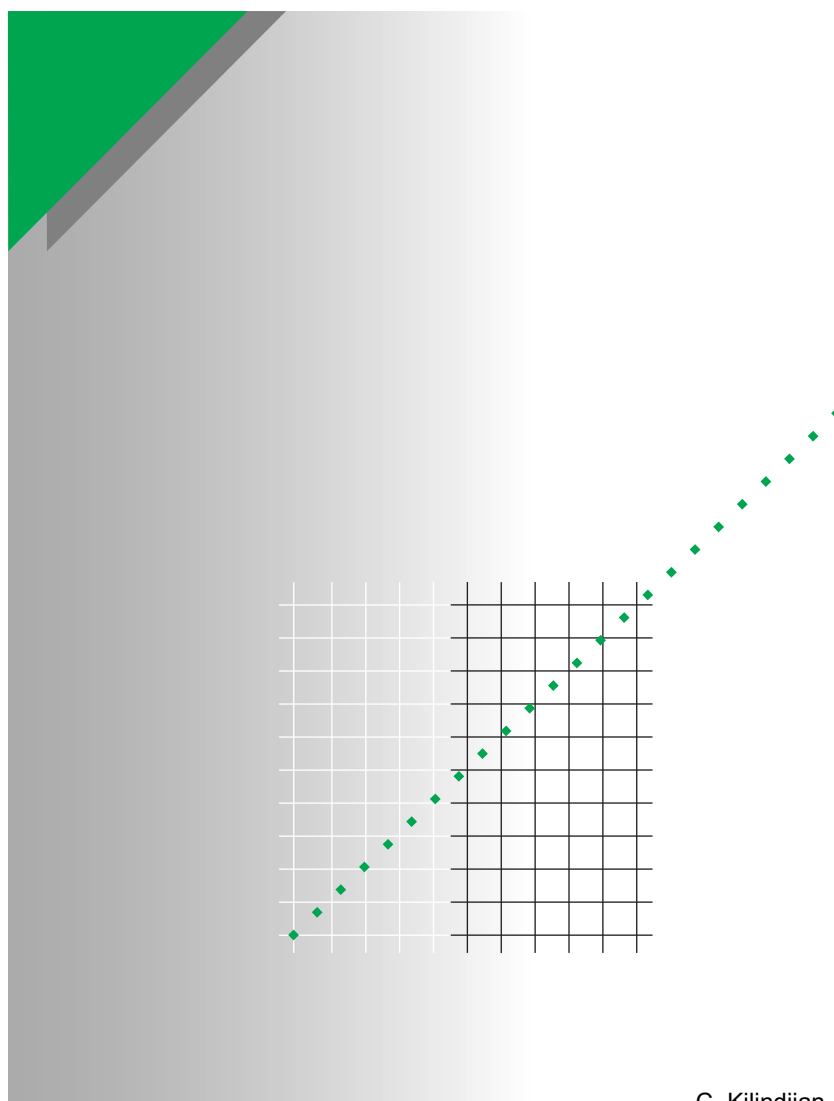


Cuaderno Técnico nº 145

Estudio térmico de los cuadros eléctricos de BT



C. Kilindjian

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:

<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.**, o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80

Fax: (93) 219 64 40

e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» del **Grupo Schneider**.

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 145 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 145

Estudio térmico de los cuadros eléctricos BT



C. KILINDJIAN

Ingeniero diplomado en 1986 de la «Ecole Supérieure d'Energie et Matériaux» de Orleans, se incorpora ese mismo año a Merlin Gerin, en el equipo de Servicio Técnico de la Unidad de Cuadros de BT.

Como responsable de los estudios teóricos de base, se ocupó especialmente de los problemas de transferencia térmica y del comportamiento electrodinámico de los equipos de BT.

Después de haber seguido el desarrollo técnico de los complementos térmicos para envolventes de BT en general, colabora como experto en temas de temperatura en el desarrollo de proyectos de la División de Potencia en BT de Schneider.

Trad.: E. Milà

Original francés: julio 1998

Versión española: febrero 2000

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Terminología

BT: Baja Tensión.

CEI: Comisión Electrotécnica Internacional.

CGBT: Cuadro General de Baja Tensión.

Coefficiente de desclasificación: Para un determinado aparato, razón entre la intensidad térmica convencional bajo la envolvente (I_{the}) y su intensidad asignada de empleo (I_e o I_n). Su valor depende de la forma de instalar y de la utilización del aparato y de su entorno.

