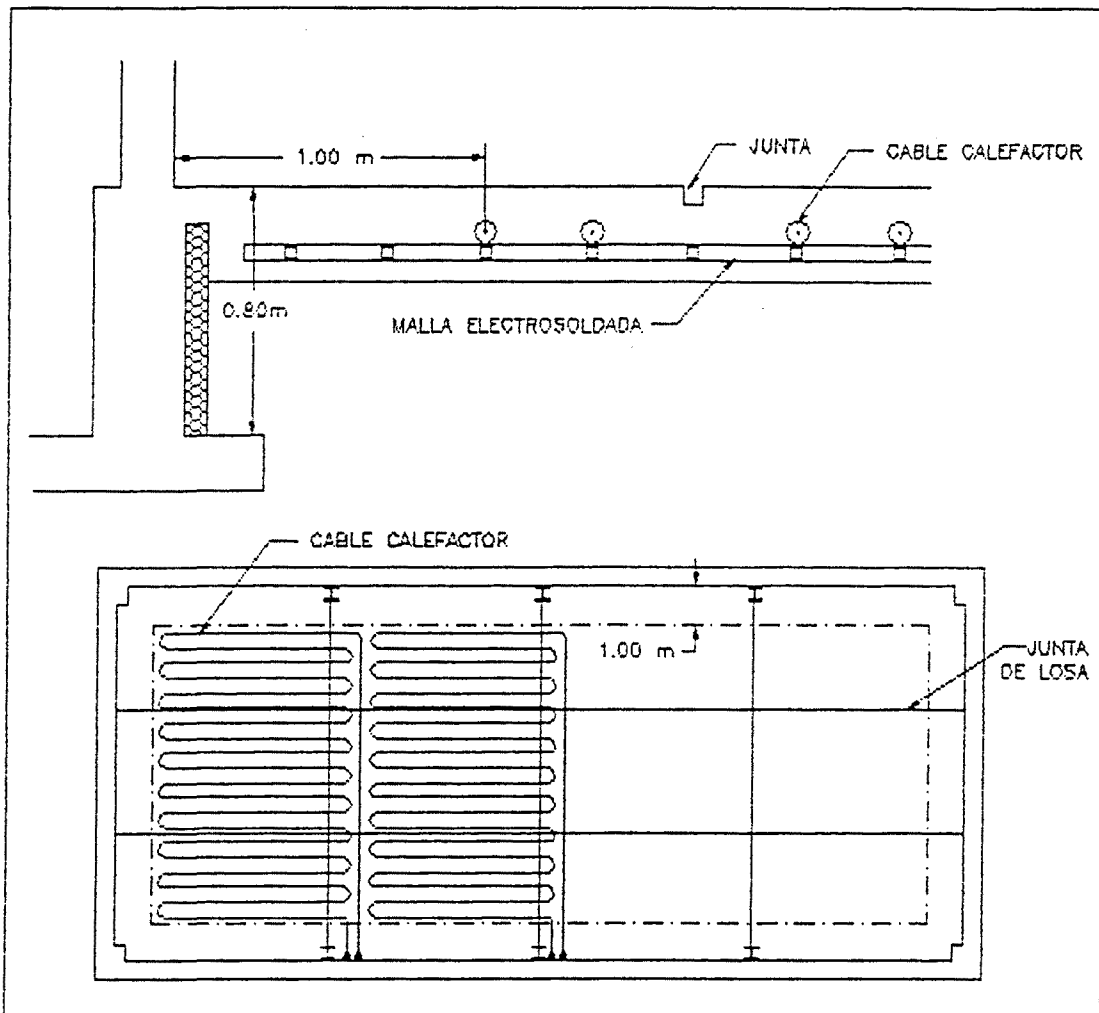
La calefacción de base por suelo se realiza a partir de un suelo tradicional de 20 a 25 cm sobre el terreno, armado con una malla en la cual se sujetan los cables calefactores.

Se aísla todo el perímetro con poliestireno de aproximadamente 80 cm de altura y 4 cm de espesor (figura 3.13).

La potencia instalada en directo corresponde al complemento entre las aportaciones caloríficas internas (máquinas) y las aportaciones de calor por el suelo.

Desde un punto de vista técnico este tipo de calefacción representa la solución ideal a los problemas de constancia y homogeneidad de la temperatura, pues, de una manera genérica, los edificios presentan una inercia calorífica importante y el suelo emite el calor un 50% por radiación y un 50% por convección.

Desde el punto de vista de funcionamiento, la red de resistencias es puesta automáticamente bajo tensión, no solamente en función de la temperatura en el interior del local, sino también en función de las diferentes horas del día (horas valle) para aprovechar las tarifas eléctricas más ventajosas. En locales ya existentes, habrá que colocar una losa de hormigón sobre el suelo primario.



Esquema suelo calefactor
fig 3.13

3.5.2 CARACTERISTICAS DE LA EMISION

El calor acumulado por la losa de hormigón, durante las 8 horas-valor, es restituido durante las 24 horas del día.

El calor restituido es emitido por convección y radiación (24).

La emisión se caracteriza por la fórmula:

$$\Phi = \alpha (T_s - T_i)$$

donde:

- Φ es el flujo emitido
- α es el coeficiente de transmisión superficial
- T_s es la temperatura superficial del suelo
- T_i es a temperatura en el interior del local

3.5.3 FUGAS TERMICAS

Se producen unicamente por la periferia del suelo y han de tenerse en cuenta para una mayoración de las pérdidas.

(DTU, reglas Th-677, & 3-51, pág 49)

Esta mayoración se calcula por la formula siguiente:

$$\Delta d = \frac{(\sum R_i) (d) (z)}{\left(\frac{S}{KL}\right) - (\sum R_i)}$$

$$\frac{\Delta d}{d'} = \frac{(\sum R_i) (z)}{\left(\frac{S}{KL}\right) - (\sum R_i)}$$

donde:

- Δd (W/°C) = suplemento de pérdidas debido a la presencia de elementos calefactores en una pared en contacto con el suelo
- d' (W/°C) = suma de las pérdidas del local
- $\sum R_i$ (m²°C/W) = suma de las resistencias térmicas entre el plano calefactor y el ambiente interior
- $\sum R_i = \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}$ = resistencia de la parte de la losa situada por encima de los cables calefactores

$$\frac{e}{\lambda} = \text{resistencia de transmisión del suelo}$$

$$\frac{1}{\alpha_i} = \text{resistencia de transmisión}$$

superficial interior

$$\alpha_i = \text{coeficiente de transmisión}$$

superficial

para un espesor de hormigón de 10 cm (caso más desfavorable); e = 0,1 m

$$\sum R_i = 0,1/1,75 + 0,09 = 0,147 \text{ m}^2\text{°C/W}$$

z = fracción de pérdidas equilibrada por la pared calefactora en contacto con el suelo. Varía de 0 a 1 según la parte de paramento en calefacción. En el caso de suelo solo $z=1$

S (m²) = superficie calefactora

K (W/m²°C) = coeficiente de transmisión lineal de la losa. En el caso de losa aislada $K=1,35$

(D.T.U. reglas Th-k77, pág 37)

L (m) = perímetro exterior del suelo

En un local de 1000 m² (40x25m), donde $z=1$ y $\sum R_i = 0,147 \text{ m}^2\text{C/W}$,

tendremos $\frac{\Delta d}{d'} = 0,0265$ menor de un 3%

En un local de 3000 m² (50x60m), tendremos $\frac{\Delta d}{d'} = 0,0148$ menor de un 1,5%.

En la práctica no se suele tener en cuenta esta mayoración por ser muy debil.

3.5.4 CONDICION DE CONFORT

Esta demostrado científicamente que solo es plenamente confortable un ambiente en el que una persona no siente ni frio ni calor; un ambiente a una temperatura tal, que no le produzca excesivas pérdidas de calor, pero que tampoco le impida eliminar su calor sobrante, es decir, donde el cuerpo encuentre un equilibrio térmico fácil de mantener por su propio sistema auto-regulador (25).

Las personas, cuya temperatura media normal es de unos 36°C (superior por tanto a la de un panel radiante) no solo no puede percibir la radiación procedente del panel sino que pueden emitir libremente al ambiente, a su vez, su propio calor sobrante generado por su metabolismo y que será mayor o menor según su actividad.

El sentido de propagación de la energía radiante es siempre desde el cuerpo caliente al cuerpo frio.

Por otra parte, el aire ambiente, que no absorbe radiación alguna, se atempera por contacto con los paramentos ya caldeados, originándose una ligerísima corriente de convección que contribuye asimismo a mantener una confortable y constante temperatura en todos los niveles y zonas de la estancia. No hay sensible y molesta diferencia de temperatura a nivel de cabeza y pies, defecto común en los sistemas convencionales más o menos acusado según la calidad de la instalación, y el nivel y la calidad del aislamiento.

La calefacción por suelo irradia el calor de una forma natural, de abajo - arriba permitiendo un máximo confort y bienestar.

Al no existir recalentamiento del aire, este permanece fresco y agradable en todo momento, sin que se altere su humedad relativa natural (40 a 60%).

En la figura 3.14 se observa como varia la evolución de la temperatura en el local según el sistema de calefacción utilizado (26).

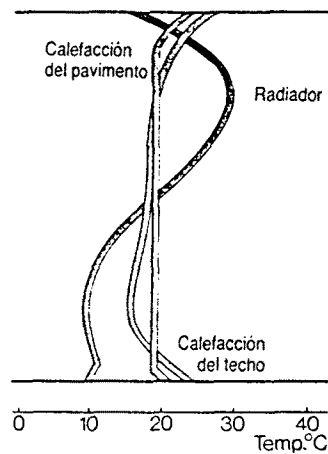


fig 3.14

3.6 REGULACION DE LOS SUELOS CALEFACTORES

3.6.1 OBJETIVO DE LA REGULACION

La regulación tiene un doble objetivo:

- Mantener la temperatura interior constante, independientemente de las variaciones de la temperatura exterior, aportaciones internas, insolación, etc.
- Aprovechar lo mejor posible las disposiciones de tarifas eléctricas: evitar los consumos en horas punta, dar prioridad a los consumos en horas valle, dependiendo del horario de tarificación de la compañía.

Sin embargo, en el caso de suelo radiante, si el local permanece a una temperatura deseada, es porque la base radiante es autorregulante. Es el suelo el que asegura la regulación de la emisión de calor, mientras que el sistema de regulación asegura la regulación de la carga de energía.

El suelo debe tener la energía almacenada suficiente para cubrir las necesidades de calor durante todo el día.

3.6.2 AUTORREGULACION DEL SUELO CALEFACTOR

Es la respuesta del suelo calefactor a una variación de la temperatura interior.

Los numerosos especialistas en aspectos térmicos se preguntan como un sistema dotado de tal inercia térmica puede reaccionar a una variación brusca de aportaciones internas, insolación, etc. Algunos, y respondiendo negativamente, añaden a veces de una forma un tanto maliciosa: ¿como preveer la noche de insolación del día siguiente?.

De hecho, la inercia del suelo reside en su capacidad de acumulación, y no en su aptitud de raccionar a perturbaciones exteriores o interiores. En efecto, se caracteriza por una gran superficie de intercambio y una temperatura de superficie débil, muy próxima a la temperatura del local.

Ocurre que el flujo de calor liberado al local es autorregulante; a toda variación de la temperatura del local corresponde instantáneamente una variación del flujo emitido por el suelo, el cual se opone rigurosamente a la variación inicial.

A una perturbación (variación de insolación, temperatura exterior, aportaciones internas, etc.) que provoca una variación de la temperatura interior corresponde una variación de flujo emitido (27), según la fórmula:

$$\Phi = \alpha (T_s - T_i)$$

de donde, si Δ indica la variación de una magnitud:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Phi} = - \frac{\Delta T_i}{(T_s - T_i)}$$

si $T_s - T_i$ es pequeña, implica que $\frac{\Delta \Phi}{\Phi}$ es relativamente elevada, por lo que

las variaciones de flujo son importantes y se oponen a la variación de la temperatura interior (signo -).

Por ejemplo, si la temperatura de la superficie del suelo es de 26°C y la temperatura interior deseada de 18°C;

- si la T^{a} interior baja 2°C, la emisión del suelo aumenta un 25%
- si la T^{a} interior sube 2°C, la emisión del suelo disminuirá en un 25%

3.6.3 DISPOSITIVOS DE REGULACION DE LA CARGA

Los dispositivos utilizados para la regulación de la carga en el caso de una instalación de calefacción por Suelo Calefactor son:

- REGULACION EN FUNCION DE LA TEMPERATURA EXTERIOR
- REGULACION POR TERMOSTATO INTERIOR CON CONTACTOS DECALADOS

Estos dispositivos pueden ser complementados con los siguientes accesorios:

- LIMITADORES DE LOSA
- LIMITADORES DE AMBIENTE

REGULADOR PROPORCIONAL A TRAVES DE SONDA DE TEMPERATURA EXTERIOR

A) SOLO BASE (figura 3.15)

Un REGULADOR PROPORCIONAL comporta una función NOCHE y una función DIA.

El RELOJ DE TARIFICACION recibe información NOCHE-DIA y selecciona la función correspondiente en el REGULADOR.

Evita los consumos en horas punta.

Una SONDA EXTERIOR registra la temperatura exterior y transmite la información al regulador, el cual, a través del CONTACTOR DE POTENCIA ordena la carga.

En el regulador se compara la temperatura exterior con la pendiente del aparato regulador (pendiente de noche - pendiente de día)

Un TERMOSTATO LIMITADOR DE LA TEMPERATURA AMBIENTE interrumpe la carga si la temperatura deseada se sobrepasa más de un grado centígrado.

Un INTERRUPTOR, controlado por la información punta del reloj de tarificación, prohíbe automáticamente los consumos en horas punta.

Un TERMOSTATO LIMITADOR DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO, actúa como sistema de seguridad cortando la calefacción en el caso de una avería del regulador que pueda producir un recalentamiento del suelo (una sonda por cada 1000 ó 2000 m² de losa).

Este sistema es satisfactorio desde el punto de vista teórico en la medida en que permite la realización de las curvas de carga previstas por el estudio térmico. Sin embargo su puesta en obra necesita del conocimiento preciso de los parámetros térmicos del edificio a calefactar.

Generalmente en las obras los parámetros del edificio construido difieren un poco de lo previsto, por tanto es necesario un ajuste práctico de los puntos de reglaje.

B) BASE PRIORITARIA + APOYO (figura 3.16)

El apoyo solo debe intervenir cuando se hallan agotado todas las posibilidades de la base.

El sistema utilizado es sensiblemente análogo al precedente, pero el TERMOSTATO LIMITADOR se reemplaza por un TERMOSTATO CON DOS CONTACTOS DECALADOS de 2 a 3°C.

El reglaje manual del termostato se realiza simultáneamente sobre los dos contactos sin modificarse el decalaje.

El contacto que funciona para la temperatura ambiente más alta (es decir aquel que para una temperatura ambiente dada, se cierra el primero cuando, al actuar sobre el botón de reglaje manual, desplazamos el punto de consigna hacia las temperaturas crecientes) interrumpe, como en el caso anterior, la carga de la base si la temperatura deseada se sobrepasa en más

de 1 ó 2°C.

El segundo contacto (decalado 2 ó 3°C en referencia al anterior) pone en servicio los aerotermos de apoyo si la temperatura es inferior en 1 ó 2 °C a la temperatura deseada.

En los dos casos A y B, el termostato interior es imperativo. Su objetivo no es el de regular la temperatura interior, sino de permitir la recuperación de las aportaciones gratuitas evitando los sobrecalentamientos, y en el segundo caso asegurar la prioridad de la base calefactora.

En consecuencia, este comando no debe dejarse a disposición de los ocupantes (habrá que prever por ejemplo un armario con llave)

REGULADOR CON TERMOSTATO INTERIOR CON CONTACTOS DECALADOS

Este sistema es aplicable cuando las necesidades de calor son poco variables a lo largo del día.

C) SOLO BASE (figura 3.17)

El RELOJ DE TARIFICACION recibe la información y selecciona la función NOCHE -DIA.

El TERMOSTATO INTERIOR dispone de dos contactos decalados de 2 a 3 °C.

El contacto que funciona por la temperatura ambiente, la más alta, es alimentado de noche y regula la carga de la losa durante la noche.

El contacto decalado en 2°C por similitud con el precedente es alimentado de día y entra en acción si la temperatura interior desciende por debajo del decalaje prereglado.

Así se asegura la prioridad de los consumos nocturnos.

Los resultados obtenidos con este sistema son muy satisfactorios.

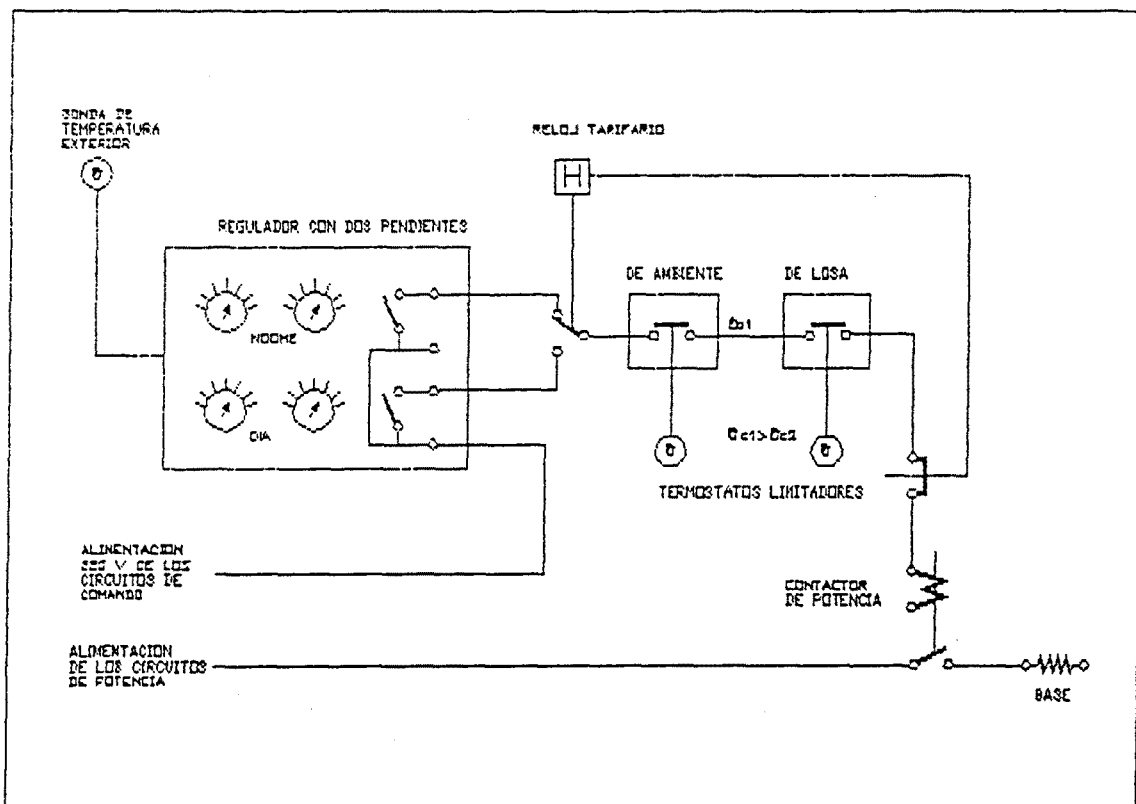
Este dispositivo resulta también muy interesante desde el punto de vista práctico, puesto que:

- el montaje es muy simple
- el funcionamiento es fiable por poco que se elija un modelo de termostato robusto y preciso
- el reglaje es inmediato

D) BASE PRIORITARIA +APOYO (figura 3.18)

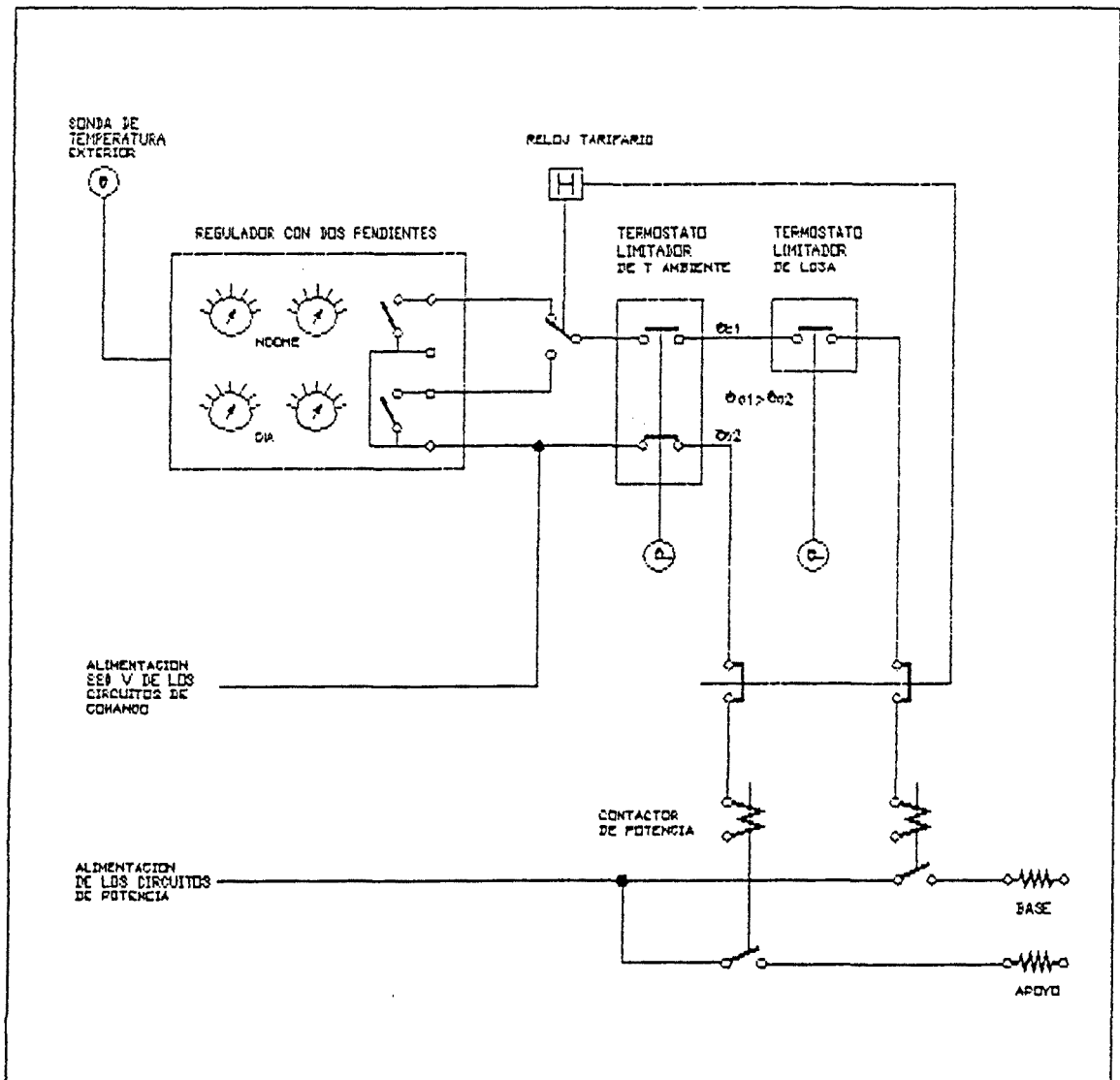
El sistema utilizado es sensiblemente análogo al precedente, pero el TERMOSTATO utilizado es un TERMOSTATO CON 3 CONTACTOS DECALADOS

El tercer contacto, decalado en 2°C en relación con el segundo contacto, pone en servicio los aerotermos de apoyo si la temperatura es inferior en 2°C a la temperatura prefijada



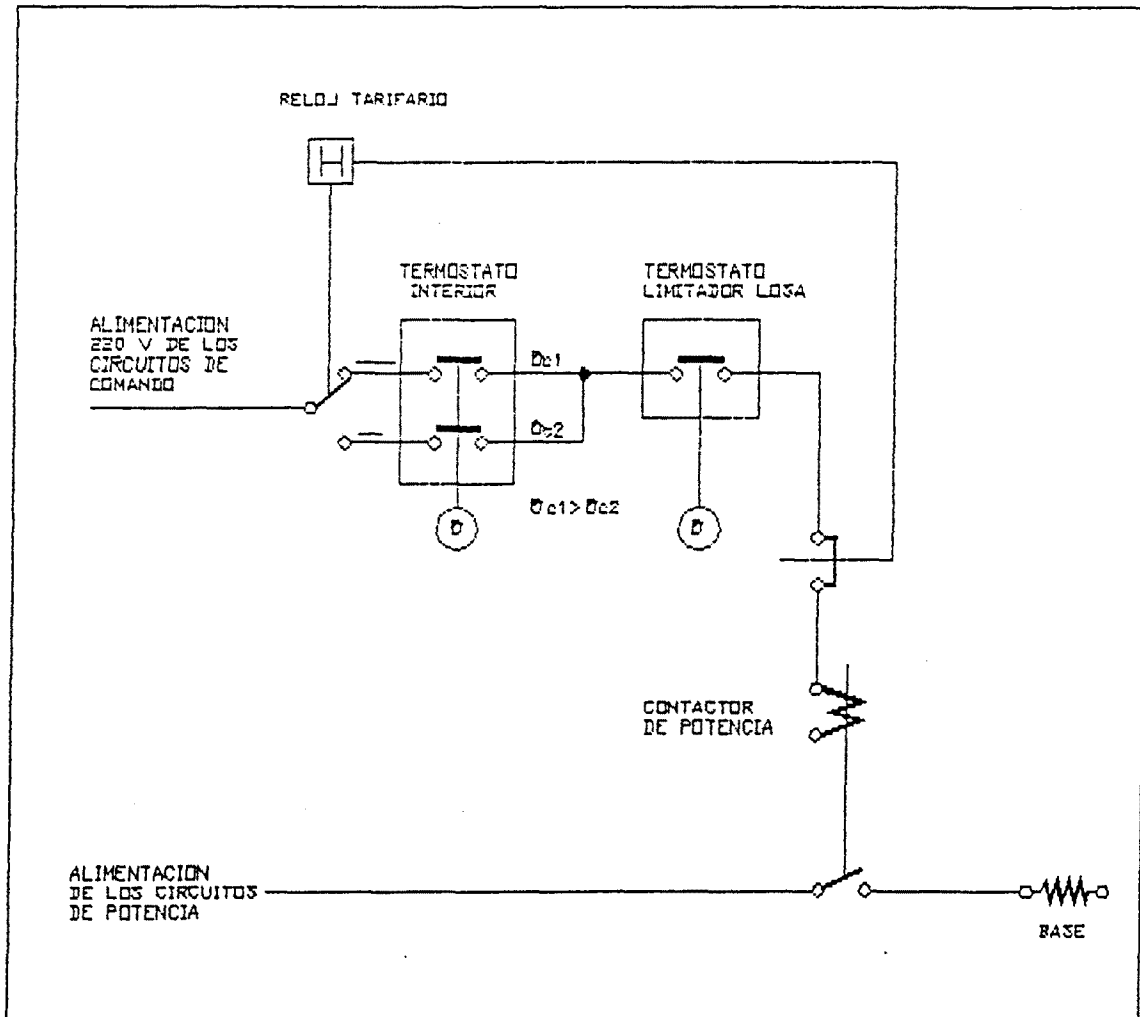
Esquema del sistema de regulación de un sistema de calefacción por suelo radiante con regulador proporcional a través de sonda de temperatura exterior

fig 3.15



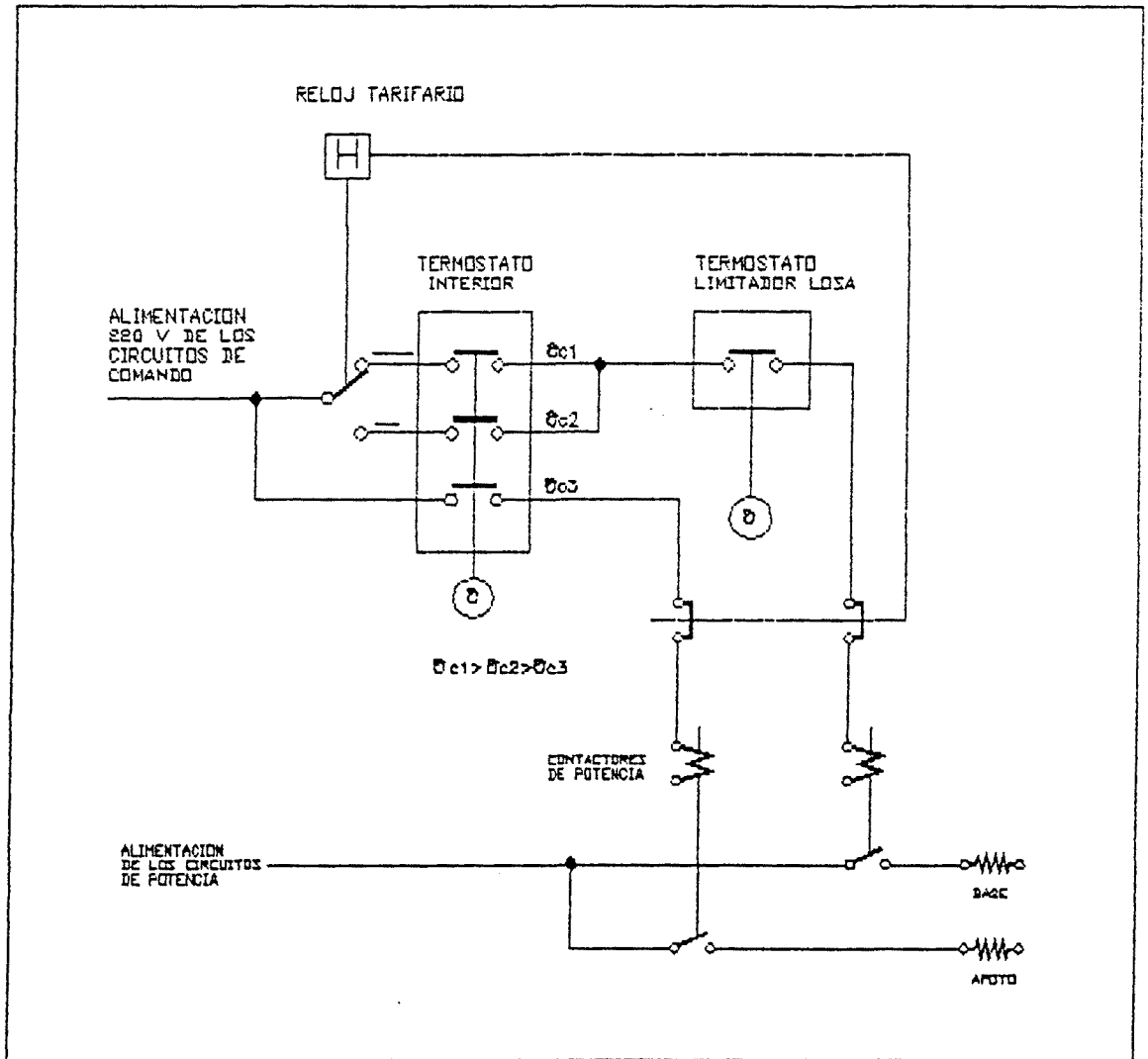
Esquema de principio de regulación de una calefacción mixta base+apoyo, con base prioritaria en función de la temperatura exterior