Coefficiente de diversidad o de esponjamiento: Razón entre la intensidad asignada del interruptor automático de entrada y la suma de las intensidades asignadas de las salidas. Este coeficiente se denomina también factor de diversidad.

Conjunto de aparamenta de BT: Combinación de uno o más aparatos de conexión a BT con los elementos asociados de mando, medida, señalización, protección, regulación, etc..., completamente montados bajo la responsabilidad del fabricante, con todas las uniones internas mecánicas y eléctricas y sus correspondientes elementos de construcción.

CS/CDS: Conjunto de serie y conjunto derivado de serie (EDS), de equipos de BT, definidos por las normas las cuales imponen diversas características técnicas, criterios de diseño y de realización de los ensayos.

Envolvente de BT: Expresión genérica que designa los cofres, armarios y cuadros BT. Abarca también la estructura que permite asegurar la protección de los diversos componentes y de la aparamenta BT contra ciertas influencias externas y la protección contra contactos directos.

Grado Celsius °C (antes, centígrado): Temperatura con su referencia de 0 °C en la temperatura del hielo fundente, y con 100 °C en la temperatura del agua hirviendo a presión atmosférica normal.

Grado Fahrenheit, °F: Unidad utilizada particularmente en el área de influencia de los países de lengua inglesa. Sus puntos de referencia son: 32 °F, para la temperatura del hielo fundente, y 212 °F para la temperatura del agua hirviendo a presión atmosférica normal. Para obtener la expresión de la temperatura Fahrenheit a partir de los grados Celsius, debe multiplicarse la temperatura en °C por 9, dividir el resultado por 5 y sumarle 32.

Grado Kelvin, K: Unidad de temperatura del sistema internacional (SI). Escala absoluta porque su definición se deduce de datos físicos precisos. Su graduación es la misma que la escala Celsius, pero con origen decalado 273 grados: la temperatura del hielo fundente corresponde a 273 K.

Intensidad asignada de empleo (I_e ó I_n): Para un aparato dado, es la especificada por el fabricante y tiene en cuenta la tensión asignada de empleo, la frecuencia asignada, el servicio asignado...

Intensidad térmica convencional al aire libre (I_{th}): Es el valor máximo de la intensidad de prueba a utilizar para los ensayos de calentamiento de un componente al aire libre. Su valor debe ser al menos igual al valor máximo de la corriente asignada de empleo para el componente sin envolvente, en servicio durante 8 h.

Intensidad térmica convencional bajo envolvente (I_{the}): Es el valor de la intensidad, fijada por el fabricante, que hay que utilizar para los ensayos de calentamiento de los componentes cuando están montados bajo una envolvente específica. Si el material está destinado normalmente a utilizarse bajo envolvente no específica, este ensayo no es obligatorio ya que queda sustituido por el de intensidad térmica convencional al aire libre (I_{th}). En este caso, el fabricante debe estar en condiciones de suministrar los valores de intensidad térmica bajo envolvente o bien el valor del factor de desclasificación.

Juego de barras (embarrado): Expresión genérica que designa el conjunto de conductores rígidos de distribución de corriente eléctrica en el interior de una envolvente de BT no incluyendo los conductores situados aguas abajo de la aparamenta de protección y/o de mando.

Sistema: En el sentido térmico de la expresión, es la región del espacio que se toma en consideración y en la que se estudian los procesos térmicos y su evolución. Está limitado por las fronteras, reales o ficticias, que según el tipo de intercambio que se produzca en su interior nos permite distinguir entre los sistemas aislados (sin ningún intercambio de energía ni de materia a través de su frontera), sistemas cerrados (únicamente se intercambia energía a través de su frontera, por ejemplo: envolvente de BT estanca) y sistemas abiertos (eventual intercambio de materia y energía a través de su frontera, por ejemplo: envolvente BT ventilada).

Termodinámica: Parte de la Física que trata de la producción, transmisión y utilización del calor. Aquí, se considera el aspecto de la transmisión, exponiendo sucintamente las leyes de transferencia (conducción, convección y radiación) y de las nociones sobre los métodos para su evaluación.

Estudio térmico de los cuadros eléctricos BT

El objetivo de este Cuaderno Técnico es aportar una contribución a la comprensión y dominio de los problemas térmicos que aparecen en un cuadro eléctrico BT.