fig 3.16



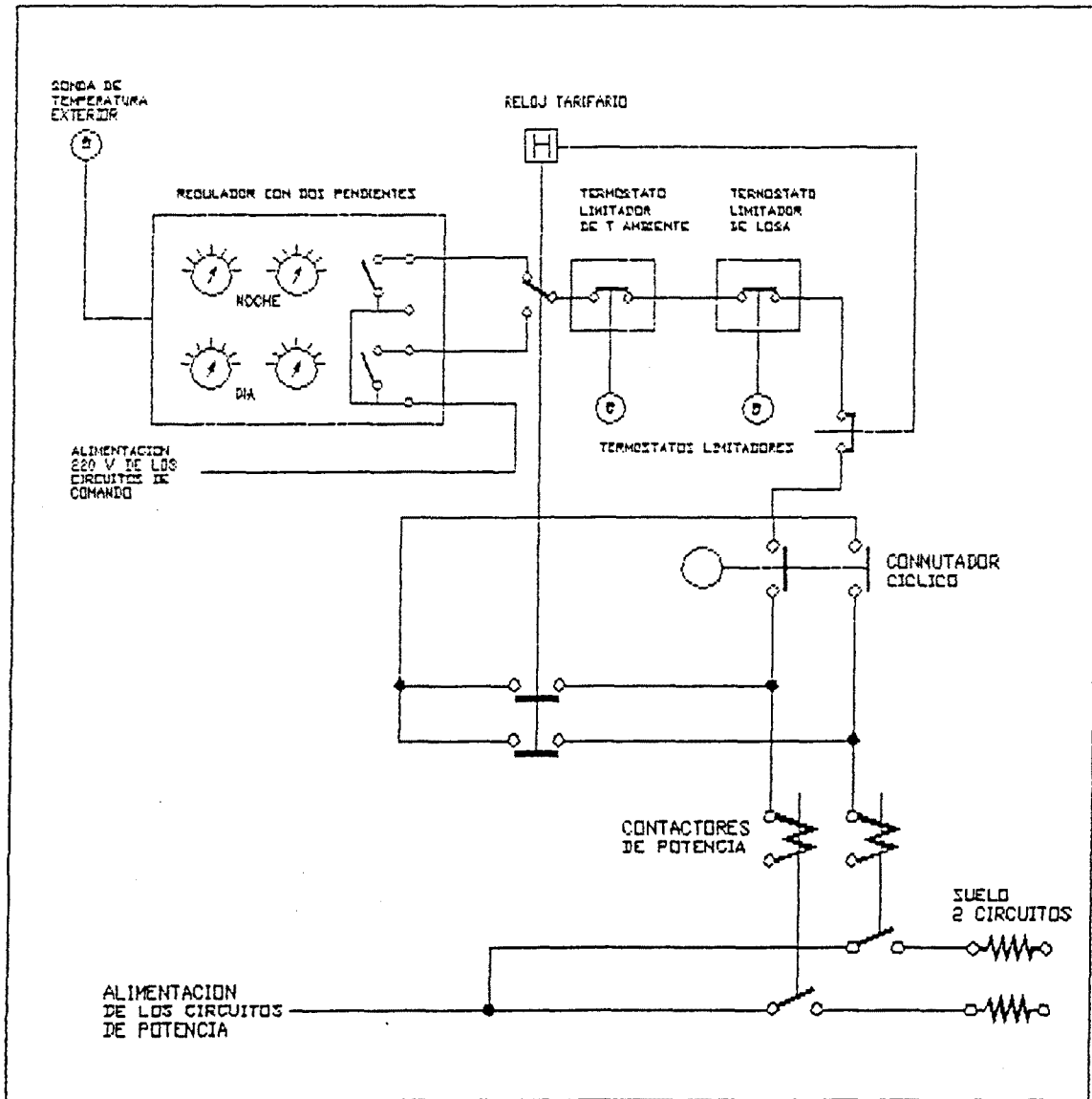
Esquema del sistema de regulación de un sistema de calefacción por suelo radiante con regulación por termostato interior con contactos decalados

fig 3.17



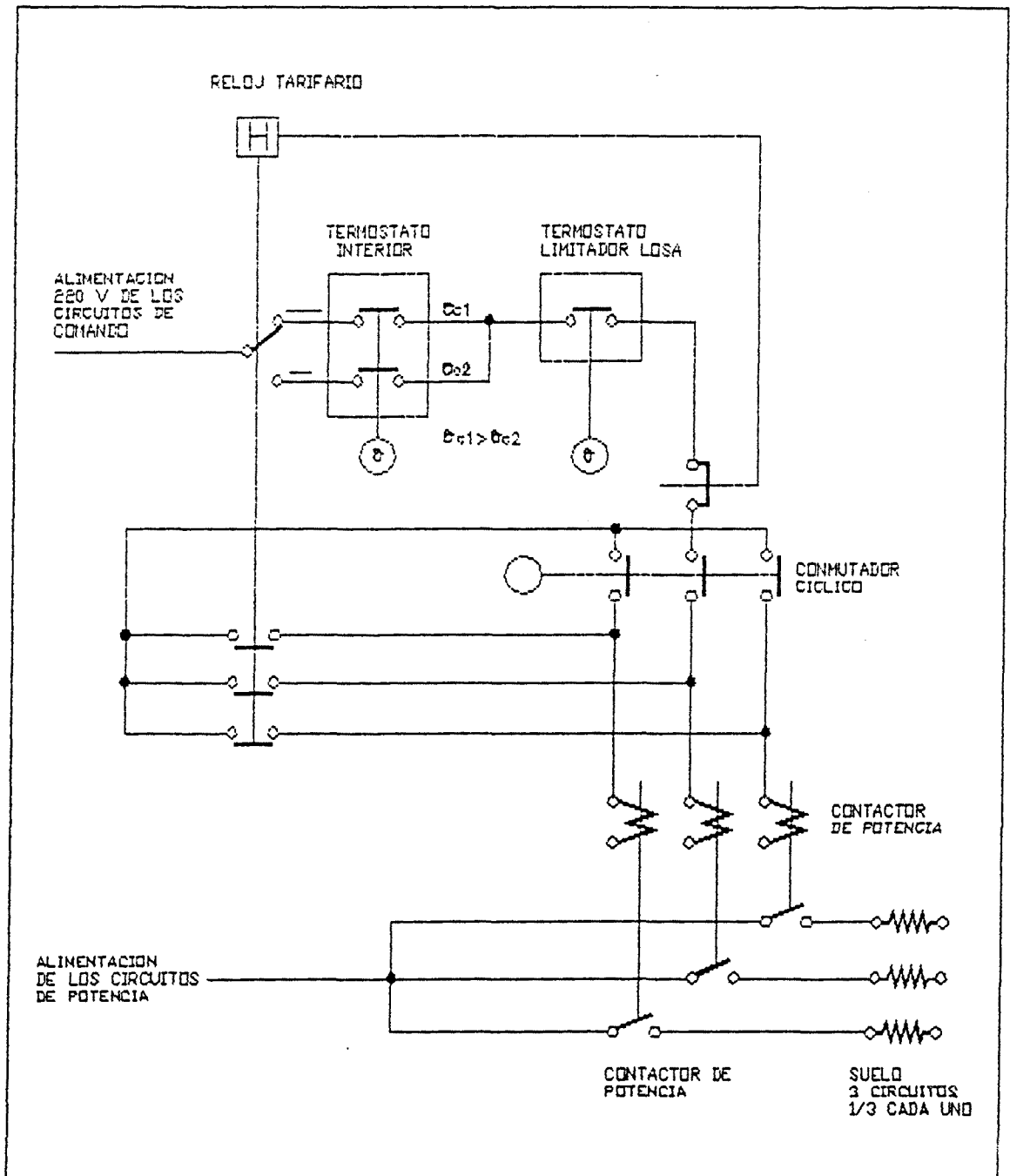
Esquema de principio de regulación de una calefacción mixta base+apoyo, con base prioritaria por termostato interior con contactos decalados

fig 3.18



Esquema de principio de regulación de un suelo calefactor con solo base en función de la temperatura exterior con relance de día a media potencia

fig 3.19



Esquema de principio de regulación de un suelo calefactor con solo base por termostato interior con contactos decalados con relance de día a un tercio de potencia.

fig 3.20

3.6.4 ADVERTENCIAS

Existe una gran gama de aparatos y los esquemas prácticos a realizar existen para cada uno de los sistemas descritos.

En todos los casos es imperativo respetar todas las seguridades mencionadas.

Una regulación manual ó pilotada por reloj podrá asegurar la puesta en régimen durante los periodos prolongados de inocupación del local, con un relance a las 22 horas de la vigilia de la vuelta a la actividad podría asegurarse la recarga térmica del suelo.

Los dispositivos descritos aseguran la prioridad de los consumos en horas valle y mediante el juego de termostatos limitadores se tiene en cuenta la recuperación de calor de las aportaciones internas.

3.7 EL PROYECTO DEL SISTEMA DE CALEFACCION

La calefacción eléctrica en el interior de locales tipo vivienda u oficina es utilizada actualmente con bastante frecuencia.

Este tipo de calefacción se aplica igualmente en los locales industriales por las ventajas que ofrece tanto desde el punto de vista de instalación como de explotación.

Este tipo de instalaciones necesita imperativamente un estudio previo (28). Este estudio requiere la intervención de una serie de factores de diferente importancia que hacen que cada caso que se produce en la práctica sea un caso especial (figura 3.21).

En efecto, según la importancia del edificio a calefactar, el grado de aislamiento, el tipo de máquinas, la densidad y el grado de actividad de mano de obra, el número de puertas que dan al exterior con su frecuencia de abertura, la instalación será en cada caso diferente (29).

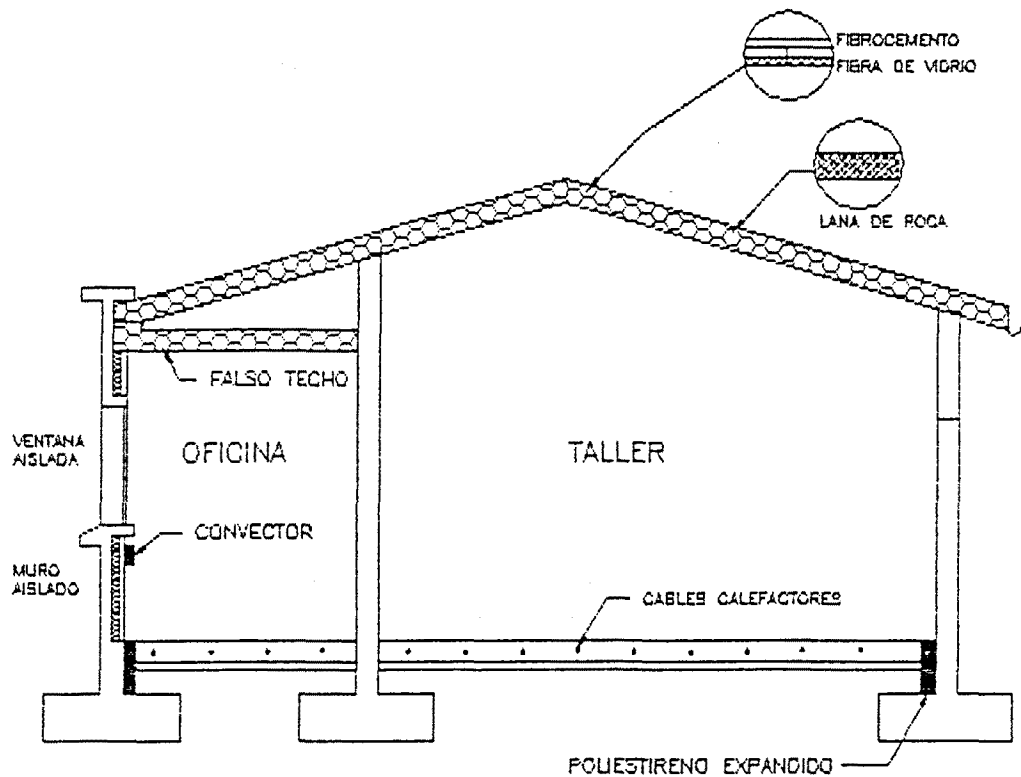
Por otra parte, según la naturaleza de la fabricación, las industrias necesitan más ó menos renovaciones de aire (existen industrias "limpias" que no producen polvo ó productos de combustión, sin embargo existen otras que al contrario de las primeras necesitan grandes volúmenes de aire nuevo) (30).

El edificio debe poseer un aislamiento en las paredes, que generalmente se realiza sea cual sea el tipo de calefacción utilizada, para evitar el calor excesivo en verano ($K \leq 1 \text{ W/m}^2\text{°C}$)

Los muros serán aislados si el coeficiente de transmisión térmica $K > 2,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Las puertas que se abran frecuentemente deberán disponer de puertas flexibles con hojas o paneles.

Cabe señalar que evidentemente será diferente calefactar un edificio nuevo de uno existente.



Edificio Industrial con los diferentes tipos de aislamientos
fig 3.21

En la elección del sistema de calefacción (31) se debe analizar el hecho de que sea un sistema realmente eficaz tanto desde una óptica funcional como económica, por ello deben analizarse sus diversos aspectos:

Ventajas funcionales

- Distribución uniforme en toda la superficie de la nave ó del edificio industrial.
- No ocupa espacio.
- Dado que trabaja a baja temperatura, no genera corrientes de aire.
- La ausencia de impulsiones de aire hace que disminuya la contaminación acústica del local.
- Se evita la estratificación del aire en la parte superior de la nave.

Ventajas económicas

- La menor temperatura del aire ambiental, produce un ahorro en las infiltraciones y un ahorro energético, derivado de las menores pérdidas en la renovación del aire ambiental.
- Dado que no tiene partes móviles no presenta problemas de mantenimiento.
- Los costes de implantación son menores que en otros sistemas de calefacción por suelo radiante.

Inconvenientes funcionales

- Es necesario poder detectar con exactitud el lugar donde se halla el cable para poder instalar la maquinaria.
- Rigidez en el horario de utilización.

Inconvenientes económicos

- No puede utilizarse fuera de las horas valle.

3.7.1 SISTEMA DE CALEFACION

En la calefacción eléctrica por Suelo Radiante debe producirse una perfecta integración eléctrica del medio calefactor en el edificio. Por ello, es necesario definir un sistema calefactor formado por:

- Elemento calefactor (cable)
- Elemento acumulador (suelo o pavimento)
- Elemento receptor (parte interior del edificio)
- Elemento disipador (envolvente del edificio)
- Conjunto de regulación (banco de datos)
(programador)

Es necesario considerar las características de cada sistema.

3.7.2 EL CABLE

La necesidad de disponer de un pavimento que en la mayoría de los casos hace de losa de cimentación para pequeña maquinaria con un mínimo de interferencias, nos obliga a utilizar elementos calefactores de mayor potencia por las siguientes razones:

- a) menor número de cables por m² de pavimento
- b) menor probabilidad de rotura
- c) mayor facilidad de detección

Por contra puede originar distribuciones no uniformes y dar lugar a focos puntuales con exceso de temperatura.

3.7.3 EL PAVIMENTO

El pavimento se puede analizar desde diferentes ángulos en función del énfasis que se ponga, prevalecerán unas cualidades u otras, como son :

- Elemento de anclaje de maquinaria
- Elemento de tránsito
- Elemento expuesto a los agentes químicos
- Elemento calefactor

En función de ellas el pavimento deberá cumplir con:

- a) Capacidad mecánica
- b) Resistencia a la abrasión
- c) Resistencia a la acción química
- d) Capacidad de acumular y ceder calor

Para dar respuesta a las necesidades anteriormente citadas los pavimentos han sido:

- Terrazo de hormigón
- Terrazo berroqueño
- Gres antiácido

En la actualidad se puede centrar el pavimento en:

- Subbase granular
- Hormigón
- Mallazo 15x15x0.5
- Recubrimiento superficial de 0.5 a 10 mm
 - Cuarzo
 - Corindon
 - Pintura epoxi
 - Pinturas epoxis autonivelantes
 - Morteros epoxi

Si se analiza el pavimento como elemento calefactor en seguida se vislumbran las misiones que debe cumplir:

en el orden calorífico propiamente dicho

- Capacidad de acumulación
- Capacidad de disipación

en el orden de mantenimiento

- Facilidad de localización de averías del cable calefactor
- Facilidad de localización del cable

3.7.4 EL EDIFICIO

El edificio en su conjunto es el elemento disipador del calor ó mejor la membrana de intercambio calorífico entre el ambiente interior y ambiente exterior (32). Se debe hacer un especial énfasis en este hecho ya que muchas de las edificaciones industriales que se proyectan en España no cumplen con lo especificado en la NBE-CT-79.

De forma especial deben considerarse:

- Aislamiento térmico
- Infiltraciones
- Renovaciones de aire de proceso

Dadas las circunstancias de los edificios industriales será de especial importancia la ubicación de las puertas y ventanas con respecto a la

orientación y a los vientos dominantes.

Debe estudiarse el edificio desde un aspecto térmico en dos formas distintas:

- a) Una primera de forma total y globalizadora para dar una visión de conjunto del sistema de calefacción y cuales deben ser los aportes totales de calor.
- b) Un estudio pormenorizado en cada una de las diferentes fases del proceso de calefacción, que son:
 - 1ª Carga del sistema
Disipación de calor al exterior
Temperaturas exteriores frías
 - 2ª Sistema en descarga
Disipación de calor al exterior
Temperatura exterior media
Incidencia de la generación interna
Incidencia de la insolación

3.7.5 EL CONJUNTO DE LA REGULACION

Realmente uno de los elementos básicos de todo sistema de calefacción por cable radiante es el sistema de regulación, en él que se han de contemplar los siguientes factores:

- Análisis estadístico de temperaturas
- Evolución de las temperaturas durante el día
- Horas de insolación en función de la temperatura nocturna
- Horas de insolación en función de la humedad

3.8 DIMENSIONADO DE UNA INSTALACION DE CABLE RADIANTE

3.8.1 CALCULO DE LA DEMANDA DE CALOR

Consiste en compensar las pérdidas del local con las aportaciones internas, si existen, y con las aportaciones del suelo, introduciendo en este la energía que se ha de restituir (33).

El cálculo de las pérdidas por las paredes (PTP) de un local de volumen V en contacto con el exterior, conduce a un coeficiente G1 de pérdidas volumétricas por 1°C de diferencia entre la temperatura interior del local calefactado y el exterior.

La evolución de una tasa horaria de renovación de aire (PPI) conduce a un valor de pérdidas volumétricas Go para 1°C de diferencia de temperatura entre el interior del local calefactado y el exterior.

El coeficiente global de pérdidas volumétricas (G) será en W/m³°C igual a :

$$G = G_1 + G_0$$

$$G = \sum \frac{KS}{V} 0,34\tau$$

Las pérdidas del local, por las paredes y debidas a las renovaciones de aire ($d' = PTP + PPI$), para una temperatura interior T_i y una temperatura exterior media T_{em} , se expresa como:

$$d(w) = GV(T_i - T_{em})$$

$$d(Kw) = GV(T_i - T_{em})$$

siendo G el coeficiente global de pérdidas.

Si se hace con todo rigor, en el caso de suelo calefactado convendría añadir la mayoración correspondiente a las fugas térmicas (Δd) (34).

Obtendríamos así las pérdidas globales del local (Dg) como:

$$Dg = d' + \Delta d$$

En la practica, podemos despreciar Δd y considerar $Dg = d'$, ya que la experiencia demuestra que d' está generalmente sobrevalorado, ya que las renovaciones de aire reales son la mayoría de las veces menores de las que se tienen en cuenta. además Δd no suele ser muy grande.

Las necesidades de calefacción del local (DC) serán iguales a las pérdidas globales (Dg) menos las aportaciones internas (A).

$$DC = Dg - A$$

3.8.2 CALCULO DE LA POTENCIA A INSTALAR

Siendo P_i la potencia instalada en la base (expresada en KW).

Durante las horas valle (8 horas) esta potencia es utilizada, cada vez que se requiera, para acumular en el suelo la energía que el local necesita.

En ciertos casos (que se analizan posteriormente) la potencia instalada P_i puede no ser suficiente para asegurar durante los días más fríos la totalidad de las necesidades en las horas punta. El complemento de energía necesaria será suministrada en las horas llano (duración 12 horas) y su valor vendrá dado por la expresión;

$$P_r = \alpha_{re} P_i$$

donde;

P_i	=	potencia instalada en la base
P_r	=	potencia instalada en el apoyo (relanzamiento)
α_{re}	=	coeficiente de relanzamiento (0-1)

La regulación deberá entonces ser tal que dé prioridad a la energía en horas valle, y solamente después, los días más fríos, utilice la energía en horas llano.

La alimentación del suelo en horas llanas se denomina el relanzamiento del suelo. El coeficiente α_{re} se denomina COEFICIENTE DE RELANZAMIENTO.

Puede estar comprendido entre 0 (si no hay relanzamiento) y 1 (si la potencia utilizada en horas valle es igual a la utilizada en horas llano).

Durante las 4 horas punta el suelo nunca se conectará a tensión.

En la práctica los valores de α_{re} que se utilizan son: 0, 1/4, 1/3, 1/2, 1.

Los días más fríos, el funcionamiento en horas valle y su eventual relanzamiento en horas llano, deberá compensar las necesidades de calefacción del local.

Siendo 8 el número de horas valle y 12 el número de horas llano, tendremos que la ENERGIA MAXIMA ACUMULABLE en un DIA para asegurar el equilibrio térmico del local es:

$$24 (Dg-A) = 8P_i + 12P_r$$

sustituyendo $P_r = \alpha_{re} P_i$

$$24 (Dg-A) = (8+12\alpha_{re})P_i$$

despejando P_i

$$P_i = \frac{24 (Dg-A)}{(8+12\alpha_{re})}$$

$$P_i = \frac{24DC}{(8+12\alpha_{re})}$$

si $\alpha_{re} = 0$ (no hay relance)

$$24 (Dg-A) = 8P_i$$

$$P_i = 3 (Dg-A) = 3DC$$

Por tanto la POTENCIA A INSTALAR EN LA BASE según los diferentes valores de α_{re} será la indicada en la TABLA 3.3.

α_{re}	0	1/4	1/3	1/2	1
Pi	3(Dg-A)	2,2(Dg-A)	2(Dg-A)	1,7(Dg-A)	1,2(Dg-A)

TABLA 3.3

3.8.3 POTENCIA LIMITE DEL SUELO. CONDICION DE CONFORT

Llamando Plímite a la POTENCIA LIMITE tendremos

$$P_{\text{limite}}(W) = S_e P_{\text{max}}$$

$$P_{\text{limite}}(KW) = \frac{S_e P_{\text{max}}}{1000}$$

siendo;

P_{max} (W/m²) la potencia máxima por m²
 S_e (m²) la superficie de suelo equivalente en cables calefactores
 $S_s = 0,9 \times$ Superficie total del suelo

Deberá cumplirse que:

$$\begin{array}{lcl} \text{Potencia instalada} & \leq & \text{Potencia limite suelo en la base para} \\ & & \text{respetar condición de confort} \\ (P_i) & \leq & (P_{\text{limite}}) = (S_e P_{\text{max}}) \end{array}$$

3.8.4. ELECCION DEL VALOR α_{re} Y DE LA POTENCIA A INSTALAR

Se distinguen 3 casos en función de los cuales se elegirá el valor de α_{re} y el valor definitivo de la potencia a instalar P_i .

PRIMER CASO

Varios valores de α_{re} satisfacen la condición imperativa de confort $P_i \leq P_{\text{limite}}$.

Para cada valor posible de α_{re} se calcula el balance entre el coste de inversión y coste explotación (teniendo en cuenta la potencia disponible).

Notese que cuando más pequeño es el coeficiente α_{re} , que corresponde a una potencia instalada mayor y a una proporción de energía consumida en horas valle, mayor es la inversión y menor es el coste de explotación.

la comparación entre las dos soluciones no lleva a la formula :

$$n = \frac{\Delta I}{\Delta C_{ext}}$$

donde:

n = tiempo de retorno (nº de años) de la inversión suplementaria

ΔI = diferencia de coste de la inversión de las dos soluciones

ΔC_{ext} = diferencia de coste de explotación de las dos soluciones.

la elección de la solución más económica implica el cálculo de los costes de explotación, y en consecuencia el de los consumos de las energías previsibles.

SEGUNDO CASO

Solo la solución $\alpha_{re} = 1$ permite satisfacer las condiciones $P_i \leq P_{limite}$.

En este caso la potencia a instalar en el suelo es igual a la potencia límite.

TERCER CASO

Ninguno de los valores de α_{re} satisface la condición $P_i \leq P_{limite}$.

En efecto, puede ocurrir que cuando las necesidades ($Dg-A$) sean grandes la condición de confort no pueda ser satisfecha ni siquiera con $\alpha_{re} = 1$ (es decir, en funcionamiento durante 20 horas los días más fríos, una potencia igual a la potencia límite).

Debe realizarse entonces un suelo equipado de la potencia máxima compatible con la condición de confort;

$$P_i = S_e P_{max}$$

y asociar a este suelo una calefacción de apoyo mediante aerotermos que serán utilizados los días más fríos, siempre fuera de horas punta (un máximo de 20 horas de las 24 diarias).

Potencia de los aerotermos a instalar;

$$\begin{aligned} 24(Dg-A) &= 20P_i + 20P_{aerot} \\ P_{aerot} &= 1,2(Dg-A) - P_i \end{aligned}$$

entendiendo que en este caso $P_i = P_{limite}$

3.9 PUNTO DE VISTA ECONOMICO

3.9.1 COSTES DE INVERSION Y DE EXPLOTACION

La justificación económica de un sistema de calefacción requiere tener en cuenta a la vez los COSTES DE INVERSION y los COSTES DE EXPLOTACION (35).

Actualmente los COSTES DE EXPLOTACION correspondientes a la

realización sobre un terreno de un suelo calefactor son del orden de:

- 2600 - 3100 pts/m² para pequeños locales (1000 - 1500 m²)
- 2100 - 2600 pts/m² para grandes locales (2000 m² ó más)

El precio comprende el suministro y la colocación de los elementos de calefacción, el suministro y la colocación de las canalizaciones de alimentación de los elementos de calefacción después del armario general de calefacción incluidos los dispositivos de protección, de comando y de regulación.

No incluye las eventuales modificaciones de la potencia del transformador MT/BT y del cuadro general de BT, en el caso de que esta modificación sea necesaria para la elección de este sistema de calefacción. En efecto, su coste dependerá mucho de la importancia de otros usos de la electricidad en la fábrica. En cualquier caso esto excepcionalmente no superará las 300 - 500 pts/m² y generalmente está comprendido entre 100 - 200 pts/m².

Los COSTES DE EXPLOTACION son evidentemente función de:

- La temperatura interior deseada
 - la situación geográfica del local a calefactar
 - del coeficiente global de pérdidas volumétricas (G)
 - de las aportaciones internas, etc.
- así, como de la importancia del relance de día.

Existen determinados tipos de fábricas donde existe un gran riesgo de incendio, es interesante por tanto destacar que cuando la calefacción sea asegurada en su totalidad por el suelo, la prima de seguros no se mayorará como ocurre en otros tipos de sistemas utilizados.

En la TABLA 3.4 se indican las tasas de mayoración aplicadas por las compañías de seguros contraincendios según el sistema de calefacción:

<u>SISTEMA DE CALEFACCION</u>	<u>TASA DE MAYORACION</u>
Calefacción por aerotermos con vapor o con aire caliente	0%
Calefacción con aire caliente	25%
Aerotermos eléctricos con seguridad incorporada	25%
Calefacción con aire caliente impulsado	50%
Aerotermos eléctricos ordinarios	50%
Calefacción ordinaria	100%
Calefacción eléctrica radiante por suelo	0%

TABLA 3.4

Según la TABLA 3.4, una prima anual de 80.000 pts para una calefacción por aire puede reducirse a 60.000 pts utilizando un sistema de calefacción eléctrica radiante por suelo.

De cara al propietario del local esto puede enfocarse de forma que la reducción de esta prima del seguro contraincendios es del orden del coste de consumo de electricidad por este sistema de calefacción, por lo que el coste del sistema de calefacción será prácticamente nulo.

3.9.2 COMO EVALUAR LOS CONSUMOS Y SU COSTE

La evolución del coste de explotación debe realizarse con ciertas aproximaciones que no cambian notablemente el resultado.

Es necesario la repartición de los consumos según la tarifa horaria.

En primera aproximación, consideraremos que todo el consumo de calefacción se efectúa en periodo de invierno, lo cual nos conducirá a un coste ligeramente sobrevalorado.

3.9.2.1 CASO DE SOLO BASE (figura 3.22)

PRIMER CASO (no se trabaja en el local los domingos)

a) Cálculo del consumo total C_t

1º- Determinamos en función de las aportaciones internas, la temperatura de no calefacción T_{nc} (para los días laborables)

$$T_{nc} = T_i - \frac{A}{GV}$$

2º- Aplicamos la fórmula

$$C_t = 24 GV \frac{6}{7} (D_j T_{nc}) + \frac{1}{7} (D_j T_i)$$

que tiene en cuenta la proporción de consumo entre los 6 días laborables $[6/7(D_j T_{nc})]$ y el domingo sin aportaciones internas $[1/7(D_j T_i)]$.

b) Cálculo del consumo en horas llana C_{hll}

1º- Determinamos la temperatura T_x a partir de la cual se efectúa el relance en horas llana

$$T_x = T_{nc} - \frac{P_i}{3GV}$$

2º- Aplicamos la fórmula

$$C_{hll} = 24GV \left[\frac{6}{7} (D_j T_x) \right]$$

que tiene en cuenta la aplicación de tarifa en horas llanas seis días sobre siete.

c) Cálculo del consumo en horas valle C_{hv}

1º- Se calcula por diferencia

$$C_{hv} = C_t + C_{hll}$$

2º- Verificación del resultado comparandolo con el obtenido por la formula:

$$C_{hv} = 24GV \left[\frac{6}{7} (D_j T_{nc} - D_j T_x) + \frac{1}{7} (D_j T_i) \right]$$

SEGUNDO CASO (no se trabaja ni sabados ni domingos)

a) Cálculo del consumo total C_t

1º- Determinamos en función de las aportaciones internas, la temperatura de no calefacción T_{nc} (para los días laborables)

$$T_{nc} = T_i - \frac{A}{GV}$$

2º- Aplicamos la formula

$$C_t = 24GV \left[\frac{5}{7} (D_j T_{nc} + \frac{2}{7} (D_j T_i)) \right]$$

que tiene en cuenta la proporción de consumo entre los 6 días laborables trabajados $[(5/7) (D_j T_{nc})]$ y el sábado y el domingo sin aportaciones internas $[(2/7) (D_j T_i)]$.