Empezando por un repaso de las normas y los fenómenos térmicos: conducción-radiación-convección, se sigue mostrando cómo, a partir de las técnicas de modelización, generalmente reservadas a otros dominios, es posible realizar una modelización en los armarios BT.

La modelización alimenta naturalmente los programas informáticos de ayuda al diseño de armarios para equipos de aparamenta eléctrica.

Los resultados obtenidos se comparan con las mediciones reales de temperatura.

Finalmente, se resalta la metodología y las posibilidades de la guía CEI 890.

Índice

1	Introducción	1.1 Control térmico de los armarios eléctricos BT	p.	6
2	Los problemas térmicos en un cuadro	2.1 Causas, efectos y soluciones	p.	7
		2.2 Detalle sobre las normas	p.	8
3	Comportamiento térmico de un cuadro eléctrico BT	3.1 Repaso sobre los principales fenómenos térmicos	p.	11
		3.2 Intercambios al nivel de un cuadro	p.	14
4	Presentación de la modelización	4.1 Principio	p.	15
		4.2 Modelización de la convección	p.	16
		4.3 Aplicación a las envolventes de BT	p.	17
5	Comportamiento de las fuentes de calor	5.1 Los juegos de barras	p.	18
		5.2 La aparamenta	p.	19
6	Método de cálculo de la temperatura en el interior de las envolventes	6.1 Principio	p.	21
		6.2 Descripción de los datos a suministrar y de los datos obtenidos	p.	21
		6.3 Configuraciones modelizadas	p.	22
		6.4 Resultados	p.	22
		6.5 Resultados experimentales	p.	25
7	Método propuesto por el documento CEI 890		p.	26
8	Conclusión		p.	28

1 Introducción

1.1 Control térmico de los armarios eléctricos BT

Los nuevos métodos de fabricación desarrollados por la industria en el transcurso de los últimos años (tendencias, flujos,...) han puesto en evidencia una nueva noción: **la seguridad industrial**. Este concepto, que engloba dos aspectos diferentes: la seguridad de las personas y de los bienes y la disponibilidad de la energía eléctrica, muestra cuando se aplica a procesos complejos, los puntos críticos en los que el funcionamiento debe estar perfectamente normalizado.

El cuadro eléctrico es uno de estos puntos críticos.

Hay que destacar que el problema es similar al del sector terciario.

Considerado, no hace mucho, como un simple punto de paso, se ha convertido en el verdadero centro neurálgico de las instalaciones eléctricas. De su seguridad depende la seguridad del conjunto de la instalación y con ello de toda la actividad industrial o terciaria.

El dominio de su funcionamiento precisa conocer y controlar no sólo el funcionamiento de sus constituyentes sino también las influencias externas a las que se ven sometidos.

Un cuadro eléctrico responde a la asociación de 4 elementos fundamentales:

- la envolvente,
- la aparamenta,
- las conexiones,
- las funciones que garantizan la señalización, el mando y el tratamiento de la información.

El cuadro eléctrico es **cada vez más técnico**. Necesita unos **estudios de base** para controlar, ya desde el diseño, las condiciones de funcionamiento de sus componentes en un entorno determinando.

Estos estudios se refieren entre otros a los **aspectos térmicos**, que son el objeto del presente Cuaderno Técnico.

2 Los problemas térmicos de un cuadro

El control de los fenómenos térmicos es de todos el más importante, principalmente por tres razones:

- por la tendencia a instalar el material eléctrico bajo envolventes (seguridad) que suelen ser de material aislante (poco eficaces para disipar el calor);
- por la evolución de la aparamenta que integra, cada vez en mayor medida, la electrónica, cuyas dimensiones se van reduciendo sistemáticamente;
- por la tendencia a ocupar el volumen del armario al máximo y aumentar el coeficiente de esponjamiento.

Esto puede ocasionar un problema de calentamiento que se manifestará con temperaturas, localizadas en diversos puntos de un aparato o de un equipo de BT, superiores a los valores límite fijados por las normas o dependientes del comportamiento de ciertos componentes. Un estudio térmico de una envolvente BT tiene por objetivo principal el determinar la intensidad admisible para cada aparato, compatible con sus características, teniendo en cuenta su entorno de funcionamiento.

2.1 Causas, efectos y soluciones

La temperatura de un material eléctrico es el resultado:

- del efecto Joule ($P = I^2R$), es decir, de su resistencia al paso de la corriente,
- de la temperatura ambiente.