En esta fórmula, suponemos que la temperatura interior de consigna se mantiene constante todos los días, pero podríamos también dejar libre la temperatura el sábado y el domingo y conformarnos con una temperatura más baja.

b) Cálculo del consumo en horas llana C_{hll}

1º- Determinamos la temperatura T_x a partir de la cual se efectúa el relance en horas llano

$$T_x = T_{nc} - \frac{P_i}{3GV}$$

2º- Aplicamos la fórmula

$$C_{hll} = 24 GV \left[\frac{6}{7} (D_j T_x) + \frac{1}{7} (D_j T_i - D_j T_{nc}) \right]$$

que tiene en cuenta la proporción de consumos correspondientes a los relances de día durante 6 días a la semana incluido el sábado $[6/7(D_j, T_x)]$ y el suplemento de calefacción ocasionado por la ausencia de aportaciones internas $[1/7(D_j, T_i - D_j, T_{nc})]$. Suponemos que no dejamos libre la temperatura los días no trabajados. No se tiene en cuenta el domingo ya que este no comporta horas llano.

c) Cálculo del consumo en horas valle C_{hv}

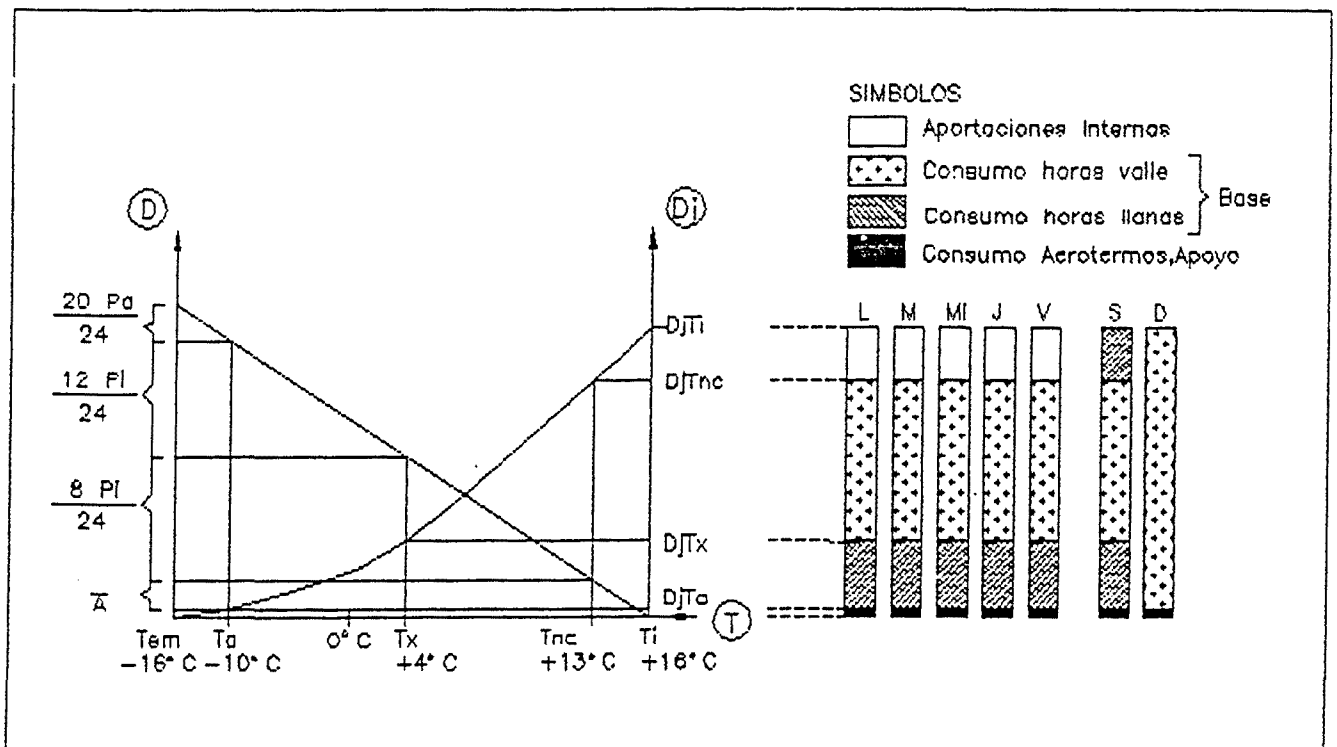
1º- Se calcula por diferencia

$$C_{hv} = C_t - C_{hll}$$

2º Verificación del resultado comparandolo con el obtenido por la formula:

$$C_{hv} = 24 GV \left[\frac{6}{7} (D_j T_{nc} - D_j T_x) + \frac{1}{7} (D_j T_i) \right]$$

en el cual el último término representa la proporción de consumo en domingo, totalmente en horas valle y sin aportaciones internas $[1/7(D_j, T_i)]$



ESQUEMA DE CONSUMOS

CASO SOLO BASE ($\alpha_{re} = 1/2$)

fig 3.22

3.9.2.2 BASE + APOYO (figura 3.23)

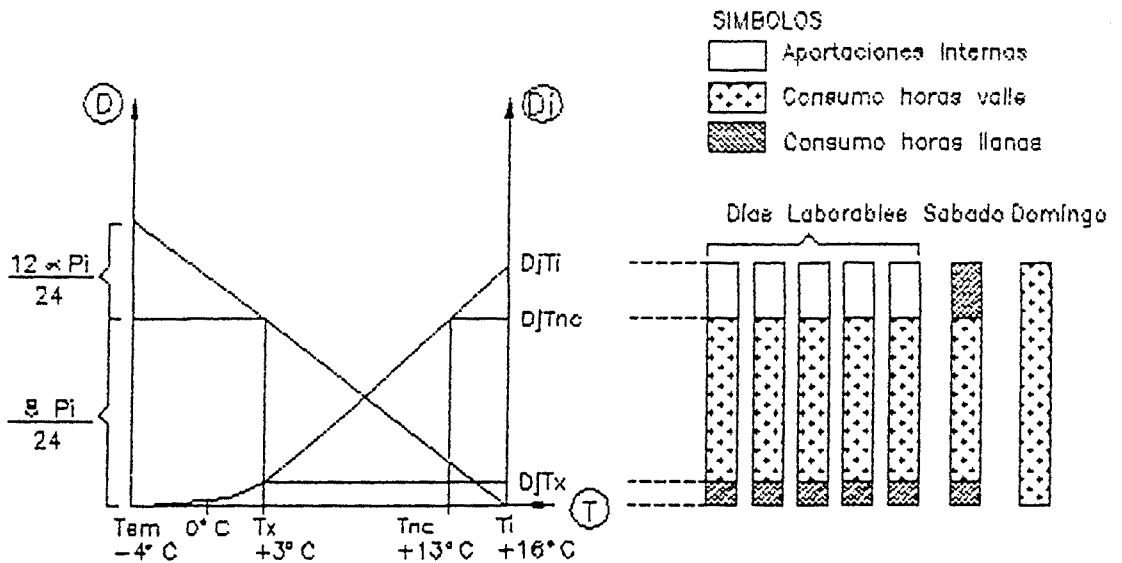
La temperatura T_{aerot} a la cual la regulación deberá conectar los aerotermos, viene dada por la fórmula:

$$T_{aerotermos} = T_{nc} - \frac{P_i}{1,2 GV}$$

y el consumo de los aerotermos ($C_{aerotermos}$) (horas llano y valle) por la fórmula:

$$C_{aerotermos} = 24 GV D_j T_{aerotermos}$$

Sin embargo, en la práctica, se puede aplicar simplemente las mismas fórmulas que en el caso de BASE SOLO (el coste a contar en horas llano con consumo nocturno eventual de los aerotermos). Esta aproximación es aceptable, pues si T_a es debil, C_{aerot} también; generalmente menos de un 1% del consumo total C_c .



ESQUEMA DE CONSUMOS BASE + APOYO
fig 3.23

3.9.2.3 ADVERTENCIAS

No se ha aplicado a estos cálculos ningún coeficiente de interrumpibilidad (no interrupción de la calefacción), ni ningún coeficiente de rendimiento, el cual será prácticamente 1.

La experiencia demuestra que aplicando estas fórmulas de cálculo (36), los consumos evaluados son, la mayoría de las veces, superiores en un 10 ó 20% a los consumos reales, debido a que las renovaciones de aire del local son generalmente inferiores a los valores que se han utilizado de base en el cálculo de las pérdidas.

3.9.2.4. DETERMINACION DEL COSTE DE LOS CONSUMOS PARA LA INDUSTRIA

Se aplica a los consumos calculados el precio correspondiente de tarifa aplicable a la industria, y teniendo en cuenta la potencia a suscribir (tarifa verde).

PRECIO FIJO

Se obtiene multiplicando la potencia contratada para la calefacción (KW) por el precio del Kilowatio.

La potencia contratada se evalua como se indica en la figura 3.24.

- Suplemento de potencia contratada que afecta al consumo de calefacción
 - La zona delimitada por las líneas ----- y ---.---.---.--- representa la potencia contratada para la fabricación y otros usos en general (ventilación, alumbrado)
 - La zona delimitada por las líneas ---.---.---.---. representa la potencia en horas valle que estamos obligados a contratar a pesar de que no la necesitamos. (esta estará disponible para la calefacción)
 - Las zonas delimitadas por las líneas -.-.-. representa la potencia necesaria para la calefacción de suelo.
 - Los trazos continuos delimitan según las zonas, la potencia a suscribir.
- Hay que destacar que las potencias de calefacción no se añaden totalmente con las otras potencias contratadas en horas llano, cuando en horas valle utilizan la potencia disponible.
- Solo los suplementos de potencia con respecto a la contratada (zona punteada) deben contabilizarse como gastos de calefacción, con los coeficientes reductores 0,4 y 0,07 previstos para la tarifa verde.

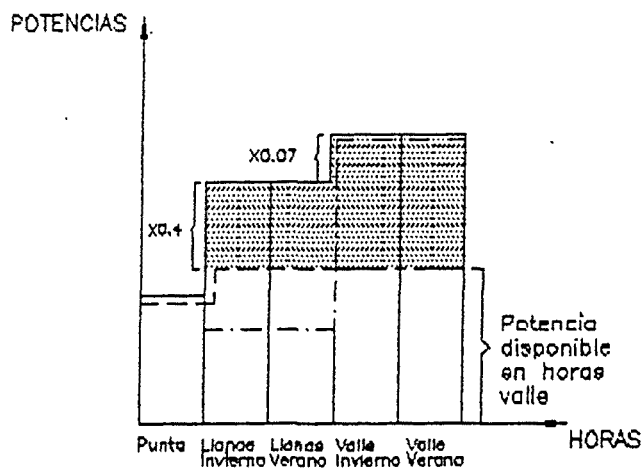


fig 3.24

COSTES PROPORCIONALES AL CONSUMO

Se obtienen multiplicando la cantidad de Kilowatios hora consumidos en cada periodo tarifario por el precio correspondiente del Kilowatio hora.

3.10 FIJACION AL SUELO DE LAS MAQUINAS

La posibilidad de fijar ó de desplazar las máquinas cuando los cables estan embebidos en el suelo en un sistema de calefacción por cable radiante, es un tema a tener en cuenta por los industriales y los contratistas.

3.10.1 CASO DE MAQUINAS PEQUEÑAS Y MEDIANAS QUE NO REQUIEREN CIMENTACION NI FOSAS

Existen numerosos sistemas que evitan los empotramientos profundos, realizados a menudo por rutina, y que son más racionales y menos costosos:

- Pletinas antivibratorias que no necesitan ningún empotramiento (pletinas Vibrachos, zapatas Mako, ..etc). Son convenientes en numerosos casos y aportan además un ahorro importante.
- Clavijas con poca profundidad de penetración (Spitroc, Rawl, Fischer, ..etc). Presentan excelentes resistencias al arrancamiento: 15 ó 20 KN por 6 cm de penetración).
- En determinados edificios de buena calidad, la losa de hormigón se realiza sobre un lecho de grava-cemento compactado. En estos casos es posible instalar los cables sin ninguna dificultad en este lecho de grava-cemento, tal como se hace en el caso de suelos semi-rígidos.

Por otra parte, el deterioro de un cable no representa un gran problema puesto que la reparación del mismo es facil y poco costosa.

3.10.2 CASO DE MAQUINAS GRANDES QUE REQUIEREN DE CIMENTACIONES O FOSAS

Su implantación es casi siempre conocida con anterioridad, y las obras necesarias para su implantación (cimentación ó fosa) se realizan antes de hormigonar.

El plan de puesta de los cables preveerá zonas libres de cables para los emplazamientos de las máquinas.

Sí, posteriormente, es necesario desplazar una máquina a pesar del coste de esta operación, será necesario desconectar el elemento situado bajo el emplazamiento previsto y realizar la fosa ó el cimiento correspondiente. Los Kilowatios perdidos en la instalación serán la mayoría de las veces compensados por las aportaciones internas de la nueva máquina.

De todas formas, es siempre útil y fácil de preveer, entre los diferentes elementos de calefacción, un cuadrículado de pequeñas dimensiones sin cables en previsión de la necesidad de realizar posteriormente cambios. Esto presenta pocos inconvenientes durante la puesta en obra y sin embargo facilita las eventuales modificaciones posteriores.

3.11 REALIZACION DE SUELOS CALEFACTORES

La realización de un suelo calefactor eléctrico no presenta dificultades. Sin embargo es necesario;

- antes de la puesta en obra, almacenar los cables al abrigo de la intemperie y no colocar ningún elemento extraño temporalmente sobre los cables.
- velar por una buena coordinación de los diferentes elementos que intervienen en la obra.
- respetar los Reglamentos en vigor y las Normas del buen hacer.

3.11.1 PRINCIPALES REGLAS A RESPETAR

LAS NORMAS

NF P 03001 (11-72)

Pliogo de Condiciones Generales aplicables a los trabajos del edificio siendo objeto de Avisos Técnicos privados.

NF C 15.100 (07-77 y add nº1)

Ejecución y mantenimiento de instalaciones eléctricas de primera categoria

NF C 15.710 (12-21)

Equipos de calefacción por conductores y cables eléctricos calefactores instalados en los suelos de hormigón. Reglas de seguridad.

UTE C 18.515 (10-75)

Prescripciones de seguridad aplicables a los trabajos de construcción, de explotación y de mantenimiento de las instalaciones y de los equipos eléctricos de los establecimientos sometidos a las disposiciones del 14 de Noviembre de 1962

Etc.

DOCUMENTOS TECNICOS UNIFICADOS DE C.S.T.B

D.T.U. Nº 65.7

Ejecución de los suelos calefactores por conductores y cables eléctricos embebidos en el hormigón.

3.11.2 VERIFICACION DEL AISLAMIENTO PERIFERICO DE LA LOSA

El aislamiento térmico más difundido es la puesta vertical de poliestireno de 4 ó 5 cm de espesor sobre 0,60 ó 1 m de altura.

La puesta en obra deberá de tener en cuenta;

- el aislamiento deberá ser continuo, en particular por el contorno interior de los pilares del edificio.
- el poliestireno deberá aflorar sobre el nivel superior de la losa.

El instalador de la calefacción deberá asegurar que estas condiciones se respetan.

3.11.3 CONTROL DE LOS ELEMENTOS DE CALEFACCION A LA RECEPCION

El instalador del sistema de calefacción procederá a las operaciones siguientes:

3.11.3.1 VERIFICACION DE LA CONTINUIDAD ELECTRICA

- Del alma del cable
- De la vaina en el caso de que exista
Los elementos que resulten defectuosos deberán ser inmediatamente devueltos para su cambio, con el fin de poder disponer de ellos cuando se realice la puesta en obra. Por tanto, será necesario;
 - recibir los elementos con suficiente antelación
 - verificar los elementos a su recepción.

3.11.3.2 MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO ENTRE EL ALMA Y LA VAINA

Esta medida debe realizarse sobre una tensión de 1250 Vóltios con una impedancia de aparatos de medida de 100 K ohmios.

Los valores de aislamiento deben estar conformes con:

- los indicados en la Norma NF C 15.170 y por los Avisos Técnicos para los cables que no están incluidos dentro de esta Norma.
- a las indicaciones de los constructores si estas son obligatorias.

3.11.3.3 MEDIDA DE LA POTENCIA DEL ELEMENTO

Medir la resistencia eléctrica del conductor y calcular su potencia bajo la tensión de empleo prevista.

Los elementos cuya potencia sea diferente en un 10% (más ó menos) de la potencia prevista en el estudio de calefacción, deberán ser revisados.

3.11.4 PUESTA EN OBRA DE LOS CABLES CALEFACTORES

3.11.4.1 PASO DE JUNTAS

La pregunta que se plantea es ¿ cuando los cables calefactores pueden atravesar las juntas de una losa de hormigón ?.

a) LOS TRES TIPOS DE JUNTAS

En un suelo formado por una losa de hormigón sobre un terreno, se distinguen tres tipos de juntas:

a1) JUNTAS DE DILATACION

Son interrupciones totales de la losa, en un intervalo de 1 ó 2 cm. En los laterales de estas juntas la armadura metálica está interrumpida (figura 3.25)

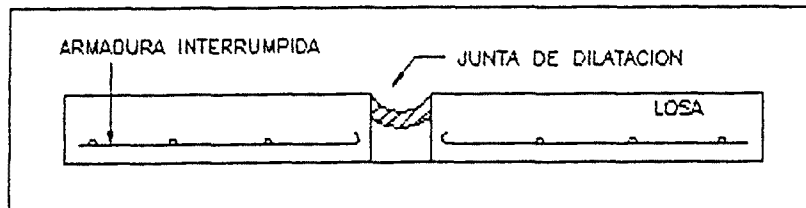


fig 3.25

a2) JUNTAS DE TRABAJO

Son las soluciones de continuidad de la losa, que aparecen al no realizarse el hormigonado de una sola vez. Las más frecuentes tienen una longitud entre 4 y 6 m. Para conseguir un buen nivelado deberán utilizarse los regles de forma adecuada (figura 3.26)

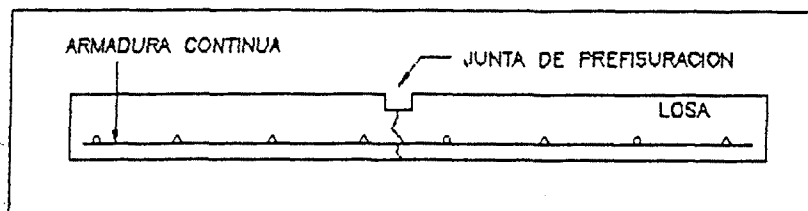


fig 3.26

- a3) **JUNTA DE PREFISURACION**
 Son los "puntos débiles" creados intencionadamente. En ocasiones se incrustan perfiles en el hormigón destinados a localizar las fisuras de contracción (figura 3.27).

Para evitar las fisuras de retracción, las juntas de trabajo y las de fisuración no deben estar separadas más de 4 ó 4,5 m.

Nota: los cables calefactores no están reflejados sobre los esquemas

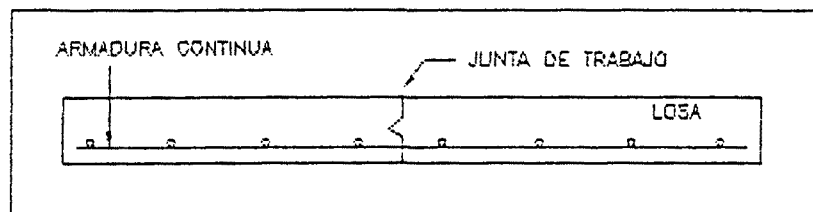


fig 3.27

- b) **¿CUANDO LOS CABLES CALEFACTORES PUEDEN ATRAVESAR LAS JUNTAS?**

El artículo 4.13 de la D.T.U. Nº 65-7 es muy claro al respecto;

- las juntas de dilatación no deben ser atravesadas por los elementos de calefacción.
- las juntas de prefisuración pueden ser atravesadas sin inconveniente.
- las juntas de trabajo pueden ser también atravesadas por los cables calefactores, pero en la práctica esto es raramente necesario.

3.11.4.2 PLAN DE PUESTA

En el momento del estudio de la instalación, el maestro de obra ó contratista deberá repartir la superficie a equipar según las zonas en las que habrá elementos de calefacción.

En el caso de Losa de Hormigón, el plan de hormigonado de la losa, en el cual deberán haberse previsto las zonas para fosas, cimentaciones, etc. servirá de base para esta repartición.

Se establece pues un plan de ejecución respetando las prescripciones del cableado, especialmente en lo que respecta al radio de curvatura del cable y a las uniones frías.

3.11.4.3 CASO DE SUELOS DE HORMIGON

a) PUESTA DE LOS CABLES

Los elementos calefactores (en tramos prefabricados ó preparados con anticipación) serán desenrollados en los emplazamientos previstos en el plan de ejecución y respetando el trazado previsto, especialmente para las uniones frías.

El cable calefactor, las conexiones y las uniones frías serán fijadas al mallazo que constituye la armadura de la losa (ó sobre el primer nivel en el caso de losa muy fuertemente armada) sea mediante pequeños elementos de material plástico, sea por sujeción mediante hilo metálico plastificado, teniendo cuidado de no deteriorar la envoltura del cable por una fijación demasiado enérgica.

Los cables estarán a 8 cm como mínimo del nivel superior de la losa, y a 2 cm como mínimo del nivel inferior. El objetivo será mantener los cables a la separación y a la cota deseada durante el hormigonado.

b) VERIFICACIONES ANTES DE LA PUESTA EN OBRA

El instalador del sistema de calefacción deberá realizar para todos los elementos de calefacción correspondientes a una jornada de hormigonado, las siguientes verificaciones:

b1) CASO DE CABLES CON PANTALLA METALICA PUESTA A TIERRA

- Aislamiento entre el alma y la pantalla; este aislamiento medido con un megohmetro de corriente continua sobre una tensión de 500 V como mínimo y de 1550 V como máximo, no deberá ser inferior a $1 M\Omega$.
- Continuidad del alma y de la vaina metálica; medida de la resistencia del alma que debe corresponder a la potencia a instalar como máximo con una oscilación de un 10%.
- Aislamiento del cable con relación a la masa del edificio. Deberá ser superior a 1000 ohmios por voltio de tensión nominal para una longitud de cable de 100 m, y en cualquier caso superior a $250 K\Omega$ por 100 m. Los valores prescritos para las longitudes superiores están admitidos como inversamente proporcionales a la longitud.

b2) CASO DE CABLES DE ALUMINIO ALIMENTADOS A MUY BAJA TENSION

- Continuidad por medida de la resistencia del alma
- Aislamiento del cable en relación a la masa del edificio (tal como se ha indicado en el caso anterior).

En los dos casos es conveniente consignar por escrito sobre un Pliego Especial los resultados de estas medidas, para obtener los valores por separado y facilitar las verificaciones ulteriores, que serán igualmente consignadas por escrito.

b) VERIFICACIONES DURANTE EL HORMIGONADO

el instalador controlará en continuo, durante el hormigonado de la losa:

- El aislamiento del alma en relación a la masa del edificio ó en relación a la pantalla metálica, según el caso.
- La continuidad del alma
- Eventualmente la continuidad de la vaina metálica, mediante un aparato adecuado: Testador de cable; detector conectado a las extremidades de los cables y con un sistema de alarma sonora, que dará una señal cuando un cable sea dañado (defecto del aislamiento ó rotura del cable)

En caso de detectar un defecto durante el hormigonado, en esta zona deberá colocarse una placa de poliestireno y rellenar de hormigón con el fin de proceder con facilidad en la reparación posterior.

De todas formas, en los edificios industriales, es raro constatar más de 1 defecto producido por el hormigonado por 1000 m² de suelo. La experiencia demuestra que en una obra bien realizada el número de defectos es inferior a 1 por cada 10000 m² de suelo.

Deberá sensibilizarse al equipo instalador sobre ciertas precauciones:

- En el caso de que las máquinas tengan que circular sobre los cables, deberán hacerlo con extrema precaución. Hay que evitar en lo posible que las máquinas tengan que maniobrar sobre los cables.
- Evitar el uso de útiles cortantes para repartir el hormigón.
- Vibrar bien el hormigón para asegurar un embebido satisfactorio del cable, de las uniones frías y de las fundas destinadas a recibir las sondas termostáticas del suelo.

3.11.4.4 CASO DE SUELOS SEMIRIGIDOS

Una vez que está compactada la primera capa de grava-cemento, se colocarán en obra los cables calefactores en los emplazamientos previstos en el plan de ejecución y respetando el trazado previsto, especialmente en lo que se refiere a las uniones frías.

Los tramos serán fijados a esta primera capa mediante varillas a las cuales se atarán las cintas que determinarán la separación de las espiras. Posteriormente se extenderá la segunda capa de cemento.

Al igual que en el caso de los suelos de hormigón, el aislamiento y continuidad del cable serán verificados en continua durante esta operación.

la capa superficial se realizará a continuación, con las mismas condiciones de un suelo no calefactor.

3.11.5 PRECAUCIONES CONCERNIENTES A LAS CONEXIONES ELECTRICAS

- a) Los cables de alimentación se dispondrán a una distancia suficiente de los cables calefactores. las cajas de conexión deberán ser accesibles (NF C 15.100).
- b) Proteger cada circuito con un fusible situado lo más cerca posible de la posición del suelo calefactor.
- c) El circuito de alimentación comprenderá igualmente:
 - un aparato de corte general del circuito de calefacción
 - los desconectores de comandosEstos desconectores serán comandados por la regulación.
- d) Todas las partes del circuito de alimentación estarán conformes con la Norma NF C 15.100 y con la D.T.U. Nº 65.7

3.12 PUESTA EN SERVICIO Y MANTENIMIENTO DE LAS INSTALACIONES

3.12.1 VERIFICACION DE LA REGULACION ANTES DE LA PUESTA EN SERVICIO

NOCIONES DEL REGLAJE DE LA REGULACION

PRINCIPIO DE DECALAJE. DOS CONSIGNAS, DIA Y NOCHE

Cuando, los días más fríos, es necesario una recarga de día, son necesario dos parejas de consignas; (origen, pendiente) una de noche y una de día.

Las temperaturas exteriores medias (T_{em}) vistas por los reguladores de noche y de día difieren de la temperatura media diaria.

Sin embargo, para un lugar dado, la amplitud de las variaciones de temperatura diurna en invierno cambia relativamente poco de un día a otro.

Para construir la curva de regulación, es posible basarse en la amplitud más frecuente.

CONTROL DE FUNCIONAMIENTO

Antes de la primera puesta en calefacción, la empresa adjudicataria procederá a controlar la puesta en servicio de la regulación. En particular, verificará:

- a) El coste de la calefacción durante las horas punta, comandado por el reloj.
- b) El buen funcionamiento del limitador de la losa
- c) El buen funcionamiento de los termostatos interiores y de sus reglajes.
- d) Eventualmente el buen funcionamiento de reguladores y de sus reglajes.
- e) Eventualmente el buen funcionamiento de la sonda exterior.

3.12.2 PUESTA EN CALEFACCION

Después de los controles, la puesta en calefacción de la losa se realizará conforme a lo descrito por la D.T.U. Nº 65.7; donde se verifica principalmente:

- Las potencias, medidas a partir de la tensión de utilización entre fase y neutro y de las intensidades destinadas a cada fase, según el régimen de funcionamiento: horas valle, horas llano y potencia nula en horas punta.
- Equilibrado de las fases
- Los movimientos de aire imputables al aporte dinámico eventual.

3.12.3 ENTREGA EN MANO. MODO DE EMPLEO

Es indispensable que se disponga de un documento explicando claramente el funcionamiento del sistema de regulación y la puesta en marcha.

Se informará al usuario sobre el tiempo necesario para cambio de régimen de temperatura interior cuando este cambio es causa de la inercia del edificio; no es necesario, por ejemplo, interrumpir la calefacción ó disminuir fuertemente su régimen durante los fines de semana, pues la reposición de temperatura hace intervenir un factor de tiempo importante.

No hay que olvidar precisar, llegado el caso, el espesor de la losa de fijación y la profundidad máxima de los agujeros que se pueden realizar sin riesgo de deteriorar los elementos calefaccion.

3.12.4 VERIFICACION DEL REGLAJE DE LA CALEFACCION

Estas verificaciones y correcciones consisten en :

- a) Medir las desviaciones entre las temperaturas de funcionamiento teóricas de día y de noche prevista en el estudio (8 horas de noche y 12 α_{Te} de día).
- b) Suprimir las desviaciones

Medidas a efectuar;

Durante unos días consecutivos, en el transcurso de los meses de invierno, cuando la temperatura exterior es inferior a la temperatura de relance T_x , mediremos:

- La temperatura exterior, con un registrador de temperatura situado si es posible en las proximidades de la sonda del regulador (para obtener la temperatura media diaria tomaremos la media de temperaturas relevantes cada 3 horas)
- El número de horas de funcionamiento de la losa en horas valle y en horas llano, que será reflejado cada día sobre los contadores horarios situados en los bornes del regulador.

3.12.5 MANTENIMIENTO Y VERIFICACIONES

Los suelos calefactores eléctricos necesitan un mantenimiento mínimo para mantener la regularidad de la calefacción y un coste de explotación mínimo.

Las anomalías de funcionamiento son fácilmente detectables:

- por el nivel de confort
- por el análisis de los consumos

Se distinguen tres métodos de detección de anomalías:

1- EXAMEN DE LAS FACTURAS

Los consumos anuales descontando los consumos medios del verano y calculados sobre 12 meses, dan los consumos de calefacción y de alumbrado.

2- REGISTRO DEL TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACION

Registro del tiempo de funcionamiento de la instalación por un contador horario.

3- VALORACION DE LOS CONSUMOS DE CALEFACCION

Es conveniente realizar cada año antes del invierno (en septiembre) una verificación de la instalación; que puede consistir en:

- bloqueo de las conexiones
- estado de los contactos de potencia y de protección
- medida de la potencia; en horas valle y en horas llano
- verificación de la regulación

A continuación se indican las verificaciones a realizar y sus frecuencias. Estos datos son a título orientativo, ya que pueden variar según la importancia de la instalación y de su complejidad.

OPERACIONES DE MANTENIMIENTO Y VERIFICACIONES DE UN SUELO CALEFACTOR

VERIFICACIONES A EFECTUAR

Control manual de la alimentación del suelo calefactor.

Esta disposición es posible prácticamente en todas las regulaciones.

- a la puesta en servicio de la instalación

Verificación de la alimentación de cada capa calefactora mediante pinza amperimétrica.

- a la puesta en servicio de la instalación
- anualmente

Verificación de la regulación según las prescripciones indicadas por el constructor.

- a la puesta en servicio de la instalación
- anualmente

Verificación del estado de los aparatos de maniobras y de seguridad, especialmente los contactos de los contactores de alimentación.

- anualmente

Disparo del interruptor diferencial mediante la creación de un fallo artificial.

- a la puesta en servicio de la instalación
- anualmente

Verificación del funcionamiento de las señalizaciones permanentes según la posición de los interruptores diferenciales.

- a la puesta en servicio de la instalación
- anualmente

Verificación del estado de la lámpara de señalización (botón de prueba de las lámparas en el interior del armario).

- mensualmente, durante la estación de calefacción

Ensayo del dispositivo de seguridad de limitación de temperatura del plano calefactor creando artificialmente un aumento de temperatura.

- anualmente

Verificación de la energía registrada por los contadores, comparación de los consumos según los grados día reales y retoque de la regulación.

- el primer año; mensualmente
- después del primer año; anualmente

3.12.6 PATOLOGIAS

Aunque la realización de un suelo calefactor es supervisada, se plantean dos cuestiones referentes a la duración de las instalaciones:

- ¿las losa de hormigón no se fisuran y se degradan debido a la presencia de cables calefactores?
- ¿los cables calefactores no se deterioran a lo largo del tiempo?

la experiencia demuestra que no es así.

3.12.6.1 FISURACIONES

Las losas en las que se encuentran incorporados los cables calefactores no se fisuran ni más ni menos que las que no llevan incorporadas estos cables. Por otra parte, el calentamiento de estos cables en invierno es menor que el producido en verano por la presencia del sol.

De hecho, las fisuras constatadas debidas a la retracción del hormigón resultan de:

- sea de la puesta en obra del hormigón; calidad del cemento empleado, una relación agua/cemento muy fuerte, infiltraciones de agua en el terreno, asentamiento del terreno, etc.
- sea de un alejamiento importante entre las juntas de trabajo y las juntas de prefisuración, que no debe sobrepasar los 4 ó 4,5 m.

3.12.6.2 DURACION DE LOS CABLES

En el momento de la puesta en obra del hormigón es cuando el riesgo de deterioro de los cables es mayor.

Un buen control durante el hormigonado de la losa permite limitar este riesgo a menos de 1 incidente por cada 1000 m², y frecuentemente a menos de 1 incidente por cada 10000 m².

En caso de deterioro de un cable calefactor durante la puesta en obra, la detección a través del dispositivo automático de control del aislamiento será inmediato, y la reparación del mismo se efectúa fácilmente antes del secado del hormigón.

Puede ocurrir que se detecte un defecto posteriormente, por ejemplo durante las verificaciones antes de la puesta en servicio. Este tipo de incidente (debido a un defecto de fabricación del cable ó a un deterioro durante la obra que no haya sido detectado por los diferentes controles) no suele ser frecuente.

La localización del cable defectuoso se puede realizar sin grandes dificultades y la reparación del mismo es sencilla y poco costosa (37).

Si a pesar de tomar las precauciones pertinentes, aparecen defectos por las causas que se señalan a continuación (TABLA 3.5), es posible su detección y su reparación.

DEFECTOS EVENTUALES. CUSAS Y REMEDIOS		
CAUSA	REMEDIO PREVENTIVO	REMEDIO CURATIVO
Incidente o negligencia durante la puesta en obra	Aparato automático de vigilancia	
Percance posterior		Reparación de la posición del cable por personal especializado
Maquinas (cimentaciones o anclajes)	Localización de los cables Longitud de los anclajes compatible con el espesor de recubrimiento	
Bolsas de aire en el hormigón	Vibración enérgica del hormigón	
Aparición tardía de un defecto en el cable a pesar de haber superado los controles previos		Localización del defecto y reparación

TABLA 3.5

3.13 FIRMAS COMERCIALES

3.13.1 CABLES CALEFACTORES

3.13.1.1 CABLES CALEFACTORES CON AISLAMIENTO MINERAL

Potencia lineal máxima 33 W/m

- Pyrotenax (Cables de Lyon)
- Deléage (British Insulated Callender's Cables Limited,

Londres)

3.13.1.2 CABLES CON PANTALLA METALICA Y ENVOLVENTE DE AISLAMIENTO ORGANICO

Potencia lineal máxima 33 W/m

- Tressitherm (Tréfirmétaux)
Aviso Técnico Nº 14/7504
- Senowatt (Calwatt, Câbleries de Sens, C.G.F.) Aviso Técnico Nº 14/7614
- Flextherm Type 5001 (Dätwyler, Suiza)
Aviso Técnico Nº 14/7717
- Cablossol (Société Tresco)
Aviso Técnico Nº 14/7945

3.13.1.3 CABLES DE ALUMINIO ALIMENTADOS A MUY BAJA TENSION

Potencia lineal máxima 35 W/m

- 100/1,6 Calendal (Société Aluminium Péchiney)
Aviso Técnico Nº 14/7503

3.13.2 REGULADORES

TIPO	MARCA
Pirosol G2	Georgin
Telec CB 75	Sidetel
RCO 10	Jouvenel et Cordier
LS 22 y 11	Process Control
Delta Theta	Delta-Dore
Optimiseur Re 01	Stafa Control System

3.13.3 MATERIALES DE CONTROL DURANTE LA PUESTA EN OBRA

Controladores del nivel de aislamiento en continuo con alarma sonora:

- Chauvin Arnoux
- Conivis (Deléage)

3.13.4 REPARACION

Las empresas siguientes estan capacitadas para detectar defectos:

- APAUTE
- SOCOTEC
- LABORATORIO NACIONAL DE ENSAYOS
- CHAPEL REPROGRAPHIE

En principio, los fabricantes de cables pueden efectuar la detección de los defectos y su reparación.

3.14 TARIFAS ELECTRICAS

3.14.1 COMPOSICION GENERAL DE LAS TARIFAS

Las tarifas de energía eléctrica de estructura binómica aplicables por las empresas acogidas al Sistema Internacional de Facturación de Energía Eléctrica (SIFE), están compuestas por un término de potencia que será función de la potencia contratada y demandada por el usuario, y un término de energía, proporcional a la energía consumida y medida por contador, que constituyen la tarifa básica, las cuales se afectarán, cuando proceda, por recargos o bonificaciones como consecuencia de la discriminación horaria, de la interrumpibilidad y estacionalidad y del factor de forma, como complementos de la tarifa básica.

La suma de los dos términos mencionados y de los citados complementos, función de la modulación de la carga y de la energía reactiva, constituye, a todos los efectos, el precio tope de tarifa autorizado por el Ministerio de Industria y Energía.

3.14.2 COMPLEMENTOS DE TARIFA Y DISCRIMINACION HORARIA

Existen dos tipos de periodos horarios.

PERIODOS HORARIOS Y ZONAS DE APLICACION

TIPO A

Considera, para todos los días de la semana, los periodos horarios siguientes:

HORAS PUNTA	4 horas
HORAS LLANO	12 horas
HORAS VALLE	8 horas

TIPO B

los abonados que tengan instalados contadores adecuados para ello pueden optar por la discriminación horaria siguiente:

HORAS PUNTA	6 horas en día laborable
HORAS LLANO	10 horas en día laborable
HORAS VALLE	8 horas en día laborable y 24 horas en sábado y festivo de ámbito nacional

El sector eléctrico se divide en zonas geográficas a efectos de aplicación de la discriminación horaria.

En la TABLA 3.6 se indican los Recargos y Descuentos por Discriminación Horaria.

		PERIODO HORARIO		
		HORAS PUNTA	HORAS LLANO	HORAS VALLE
TIPO A	DURACION	4 horas/día	12 horas/día	8 horas/día
	DESCUENTO RECARGO	+ 70%		-43%
TIPO B	DURACION	6 horas/día laborables	10 horas/día laborables	8 horas/día laborables 24 horas /día sábado y domingo
	DESCUENTO RECARGO	100 %		-43%

Recargos y descuentos por discriminación horaria .

TABLA 3.6

3.14.3 APROVECHAMIENTO DE LA TARIFA ELECTRICA POR EL SISTEMA DE SUELO CALEFACTOR

La tarificación del suministro de energía eléctrica en media tensión se caracteriza por los costes respectivos de la POTENCIA FACTURADA y de la ENERGIA CONSUMIDA que depende de los periodos tarifarios.

La tarifa comprende un precio fijo anual y los precios de los Kilowatios/hora diferentes según los meses y las horas del día (estas diferencias reflejan las diferencias del precio de coste del Kwh).

La PRIMA FIJA es tanto menor cuando más se utiliza la potencia en horas valle y en horas llano, y el PRECIO de los KWh es tanto menor cuanto más se utiliza la potencia en horas valle.

El suelo calefactor sobre terreno respeta estas consideraciones económicas de explotación; su poder de acumulación permite:

- utilizar con prioridad la energía a la potencia máxima durante las horas valle.
- evitar el consumo durante las horas punta y eventualmente durante las horas llanas.
- acumular durante la noche la potencia necesaria de calor durante el día.

Para garantizar una buena sincronización entre los periodos tarifarios y los usos, la instalación de calefacción deberá disponer de un reloj tarifario de la empresa eléctrica suministradora de energía, el cual pilotará:

- desconexión del suelo calefactor y del apoyo durante las horas punta.
- conexión a la plena potencia instalada durante las horas valle.
- conexión, si es necesario, de la potencia de relance durante el resto del tiempo.

3.14.4 EVOLUCION DE LAS TARIFAS ELECTRICAS.PRECIO DE LA ELECTRICIDAD

Al analizar como ha evolucionado el precio de la electricidad en la Industria y en la vivienda (figuras 3.28 y 3.29 respectivamente) en los diferentes países en referencia a España, distinguiendo para cada uno de ellos 4 consumos diferentes:

- En uso Residencial

C_{R1} : 1200 Kwh/año
 C_{R2} : 3500 Kwh/año
 C_{R3} : 7500 Kwh/año
 de los cuales 2500 son de noche
 C_{R4} : 13000 Kwh/año
 de los cuales 5000 son de noche

- En la Industria

C_{I1} : 100 Kw x 1600 h
 C_{I2} : 1000 Kw x 2500 h
 C_{I3} : 4000 Kw x 4000 h
 C_{I4} : 10000 Kw x 5000 h

Se observa que, excepto en países como Grecia y Portugal, tanto en uso industrial como residencial el coste de la electricidad ha sido considerablemente superior en España en referencia al resto de países. Actualmente la mejora de la política tarifaria en España ha hecho que estas diferencias sean menos acusadas.

PRECIO DE LA ELECTRICIDAD PARA LA INDUSTRIA. ESPAÑA BASE 100
 F1:100KWx1600h; F2:1000KWx2500h; F3:4000KWx400h; F4:10000KWx5000h

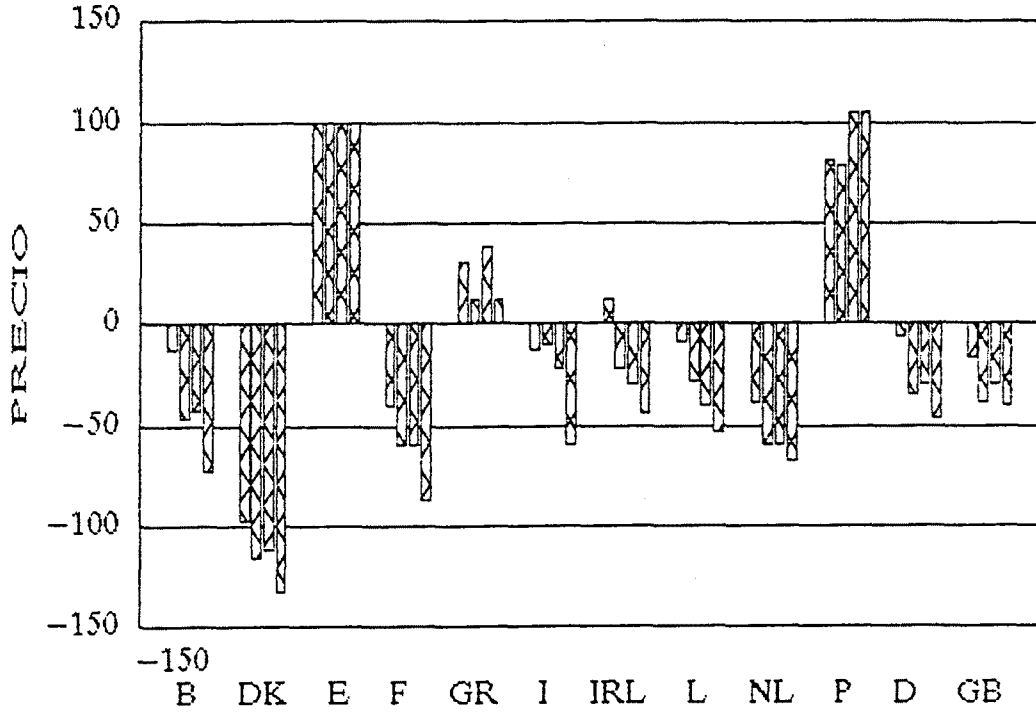


fig 3.28

PRECIO DE LA ELECTRICIDAD RESIDENCIAL ESPAÑA BASE 100
 C1:1200KWh/año; C2:3500KWh/año; C3:7500KWh/año; C4:13000KWh/año

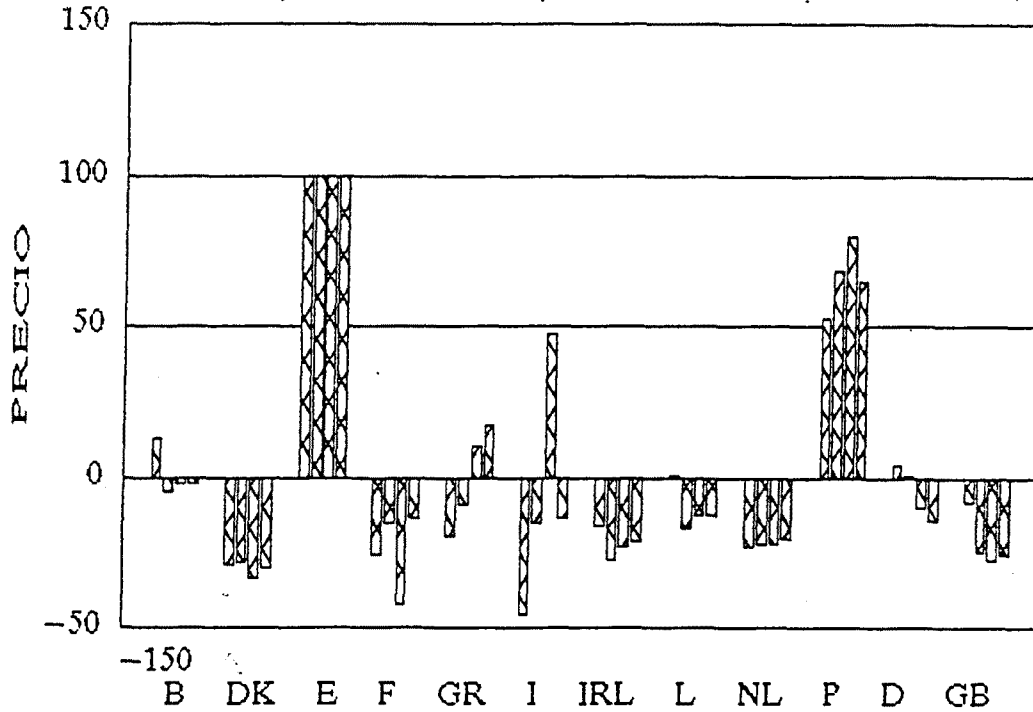


fig 3.29

3.14.5 ANALISIS DEL CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA P.I.B.

En un análisis comparativo de los consumos de energía eléctrica en el año 1988 para los diferentes países de la OCDE, cabe destacar la clara correspondencia entre el Producto Nacional Bruto por habitante y el consumo de energía eléctrica por habitante y año de cada país, como queda reflejado en la TABLA 3.6.

PAISES	P.I.B (\$ USA)	CONSUMO ELECTRICIDAD (Kwh)
Estados unidos	17.935	10.418
Canada	15.137	16.321
Suiza	15.077	6.657
Noruega	15.032	22.085
Islandia	13.360	16.142
Suecia	12.847	15.271
Finlandia	12.212	11.249
Japon	12.208	5.483
Dinamarca	11.517	5.511
R.F Alemana	10.949	6.294
Australia	10.636	7.252
Luxemburgo	10.400	10.813
Francia	10.109	5.542
Austria	9.217	5.392
Países Bajos	9.035	4.755
Reino Unido	8.984	4.806
Belgica	8.731	5.613
Italia	8.132	3.524
Nueva Zelanda	6.765	7.866
Irlanda	5.709	3.059
ESPAÑA	4.821	3.015
Grecia	3.496	2.796
Portugal	2.281	2.053
Turquia	1.174	726

TABLA 3.6

Las cifras de la TABLA 3.6 reflejan que el crecimiento del consumo de energía eléctrica será importante en los años sucesivos, a medida que evoluciona el nivel económico del país.

3.14.6 ANALISIS DEL COSTE DE LA ENERGIA ELECTRICA

En un análisis comparativo de los diversos tipos de tarificación existentes en la C.E.E. , se observa de forma pronunciada la diferencia existente entre España y otros países mediterráneos como Francia e Italia, como se refleja en las TABLAS 3.7, 3.8 Y 3.9.

ESPAÑA						
	HORAS PUNTA	HORAS LLANO	HORAS VALLE	HORAS PUNTA	HORAS LLANO	HORAS VALLE
	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano
PTS/(kwh)	16,64	9,79	5,58	16,64	9,79	5,58
H/año	730	2190	1460	730	2190	1460
%	8,3	25	16,6	8,3	25	16,6

TABLA 3.7

FRANCIA						
	HORAS PUNTA	HORAS LLANO	HORAS VALLE	HORAS PUNTA	HORAS LLANO	HORAS VALLE
	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano
CFF/kwh	109,12	57,19	30,05		17,94	10,43
H/año	309	1762	1153		2935	2201
%	3,5	20,1	17,7		33,5	25,1

CFF = centavo de franco frances

TABLA 3.8

ITALIA						
	HORAS PUNTA	HORAS LLANO	HORAS VALLE	HORAS PUNTA	HORAS LLANO	HORAS VALLE
	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano
L/Kwh	113,45	78,95	8,90		37,25	8,90
H/año	600	1800	2688		1760	1912
%	6,84	20,5	30,6		20,1	21,8

El modelo italiano sufre un incremento según el Kw-h mes , que para el caso presentado es de 14,60 L/Kw-h, puesto que se supera el índice de 250 Kw-h/mes; sino se supera el sobreprecio será de 44,10 L/Kw-h.

TABLA 3.9

Es posible preveer de forma general, que en un futuro debería abrirse un camino a fin de reducir al máximo el diferencial existente entre España y el resto de los países.

Frente al Mercado Unico Europeo, es obvio la necesidad de orientar el tipo de inversión a realizar por parte de la Industria Española en cuanto al tema que afecta directamente a los costos de energía, así como marcar unas pautas sobre la conveniencia del uso de energía eléctrica frente a otros tipos de energía.

3.15 NORMATIVA

NORMATIVA ESPAÑOLA

En España no existe una Normativa específica para este tipo de instalaciones.

Como Normas generales se puede recurrir a las Normas UNE:

- UNE 100012 Climatización. Bases para el Proyecto. Zona de Bienestar
- UNE 100013 Climatización. Bases para el Proyecto. Condiciones Interiores de Cálculo.
- UNE 20-370-74 Que hacen referencia a los cables calefactores
- UNE 21-117-74
- UNE 20-345-79
- UNE 21-155-79 Cables calefactores de locales y prevención de formación de hielo

Otra Normativa de utilidad:

- NBE-CT-79 Norma Básica sobre Condiciones Térmicas en los Edificios
- IT.IC-81 Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y A.C.S. e Instrucciones Técnicas Complementarias.
- MI.BT Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión. Instrucción MT-BT 33.1.6 "Cables de Caldeo" y todas las instrucciones que indirectamente hacen referencia a la instalación de los mismos.
- NTE-RSI-74 Normas tecnológicas sobre revestimientos de suelos industriales

Como Normativa específica para este tipo de instalaciones, está la **NORMATIVA FRANCESA:**

De aplicación obligatoria: Leyes, Decretos, Ordenes dispuestas por los poderes públicos.

De aplicación no obligatoria pero que estan homologadas por un Decreto ó una Orden ó que son explícitamente citadas en el Pliego de Condiciones Técnicas: Normas, DTU (Pliego de Condiciones y Reglas de Cálculo), Avisos Técnicos sobre los materiales, etc.

3.15.1 NORMAS

Estas Normas son publicadas por la Union Technique de l'Electricité (UTE), pero están también disponibles a través de l'Association Francaise de Normalisation (AFNOR)

- NF C 15.100
Installations électriques á basse tension- Régles (Féurier 1981)
- NF C 32.330
Conducteurs et câbles isolés pour installations et equipements - Equipements de chauffage par câbles chauffants destinés á être incorporés dans les parois des bâtiments (Mars 1985)
- NF C 8.515
Prescriptions de securité applicables aux travaux de construction, d'exploitation et d'entretien des installations et équipements électriques des établissements soumis aux dispositions du 14 novembre 1962.
- NF C 14.100
Installations de branchements de première catégorie
- NF C 12.100
Publiée sous forme de décret N°62-1454 du 14 novembre 1962 (JO du 5 décembre 1962)

- NF C 73.200
Règles generales de sécurité des apperails électrodomestiques chauffants
- NF C 73.250
Appareils électrodomestiques chauffants- Appareils de chauffage des locaux et appareils analogues- Règles de sécurité
- NF C 73.251
Appareils électrodomestiques chauffants. Appareils de chauffage électrique des locaux- Règles d"aptitude à la fonction
- NF 15.710
Equipements de chauffage par conducteurs et câbles électriques installés dans les plancher en béton. Règles de sécurité.
- NF P 03.001
Marchés Privés- Cahiers Types- Cahier des clauses administratives générales applicable aux travaux de bâtiment faisant l"object de marchés privés (octobre 1984)
- NF P 15.301
Liants hydrauliques- Définition, clasification et spécifications des ciments (décembre 1981)
- NF P 15.302 et 303
Ciments: portland ou portland de fer
- NF P 18.301
Granulats- Granulats naturels pour bétons hydrauliques (décembre 1983)
- NF P 18.302
Bétons de construction- Laitier concassé (septembre 1965)
- NF P 18.303
Béton- Mise en oeuvre. Eau de gâchage pour béton de construction (mai 1941)
- NF P 18.406
Bétons- Essai de compression (décembre 1981)
- NF P 18.407
Bétons- Essai de flexion (décembre 1981)

3.15.2 DOCUMENTOS TECNICOS UNIFICADOS DE C.S.T.B.

Estos documento son editados por el Centre Scientifique et Techique du Bâtiment (CSTB).

- DTU N° 65-7
Exécution des planchers chauffants par conducteurs et câbles électriques enrobés dans le béton.
- DTU N° 21

Execution des travaux en beton (septembre 1980)

- DTU N° 26.2
Chapes et dalles à base de liants hydrauliques (septembre 1981)
- DTU N° 70.1
Installations électriques des bâtiments à usage d'habitation (décembre 1980)
- DTU N° 70.2
Installation électriques des bâtiments à usage collectif, bureaux et assimilés, blocs sanitaires et garages. Cahier des Charges.
- Règles Th - K77. Titre I
Règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction (novembre 1977)
- Règles Th - K77. Titre II
Règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction, des pertes de base des bâtiments, et du coefficient G des locaux et autres locaux d'habitation (novembre 1977)
- Règles Th - G77. Titre III
Règles de calcul du coefficient G des locaux et autres locaux d'habitation et du coefficient G1 des bâtiments autres que les bâtiments d'habitation.

3.15.3 AVISOS TECNICOS, HOMOLOGACIONES Y APROVACIONES

- Avis Techniques formulados por los organismos oficiales:

CSTB: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
STAC: Service Technique des Assurances Constructions
- Homologaciones y Aprobaciones, en particular las que conciernen al comportamiento al fuego
- Annales de l'CTBTP N° 424. Travaux de dallage - Règles professionnelles provisoires (mai 1984)

FUNDAMENTOS TEORICOS DEL MODELO

Capitulo 4

FUNDAMENTOS TEORICOS DEL MODELO

4.1 INTRODUCCION

En este capitulo se explica la utilización de un programa de elementos finitos que permite resolver la ecuación de Poisson transitoria, la cual rige una cantidad de problemas físicos como es la transmisión de calor a través de un medio.

Se describen las etapas que intervienen en un programa de elementos finitos para cálculo de la ecuación de Poisson transitoria incidiendo principalmente en la metodología general de la programación de las diferentes subrutinas.

4.2 ECUACIONES BASICAS

La modelización del comportamiento de muchos fenómenos naturales puede describirse utilizando la formulación diferencial cuasi armonica conocida en el argot matemático como la ecuación de Poisson (38).

Dicha ecuación puede modelizar, entre otros problemas, el mecanismo de conducción de calor a través de un cuerpo (39).

La ecuación de Poisson para un dominio bidimensional puede expresarse en la forma siguiente:

$$\rho c \frac{\delta T}{\delta t} = D \nabla^2 T + \rho r \quad \text{en } \Omega \quad (i)$$

En donde;

- T = temperatura
- t = variable tiempo
- ρ = densidad
- c = calor especifico
- ρr = densidad por fuente de calor interno
- D = matriz constitutiva, formada por las conductividades térmicas, K, para las distintas dimensiones en las que

se describe el dominio, de esta manera para un dominio bidimensional corresponde a:

$$D = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \quad (\text{ii})$$

Alternativamente D queda definida para el caso uni y tridimensional como:

$$D = [K_x] \quad (\text{iii})$$

$$D = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \quad (\text{iv})$$

Las condiciones de contorno a las que se encuentra sujeta la formulación anterior son conocidas en términos matemáticos como las condiciones de;

- a) Dirichlet que fija la temperatura T , a un valor fijo y conocido de antemano sobre un contorno particular
- b) Cauchy que fija el gradiente de la temperatura normal a la superficie.

$$T - T' = 0 \quad \text{en } \Gamma_T \quad (\text{v})$$

$$n^T q + \alpha(T - T_{ext}) + q' = 0 \quad \text{en } \Gamma_q \quad (\text{vi})$$

En las ecuaciones anteriores ;

- T' = temperatura con valor conocido en la frontera
- α = coeficiente de convección-radiación
- q' = flujo ó gradiente de la temperatura con valor conocido en la frontera
- T_{ext} = temperatura en el exterior del dominio

el resto de las variables quedan definidas por las siguientes expresiones:

vector de normales al contorno:

$$n = [n_x, n_y]^T \quad (\text{vii})$$

vector de gradientes de la temperatura:

$$q_n = [q_x, q_y] = -Dg = -D\nabla T \quad (\text{viii})$$

en donde el gradiente ∇ corresponde a :

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \right]^T \quad (\text{ix})$$

Resulta inmediato la expresión de las ecuaciones (vii), (viii) y (ix) para los casos uni y tridimensionales, por lo que se omiten los desarrollos.

Dependiendo de los valores escogidos para los parámetros de la ecuación (vi) es posible reproducir los siguientes casos en el contorno:

a) **CONTORNO AISLANTE**

Matemáticamente conocido como la condición de Newman ó condición de contorno natural que representa un flujo de temperatura cero en la interfase del dominio con el medio circundante, de manera que:

$$n^T q = 0 \quad \text{por lo que } q' = 0 \text{ y } \alpha = 0 \quad (\text{vi.a})$$

b) **CONTORNO CON PERDIDA O APOORTE DE FLUJO EXTERNO**

La condición señalada queda representada matemáticamente por:

$$n^T q = -q' \quad \text{por lo que } \alpha = 0 \quad (\text{vi.b})$$

c) **CONTORNO CON PERDIDA O APOORTE DE CALOR POR CONVECCION-RADIACION**

En este caso existe una interacción del calor existente en el medio exterior T_{ext} y la temperatura del dominio T que de acuerdo con las leyes de la termodinámica se presentará un flujo en la interfase, representado por:

$$n^T q = -\alpha(T - T_{ext}) \quad \text{con lo que } q' = 0 \quad (\text{vi.c})$$

El factor α estrictamente representa el fenómeno de convección, mientras que el fenómeno de radiación sigue una ley más compleja pero que a efectos de simplificación se puede expresar de la misma manera que la expresada en (vi.c), por lo que α representa la contribución de ambos.

Los términos de las ecuaciones (i) a (ix) tienen diferentes significados físicos, dependiendo del problema que se modelice.

En el caso del PROBLEMA TERMICO tenemos:

T	=	Temperatura
D	=	Matriz de conductividad térmica
r	=	Fuente de calor interno por unidad de masa
q	=	vector de flujo de calor
ρ	=	densidad
c	=	calor específico por unidad de masa
α	=	coeficiente de convección-radiación

4.3 SOLUCION POR EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

4.3.1 FORMULACION BASICA

la aplicación del método de los elementos finitos exige como punto de partida la existencia de una forma integral expresando el mecanismo global del sistema (40). Dicha forma integral puede obtenerse aplicando el método de los residuos ponderados a la ecuación diferencial (i) y a la condición de contorno (vi) como:

$$\int_{\Omega} [\nabla^T D \nabla T + \rho r] \delta \Omega - \int_{\Omega} \rho c \frac{\delta T}{\delta t} \delta \Omega + \oint_{\Gamma_q} [n^T D \nabla T + \alpha (T - T_{ext}) + q] \delta \Gamma_q = 0 \quad (x)$$

La condición de contorno (v) no necesita incluirse en la expresión anterior puesto que se satisface imponiendo directamente el valor de T al valor prescrito en los contornos adecuados (condición forzada).

Tras integrar por partes el término $\nabla^T D \nabla T$ y reagrupar la ecuación (x) se obtiene (después de hacer $W = -W$)

$$\int_{\Omega} W^T \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \delta \Omega + \int_{\Omega} \nabla^T W^T D \nabla T \delta \Omega + \oint_{\Gamma_q} W^T \alpha T \delta \Gamma_q = \int_{\Omega} W^T \rho r \delta \Omega - \oint_{\Gamma_q} W^T q'_n \delta \Gamma_q + \oint_{\Gamma_q} W^T \alpha T_{ext} \delta \Gamma_q - \oint_{\Gamma_r} W^T q_n \delta \Gamma_r \quad (xi)$$

Observese que la última integral de (xi) incluye el flujo normal en los contornos donde T está prescrita. En la práctica este flujo se calcula "a posteriori", una vez obtenidas las temperaturas en todos los nodos.