La aparamenta eléctrica se diseña respetando las normas de fabricación que definen las temperaturas máximas que no deben rebasarse, para la seguridad de las personas: temperatura de la caja y de los órganos de maniobra, diferencia máxima de temperatura en los bornes.

Todo ello se verifica por ensayos de certificación de los productos.

En un cuadro eléctrico, el material está sometido a condiciones de empleo muy diversas y las causas de sobret temperatura son múltiples.

La tabla de la **figura 1** presenta las causas principales, sus efectos y las posibles soluciones.

Todo el problema consiste en asegurarse, en el momento del diseño del cuadro, de que todos sus componentes funcionarán en unas condiciones de temperatura menos severas que las límites previstas en las normas de construcción. La aparamenta de conexión (interruptores automáticos, contactores, etc...), deberán poder ser atravesados por la corriente prevista sin ningún problema.

El otro objetivo de seguridad para las personas y los bienes, no debe perderse de vista desde las dos condicionantes adicionales:

- disponibilidad de la energía eléctrica (sin funcionamiento intempestivo o no funcionamiento),
- tiempo de vida de los componentes.

En definitiva, el objetivo a alcanzar consiste en prever, con alta fiabilidad, el estado de funcionamiento térmico del cuadro.

Para conseguirlo, nos apoyaremos en tres tipos de soluciones:

- la experiencia del cuadrista,
- los ensayos reales para los cuadros repetitivos,
- la utilización de programas informáticos con los que es posible determinar, en función de las características de la envolvente, el par intensidad-temperatura para cada una de las fuentes de calor (aparamenta, conductores) (**capítulo 4**), y todo ello en función de su posición y de la temperatura del aire que les envuelve. Es evidente que un programa informático amparado por la experiencia y los ensayos es muy útil ya que permite estudiar comparativamente las numerosas configuraciones de instalaciones posibles y optimizar el cuadro a realizar desde el punto de vista térmico... y del coste.

Causas	Efectos	Protección	Soluciones		
Temperatura externa demasiado elevada	<ul style="list-style-type: none"> ■ Temperatura interna del cuadro demasiado elevada ■ Disparo de los relés térmicos ■ Envejecimiento de la parte electrónica ■ Temperatura de las paredes externas del cuadro excesivamente alta 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alarma ■ Puesta en marcha de alguna ventilación 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mejorar la ventilación del local o del cuadro 	Soluciones aleatorias posibles con un diseño conforme al buen saber hacer del profesional	Norma CEI 439
Coeficiente de esponjamiento elevado. Desbordamiento de las posibilidades de la instalación	<ul style="list-style-type: none"> ■ Disparo de la protección de cabecera del cuadro ■ Temperatura interna del cuadro excesiva ■ Temperatura de las paredes externas del cuadro excesivamente alta 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Desconexión 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dimensionar adecuadamente el cuadro 		
Cortocircuito o sobrecarga	<ul style="list-style-type: none"> ■ Deterioro de los conductores ■ Deterioro de los soportes aislantes de las barras 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Desconexión de seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dimensionar adecuadamente los conductores ■ Buena capacidad electro-dinámica de los soportes a temperatura elevada 		Norma CEI 634
Conexiones defectuosas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Destrucción de los conductores de la aparamenta 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Disparo aleatorio aguas arriba 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verificación de las conexiones ■ Detección de calentamientos 	Problemas de montaje y de mantenimiento.	
Sección insuficiente de los conductores	<ul style="list-style-type: none"> ■ Destrucción de los conductores 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ninguna 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dimensionamiento correcto de los conductores 	Defecto de diseño de la instalación	Norma CEI 898
Error de escalonado de la aparamenta o mala disposición física	<ul style="list-style-type: none"> ■ Funcionamiento anormal (disparos) ■ Envejecimiento prematuro 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Disparo o señalización 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Revisar la elección de los componentes y su distribución ■ Ventilación 	Elección o uso inadecuado de la aparamenta	Norma CEI 947

Fig. 1: Problemas térmicos y relación causa/efecto.

2.2 Detalle sobre las normas

Son muchas las normas que abarcan el amplio campo de la BT, por ejemplo la UNE 20460 que define las reglas a respetar para todas las instalaciones de baja tensión.

Para los aspectos de definición y de concepción de los aparatos y conjuntos de BT podemos referirnos respectivamente:

- a las normas de aparamenta, por ejemplo la CEI 60947,
- a la norma CEI 60439, para los armarios (y sus montaje) en BT.