4.3.2 DISCRETIZACION POR ELEMENTOS FINITOS

Después de discretizar el dominio en elementos en la forma clásica las temperaturas se interpolan en el interior de cada elemento como:

$$T = \sum_{i=0}^{i=n} N_i T_i = N a^{(e)} \quad (\text{xii})$$

donde N_i son las funciones de forma definidas en cada elemento y $a^{(e)}$ contiene los valores de las temperaturas nodales del elemento (e).

El vector de gradiente en cada elemento se obtiene por:

$$g = \nabla T = \nabla N a^{(e)} = B a^{(e)} \quad (\text{xiii})$$

donde

$$B = [B_1, \dots, B_n] \quad (\text{xiv})$$

siendo

$$B_i = \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \right], \quad B_i = \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \right], \quad B_i = \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \quad \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] \quad (\text{xv})$$

para problemas uni, bi y tridimensionales, respectivamente.

El vector de flujos puede calcularse en función de los valores nodales como:

$$q = -D B a^{(e)} \quad (\text{xvi})$$

4.3.3 ECUACIONES DE LA DISCRETIZACION

Sustituyendo la discretización (xii) y (xiii) en (xi) y haciendo $W = N$ (método de Galerkin) se obtiene un sistema matricial de ecuaciones que puede escribirse de la forma:

$$M \frac{\partial a}{\partial t} + K a = f \quad (\text{xvii})$$

En (xvii), "a" es el vector de incógnitas que contiene la temperatura de todos los nodos de la malla, y "M", "K", y "f" son la matriz de masa, la matriz de rigidez y el vector de fuerzas nodales que pueden obtenerse ensamblando las contribuciones elementales definidas por.

$$M^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} \rho c N^T N \partial \Omega^{(e)} \quad (\text{xviii})$$

$$K^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} B^T D B \partial \Omega^{(e)} + \alpha \oint_{\Gamma_q^{(e)}} N^T N \partial \Gamma_q^{(e)} \quad (\text{xix})$$

$$f^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} N^T \rho r \partial \Omega^{(e)} - \oint_{\Gamma_q^{(e)}} N^T q' \partial \Gamma_q^{(e)} + \oint_{\Gamma_q^{(e)}} N^T \alpha T_{\text{ext}} \partial \Gamma_q^{(e)} - \oint_{\Gamma_T^{(e)}} n^T N^T q_n \partial \Gamma_T^{(e)} \quad (\text{xx})$$

4.3.3.1 CASO ESTACIONARIO

La solución estacionaria implica unicamente resolver el sistema de ecuaciones:

$$Ka = f \quad (\text{xxi})$$

Obtenidas las temperaturas nodales pueden obtenerse los gradientes térmicos y los flujos de calor en cada punto mediante las ecuaciones (xiii) y (xvi), respectivamente. Asimismo, pueden obtenerse los flujos de calor a través de los contornos con temperaturas prescritas.

4.3.3.2 CASO TRANSITORIO

La solución del problema transitorio exige integrar en el tiempo la ecuación (xvii).

Utilizando un esquema de diferencias finitas trapezoidal generalizado se obtiene:

$$\left[\frac{M}{\Delta t} + xK \right] a^t = x f^t + (1-x) f^{t-1} + \left[\frac{M}{\Delta t} - (1-x)K \right] a^{t-1} \quad (\text{xxii})$$

donde "x" define el punto de "colocación" de la ecuación diferencial (xvii), es decir:

$$a^x = x a^t + (1-x) a^{t-1} \quad (\text{xxiii})$$

La ecuación (xxiii) permite obtener el valor de las temperaturas en el tiempo t en función de las temperaturas en el instante t-1 y de los valores de las " fuerzas " en t y t-1.

Puede demostrarse que el esquema trapezoidal de la ecuación (xxiii) es incondicionalmente estable para $x > 1/2$

En la práctica (41) se recomienda tomar $x = 2/3$ (Garlekin) ó $x = 1$ (Fuertemente implícito). La integración de $x = 0$ (Método explícito de Euler) es ventajosa si la matriz M es diagonal, puesto que en este caso la solución es explícita y no precisa la inversión de ninguna matriz. La única dificultad en este caso se debe a que el sistema de integración es condicionalmente estable y exige la utilización de incrementos de tiempo pequeños que vienen gobernados por la condición:

$$\Delta t = \frac{L}{w} \quad (\text{xxiv})$$

siendo w el mayor valor propio del sistema homogéneo:

$$|K+Mw|a=0 \quad (\text{xxv})$$

El programa permite la integración explícita con dos posibilidades para diagonalizar la matriz M .

DIAGONALIZACION POR SUMA DE FILAS

Se expresa por:

$$\begin{aligned} M_{D_{ii}} &= \sum_{j=1}^n M_{ij} \\ M_{D_{ij}} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{xxvi})$$

en donde la diagonal de la matriz de masa es la suma de todos los elementos contenidos en la fila i -ésima.

DIAGONALIZACION POR CONSERVACION DE LA MASA

se expresa por:

$$\begin{aligned} M_{D_{ii}} &= p \int_{\Omega} N_i^T \rho c N_i \partial \Omega \\ M_{D_{ij}} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{xxvii})$$

$$\sum_i M_{ii} = \int_{\Omega} \rho c \delta \Omega = 0 \quad (\text{xxviii})$$

de manera que la nueva matriz M conserve la misma masa que la matriz original.

4.4 CARACTERISTICAS DEL PROGRAMA

En los apartados siguientes se presenta la descripción del programa para Cálculo Transitorio de la Ecuación de Poisson por el Método de elementos Finitos con detalles de las subrutinas más relevantes del mismo. La versión del programa que se presenta escrita en FORTRAN tiene las siguientes características generales:

4.4.1 CARACTERISTICAS DEL MATERIAL

- Material lineal isótropo

4.4.2 ELEMENTOS UTILIZABLES

Pueden utilizarse los elementos isoparamétricos siguientes:

- Elemento lineal de dos nodos
- Elemento lineal de tres nodos
- Elemento triangular de 6 nodos
- Elemento cuadrilátero lagrangianos de 4 nodos
- Elemento cuadrilátero serendípito de 8 nodos
- Elemento cuadrilátero lagrangiano de 9 nodos
- Elemento hexagonal serendípito de 20 nodos tridimensional

4.4.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Para cada problema se admiten únicamente cargas estáticas de los tipos siguientes:

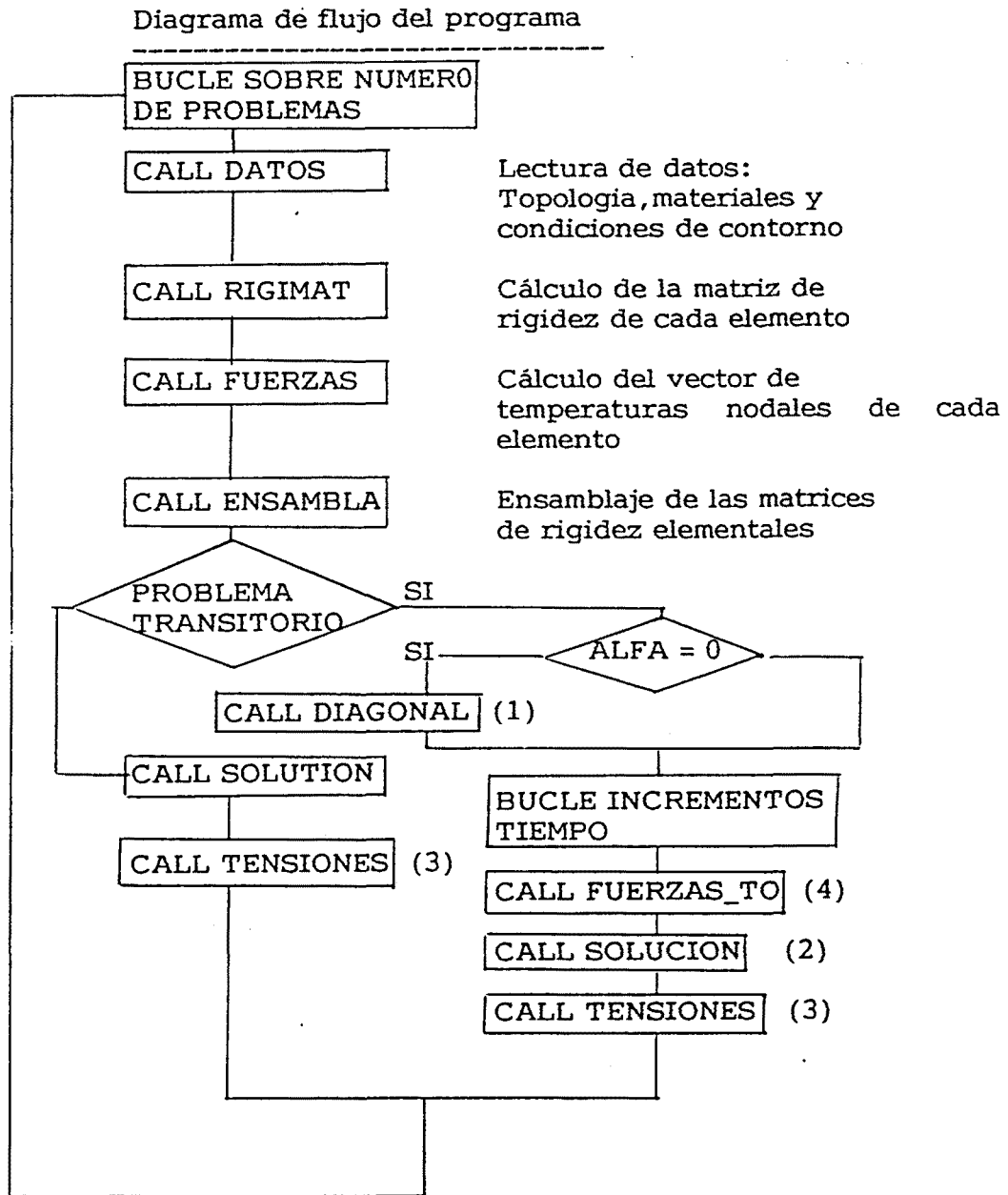
Tipos de carga

- Temperaturas puntuales nodales
- Generación interna de calor
- Flujo exterior uniformemente repartido sobre los lados de los elementos (condición de Convección/Radiación)
- Temperatura del medio externo cte.
- Temperatura puntual inicial (para el problema transitorio)

4.5 ORGANIZACION GENERAL DEL PROGRAMA

4.5.1 ETAPAS BASICAS. DIAGRAMA DE FLUJO PRINCIPAL

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo principal del programa.



- (1) Diagonalización de la matriz de rigidez
- (2) Solución del sistema ensamblado
- (3) Cálculo de la temperatura nodal y flujos en cada elemento
- (4) Cálculo de la matriz de masa afectada por las temperaturas nodales del paso del tiempo anterior, en el vector de fuerzas

fig 4.1

Se definen seguidamente las etapas fundamentales asociadas al análisis de un problema cualquiera mediante un programa de elementos finitos, así como la relación de cada etapa con las subrutinas del diagrama.

ETAPA 1: SELECCION DEL ELEMENTO

la elección del elemento es función de la tipología del problema y de la precisión buscada. Una vez escogido el elemento quedan definidas sus funciones de forma.

ETAPA 2 : DISCRETIZACION DE LA GEOMETRIA EN ELEMENTOS FINITOS

Esta etapa puede representar un porcentaje alto del esfuerzo total de cálculo si la geometría del problema a modelizar es compleja (42). En ella hay que definir perfectamente la topología de la malla (que de nuevo depende de la geometría y la precisión buscada), las coordenadas de los nodos, las propiedades del material de cada elemento y las condiciones de contorno. Esta etapa se denomina generalmente "preproceso" y puede automatizarse en gran manera si se dispone de los programas de generación de mallas adecuados. Esta automatización es mucho más esencial si se utilizan técnicas de solución adaptables.

Es importante destacar que el coste de la solución del sistema de ecuaciones global depende en gran manera de :

- a) la numeración de los nodos de la malla (por ejemplo si se utiliza el método de eliminación de gauss)
- b) la numeración de los elementos (por ejemplo si se utiliza el método frontal)

Conviene, por tanto, cuidar la topología de la malla y adecuarla en lo posible al método de solución de ecuaciones utilizado. Para ello puede hacerse uso de técnicas especiales de optimización de la enumeración de nodos y/o elementos.

ETAPA 3 : ENTRADA DE DATOS (SUBROUTINA DATOS)

Esta etapa consiste en la lectura por el ordenador de los datos generados en la discretización. Dicha lectura se efectúa en la subrutina DATOS.

ETAPA 4 : CALCULO DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ DE LOS ELEMENTOS (SUBROUTINA RIGIMAT)

En la etapa siguiente se calculan las matrices de rigidez $K^{(e)}$ de cada uno de los elementos de la malla. Dicho cálculo se efectúa en la subrutina RIGIMAT y su mayor ó menor complejidad depende del tipo de elemento utilizado.

En el caso del problema transitorio se calcula también la correspondiente matriz de masa, así como la aportación a la matriz de rigidez por condiciones de contorno generadas por convección-radiación, en la subrutina CONVECC.

ETAPA 5 : CALCULO DEL VECTOR DE TEMPERATURAS NODALES (SUBROUTINA FUERZAS)

La siguiente etapa es el cálculo del vector de temperaturas nodales equivalentes $f^{(e)}$ para cada elemento y se efectúa en la subrutina FUERZAS. De nuevo su mayor o menor complejidad depende del elemento utilizado y también de las cargas exteriores consideradas.

En el caso del problema transitorio, se considera las aportaciones necesarias de las condiciones fijadas inicialmente, y de la matriz de rigidez por el esquema de integración en el tiempo, que en cada incremento de tiempo se irá actualizando.

ETAPA 6 : SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES GLOBAL (SUBROUTINA SOLUCION)

Conocidas las matrices de rigidez y los vectores de temperaturas nodales de cada elemento, la etapa siguiente es el ensamblaje de dichas matrices y vectores en la ecuación de equilibrio global $K a = f$, y su solución para obtener las temperaturas nodales a .

Este proceso se efectúa en la subrutina SOLUCION y para el mismo puede utilizarse toda una variedad de técnicas de cálculo numérico.

ETAPA 7 : CALCULO DE GRADIENTES (SUBROUTINA TENSIONES)

La etapa final consiste en calcular los flujos o gradientes de la temperatura en los diferentes elementos a partir de los valores nodales.

Dicho cálculo se lleva a cabo en la subrutina TENSIONES. Esta etapa de postproceso va también asociada en la práctica a la representación gráfica de los resultados del cálculo (temperaturas y flujos).

En el caso del problema transitorio, se realizan los cambios necesarios sobre los vectores de temperatura y se cerrará un ciclo de tiempo para continuar iterativamente, hasta llegar a la convergencia, ó bien, al número de iteraciones previstas.

La programación del postproceso no es un problema trivial, fundamentalmente en problemas tridimensionales, siendo necesario un conocimiento profundo de técnicas de dibujo por ordenador. No obstante, generalmente puede hacerse uso de programas comerciales "ad hoc" y el problema se reduce a compatibilizar los formatos de resultados del cálculo con los necesarios para su representación gráfica (43).

Este programa para microordenadores incluye software para representación gráfica de datos y resultados compatibles con las subrutinas gráficas de MICROSOFT 5.0 y Finder 6.0.2 ó menores para Macintosh.

4.5.2 SELECCION DEL NOMBRE DE LAS VARIABLES

Una norma elemental de buena programación es mantener un criterio uniforme para escoger el nombre de las variables del programa (44). Salvo contadas excepciones, en este programa todas las variables tienen cinco

letras y además se ha tratado de que el nombre de cada una esté lo más relacionado posible con su función en el programa. Por otro lado, todas las variables que empiezan por la letra N indican "número de ", si empiezan por M indican "número máximo de" y si lo hacen con I, J, K, indican un valor determinado de la variable. Así, por ejemplo, NELEM es el número de elementos de la malla, MELEM es el número máximo de elementos que puede analizar el programa, IELEM es un elemento determinado de los NELEM, etc.

Estas normas que inicialmente pueden resultar algo tediosas, resultan de gran utilidad tanto para la utilización de un programa determinado como para su posterior modificación.

4.5.3 TRANSMISION DE INFORMACION ENTRE SUBROUTINAS

En este programa se utilizan bloques COMMON para transmitir toda la información necesaria (escalar y vectorial) entre subrutinas. Dichos bloques son iguales en todas las subrutinas, y sus vectores se han dimensionado en función del problema de mayor tamaño que puede analizarse con el programa (45).

El programa utiliza fundamentalmente cuatro bloques COMMON. El primero denominado DTSGRAL almacena los parámetros de control definidos en la subrutina DATOS y que son necesarios en todo el programa. El bloque COMMON DTSGRAL tiene la forma siguiente:

```
COMMON/DTSGRAL/      NTRAN, NDIME, NELEM, NEVAB, NGAUS,
                     NGDLN, NMATS, NNODE, NPRES, NPROB,
                     NPROP, NTENS, NTIPO, NFRON, NNFRO,
                     NTIME, ITIME, ALFAT, XLUMP
```

El segundo bloque COMMON se denomina DATA y almacena un conjunto de matrices y vectores relacionados con la geometría de la malla, las propiedades de los materiales, las condiciones de contorno y las temperaturas nodales. La forma de dicho bloque es:

```
COMMON/DATA/         COORD(MPNOD, MDIME), CARGA(MELEM, NEVA
                     B), INPRE(MPRES, MGDLN), NPDPR(MPRES), LN
                     ODS(MELEM, MNODE), MATNU(MELEM), PROPS(
                     NMATS, MPROP), PRESC(MPRES, MGDLN), CON
                     VE(MPRES, MNODE), XTIME (MPNOD)
```

El tercer bloque COMMON se denomina CALCULO y almacena un conjunto de matrices y vectores que están específicamente relacionados con el cálculo de la matriz de rigidez y el vector de temperaturas nodales. Dicho bloque tiene la forma siguiente:

```
COMMON/CALCULO/     BMATZ(MTENS, MEVAB), COREL(MDIME, MNOD
                     E)CORPG(MDIME, MGASP), DERIV(MDIME, MNO
                     DE)DBMAT(MTENS, MEVAB), DCART(MDIME, M
                     NODE)DMATZ(MTENS, MTENS), FFORM(MNODE
                     9, TENSZ(MTENS, MEVAB, MGASP)
```

El cuarto bloque COMMON se denomina GAUSSDAT y almacena los datos generales asociados a los puntos de gauss relacionados con el cálculo. Dicho bloque tiene la forma siguiente:

```
COMMON/GAUSSDAT/ POSGT(MGAUS*MDIME),POSPG(MGAUS)
,PESGT(MGAUS),PESPG(MGAUS)
```

Los argumentos de las matrices y vectores de los bloques COMMON estan dimensionados en el programa de manera que sirvan para todos los problemas resolubles.

Dichos valores se muestran en la siguiente tabla

Dimensiones de las matrices y vectores de los bloques COMMON
DATA, CALCULO y GAUSSDAT

MDIME = 3	MNODE = 27
MELEM = 200	MPNOD = 200
MEVAB = 81	MPRES = 200
MGAUS = 14	MPROP = 10
MGDLN = 3	MTENS = 3
MMATS = 10	MTOTV = 600

4.5.4 LISTADO DE LA SURUTINA PRINCIPAL

```
1. PROGRAM
2.C*****
3.C
4.C*****SUBROUTINA PRINCIPAL
5.C
6.*****
7.*****COMMON STATEMENTS
8. IMPLICIT NONE
9. INCLUDE `dtsgral.f`
10. INCLUDE `data.f`
11. INCLUDE `gaussdat.f`
12. INCLUDE `calculo.f`
13. INCLUDE `solu.f`
14. INCLUDE `solucuas.f`
15. INTEGER*2 MPROB,IPROB,IVARI,ITIME
16. CHARACTER*80 TITULO
17. CHARACTER*10 INPUT,OUTPUT
18. CHARACTER*13 AUX3
19. DATA AUX3 /`/aux3/montse/`/
20.C*****
21. OPEN (2,file=`COMAN.DAT`,FORM=`FORMATTED`)
22. READ(2,800)INPUT
23. READ(2,800)OUTPUT
24. CLOSE(2,STATUS=`KEEP`)
25. 800 FORMAT(A10)
26. OPEN(5,FILE=INPUT,FORM=`FORMATTED`)
27. OPEN(6,FILE=OUTPUT,FORM=`FORMATTED`)
28. OPEN(1,FILE=AUX3//`TEMP.1.TMP`,FORM=`UNFORMATTED`)
29. OPEN(3,FILE=AUX3//`TEMP.3.TMP`,FORM=`UNFORMATTED`)
30. OPEN(4,FILE=AUX3//`TEMP.4.TMP`,FORM=`UNFORMATTED`)
31. OPEN(8,FILE=AUX3//`TEMP.8.TMP`,FORM=`UNFORMATTED`)
32. OPEN(10,FILE=AUX3//`TEMP.10.TMP`,FORM=`UNFORMATTED`)
33. OPEN(29,FILE=AUX3//`CALSEF.POS`,FORM=`UNFORMATTED`)
34.C
```

```

35.C*****LEE NUMEROS DE PROBLEMAS ANALIZAR
36.C
37.      READ(5,900)NPROB
38.  900  FORMAT(I5)
39.      WRITE(6,905) NPROB
40.  905  FORMAT(/10X,`NUMERO DE PROBLEMAS=` ,I5)
41.C
42.C*****BUCLE SOBRE NUMERO DE PROBLEMAS
43.C
44.      MPROB=INT2(NPROB)
45.      ITIME=0
46.      WRITE(29) MPROB
47.      DO IPROB=1,NPROB
48.          REWIND 1
49.          REWIND 3
50.          REWIND 4
51.      WRITE(6,910) IPROB
52.  910  FORMAT(/////,6X,`PROBLEMA NO.` ,I3,////)
53.      READ(5,915) TITULO
54.  915  FORMAT(A80,////)
55.      WRITE(6,920) TITULO
56.  920  FORMAT(A80,////)
57.      CALL DATOS
58.      CALL GAUSSQ(NDIME,NNODE,NGAUS)
59.      CALL RIGIMAT
60.      CALL FUERZAS
61.      CALL ENSAMBLA
62.      IF (NTRAN.EQ.O) THEN
63.          CALL REDUCE
64.          CALL SUSTITUIR
65.          CALL TENSIONES
66.          CALL SUAV1
67.          CALL FEMV(ITIME,TITULO)
68.      ELSE
69.          IF (ALFAT.EQ.O) CALL DIAGONAL
70.          DO ITIME = 1,NTIME
71.C
72.C*****APLICA LAS CONDICIONES DE TIEMPO T-1
73.C
74.          CALL FUERZAS-TO
75.C
76.C*****RESUELVE POR ELIMINACION GAUSSIANA
77.C
78.          IF (ITIME.EQ.Q) THEN
79.              CALL REDUCE
80.          ELSE
81.              CALL REDUCE1
82.          ENDIF
83.          CALL SUSTITUIR
84.C
85.C*****CALCULA LAS TENSIONES DE LOS ELEMENTOS
86.C
87.          CALL TENSIONES
88.C
89.C*****SUAVIZADO DE TENSIONES
90.C
91.          CALL SUAV1

```

```

92.          CALL FEMV(ITIME,TITULO)
93.C
94.C*****EL TIEMPO T SE CONVIERTE EN T-1
95.C
96.          DO IVARI=1,NGDLN*NPNOD
97.             XTIME(IVARI) = DESPL(IVARI)
98.          ENDDO
99.C
100.         ENDDO
101.        ENDIF
102.       ENDDO
103.       CLOSE(1,STATUS='DELETE')
104.       CLOSE(3,STATUS='DELETE')
105.       CLOSE(4,STATUS='DELETE')
106.       CLOSE(8,STATUS='DELETE')
107.       CLOSE(10,STATUS='DELETE')
108.       CLOSE(29,STATUS='DELETE')
109.       CLOSE(5,STATUS='DELETE')
110.       CLOSE(6,STATUS='DELETE')
111.       STOP
112.       END

```

4.6 DESCRIPCION DE LA SUBROUTINA DATOS

En la subrutina DATOS se lee toda la información relacionada con la geometría de la malla y las propiedades de los materiales. DATOS está organizada de manera que sirva para cualquier problema termico analizado con elementos uni, bi o tridimensionales.

Seguidamente se describen las partes fundamentales de esta subrutina.

4.6.1 PARAMETROS DE CONTROL

Es necesario definir al principio una serie de parámetros de control que establezcan las características propias de cada problema. Dichos parámetros son los siguientes:

- * Número total de puntos nodales en la malla (NPNOD)
- * Numero total de elementos en la malla (NELEM)
- * Número total de nodos con movimientos prescritos (NPRES)
- * Indicador del tipo de problema
(NTRAN = 0 estacionario
= 1 transitorio sin diagonalizacion
= 2 transitorio con diagonalización por número de filas
= 3 transitorio con diagonalización por masa equivalente)
- * Número de nodos por elemento (NNODE)
- * Número de materiales diferentes en la estructura (NMATS)
- * Orden de la cuadratura de Gauss utilizada (NGAUS)
- * Número de coordenadas necesarias para definir un nodo (NDIME)
- * Indicador de escritura (IWRITE = 0 dehabilitada
= 1 habilitada)

Cuando uno de dichos parámetros empieza por la letra M su valor es el máximo que admite el programa.

4.6.2 DATOS GEOMETRICOS

La geometría de la malla puede definirse a partir de las conexiones nodales de cada elemento y las coordenadas de los nodos.

a) DEFINICION DE LAS CONEXIONES NODALES DE LOS ELEMENTOS

La geometría de cada elemento se define listando de manera sistemática sus nodos.

Como en principio cada elemento puede tener diferentes propiedades del material, es conveniente asignar un número de identificación del material a cada elemento.

Por consiguiente los datos a leer para cada elemento son:

- * Número del elemento (NUMEL)
- * Número del tipo de material del elemento (MATNU (NUMEL))
- * Lista de los nodos del elemento (LNODS (NUMEL,INODE), INODE =1, NNODE)

La definición de los nodos del elemento debe seguir siempre un mismo orden, siguiendo una secuencia antihoraria que comience por un nodo esquina cualquiera.

b) DEFINICION DE LAS COORDENADAS DE LOS NODOS

Las coordenadas de los nodos se definen siempre con relación a un sistema cartesiano global. La información a leer para cada nodo es la siguiente:

- * Número del nodo (IPNOD)
- * Coordenadas cartesianas del nodo (COORD (IPNOD, IDIME). IDIME =1, NDIME)

4.6.3 CONDICIONES DE NODOS PRESCRITOS

Las condiciones de contorno en los NPRES nodos con movimientos prescritos se leen de acuerdo con la secuencia siguiente:

- * Número del nodo prescrito (NODPR) (IPRES))
- * Indicador de los movimientos nodales prescritos (INPRE(IPRES,IGDLN),IGDLN=1,NGDLN)
- * Valores de los movimientos nodales prescritos (PRESC(IPRES,IGDLN), IGDLN=1, NGDLN)
- * Si INPRE(IPRES,IGDLN)=1 indica que el grado de libertad IGDLN del nodo prescrito IPRES está coaccionado. Por el contrario INPRE=0 denota que dicho grado de libertad está libre. Esto permite coaccionar de manera selectiva los movimientos de cada nodo.

4.6.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Deben leerse los parámetros del material necesarios para formar la matriz constitutiva D. Así, para cada material diferente la información a suministrar es la siguiente:

- * Número del tipo de material (NUMAT)
- * Propiedades del tipo de material en cuestión (PROPS(NUMAT,IPROP),IPROP=1,NPROP)

El orden de lectura de las propiedades del material es el siguiente:

- Conductividad Térmica (tantos valores como dimensiones cartesianas tenga el problema)
- Coeficiente de convección/radiación en fronteras del elemento
- Valor del calor de generación interna del elemento
- y en el caso de resolver problemas temporales, se deberá incluir el valor de la densidad del material.

4.6.5 CONDICIONES INICIALES DE TEMPERATURA

En el caso de realizar un análisis transitorio es necesario proporcionar:

- El número de iteraciones que se deseen
- El incremento de tiempo a utilizar
- el parámetro x de integración en el tiempo

Debido al esquema de iteración temporal implementado es conveniente utilizar incrementos de tiempo adecuados, para no provocar oscilaciones en la integración temporal.

La información a suministrar es la siguiente:

- * Número de iteraciones (NTIME)
- * Incremento de tiempo (DTIME)
- * Punto de integración en el intervalo Δt (ALFAT)

A continuación se darán el número de nodos con valores prescritos de las temperaturas iniciales nodales, pudiendo simplificar su captura si todos los nodos de la malla tienen un mismo valor, al introducir (NPNOD) en (NNCIT) y a continuación el valor inicial en (CITIM).

Si existen nodos con temperaturas iniciales variables se dará en (NNCIT) el número de estos y en (CITIM) el valor correspondiente, por lo que el programa asume que los nodos restantes inician con una temperatura de cero.

4.6.6 CONDICIONES DE FLUJO CONVECCION-RADIACION

En el caso de elementos que presentan radiación o convección en alguno de sus lados, se debe proporcionar el número de elementos existentes en (NNFRON) y el número de nodos que tienen por lados en (NNFRO)(En el caso de no existir deberá darse el valor de cero a ambas variables).

En el caso de tener convección-radiación, la información a suministrar es la siguiente:

- Número del elemento con la condición establecida (CONVE(IFRON,1))
- Nodos del lado considerado en numeración global (CONVE(IFRON,1+INFRO))

4.6.7 SUBROUTINA GAUSS

La función de esta subrutina es definir las coordenadas y los pesos de la cuadratura de Gauss seleccionada para las integrales del elemento. En elementos unidimensionales, cuadriláteros y hexagonales el orden de la cuadratura utilizada lo define la variable NGAUS, siendo entonces la cuadratura de orden: NGAUS en una dimensión, NGAUS x NGAUS en dos dimensiones NGAUS x NGAUS x NGAUS en tres dimensiones. Las coordenadas y los pesos de los puntos de integración se almacenan en las variables POSGP (.) y PESPG (.)

En elementos triangulares NGAUS define asimismo el orden de la cuadratura, cuando en este caso las coordenadas y los pesos de los puntos de integración asignados a las variables POSGT (.) y PESGT (.)

La subrutina Gauss permite la utilización de cuadraturas con NGAUS = 1,2 y 3 para elementos unidimensionales y cuadriláteros y hexagonales, y NGAUS = 1,3 y 7 para elementos triangulares.

4.6.8 PREPARACION AUTOMATICA DE DATOS

En muchos casos el mayor esfuerzo en el análisis de un problema por elementos finitos se invierte en la preparación de los datos. Por este motivo, es conveniente disponer de medios informáticos auxiliares que permitan automatizar gran parte de las operaciones de la entrada de datos. Ejemplo de esto son las pantallas gráficas, plotters, digitalizadores y copadoras gráficas. Asimismo, es muy útil disponer de programas para generación automática de mallas en una, dos y tres dimensiones y para su representación gráfica.

Con estos medios se pueden conseguir importantes ahorros en el tiempo de preparación de datos, así como en el de detección de los errores que inevitablemente se producen.

Los programas de generación y dibujo de la malla se incluirán en una hipotética subrutina GENER que podría ser llamada por DATOS.

4.6.9 SUBROUTINA DE CONTROL DE DATOS

Una vez leídos los datos geométricos y del material de la malla es importante realizar una serie de comprobaciones básicas que garanticen mínimamente la ausencia de errores antes de comenzar el cálculo de las matrices y vectores de cada elemento.

Dichas comprobaciones pueden ser tan simples como comprobar que no se han asignado valores absurdos a los parámetros de control; que dichos valores son compatibles con las dimensiones de los vectores de los bloques COMMON; que todos los nodos aparecen alguna vez en algún elemento; que no hay dos nodos con el mismo número o con las mismas coordenadas, etc. Asimismo, puede comprobarse que las dimensiones características de la matriz de rigidez global (ancho de banda, ancho de frente, perfil, etc) no son superiores a los límites establecidos de acuerdo con el método de solución del sistema de ecuaciones utilizado. Dichas comprobaciones podrían efectuarse en una subrutina auxiliar COMPROB que sería llamada DATOS una vez leídos los datos fundamentales de la geometría y propiedades mecánicas de la malla.

Las subrutinas de control de datos son sencillas de escribir, aunque siempre deben de adecuarse al sistema de generación de datos disponible (manual, automática, etc.).

4.7 DESCRIPCION DE LAS SUBROUTINAS DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ

4.7.1 MATRIZ DE RIGIDEZ SUBROUTINA RIGIMAT

Las operaciones para el cálculo de la matriz de rigidez para el caso estacionario y transitorio, incluidos en RIGIMAT, son las siguientes:

4.7.1.1 CASO ESTACIONARIO

En todos los casos se utiliza una formulación isoparamétrica.

La expresión general de la matriz de rigidez de un elemento plano:

$$K_{ij}^{(e)} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B_i^T D B_j |J^{(e)}| \partial \xi \delta \eta \quad (\text{xxix})$$

En donde $J^{(e)}$ es la clásica matriz Jacobiano de la transformación de coordenadas cartesianas (x, y) a naturales (ξ, η)

Los elementos de $K_{ij}^{(e)}$ se calculan numéricamente. Así denominando:

$$T_{ij}^{(e)}(\xi, \eta) = B_i^T D B_j |J^{(e)}| \quad (\text{xxx})$$

La integración numérica para un elemento cuadrilátero con una

cuadratura de Gauss de orden $m \times m$ se escribe como:

$$K_{ij}^{(e)} = \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m T_{ij}^{(e)}(\xi_p, \eta_q) W_p W_q \quad (\text{xxxix})$$

donde ξ_p y η_q son las coordenadas naturales de los puntos de integración y W_p y W_q los correspondientes pesos.

Para un elemento triangular con una cuadratura de orden m se tiene:

$$K_{ij}^{(e)} = \sum_{p=1}^m T_{ij}^{(e)}(\alpha_p, \beta_q) W_p \quad (\text{xxxixii})$$

En el programa se incluyen los elementos lineales isoparamétricos de dos y tres nodos, los elementos cuadriláteros isoparamétricos serendípticos de cuatro y ocho nodos y el lagrangiano de nueve nodos, y los triangulares de tres y seis nodos así como el elemento hexagonal isoparamétrico serendípito de veinte nodos. (fig.4.2)

En todos los elementos cuadriláteros se recomienda una cuadratura 2×2 . Por otra parte, los elementos triangulares lineal y cuadrático precisan cuadraturas de uno y tres puntos, respectivamente. Mientras que para el elemento hexagonal isoparamétrico serendípito de veinte nodos cuya matriz de rigidez se presenta a continuación, se recomienda evaluar con una cuadratura de orden $2 \times 2 \times 2$;

$$K_{ij}^{(e)} = \sum_{p=1}^2 \sum_{q=1}^2 \sum_{r=1}^2 T_{ij}^{(e)}(\xi_p, \eta_q, \zeta_r) W_p W_q W_r \quad (\text{xxxixiii})$$

En el caso de los elementos lineales, una cuadratura de orden 2 es suficiente.

4.7.1.2 CASO TRANSITORIO

Al realizar la integración en el tiempo es necesario incluir en la matriz de rigidez elemental, la aportación de una matriz de masa elemental que se evalúa de acuerdo con:

$$M_{ij}^{(e)} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho c N_i^T N_j |J^{(e)}| \partial \xi \partial \eta \quad (\text{xxxixiv})$$

como se encontró en (xviii) y de ahí se concluye que el sistema a resolver para un paso de tiempo es el propuesto en (xxii), por lo que la matriz de rigidez encontrada en el apartado 4.7.1.1, se incrementa término a término con la encontrada en la ecuación (xxxiv), siendo afectada la matriz $K^{(e)}$ por el coeficiente x de integración en el tiempo.

Las ventajas de este esquema de integración temporal, además de su

sencillez de implementación, es que presenta una estabilidad incondicional ante los valores de $x > 0,5$ y para $x = 0$ no es necesario invertir la matriz de rigidez.

Es obvio que en el caso transitorio, también se verán afectados los términos de carga según se muestra en la ecuación (xxii).

En la figura 4.3 se presenta el diagrama de flujo de RIGIMAT. Obsérvese que se han supuesto propiedades del material constantes sobre el elemento y el cálculo de la matriz constitutiva D se efectúa antes del bucle sobre los puntos de integración.

En el caso de propiedades variables bastaría con incluir la evaluación de D dentro de dicho bucle.

4.7.2 MATRIZ DE RIGIDEZ: SUBROUTINA CONVECC

La aportación a la matriz de rigidez por efectos de convección y radiación, expresado por el tercer elemento del primer término de la ecuación (xi), debe de ser considerada en todos los elementos de contorno donde esté presente dicho fenómeno.

En el caso de un elemento bidimensional isoparamétrico, la expresión general es:

$$K_{ij}^{(\alpha e)} = \int_{-1}^1 N_i^T N_j \alpha |J^{(e)}| \partial \xi \quad (\text{xxxv})$$

Debemos observar que la integración es unidimensional, ya que la pérdida de calor por convección y radiación se produce sobre los lados del elemento y no sobre todo el elemento en sí, por lo que la matriz jacobiana de transformación de coordenadas deberá corresponder a la del lado en cuestión, siendo la integración sobre esta línea; por lo tanto es importante

resaltar que la matriz $K^{(\alpha e)}$ contendrá elementos nulos con excepción de

aquellos $K_{ij}^{(\alpha e)}$ que correspondan a los del lado con la condición de contorno impuesta.

Para mayor claridad del concepto, se puede observar en la figura 4.4

Análogamente, para el caso tridimensional, la frontera de convección y radiación corresponderá a una superficie, por lo que la expresión es:

$$K_{ij}^{(\alpha e)} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 N_i^T N_j \alpha |J^{(e)}| \partial \xi \partial \eta \quad (\text{xxxvi})$$

correspondiendo a una integral de superficie.

En el caso unidimensional, se considera que existe el fenómeno sobre la superficie perimetral del elemento de línea y no en la sección transversal de éste, siendo la expresión idéntica a la ecuación (xxxv) y en este caso la

matriz $K^{(\alpha e)}$ será llena.

Al tener de esta manera, en todos los casos vistos, una matriz $K^{(ae)}$ de igual dimensión que la matriz de rigidez. La matriz de rigidez del elemento será la adición de ambas.

$$K_{ij}^{(e)} = K_{ij}^{(e)} + K_{ij}^{(ae)} \quad (\text{xxxvii})$$

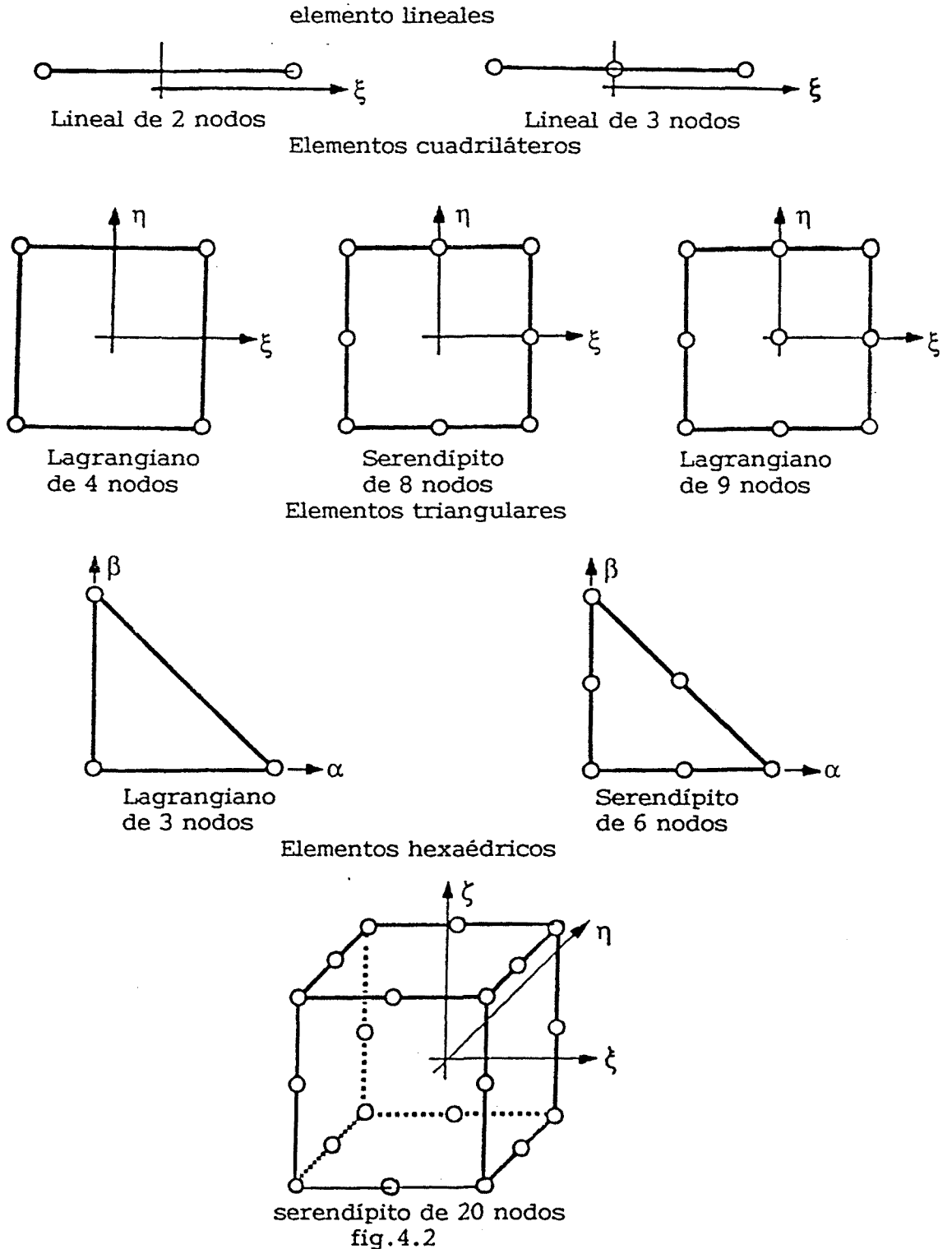


Diagrama de flujo de la subrutina RIGIMAT

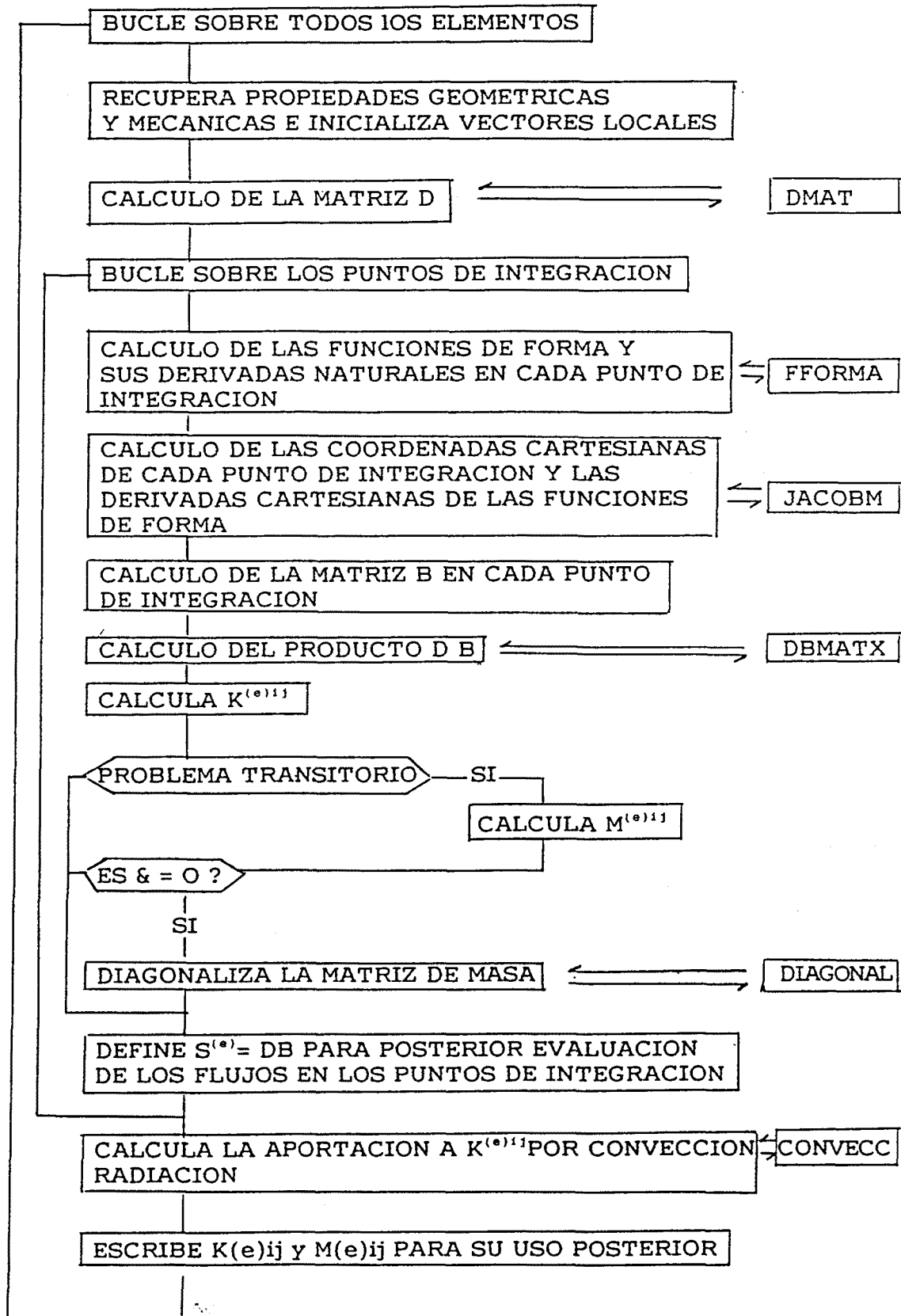


fig.4.3

Aportación correspondiente por convección- radiación

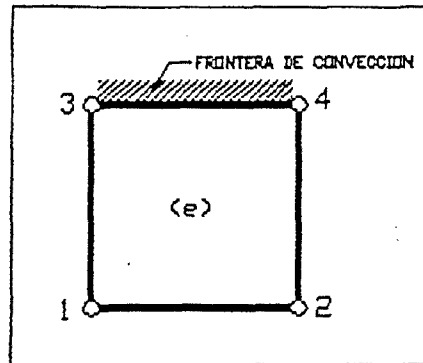


fig 4.4

$$K^{(ae)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33}^{(ae)} & K_{34}^{(ae)} \\ 0 & 0 & K_{43}^{(ae)} & K_{44}^{(ae)} \end{bmatrix}$$

4.8 SUBROUTINA FUERZAS

4.8.1 CONSIDERACIONES GENERALES

A continuación se presenta la subrutina de cálculo de temperaturas nodales equivalentes para los diferentes elementos considerados. Se tienen en cuenta los siguientes tipos de acciones exteriores:

- * Flujos puntuales nodales (IPUT \neq 0)
- * Generación interna (IPESO \neq 0)
- * Flujo y Temperatura Externa sobre el elemento (IDIST \neq 0)

La actuación de los distintos tipos de temperaturas se controla asignando un valor diferente de cero a los parámetros de control IPUT, IPESO e ILADO.

En la figura 4.5 se presenta el diagrama de flujo de la subrutina FUERZAS. En los apartados siguientes se detallan los módulos de temperaturas puntuales, Generación interna y Flujo y Temperatura Externa sobre el elemento.

4.8.2 FLUJOS PUNTUALES NODALES

Para mayor sencillez se considera que los flujos puntuales actúan directamente sobre un nodo. El vector de flujos nodales es en este caso simplemente:

$$f_i = p_i$$

siendo p_i el vector de flujos puntuales sobre el nodo de enumeración global i . Aunque este término no se incluye explícitamente en la ecuación (xx) el vector f corresponde directamente al flujo nodal equivalente por lo que la aplicación de un flujo sobre un nodo en particular queda representado directamente por un vector f , particularizado en la ecuación (xvii).

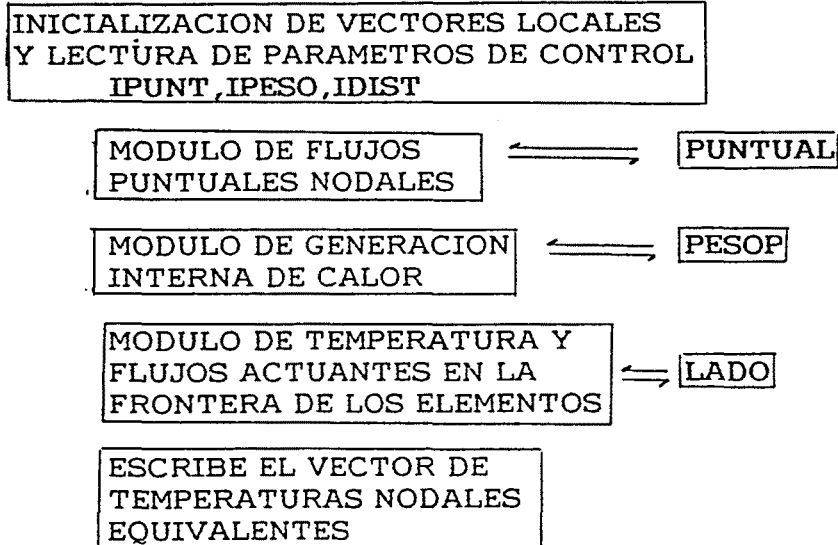


Diagrama de flujo de la subrutina FUERZAS para el cálculo de las temperaturas nodales equivalentes

fig 4.5

4.8.3 GENERACION INTERNA

La generación interna de calor equivale a una temperatura "másica" actuando por unidad de superficie/volumen. Así pues, las temperaturas por generación interna para los diferentes elementos de acuerdo con la formulación descrita, y aplicando las transformaciones isoparamétricas correspondientes, se tiene que el primer término del segundo miembro de la ecuación (xx) se expresa como:

Elementos unidimensionales

$$f_i^{(e)} = \int_{l(e)} N_i^T \rho r \partial l^{(e)} = \sum_{p=1}^{n_p} (N_i^T \rho r |J^{(e)}|)_p W_p \quad (\text{xxxix})$$

Elementos bidimensionales

$$f_i^{(e)} = \int_{A^{(e)}} N_i^T \rho r \partial A^{(e)} = \sum_{p=1}^{n_p} \sum_{q=1}^{n_q} (N_i^T \rho r |J^{(e)}|)_{p,q} W_p W_q \quad (\text{xl})$$

Elementos de sólido tridimensional

$$f_i^{(e)} = \iiint_{V^{(e)}} N_i^T \rho r \partial V^{(e)} = \sum_{p=1}^{n_p} \sum_{q=1}^{n_q} \sum_{r=1}^{n_r} (N_i^T \rho r |J^{(e)}|)_{p,q,r} W_p W_q W_r \quad (\text{xli})$$

La cuadratura para el cálculo de estos términos, suele ser la misma que para el de la matriz de rigidez, aún a costa de introducir un cierto error en el cálculo. No obstante, este error es de poca importancia y suele compensarse con los errores en la evaluación de la matriz de rigidez.

4.8.4 TEMPERATURA AMBIENTAL Y FLUJO EXTERIOR REPARTIDO SOBRE UN LADO

Sobre los lados de los elementos limítrofes de la geometría, es común que exista una temperatura externa diferente que coaccione el comportamiento del flujo de temperaturas en el interior de la malla, ó bien que exista un flujo de calor entrante ó saliente, normal a la superficie del lado del elemento; en análisis bidimensional pueden actuar un flujo repartido por unidad de longitud en direcciones normal y tangencial, (aunque en realidad el flujo tangencial no afecta la solución de la ecuación diferencial y se desprecia). Estas cargas de calor no tienen porqué ser uniformes y su intensidad puede variar a lo largo del lado. Dicha variación se define por los valores de las temperaturas en los nodos del lado cargado.

Para ser coherente con el orden de numeración de las conexiones nodales, los nodos del lado cargado deben listarse en una secuencia antihoraria.

Un flujo normal a un lado se considerará positivo si va dirigido hacia el interior del elemento. Esta definición es necesaria para evitar confusiones cuando los flujos distribuidos actúan sobre lados comunes a dos elementos, siendo importante advertir que en dicho caso la carga generada sólo debe asignarse a un solo elemento.

La expresión final del vector de las temperaturas equivalentes nodales es la combinación de los elementos segundo y tercero de la ecuación (xx) que expresado para el caso unidimensional con la formulación isoparamétrica y la integración numérica se describe como:

$$f_i^{(e)} = \oint_{\Gamma_q^{(e)}} N_i^T [\alpha T_{ext} - q'] \partial \Gamma_q^{(e)} = \sum_{p=1}^{n_p} \left(N_i^T [\alpha T_{ext} - q'] |J^{(e)}| \right)_p W_p \quad (\text{xlii})$$

que de manera similar puede ser expresada para los dominios bi y tridimensionales.

4.9 SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES.SUBROUTINA SOLUCION

Existen muchas técnicas para resolver el sistema de ecuaciones $Ka = f$ resultante del ensamblaje de las ecuaciones de equilibrio de los diferentes elementos. Entre los procedimientos más populares podemos citar los:

Métodos directos, como:

- * Eliminación Gaussiana
- * Método frontal
- * Reducción de Choleski (o Choleski modificado)
- * Reducción de Crout
- * Método del perfil, etc.

Métodos iterativos, como:

- * Método iterativo de Gauss-Seidel
- * Métodos de gradiente conjugado
- * Método de relajación

La descripción detallada de estos métodos puede encontrarse en la mayoría de libros de cálculo numérico (46). Aquí se ha empleado el método de eliminación Gaussiana, por ser quizás el más sencillo y fácil de implementar en un programa de elementos finitos. El método de eliminación Gaussiana se basa en la reducción del sistema de ecuaciones $Ka = f$ a la siguiente forma triangular:

$$\begin{aligned} K_{1,1}a_1 + K_{1,2}a_2 + K_{1,3}a_3 + \dots + K_{1,n-1}a_{n-1} + K_{1,n}a_n &= f_1 \\ K'_{2,2}a_2 + K'_{2,3}a_3 + \dots + K'_{2,n-1}a_{n-1} + K'_{2,n}a_n &= f'_2 \\ K'_{3,3}a_3 + \dots + K'_{3,n-1}a_{n-1} + K'_{3,n}a_n &= f'_3 \\ &\vdots \\ K'_{n-1,n-1}a_{n-1} + K'_{n-1,n}a_n &= f'_{n-1} \\ K'_{n,n}a_n &= f'_n \end{aligned} \quad (\text{xliii})$$

donde las primas indican que los coeficientes de la matriz global y los términos de temperatura se han modificado durante la etapa de reducción.

El sistema (xliii) permite calcular sistemáticamente todas las incógnitas resolviendo las ecuaciones reducidas en orden inverso desde la última hasta la primera, ya que cada nueva ecuación solo introduce una nueva incógnita. Así, la última ecuación proporciona directamente el valor de a_n ; sustituyendo dicho valor en la ecuación anterior puede obtenerse el valor de a_{n-1} y así sucesivamente. Esta etapa de la solución se denomina sustitución hacia atrás.

Por consiguiente, las tres etapas características del método de eliminación Gaussiana son las siguientes:

1) Etapas de ensamblaje

Consiste en ensamblar la matriz de rigidez global K y el vector de temperaturas nodales f a partir de las contribuciones de los diferentes elementos de la malla.

2) Etapas de reducción

Consiste en reducir el sistema de ecuaciones original $Ka = f$ a la forma (xliiv). Esto se efectúa empleando la ecuación i -ésima para eliminar la variable a_i de todas las ecuaciones inferiores, es decir, de la ecuación $i+1$ a la n . Formalmente esto puede efectuarse sustrayendo de la ecuación r -ésima la ecuación i -ésima multiplicada por $(i)K_{r,i}/(i)K_{i,i}$, donde el índice i indica que dichos coeficientes se han modificado $i-1$ veces antes de la eliminación de a_i . Por ejemplo, la primera ecuación se utiliza para eliminar a_1 de las ecuaciones 2 a n , como:

$$\begin{aligned} K_{1,1}a_1 + K_{1,2}a_2 + K_{1,3}a_3 + \dots + K_{1,n}a_n &= f_1 \\ 0a_1 + \left(K_{2,2} - K_{1,2} \frac{K_{2,1}}{K_{1,1}} \right) a_2 + \left(K_{2,3} - K_{1,3} \frac{K_{2,1}}{K_{1,1}} \right) a_3 + \dots + \left(K_{2,n} - K_{1,n} \frac{K_{2,1}}{K_{1,1}} \right) a_n &= f_2 - f_1 \frac{K_{2,1}}{K_{1,1}} = f'_2 \quad (\text{xliiv}) \\ 0a_1 + \left(K_{n,2} - K_{1,2} \frac{K_{n,1}}{K_{1,1}} \right) a_2 + \left(K_{n,3} - K_{1,3} \frac{K_{n,1}}{K_{1,1}} \right) a_3 + \dots + \left(K_{n,n} - K_{1,n} \frac{K_{n,1}}{K_{1,1}} \right) a_n &= f_n - f_1 \frac{K_{n,1}}{K_{1,1}} = f'_n \end{aligned}$$

A continuación se utiliza la ecuación 2 para eliminar a_2 de todas las ecuaciones y así sucesivamente. Adviértase que se mantiene la simetría en el sistema de ecuaciones modificado.

Si un movimiento está prescrito, por ejemplo $a_2 = a_2$, la incógnita pasa a ser la reacción correspondiente t_2 . En este caso, la eliminación de a_2 es trivial y todo lo que hay que hacer es sustituir $a_2 = a_2$ en todas las ecuaciones y transferir la cantidad conocida $K'_{r,2}a_2$ al segundo miembro de cada ecuación, como se ilustra seguidamente:

$$\begin{aligned} K_{1,1}a_1 + K_{1,2}a_2 + K_{1,3}a_3 + K_{1,n}a_n &= f_1 \\ 0a_1 + K'_{2,2}a_2 + K'_{2,3}a_3 + \dots + K'_{2,n}a_n &= f'_2 \\ 0a_1 + 0a_2 + K'_{3,3}a_3 + \dots + K'_{3,n}a_n &= f'_2 - K'_{3,2}a_2 \\ 0a_1 + 0a_2 + K'_{n,3}a_3 + \dots + K'_{n,n}a_n &= f'_n - K'_{n,2}a_2 \end{aligned} \quad (\text{xlv})$$

Si el movimiento está prescrito a un valor nulo es más sencillo prescindir directamente de la fila y columna correspondientes a dicho movimiento y calcular la reacción a posteriori una vez resuelto el sistema.

En el proceso de reducción puede hacerse uso de las ventajas de la simetría de la matriz de rigidez global. Ello permite reducir sólo los términos sobre y por arriba de la diagonal principal de K , obteniéndose el resto por simetría, con el consiguiente ahorro de cálculo.

En la mayor parte de los problemas estructurales K tiene forma de banda, con ceros fuera de una banda simétrica con respecto a la diagonal principal (figura 4.6). Dicha forma en banda permite introducir considerables economías en el proceso de solución del sistema, ya que en cada instante sólo es necesario almacenar la matriz triangular superior de una submatriz de dimensiones $M \times M$, siendo M el semi-ancho de banda. Por consiguiente, los requisitos de almacenaje son de $1/2M(M+1)$ números. El valor de M depende de como se enumeran los nodos de la malla. Puede demostrarse que $M = (D+1) \cdot NDGDL$ siendo D la máxima diferencia entre el número de dos nodos pertenecientes a cualquiera de los elementos de la malla.

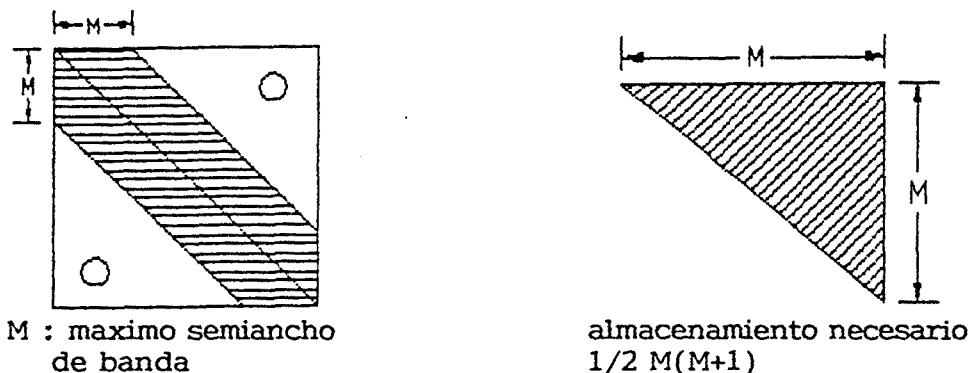


fig 4.6

Lo anterior evidencia la importancia de escoger una numeración nodal tal que el valor de M sea mínimo. Esto en general no es sencillo, sobre todo para mallas grandes, y en estos casos suele acudir a programas que automáticamente proporcionan una numeración nodal óptima. Una

alternativa es utilizar otros métodos de solución en los que el orden de numeración nodal sea irrelevante. Entre estos se encuentra el método **FRONTAL** en el que la capacidad de almacenamiento necesaria viene condicionada por la numeración de los elementos y no de los nodos, lo que facilita la etapa del preproceso. El método **FRONTAL** es una modificación del de eliminación Gaussiana y se basa en realizar el ensamblaje de las ecuaciones y la eliminación de las variables de manera simultánea. Así, una vez ensamblada la matriz de rigidez de un nuevo elemento, se eliminan las variables nodales que no se verán afectadas por posteriores ensamblajes, con lo que el espacio asignado a los coeficientes de rigidez de dichas variables puede ser ocupado por el de nuevas variables al ensamblar las ecuaciones de otro elemento, y así sucesivamente.