La norma internacional CEI 60439 se divide en cinco partes:

- CEI 60439.1 (nov. 1992) que reúne las reglas para los conjuntos de serie (CS) y los conjuntos derivados de serie (CDS).

- CEI 60439.2 (1997) que define las reglas para las canalizaciones prefabricadas,
- CEI 60439.3 (dic. 1990) que comprende la instalación de la aparamenta de BT en zonas accesibles a personas no advertidas,
- CEI 60439.4 (dic. 1990) que define las reglas para las instalaciones en canteras,
- CEI 60439.5 (mar. 1996) que se refiere al montaje de redes de distribución, instaladas en el exterior (por ejemplo, armarios para aceras o andenes).

La parte que afecta particularmente a los cuadros BT es la CEI 60439.1 editada en 1992. En el ámbito europeo, esta última es la base de la mayor parte de normas nacionales (British Standard, NFC, VDE, UNE ...). En efecto sus

contenidos transcriben fielmente el texto de la norma CEI, las diferencias corresponden más a costumbres propias de cada país que a diferencias causadas por puntos fundamentales de la norma CEI.

La aportación esencial de esta norma ha sido el definir de forma precisa dos nociones

encaminadas ambas hacia un aumento de la seguridad. Éstas son:

- la noción de conjuntos totalmente ensayados **CS** (conjuntos de serie) o parcialmente ensayados **CDS** (conjuntos derivados de serie),
- la noción de las formas (figura 2).

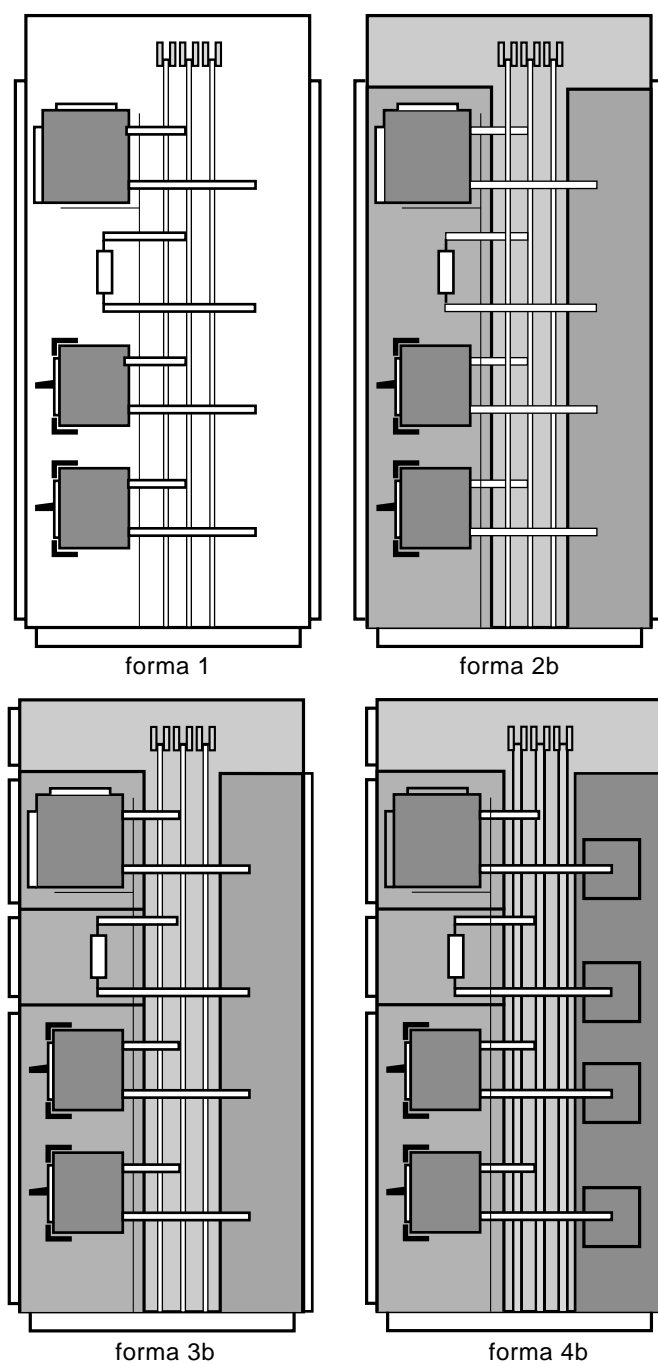


Fig. 2: Diversas «formas» según la norma CEI 60439.