Esto reduce considerablemente los requisitos de almacenaje y el número de operaciones aritméticas, a costa, sin embargo, de incrementar sensiblemente la complejidad del algoritmo de solución.

Las subrutinas **SOLUCION**, **ENSAMBLA** y **SUSTITUIR** para resolver el sistema de ecuaciones utilizan el método de eliminación Gaussiana explicado. Como nota característica se destaca que en dichas subrutinas los términos de la matriz de rigidez se almacenan en un vector siguiendo una secuencia a lo largo de la banda, prescindiéndose de los coeficientes nulos situados fuera de la misma, con la consiguiente economía de memoria.

El método de solución seguido para el problema de integración en tiempo, es esencialmente el mismo, con la salvedad de que en la parte triangular inferior de la matriz de rigidez, que el sistema de reducción gaussiana convierte en ceros, se almacenan los valores de los elementos K'_{ij} / K'_{ii} de manera que para resolver el sistema en todas las iteraciones temporales, no será necesario resolver nuevamente la matriz de rigidez, ya que es constante en todo el proceso, y esta información almacenada servirá para reducir el vector de temperaturas nodales, con el consecuente ahorro de tiempo de cómputo.

4.10 CALCULO DE LOS FLUJOS ELEMENTALES. SUBRUTINA TENSION

Como es usual los flujos se calculan inicialmente en los puntos de integración y a partir de dichos valores se procede a su extrapolación a los nodos y al subsecuente alisado nodal si se desea. Así, las tensiones en el punto de Gauss p se obtienen por:

$$q_p = \sum_{i=1}^n (DB)_p a_i \quad (\text{xlvii})$$

Recordemos que durante el cálculo de la matriz de rigidez **RIGIMAT** se evalúa el producto **DB** en cada punto de Gauss, almacenándose la matriz resultante en un fichero, juntamente con las coordenadas cartesianas de los puntos de Gauss. Por consiguiente, para efectuar los productos de (xlvi) basta con leer para cada elemento la información almacenada en dicho fichero, evitándose así repetir el cálculo de las matrices **B** y **D** en cada punto de Gauss.

En la subrutina **TENSIONES** es donde se efectúan estas operaciones.

SEGUNDA PARTE

MODELIZACION TEORICA

FORMULACION DE LAS ECUACIONES

Capítulo 5

FORMULACION DE LAS ECUACIONES

5.1 DEFINICION DE LA TIPOLOGIA DEL PROBLEMA

La Calefacción Eléctrica por Suelo Radiante en los edificios industriales se realiza a partir de una Losa de hormigón sobre el terreno, de 15 a 20 cm de espesor, armado con una malla en la cual se sujetan los cables calefactores los cuales quedan embebidos dentro de la Losa de hormigón. Aislandose todo el perímetro con polietieno de aproximadamente 80 cm de altura y 4 cm de espesor.

La energía necesaria para calefactar el edificio se acumula en el suelo (la capacidad de acumulación no depende del espesor del hormigón, el calor se acumula en su mayoría en el suelo) preferentemente durante las horas en que la energía es más barata (horas valle).

La acumulación se realiza en función de la temperatura exterior (los acumuladores solamente cargarán la cantidad de calor que se precise liberar durante el periodo de calefacción).

La liberación del calor almacenado se realiza por radiación térmica y por convección natural a través de la superficie durante las 24 horas del día. Esta liberación debe ser suficiente para mantener una temperatura de confort en el interior.

La transmisión de calor a través de la Losa de hormigón viene regida por la ecuación de TIPO PARABOLICO (47):

$$\rho c \frac{\partial \Phi}{\partial t} = D \nabla^2 \Phi + \rho r \quad \text{en } \Omega$$

Se trata de un problema BIDIMENSIONAL, ya que se supone que el flujo de calor se produce en dos direcciones; perpendicular y longitudinalmente a la Losa de hormigón.

Consideraremos el problema LINEAL; los coeficientes de la ecuación anterior no dependen del tiempo ni de la temperatura y los materiales son homogéneos.

El problema se resolverá inicialmente en REGIMEN PERMANENTE Y CON FOCOS INTERNOS, para la obtención de la distribución OPTIMA de las resistencias (disposición, número y distancia entre ellas).

Para la obtención de la evolución de la temperatura con el tiempo se resolverá el problema en REGIMEN TRANSITORIO para cada intervalo de tiempo en el que se ha discretizado la temperatura exterior; con la correspondiente comprobación al final de cada intervalo de que no se superen los límites impuestos a la temperatura superficial de la Losa, temperatura del local y temperatura del cable calefactor.

Durante la NOCHE (PERIODO DE CARGA, con GENERACION INTERNA DE CALOR) este análisis nos permite determinar el tiempo de encendido y apagado del sistema.

Durante el DIA (PERIODO DE DESCARGA) obtendremos la evolución de la temperatura interior con el tiempo, pudiendo determinar si esta se encuentra dentro de los límites de CONFORT. En el caso de no ser así sería necesario un RELANCE, el cual solo podría realizarse en las horas llanas, nunca en horas cruce.

Una vez definido un Modelo para la Variación de la Temperatura de la Losa de hormigón, se estudiará como influyen las siguientes variables:

- Profundidad del cable calefactor dentro de la Losa
- Dosificación de hormigón utilizada en la construcción de la Losa

lo cual nos permitirá analizar:

- La dosificación óptima del Suelo de hormigón.
- La posición óptima del cable calefactor dentro de la Losa de hormigón.

5.2 ESTUDIO TERMICO DE LA LOSA

5.2.1 INTRODUCCION

El estudio de los efectos radiantes es complejo (48). La temperatura media radiante en un recinto cerrado es la obtenida de temperaturas medias de las superficies no calentadas en proporción a sus áreas; estas pueden calcularse a partir de la conductividad y espesor de los materiales y asumiendo un gradiente de temperaturas entre el interior y el exterior del local. Este cálculo solo dá una aproximación; factores tales como la presencia de un gran ventanal, el número de ocupantes, así como la ropa que lleven, y la introducción de calor mediante el empleo de calefactores o a través de las ventanas via radiación solar, hacen que el cálculo de la temperatura media radiante sea enormemente complicado.

5.2.2 TRANSMISION DE CALOR POR CONVECCION Y RADIACION

La energía calorífica que, por convección y radiación, es cedida por el suelo, depende de la diferencia de temperaturas entre su superficie y el aire ambiental y las superficies que limitan el recinto (49).

La convección y la radiación pueden calcularse por separado mediante ecuaciones empíricas.

CONVECCION

$$q_c = S \alpha_c (T_s - T_i)$$

- q_c potencia calorífica de convección (W)
- S superficie de transmisión (m²)
- α_c coeficiente de convección (W/m² °C)
- T_s temperatura superficial de suelo (°C)
- T_i temperatura ambiental del recinto (°C)

RADIACION

$$q_r = S c_{sb} (T_s - T_{RM})$$

- q_r potencia calorífica de radiación (W)
- S superficie de transmisión (m²)
- c_{sb} constante de Stefan-Boltzmann
 $c_{sb} = 5,67 \cdot 10^{-8}$ (W/m²°K)
- T_s temperatura absoluta superficial del suelo (°K)
- T_{RM} temperatura radiante media absoluta (°K)

La potencia calorífica total cedida por el suelo al ambiente vendrá dada como la suma de la potencia calorífica de convección y de radiación, resultando:

$$q_T = q_c + q_r$$

$$q_T = S \alpha_c (T_s - T_i) + S c_{sb} (T_s - T_{RM}) \quad (W)$$

En la práctica, encontramos que cuerpos de diversas formas radian energía en todas direcciones, pero solo una pequeña parte de la radiación total participa en el intercambio de calor.

La integración de la ecuación diferencial para el intercambio de calor, entre áreas infinitesimalmente pequeñas, es bastante complicada y su solución depende de la forma de las dos áreas y de su posición relativa. A este coeficiente se le conoce con el nombre de factor de forma (50).

Todos los métodos prácticos para el cálculo de recintos con calefacción radiante se basan en el siguiente principio (51): la energía total radiada por el panel calentado es absorbida por las otras superficies del recinto. Si se pudiera hallar una temperatura media de todas las superficies no calentadas, el factor de forma sería igual a la unidad, puesto que estas encerrarían completamente a la otra y cada elemento de área no vería más que la superficie envolvente.

Se ha hallado un grán número de instalaciones prácticas en las que la temperatura radiante media (TRM) de los paneles no calentados, calculada mediante la ecuación

$$TRM = \frac{\sum T_i S_i}{\sum S_i}$$

(donde S_i es el área de la superficie i ésima no calentada y T_i su temperatura), involucra errores en el cómputo de la TRM no mayores que los introducidos por aproximar los factores de forma a la unidad.

5.3 CONDICION DE CONFORT

El Suelo Calefactor proporciona una mejora de las condiciones ambientales, por tres razones:

- No hay movimiento de aire, con lo cual se evita el movimiento de polvo y la desagradable sensación de corriente de aire.
- Homogeneidad de la temperatura en el plano horizontal; la emisión de calor se realiza a través de una gran superficie de intercambio, principalmente por radiación a temperatura poco elevada, distribuyendose el mismo confort por todo el recinto (no zonas frías ni zonas sobre-calentadas).
- Homogeneidad de temperatura en el plano vertical; el gradiente de temperatura del aire es prácticamente nulo; la temperatura resultante es la misma a nivel del suelo que en el resto.

Es necesario respetar una condición de confort.

M.M Missenard y Maréchal publicaron dos curvas de confort, que dán, para una temperatura de aire dentro del local calefactado por suelo, la temperatura de superficie a no sobrepasar para que no se produzca incomfort.

Si esta condición no se cumple podría producirse un incomfort notorio.

Los estudios realizados han traducido la condición de confort de M.M. Missenard y Maréchal en una fórmula más fácilmente manejable (figura 5.1 y 5.2).

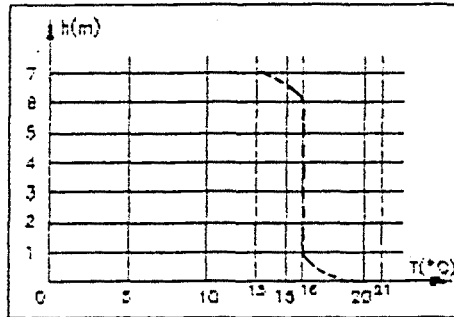


fig 5.1
Ejemplo de gradiente vertical de temperatura obtenido con un suelo calefactor

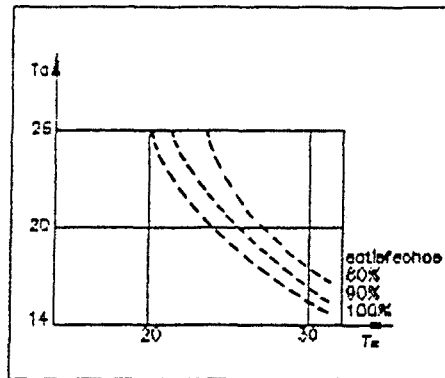


fig 5.2
Porcentaje de individuos satisfechos del confort en función de las temperaturas de aire y de suelo. Gráfico de M. Maréchal.

Estas constataciones experimentales nos permiten, para cada una de las configuraciones de un Suelo Calefactor eléctrico:

- Calcular y verificar el flujo térmico máximo (W/m^2) a no sobrepasar, en función de la temperatura del aire del local, para cumplir la condición de confort.
- Definir el acercamiento de los cables a no sobrepasar.

En el caso de suelos sobre terreno utilizados en la industria, las limitaciones son las siguientes:

- Separación entre cables calefactores :
0,3 m máximo.
- Potencia a no sobrepasar en función de la temperatura del aire del local (TABLA 5.1)

Tª AIRE (°C)	PMAX (w/m2)
<= 15	200
16	185
17	170
18	150
19	120
20	80

TABLA 5.1

5.4 TEMPERATURA AMBIENTAL DEL RECINTO

Después de un considerable número de experiencias adquiridas con instalaciones en funcionamiento, y teniendo en cuenta los factores fisiológicos que han determinado que el grado de confortabilidad no dependa exclusivamente de la temperatura y de la humedad, sino del flujo de densidad calorífica sobre la superficie del cuerpo, se ha llegado, unánimemente, a la conclusión de que si para la temperatura ambiente se aplica el valor de $T_i = 18^\circ\text{C}$ la temperatura percibida por el cuerpo, ó aparente en el recinto se hallará entonces entre 20°C y 21°C .

Esto se debe a que la percepción térmica de los seres humanos está influenciada por la radiación y la convección (en la calefacción por Suelo Radiante la radiación alcanza valores de más de un 50 % del calor total emitido, inalcanzable por otro sistema de calefacción), induciendo a la sensación de un estado de bienestar, por la citada temperatura aparente, que difiere de la realmente existente, que permite una necesaria liberación uniformemente repartida de la energía corporal producida por el metabolismo y por el movimiento (52).

Estas condiciones ideales solo puede cumplirlas la calefacción de Suelo Radiante, manteniendo a su vez un ligero gradiente térmico decreciente de los pies a la cabeza (pies calientes-cabeza despejada).

5.5 TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO

Por razones fisiológicas, el limite superior de la temperatura del suelo para la transmisión de calor debe mantenerse entre los 25°C y 30°C , y en ningún caso debe estar por debajo de 24°C ni por encima de 32°C (53).

Debido a que la temperatura exterior y la interior serán variables a lo largo

del día, también lo será la temperatura superficial del suelo, sujeta, además, a las variaciones provocadas por el encendido y apagado intermitente de la calefacción (54).

En el suelo aparecen también unas franjas térmicas en la dirección de las resistencias (figura 5.3), debido al gradiente térmico entre estas y el hormigón en que están empotradas.

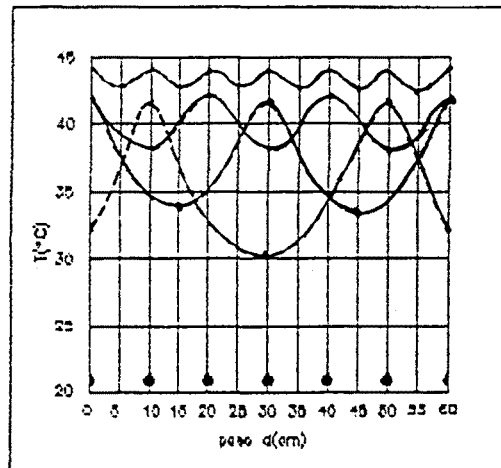


fig 5.3

Las diferencias de temperatura serán tanto menores cuanto menor sea la distancia entre resistencias; en mediciones realizadas en instalaciones en funcionamiento, se han alcanzado diferencias máximas de 3°C, apenas perceptibles para el cuerpo humano.

5.6 TEMPERATURA MÁXIMA DEL CABLE

La temperatura máxima del cable calefactor es de 60°C

5.7 TEMPERATURA EXTERIOR Y RADIACION SOLAR

Para el cálculo de la demanda de calor se ha tomado la temperatura exterior invariable y determinada según la norma UNE 24045.

No se considera el aporte de calor introducido en el local vía radiación solar, por cuanto el objetivo es simular el funcionamiento de la calefacción en diversas condiciones para comprobar la autosuficiencia y capacidad del sistema (55).

Cualquier aporte de radiación solar conllevará un beneficio del usuario y del sistema de calefacción, y se traducirá en un menor consumo de energía eléctrica para la calefacción (56).

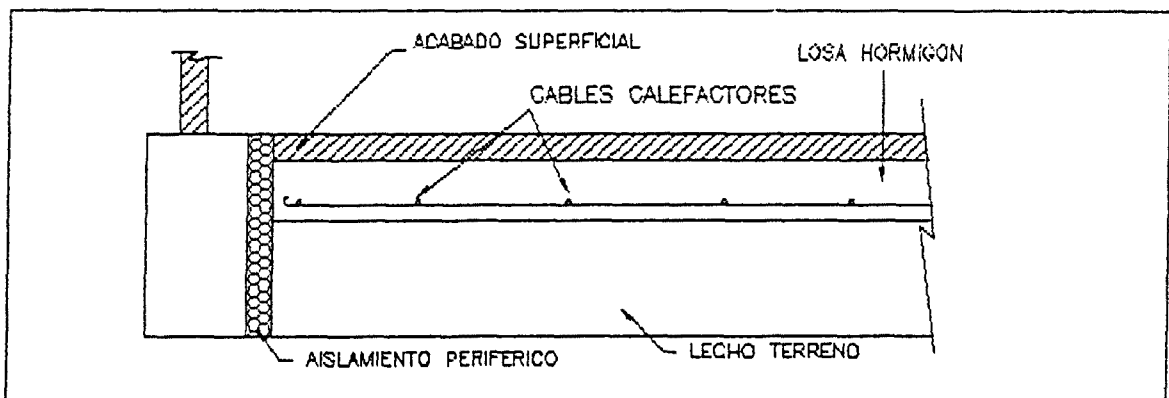
5.8 DOMINIO A ANALIZAR

5.8.1 SUELOS INDUSTRIALES

El Suelo Calefactor para un edificio industrial estará constituido por (figura 5.4):

- TERRENO
Un suelo natural ó de relleno
- LOSA DE HORMIGON
Un lecho de hormigón de 15 a 20 cm de espesor armado con una malla electrosoldada.
- ACABADO SUPERFICIAL
Un lecho de superficie semirígida, el cual confiere al suelo cualidades particulares antiporosas, antideslizantes, antifisuras, etc.

Los CABLES CALEFACTORES se incorporan a la losa de hormigón.



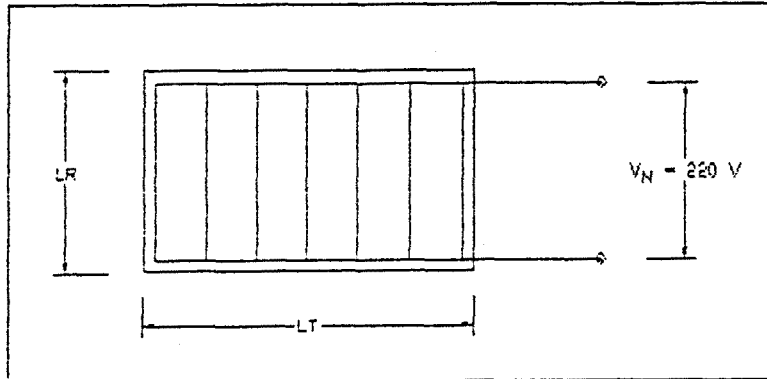
Suelo calefactor industrial
fig 5.4

5.8.2 RESISTENCIAS

La conexión de las resistencias responde a un montaje en paralelo sometidas a una tensión nominal común de 220 V (tensión de la red). (figura 5.5)

La disposición de estas resistencias será paralela a la pared exterior de mayor superficie para compensar así el enfriamiento del ambiente próximo a la pared exterior.

Aunque la separación entre las resistencias debería ser menor en las proximidades de la pared exterior, se tomará un espaciado regular igual entre todas las resistencias que simplificará el problema.

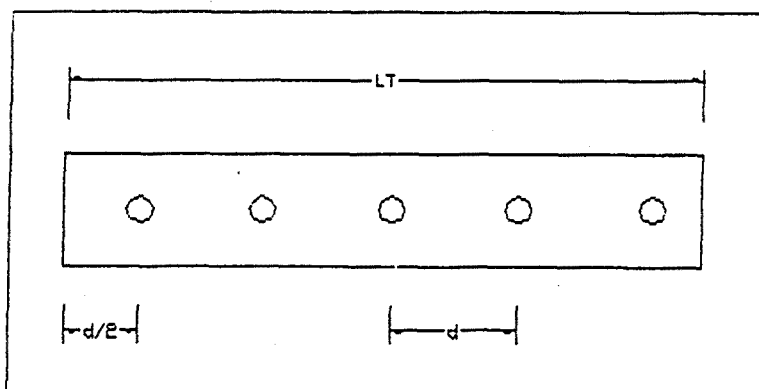


Conexión de las resistencias
fig 5.5

La elección de las resistencias debe hacerse en base a tres criterios:

- El precio por unidad, variable según la potencia que pueda disipar.
- La gama de resistencias disponible en el mercado.
- El gradiente térmico máximo aceptado en el suelo, tanto mayor cuanto mayor sea la potencia disipada por la resistencia por cuanto tanto mayor será el espaciado entre éstas.

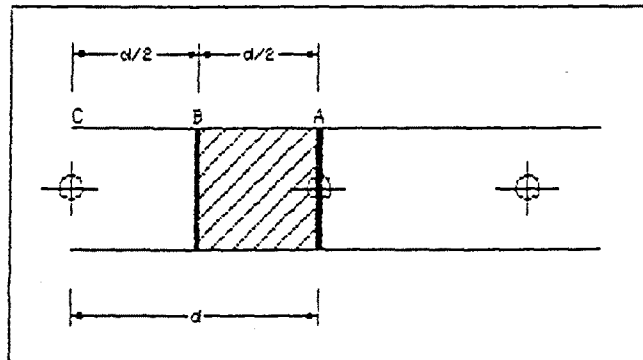
Consideramos la distribución de resistencias indicada en la figura 5.6



Distribución de resistencias
fig 5.6

5.8.3 CELDA TIPO

Discretizamos como se indica en la figura 5.7.



Discretización. Celda tipo
fig 5.7

Puesto que las temperaturas en las secciones A y C son iguales, la sección media B será una sección de simetría respecto a A y C.

Además, puesto que la sección A divide a la resistencia en dos partes iguales, podemos considerar la semicelda comprendida entre A y B como CELDA TIPO a lo largo de toda la longitud transversal del suelo con dos paredes aislantes térmicamente.

a) CELDAS EXTREMAS

La propia construcción del suelo lleva consigo la colocación de un aislamiento periférico para evitar las pérdidas de calor por el perímetro. Además, la superficie lateral de transmisión de calor por conducción es mucho menor que la superficie del suelo de transmisión de calor por convección y radiación.

Por estas razones podemos despreciar el calor transmitido por conducción por el perímetro (capa de aislamiento y superficie pequeña) considerando la superficie perimetral del suelo como aislante perfecto (superficie adiabática).

Aceptando esto y fijándonos en la figura 5.8, se puede observar que las celdas A y B reúnen ahora idénticas características:

- Se ha diseñado el ancho de celda A como la mitad de la distancia entre dos resistencias y por tanto resulta ser igual al ancho de la celda B.
- Ambas celdas son de igual espesor y están formadas por los mismos materiales.
- En el interior de ambas celdas se genera la mitad de calor que se genera en una resistencia
- Las dos celdas pueden ser consideradas aisladas térmicamente por sus extremos.

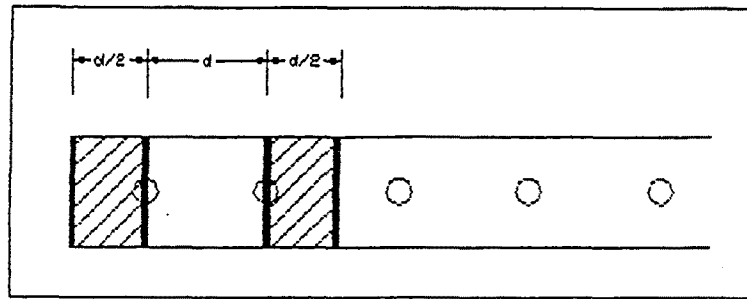


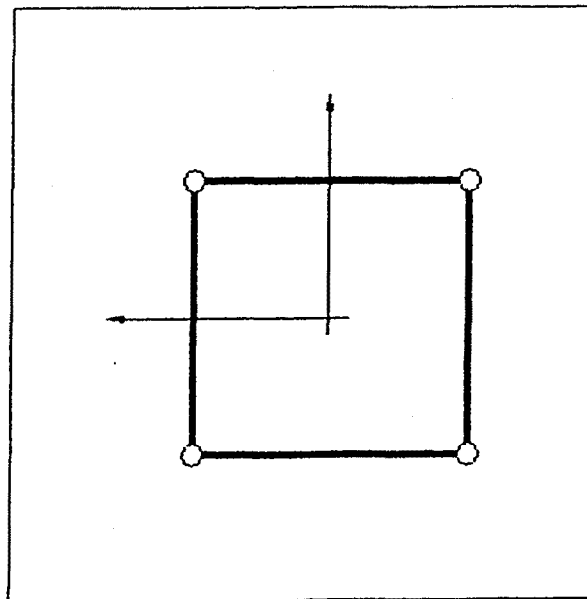
fig 5.8

- b) El perfil de temperaturas en el suelo es constante a lo largo de las resistencias, puesto que la generación de calor es la misma en cualquier punto de éstas.

Por tanto podemos limitarnos a estudiar la distribución de temperaturas en una sección transversal del suelo.

5.9 SELECCION DEL ELEMENTO

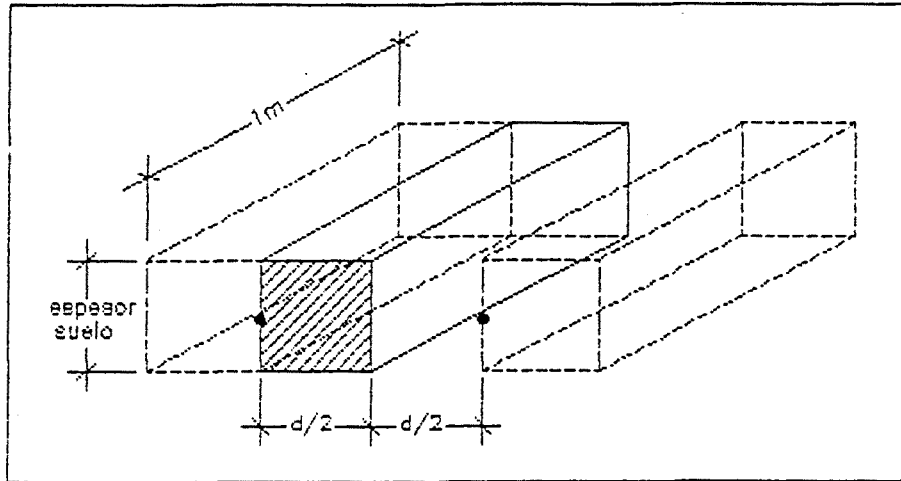
El elemento que se utilizará para la discretización será el elemento cuadrilátero lagrangiano de 4 nodos (figura 5.9).



Elemento cuadrilátero lagrangiano de 4 nodos
fig 5.9

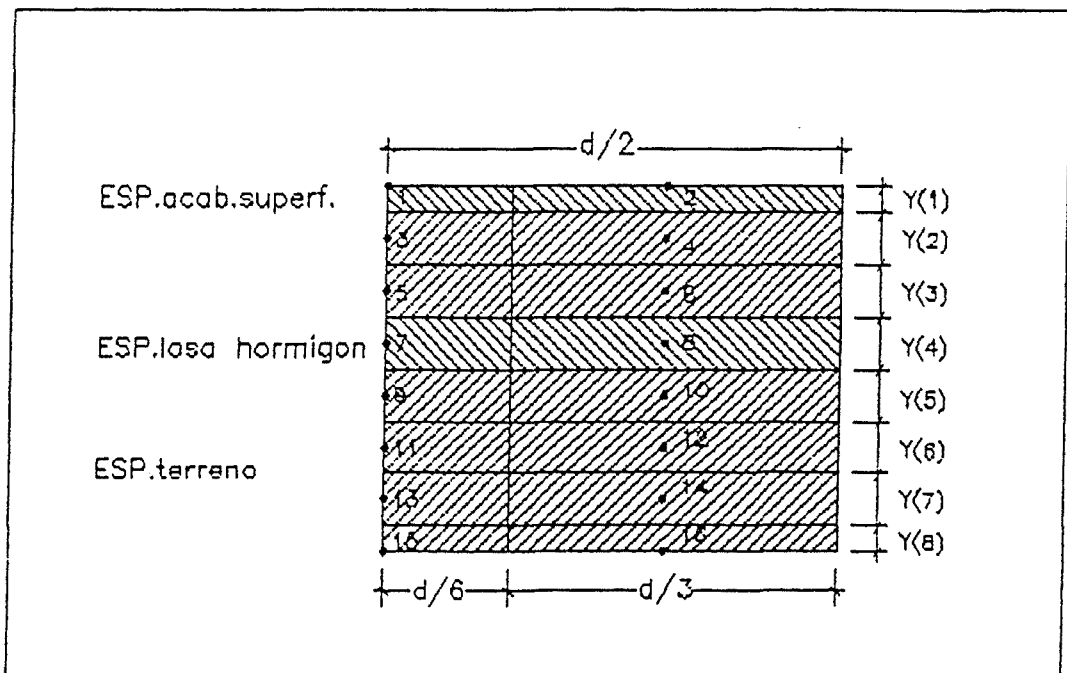
5.10 DISCRETIZACION DE LA GEOMETRIA

Sea A la celda tipo (figura 5.10):



Celda tipo
fig 5.10

Discretizamos la celda tipo mediante el elemento cuadrilátero lagrangiano de 4 nodos tal como se muestra en la figura 5.11.



Discretización celda tipo
fig 5.11

En la discretización horizontal, la razón de la diferencia en el ancho de los elementos impares ($d/6$) y el de los pares ($d/3$) está en que las resistencias se consideran en la modelización de sección rectangular; de este modo, en el elemento impar correspondiente se generará uniformemente la mitad del calor de toda la resistencia.

En cuanto a la altura de los elementos (discretización vertical) se ha subdividido las capas de los diferentes materiales en distintas partes de acuerdo con el espesor relativo de cada material de cara a conseguir elementos de altura similar.

- La capa de acabado superficial queda inalterada por ser, en general, de pequeño espesor (3 a 5 cm).
- La capa de hormigón queda subdividida en 5 capas, una de igual espesor que la resistencia y las otras con el restante. Dado que el espesor del hormigón oscila entorno a los 20 cm y el espesor de la resistencia en torno a 1+2cm, obtendremos una capa de 1 cm y las restantes de 5 cm.
- Para la capa de terreno se considera un espesor de 25 cm (a partir del cual se considera que ya no hay transmisión de calor), el cual lo subdividiremos en 5 capas de 5 cm de espesor.

Finalmente se considerará también dentro de la discretización la capa de aire, la cual tendrá un espesor entre 7 y 10 m.

La discretización será ahora menos intensiva que en el suelo por cuanto el interés se centra en la evolución de las temperaturas dentro de la Losa de hormigón, puesto que en el aire se pretende mantener una temperatura constante del orden de los 18°C.