Sin entrar en el detalle, podemos decir que los **CS** corresponden a productos perfectamente definidos y fijados tanto a nivel de componentes (planos precisos de cada uno de sus constituyentes) como de su fabricación (guía de montaje) y deben satisfacer los **ensayos de tipo** (calentamiento, cortocircuito, continuidad de masa...) definidos por la norma.

Los **CDS** corresponden a conjuntos en los que la estructura de base es un CS con una o varias modificaciones; modificaciones que deben de estar validadas por el cálculo o por un ensayo específico.

La noción de **forma** corresponde a una definición precisa de los grados de separación que pueden encontrarse en un cuadro y que aumentan la protección de las personas por una no accesibilidad a las partes activas (juegos de barras...). Se distinguen 4 tipos de formas que van desde una ausencia total de separación (forma 1) hasta un cierre completo de los diferentes elementos del cuadro (forma 4).

Hay que advertir que este encierro incide muchísimo sobre la componente térmica de estos conjuntos.

La norma CEI define igualmente el ensayo de calentamiento que debe satisfacer un conjunto.

Esta norma precisa las condiciones y los límites de calentamiento (8.2.1 de la norma) que no deben rebasar los diferentes constituyentes del conjunto.

■ Condiciones de ensayo:

□ El conjunto debe estar dispuesto para el uso normal.

□ La corriente correspondiente al valor asignado se reparte entre los diferentes aparatos teniendo en cuenta un factor de diversidad (K_d) variable según el número de circuitos principales.

$2 \leq n^\circ \text{ de circuitos principales} \leq 3 \quad K_d = 0,9$

$4 \leq n^\circ \text{ de circuitos principales} \leq 5 \quad K_d = 0,8$

$6 \leq n^\circ \text{ de circuitos principales} \leq 9 \quad K_d = 0,7$

número de circuitos principales $\geq 10 \quad K_d = 0,6$

□ Se consigue realmente la estabilización térmica cuando la variación de temperatura no excede de 1°C/h . Los conductores conectados a los aparatos deben de tener su sección conforme a las directrices de la norma.

□ Las mediciones de temperatura se efectúan con ayuda de termopares.

□ La temperatura ambiente de referencia es de 35°C .

Con relación a la temperatura ambiente, no deben rebasarse los calentamientos:

■ 70 K para los bornes de conexión de los conductores exteriores,

■ 25 K para los órganos de mando manual de material aislante,

■ 30 K ó 40 K para las superficies metálicas externas, accesibles o no.

■ valores específicos particulares para los constituyentes incorporados y también para los aislantes en contacto con los conductores.

Hay que señalar todavía un tema de normalización: la existencia de una guía técnica de predeterminación de los calentamientos (CEI 890). Ha estado validada por numerosos ensayos ya que no tiene la categoría de norma.

La guía da resultados correctos para unas configuraciones simples (envolvente poco compartimentada, fuentes de calor uniformemente repartidas...). En el **capítulo 7** se hace una presentación de este método así como una comparación con nuestro método de diseñadores de «armarios».

3 Comportamiento térmico de un cuadro eléctrico BT

Un cuadro eléctrico es un sistema compuesto de un fluido (el aire) y de cuerpos sólidos en los que el paso de corriente eléctrica va acompañada de pérdidas de energía que provocan una elevación de temperatura.

La evolución hacia el equilibrio térmico se realiza por transferencia del calor desde las partes activas (aparatos, conductores,...), donde se genera dicho calor, hacia las partes en contacto con el exterior que lo transmiten a su alrededor, al medio que les rodea.

3.1 Repaso sobre los principales fenómenos térmicos

Los intercambios térmicos permiten describir el comportamiento de un sistema cualquiera, en el que el sistema es un cuadro eléctrico. Hacen intervenir tres tipos de fenómenos diferentes:

Fenómeno de conducción: que corresponde a una transferencia de calor al interior de cuerpos sólidos (**figura 3**). Se distinguen:

- por una parte, los fenómenos de conducción simple, para los que el cuerpo considerado no es la base de ningún fenómeno térmico, por ejemplo: conducción al interior de un muro,
- por otra parte, los fenómenos de conducción viva, donde el cuerpo estudiado es la base de una creación de calor; por ejemplo: barra de cobre recorrida por una corriente eléctrica.