Se subdividirá por tanto en 5 ó 10 capas de 2 ó 1 m de espesor.

5.11 CONDICIONES DE CONTORNO

5.11.1 CONTORNOS AISLADOS TÉRMICAMENTE

El contorno aislante matemáticamente es conocido como la condición de Newman ó condición de contorno natural que representa un flujo de temperaturas cero en la interfase del dominio con el medio circundante, de manera que:

$$n^T q = 0 \quad \text{por lo que } q = 0 \text{ y } \alpha = 0$$

En el dominio a analizar tendremos que los contornos laterales estarán aislados térmicamente, como ya se vió en el apartado 5.10 en la obtención de la celda tipo.

El contorno inferior correspondiente al terreno también se considerará aislado térmicamente, puesto que a la profundidad considerada de 25 cm despreciaremos la transmisión de calor hacia el terreno.

5.11.2 CONTORNOS CON PERDIDA O APORTE DE CALOR POR CONVECCION-RADIACION

El contorno superior del dominio a analizar será un contorno con pérdida de calor por convección-radiación.

En este caso existe una interacción del calor existente en el medio exterior (T_{ext}) y la temperatura del dominio (T) que de acuerdo con las leyes de la termodinámica se presentará un flujo en la interfase, representado por:

$$n^T q = -\alpha (T - T_{ext}) \text{ con lo que } q = 0$$

El factor α estrictamente representa el fenómeno de convección (57), mientras que el fenómeno de radiación sigue una ley más compleja pero que a efectos de simplificar se puede expresar de la misma manera que la expresada en la ecuación anterior, por lo que α representaría la contribución de ambos fenómenos.

5.11.3 CONTORNO CON TEMPERATURA PRESCRITA

Deberá considerarse como mínimo un nodo con temperatura prescrita.

5.11.4 TEMPERATURAS PUNTUALES NODALES

Se considera para mayor sencillez que las temperaturas puntuales actúan directamente sobre un nodo.

Este vector de temperaturas puntuales es en este caso simplemente:

$$y_i = v_i$$

siendo v_i el vector de temperaturas puntuales sobre el nodo de enumeración global i .

El vector y corresponde directamente a las temperaturas nodales equivalentes, por lo que la aplicación de una temperatura sobre un nodo en particular queda representada directamente por un vector f , particularizado en la ecuación anterior.

Una de las formas de modelizar la generación interna de calor será suponer que en uno de los nodos del elemento que contiene el cable calefactor tenemos aplicada una temperatura determinada durante todo el periodo de carga.

5.12 CONDICIONES INICIALES DE TEMPERATURA

En el caso de realizar un análisis transitorio es necesario proporcionar el número de nodos con valores prescritos de las temperaturas iniciales

nodales.

La temperatura inicial en el primer intervalo de análisis será:

- los nodos pertenecientes a la Losa de hormigón = 8-10°C
- los nodos pertenecientes al terreno = 10-12°C
- los nodos pertenecientes al aire = Text + 3°C

En los siguiente intervalos la T^a inicial será la obtenida al final del intervalo anterior.

5.13 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Las propiedades de los diferentes materiales del dominio a analizar vienen indicadas en la TABLA 5.2.

MATERIAL	TERRENO	HORMIGON		
PROPIEDAD		H	..	H
CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/m°C)	2,10	0,256	..	3,6
DENSIDAD (Kg/m3)	1800	800	..	2600
CALOR ESPECIFICO (W h/Kg °C)	0,23	0,18	..	0,18
		0,23	..	0,23
		0,32	..	0,32
CALOR POR UNIDAD DE MASA (W h /m3 °C)	414	144	..	468
		184	..	598
		256	..	832
COEFICIENTE CONVECCION RADIACION (W/m2 °C)	-	-	..	-

Propiedades de los materiales
TABLA 5.2

5.14 EVOLUCION HORARIA DE LA TEMPERATURA EXTERIOR

La evolución de la temperatura exterior a lo largo de un día en una localidad determinada, está directamente influenciada por los valores de la irradiación solar sobre superficie horizontal en dicha localidad.

El calor absorbido por el terreno se transfiere parcialmente al aire en contacto con el mismo, mediante un mecanismo de convección cuya intensidad está relacionada con el grado de turbulencia de la atmosfera.

Este último factor está fuertemente ligado a la presencia del viento y a la velocidad del mismo.

La radiación solar tiene caracter senoidal, representando su máximo, en el mediodía solar y un mínimo localizado a las horas de salida y puesta del sol. La velocidad del viento alcanza su máximo en las horas situadas poco después del mediodía.

De los puntos anteriores se desprende que la evolución de la temperatura exterior tiene caracter senoidal (58).

El máximo de temperaturas se encuentra retrasado del máximo solar debido a la inercia de la capa superficial de la Litosfera. El desplazamiento entre ambos máximos depende de la rapidez con que el suelo disipe el calor hacia el aire.

Tomando valores medios, este desplazamiento es función de la frecuencia con que aparecen periodos de calma, oscilando entre tres horas para las localidades del interior y una hora para las costeras.

El mínimo de temperatura se realiza aproximadamente a la salida del sol, instante en que finaliza el enfriamiento nocturno. Esta hora y por tanto dicho valor mínimo es dependiente de la latitud y del día del año. La oscilación anual para cada latitud es del orden de tres horas.

A partir de las temperaturas diarias a lo largo de las 24 horas aproximamos la distribución discreta de 24 valores a una distribución continua senoidal ajustada por el método de los mínimos cuadrados, ajuste que es perfectamente válido y nos permite calcular la temperatura exterior en cualquier momento del día.

Para una localidad, año y mes tipo analizando las temperaturas a lo largo de las 24 horas, obtendremos la gráfica correspondiente (59).

En el caso de que conozcamos solamente las temperaturas máxima y mínima, T_M y T_m , y la hora en que se alcanzan, h_M y h_m , esta variación térmica puede ajustarse, con cierta aproximación, a tres expresiones válidas para tres intervalos de horas distintos, que son los siguientes:

(1) Periodo de 0 a h_m :

$$T_{ext} = T_1 - T_2 \cos \left(\frac{180 (h_m - h)}{(24 - h)} \right)$$

(2) Periodo de h_m a h_M

$$T_{ext} = T_1 - T_2 \cos \left(180 \frac{(h_m - h)}{(-H)} \right)$$

(3) Periodo de h_M a 24

$$T_{ext} = T_1 - T_2 \cos \left(\frac{180 (24 + h_m - h)}{(24 - H)} \right)$$

$$\text{donde } T_1 = (T_M + T_m)/2$$

$$T_2 = (T_M - T_m)/2$$

$$H = h_M - h_m$$

Representandolo graficamente en la figura 5.12:

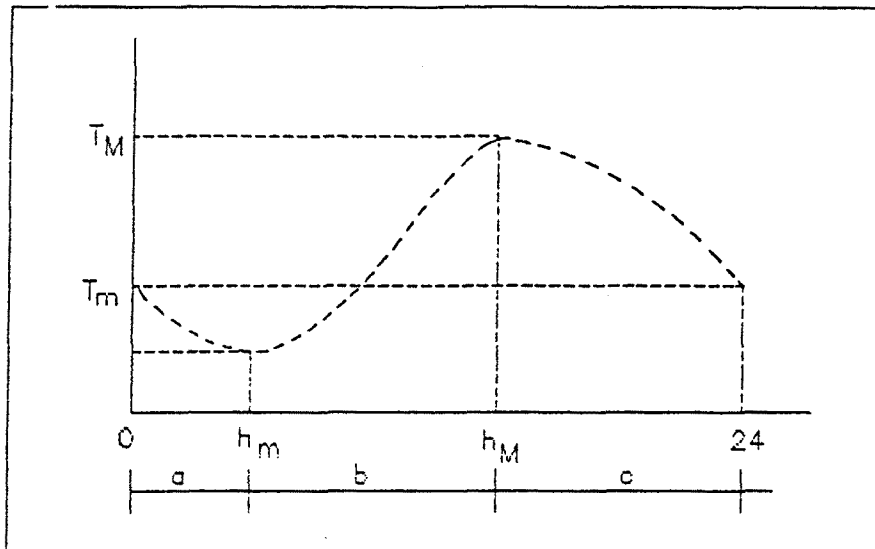


fig 5.12

Podemos acercarnos algo más a la situación real, aceptando que la temperatura exterior varía de forma escalonada, manteniéndose constante de hora en hora.

5.15 CURVAS DE FRECUENCIA ACUMULADA

Analizando la serie histórica de valores de temperatura, que se producen fijando el día del año y la hora, se comprueba que la distribución de dichos valores se puede asimilar a una Normal $N(u, d)$. Conociendo la media y la desviación típica de dicha distribución es posible conocer los valores extremos separados (temperatura máxima y temperatura mínima para cada hora) (60).

El punto de partida para determinar las curvas de frecuencias se encuentra en la constatación anterior.

En cada hora, la media de la distribución viene dada por el valor que la función $T(t)$ toma en cada instante.

Para conocer las desviaciones típicas, es suficiente con calcular las correspondientes a las horas en las que se producen los valores extremos ($T_{\text{máx}}$ y $T_{\text{mín}}$). El resto puede calcularse de varias maneras, aunque en la mayoría de los casos suele ser suficiente una interpolación lineal entre los dos valores anteriores.

Una vez determinadas las Normales para cada hora, se obtienen, mediante aplicación de la teoría de Gumbel, los valores extremos esperados de temperatura.

Subdividiendo el intervalo así definido en un número discreto de subintervalos, cada uno de los cuales representa la probabilidad de ocurrencia determinada se puede generar la población original y a partir de la misma, obtener las curvas de frecuencias.

Este procedimiento puede aplicarse a periodos distintos de 24 horas y cubrir duraciones variables a lo largo del año (61).

5.16 CALCULO DE LA DEMANDA DE CALOR EN REGIMEN PERMANENTE PERDIDAS TOTALES DEL EDIFICIO

En régimen permanente, la demanda de calor del local será precisamente igual a la pérdida de calor; esta puede considerarse, independientemente, como la suma de dos factores: pérdidas a través de las paredes y pérdidas debidas a la infiltración de aire (62).

5.16.1 PERDIDA DE CALOR A TRAVES DE LAS PAREDES

Serán numéricamente igual al producto de la conductancia equivalente K de las paredes por la diferencia de temperatura interior T_i y exterior T_e :

$$PTP = K(T_i - T_e)$$

Distinguiremos tres componentes en las paredes exteriores (63): muros de fábrica con diferentes capas, puertas y superficies acristaladas (ventanas).

a) MURO DE FABRICA

La conductancia equivalente del muro exterior K_m se calculará como inversa de la resistencia equivalente. Esta a su vez se calculará como suma de resistencias en serie de cada componente.

- Resistencia exterior R_e : inversa del coeficiente de convección y radiación de la superficie exterior α_e ,

$$R_e = \frac{1}{\alpha_e}$$

- Resistencia del muro R_m : suma de las resistencias de cada capa de material de espesor e_i y conductividad λ_i ;

$$R_M = \sum_{i=0}^n \frac{e_i}{\lambda_i}$$

- Resistencia interior R_i : inversa del coeficiente de convección y radiación de la superficie interior α_i ;

$$R_i = \frac{1}{\alpha_i}$$

Finalmente la conductancia equivalente del muro se verá afectada por el factor de superficie del muro S_M .

De acuerdo con lo expuesto podemos escribir:

$$K_M = \frac{S_M}{\left(\frac{1}{\alpha_e} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_i} \right)}$$

donde K_M es la conductancia equivalente del muro exterior ($W/^\circ C$), estando las restantes variables expresadas en unidades S.I.

Como paredes exteriores tendremos los cerramientos verticales y la cubierta.

CERRAMIENTO VERTICAL

Panel prefabricado de hormigón aligerado con perlita o vermiculita (dosificación 3/1) de espesor 12 cm.

$$\alpha_i = 9,28 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_e = 16,82 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} = 0,74 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$K = 1/0,74 = 1,35 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$S_M = (2 \times 50 \times 8) + (2 \times 40 \times 8) = 1440 \text{ m}^2$$

Sustituyendo en la expresión obtenida anteriormente:

$$K_M = 1582 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

CUBIERTA

Cubierta de chapa metálica de 0,63 mm de espesor con aislamiento térmico mediante fibra de vidrio de 70 mm de espesor.

$$\alpha_i = 11,6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_e = 19,14 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} = 1,47 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$K = 1/1,47 = 0,57 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$S_M = 1 \times 50 \times 40 = 2000 \text{ m}^2$$

Sustituyendo en la expresión anterior:

$$K_M = 1244 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

La conductancia equivalente para los cerramientos con el exterior será:

$$K_M = K_M(\text{paredes}) + K_M(\text{cubierta})$$

$$K_M = 2826 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

b) PUERTAS

Los valores de la conductancia equivalente de las puertas exteriores, K_p , vienen tabulados en manuales y prontuarios de calefacción y climatización de viviendas, según el tipo y constitución de estas. Análogamente, la conductancia equivalente de la puerta vendrá multiplicada por el factor de superficie de la puerta, S_p .

Podemos escribir:

$$K_p = S_p K_{\text{puerta}}$$

donde K_p es la conductancia equivalente de las puertas exteriores, en unidades ($\text{W/}^\circ\text{C}$), estando las restantes variables expresadas en unidades S.I.

Como puertas consideraremos 2 puertas metálicas opacas de dimensiones $5 \times 5 \text{ m}$, que separan con el exterior.

Tendremos:

$$K_{\text{puerta}} = 5,8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$S_p = 2 \times (5 \times 5) = 50 \text{ m}^2$$

Luego:

$$K_p = 50 \times 5,8 = 290 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

c) VENTANAS

Al igual que las puertas exteriores los valores de la conductancia equivalente de las ventanas exteriores, K_v , vendrán tabulados en

manuales. Llamando S_v a la superficie acristalada podemos escribir:

$$K_v = S_v K_{\text{ventana}}$$

donde K_v es la conductancia equivalente de las ventanas exteriores en unidades ($W/^\circ C$), estando las restantes variables expresadas en el sistema S.I.

Como ventanas consideraremos 20 unidades con carpintería metálica y acristalamiento sencillo, de dimensiones 1,5x1,5 m repartidas en todo el local.

Tendremos:

$$K_v = 5,8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ C$$

$$S_v = 20 \times (1,5 \times 1,5) = 45 \text{ m}^2$$

Luego:

$$K_v = 45 \times 5,8 = 261 \text{ W/}^\circ C$$

La conductancia equivalente de la pared exterior puede tomarse como suma de los muros, de puertas y de ventanas exteriores, despreciando en todo momento los efectos de borde, dadas las grandes dimensiones de la pared, que a efectos de cálculo puede considerarse como infinita (64).

Podemos escribir:

$$K = K_m + K_p + K_v$$

donde K es la conductancia equivalente de la pared exterior en unidades ($W/^\circ C$), estando las restantes variables expresadas en unidades S.I.

$$\text{Luego: } K = 2826 + 290 + 261 = 3377 \text{ W/}^\circ C$$

Finalmente como habíamos dicho, las pérdidas de calor a través de las paredes vendrán dadas como producto de la conductancia equivalente de la pared exterior y la diferencia de temperaturas interior T_i y exterior T_e :

$$PTP = K (T_i - T_e)$$

Tomando como temperatura interior $T_i = 18^\circ C$ y como temperatura exterior $T_e = -2^\circ C$ (para el cálculo de la demanda de calor tomamos la temperatura exterior invariable y según norma UNE 24045)

Sustituyendo:

$$PTP = 3377 \times (18 - (-2)) = 67540 \text{ W} = 67,5 \text{ KW}$$

5.16.2 PERDIDAS DE CALOR POR INFILTRACION DE AIRE (PPI)

Infiltración es la corriente de aire a través de las oberturas practicadas en la estructura del edificio, motivada por diferencias de presión a través de la envolvente (65).

La intensidad de la fuga de aire describe la estanqueidad del edificio y se

determina midiendo las fugas de aire de la estructura protectora.

El control de la infiltración es una estrategia importante para asegurar la comodidad térmica y minimizar el empleo de energía en los edificios.

Las pérdidas por infiltración a través de las puertas y ventanas y por renovaciones del aire ambiente por apertura de puertas y ventanas, pueden ser calculadas como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un volumen de aire a temperatura T_1 a la temperatura ambiente T_0 . De acuerdo con esto será:

$$PPI = V p c (T_1 - T_0) \text{ (W)}$$

donde:

- V es el volumen de renovación de aire (m³/h)
(volumen de aire exterior que entra por hora)(depende de la velocidad y dirección del viento, anchura de rendijas ó tamaño de aberturas, tipos de aberturas, etc.
- p es la densidad media del aire (Kg/m³)
- c es el calor específico del aire (J/Kg K)

Podemos introducir la variable RHA (número de renovaciones de aire por hora); la ecuación anterior quedará:

$$PPI = (VHAB)(RHA) p c (T_1 - T_0) / 3600$$

donde:

VHAB es el volumen del local (m³)

RHA es el número de renovaciones de aire por hora

$$\frac{Vol}{h} = \frac{80}{\sqrt{VI}} = \frac{80}{\sqrt{16000}} = 0,63$$

Tasa de renovación de aire no específica

renovaciones de aire:

almacen.....0,5 vol/h

despachos.....1,0 vol/h

vestuarios.....5,0 vol/h

sanitarios.....5,0 vol/h

Tomando :

$$\rho = 1,247 \text{ Kg/m}^3$$

$$c = 1005 \text{ J/Kg } ^\circ$$

$$VHAB = 16000 \text{ m}^3$$

$$RHA = 0,63 \text{ ren/h}$$

$$V = 0,63 \text{ vol/h} \times (16000 \text{ m}^3 / 1\text{vol}) = 10.080 \text{ m}^3/\text{h}$$

realizando la conversión de unidades:

$$1 \text{ Kcal} = 4,1868 \text{ KJ}$$

$$1 \text{ Kcal/h} = 1,160 \text{ W}$$

Sustituyendo:

$$\text{PPI} = 70.181 \text{ W} = 70 \text{ KW}$$

5.16.3 MARGENES DE SEGURIDAD

Las pérdidas totales de calor vedrán afectadas por unos coeficientes de seguridad para poder hacer frente a condiciones ambientales anormalmente severas (66).

Se han considerado tres coeficientes de uso generalizado en proyecto de climatización de edificios.

- a) **MARGEN POR ORIENTACION (MAO) GEOGRAFICO**, variable según sea esta Norte, Sur, Este u Oeste. Toma valores comprendidos entre un 5 y un 10 %.
- b) **MARGEN POR EXPOSICION DE VIENTO (MVI)**, variable según la situación geográfica del edificio, en zona de vientos fuertes, racheados, etc. Toma valores comprendidos entre un 5 y un 10 %.
- c) **MARGEN DE CALDEO INTERMITENTE (MCI)**, variable según el tipo de edificio, dimensiones, periodos largos de no estancia, etc. Toma valores comprendidos entre un 10 y hasta un 50 %.

5.16.4 DEMANDA TOTAL DE CALOR

De acuerdo con lo expuesto hasta el momento, el sistema de calefacción deberá ser dimensionado de acuerdo con las pérdidas de calor, afectadas por unos coeficientes de seguridad.

La demanda total de calor (DC) a suministrar por las resistencias deberá ser:

$$\text{DC} = (\text{PTP} + \text{PPI}) (1 + \text{MAO} + \text{MVI} + \text{MCI}) (\text{W})$$

donde MAO, MVI y MCI están expresados en tanto por uno.

En régimen permanente, prescindimos de los márgenes de seguridad. La demanda de calor será:

$$\text{DC} = \text{PTP} + \text{PPI}$$

Sustituyendo los valores para el local en estudio:

$$\text{DC} = 67540 + 70181 = 137.721 \text{ W} = 138 \text{ KW}$$

Que para un local de 2000 m² corresponde a 70 W/m².

5.17 CALCULO DE LA POTENCIA INSTALADA

Para el cálculo de la potencia instalada (P_i), partimos de dos datos esenciales (67):

- 1º) Curvas de frecuencias acumuladas de temperaturas medias en la localidad donde se encuentre ubicado el edificio a calefactar.
- 2º) Cálculo de las pérdidas totales del edificio (D_i) (Demanda de calor del edificio, DC).

Como se aprecia en la figura 5.13 están representados dos sistemas de coordenadas:

En el sistema inferior, el eje de ordenadas representa el número de días en que se registra una temperatura media exterior, determinada en el eje de abcisas.

En el sistema superior se proyectan, en el eje de abcisas, los puntos:

- T_{ec} : Temperatura exterior de cálculo ($-2\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- T_{bd} : Temperatura consigna de día ($+5\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- T_{nc} : Temperatura de no calefacción ($+18\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- T_{ic} : Temperatura interior de cálculo ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

determinados en el eje de abcisas del sistema inferior (los criterios para la elección de dichos puntos se expresan más adelante).

El eje de ordenadas del sistema superior representa (en tanto por ciento) la demanda instantánea de calor.

Las pérdidas de calor que debe reponer el sistema calefactor, y que, en definitiva, determina la potencia instalada (P_i) deberá adecuarse al porcentaje que resulta determinado en dicho eje por la intersección de la recta trazada paralelamente a la recta que une los puntos $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_{ic}) del eje de abcisas y el 100% D_i del eje de ordenadas, determinadas a su vez desde el punto $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_{nc}).

En un sistema de calefacción por acumulación pura, la potencia instalada deberá ser 3 veces mayor que en un sistema directo puesto que, en sólo 8 horas, debe producir y reponer el calor perdido por el edificio en 24 horas.

$$P_i = 3 \times DC = 3 \times 138 = 414 \text{ KW}$$

El porcentaje (multiplicado por 3) de la potencia instalada en la base viene determinado por la intersección con el eje de ordenadas (100% D_i) de una recta, paralela al eje de abcisas, que se traza desde el punto de intersección de la proyección del punto T_{bd} ($+5\text{ }^{\circ}\text{C}$) con la recta trazada desde T_{nc} ($+18\text{ }^{\circ}\text{C}$) paralela a la recta T_{ic} , 100% D_i .

La curva de frecuencias de temperaturas medias exteriores de la zona climática en la que se realiza el estudio (definida en la NBC-CT

"Condiciones Térmicas en los Edificios, Aislamiento Térmico) ha sido calculada y trazada mediante ordenador a partir de los datos climáticos publicados por ATECYR.

El salto térmico de cálculo para dicha zona es:

$$T_{ic} - T_{ec} = 20 - (-2) = 22^{\circ}\text{C}$$

De estos 22°C deducimos "conservadoramente" 2°C , que estimaremos como suplidos por aportaciones gratuitas de calor, que sitúan el punto T_{nc} (temperatura de no calefacción) en 18°C .

Situamos seguidamente este punto en el eje de abcisas del sistema de coordenadas inferior y lo proyectamos al sistema superior también en el eje de abcisas (temperaturas medias exteriores). Desde dicho punto trazamos una recta paralela a otra recta trazada previamente que une los puntos $+20^{\circ}\text{C}$ del eje de abcisas al punto 100% Di de eje de ordenadas. Aquella corta al eje de ordenadas en el valor 91% Di que restado de 100 nos indica que las aportaciones gratuitas de calor equivalen al 9% de las necesidades de calor del local que se calcula.

En otros términos, si la temperatura media exterior del día es de $+18^{\circ}\text{C}$, sin necesidad alguna de aporte de calor por parte del sistema calefactor de base, la temperatura interior del local se situará en $+20^{\circ}\text{C}$. Esta es la razón de denominar este punto T_{nc} (temperatura de no calefacción) traduciendo literalmente la denominación adoptada por nuestros vecinos franceses, pioneros destacados en esta técnica.

Con lo anterior hemos reducido el salto térmico en 2°C :

$$T_{nc} - T_{ec} = 18 - (-2) = 20^{\circ}\text{C}$$

Podemos reducir este salto todavía más haciendo la siguiente consideración:

Observando la curva de frecuencias acumuladas de temperatura exterior vemos que en $+5^{\circ}\text{C}$ se produce un notable punto de inflexión. Vemos que de los 224 días de calefacción anuales, solo 30 días bajan de $+5^{\circ}\text{C}$ de temperatura media diaria. En vez de dimensionar la calefacción de base para suplir un salto térmico de 20°C , que representaría una potencia instalada del 91 por 100 de DC, es decir:

$$P_{iB} = (91 \times 3)\text{DC}/100 = 2,73 \text{ DC}$$

Calcularemos la base para un salto térmico de 13°C

$$T_{nc} - T_{bd} = 18 - 5 = 13^{\circ}\text{C}$$

y relanzaremos la calefacción en horas llanas solo cuando la temperatura media exterior baje de los 5°C . El sistema regulador electrónico posee al efecto dos mandos diferenciados (día y noche) para fijar en él los puntos de consigna en horas-llanas (día) y en horas-valle (noche), con lo que:

$$P_{iB} = (54 \times 3)\text{DC}/100 = 1,62 \text{ DC}$$

$$P_{iB} = 1,62 \times 138 \text{ kW} = 224 \text{ KW}$$

Que para un local de 2000 m^2 corresponde a 112 W/m^2

Reduciendo así la potencia instalada casi a la mitad.

El consumo en horas llanas será, como se puede apreciar en el área R del gráfico inferior (que es proporcional al consumo de la base en horas-llanas), tan solo del 3,5 % del consumo total de todo el sistema, frente al 91 % del consumo en horas-valle (área B). Las aportaciones gratuitas de calor serán del 9 % (área G).

La potencia instalada en base (P_{iB}) será suficiente para asegurar una óptima calefacción incluso para temperaturas inferiores a T_{oc} que eventualmente pudieran producirse en años de climatología rigurosa y fuera de lo normal, extremo no tenido en cuenta en las temperaturas exteriores de cálculo asignadas por Norma a la zona correspondiente.

LA POTENCIA A INSTALAR EN LA BASE para satisfacer la demanda de calor del edificio será pues:

$$P_{iB} = 224 \text{ KW}$$

Por otra parte tendremos que :

LA POTENCIA LIMITE A INSTALAR EN EL SUELO para respetar la condición de confort, viene dada por la expresión:

$$P_{\text{limite}} = P_{\text{máx}} / \text{m}^2 \times S_a$$

siendo:

$P_{\text{máx}} / \text{m}^2$; la potencia máxima por m^2 para una temperatura interior determinada
Para $T_{\text{int}} = 18^\circ\text{C}$; $P_{\text{máx}} / \text{m}^2 = 150$

S_a ; superficie del suelo equivalente en cables calefactores. Se toma igual al 90 % de la superficie del local
 $S_a = 0,9 \times S = 0,9 \times 2000 = 1800 \text{ m}^2$

Por tanto:

$$P_{\text{limite}} = 150 \text{ W/m}^2 \times 1800 \text{ m}^2 = 270.000 \text{ W} = 270 \text{ KW}$$

DEBERA CUMPLIRSE que P_{iB} sea menor ó igual que P_{limite}

$$P_{iB} = 224 \text{ KW} < P_{\text{limite}} = 270 \text{ KW}$$

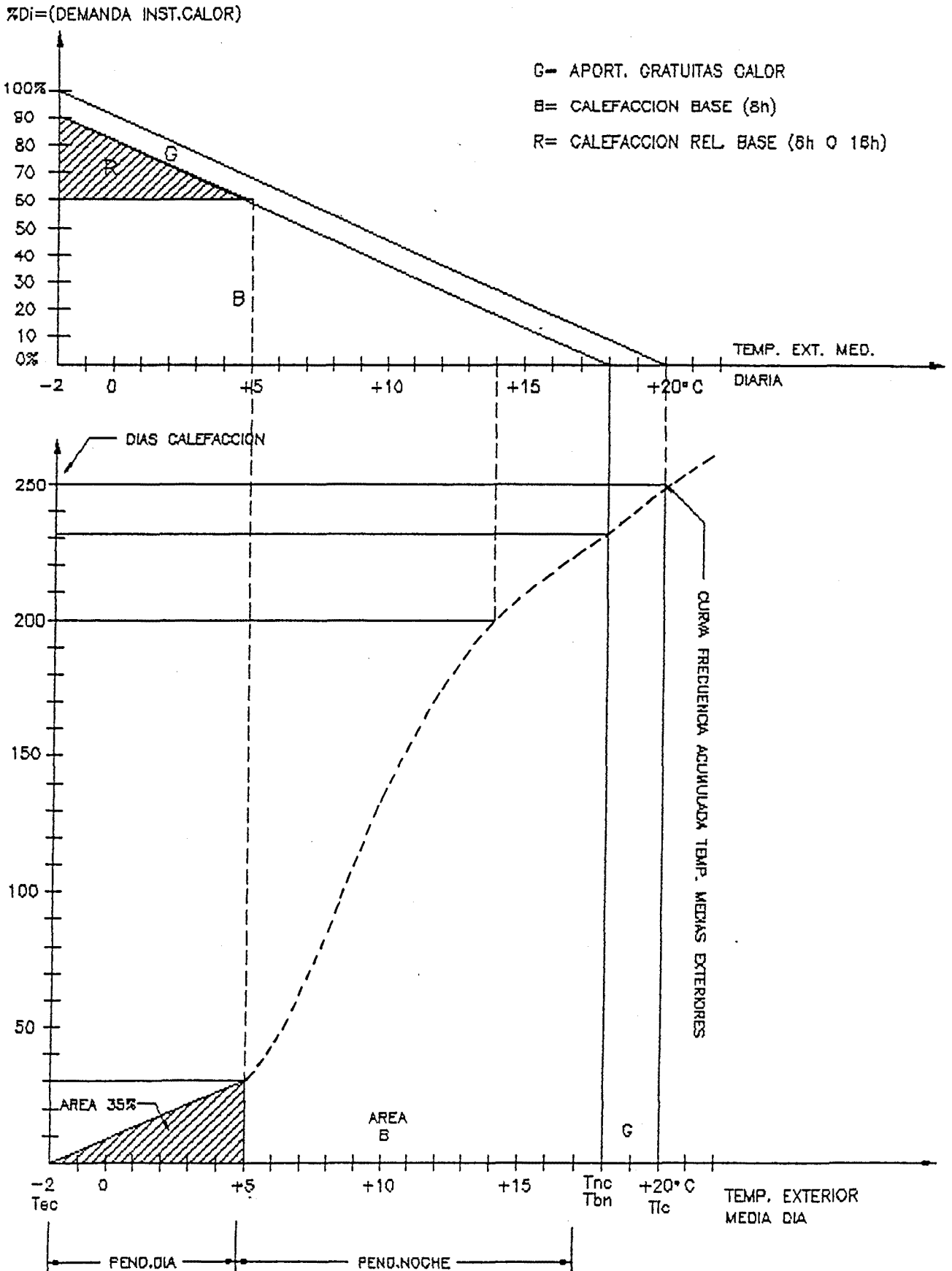


figura 5.13