Los cálculos relativos a la transmisión de calor por conducción se basan en la ley de Fourier, que para las geometrías simples, se reduce a la relación:

$$\Phi_{ij} = \frac{\lambda S}{d} (T_i - T_j)$$

siendo:

Φ_{ij} = flujo transmitido entre dos puntos i y j, en W,

λ = conductividad térmica en W/m °C,

S = superficie de transmisión en m²,

T_i, T_j = temperaturas de los dos puntos en °C,

d = distancia entre los dos puntos en m,

λ es una característica del medio «conductor». Su valor es función de la temperatura pero a menudo se considera como una constante.

Por ejemplo: algunos valores de λ en W/m °C:

Plata	$\lambda = 420$
Cobre	$\lambda = 385$
Aluminio	$\lambda = 203$
Acero	$\lambda = 45$
Materiales plásticos	$\lambda = 0,2$
Asfalto	$\lambda = 0,935$
Piedra	$\lambda = 0,657$
Lana de vidrio	$\lambda = 0,055$
Aire (30 °C)	$\lambda = 0,026$

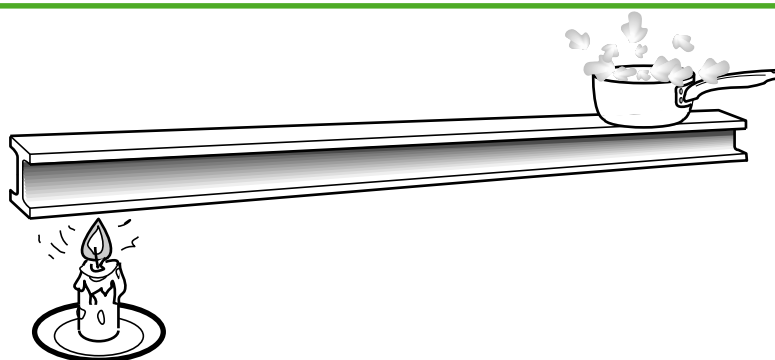


Fig. 1: Impedancia de las conexiones.

Fenómeno de radiación: corresponde a la transferencia de calor entre cuerpos sólidos separados por un medio más o menos transparente (**figura 4**).

Estos intercambios, que se establecen entre las superficies de cuerpos cualesquiera dispuestos uno frente a otro, se representan por relaciones bastante complejas en las que intervienen:

- la emisión del sólido, que si es considerado como un cuerpo negro, no es función de su temperatura,
- los estados de superficie, representado por medio del coeficiente de emisividad e , que caracteriza el grado de las superficies de estos cuerpos con referencia al cuerpo negro,
- los fenómenos de reflexión y de absorción,
- la disposición de las superficies unas respecto a las otras por la intermediación de los factores de forma.

Sin embargo, en el caso particular de una superficie (por ejemplo, j) que envuelve completamente a la otra (i) y tal que la razón S_i/S_j sea de valor bajo, estas expresiones se simplifican y se llega a:

$$\Phi_i = \varepsilon_i \sigma S_i (T_i^4 - T_j^4)$$

siendo:

Φ_i = flujo de calor transmitido a través de la superficie S_i , en W,

ε_i = coeficiente de emisividad en la superficie S_i ,

σ = constante de Stefan-Boltzmann

$(5,67032 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4})$,

S_i = superficie en m^2 ,

T_i, T_j = temperatura de las superficies en transmisión en K.

Fenómenos de convección: bajo el término general de convección se funden, de hecho, dos fenómenos diferentes que a menudo se aúnan.

■ **el fenómeno de convección propiamente dicho** que corresponde a una transferencia de calor entre un cuerpo sólido y un fluido en movimiento. Según el origen del movimiento del fluido se distingue la convección natural y la convección forzada (**figura 5**).

Estas transferencias se caracterizan por los coeficientes de intercambio h_i :

$$\Phi_i = h_i S_i (T_f - T_i)$$

siendo:

Φ_i = flujo de calor transferido a la superficie S_i , en W,

h_i = coeficiente de intercambio en $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$,

T_f, T_i = temperaturas del fluido y de la superficie de transferencia en $^\circ\text{C}$.

Desde un punto de vista físico, el problema de intercambio de calor por convección está fuertemente relacionado a un problema de mecánica de fluidos.



Fig. 4: Fenómenos de radiación.

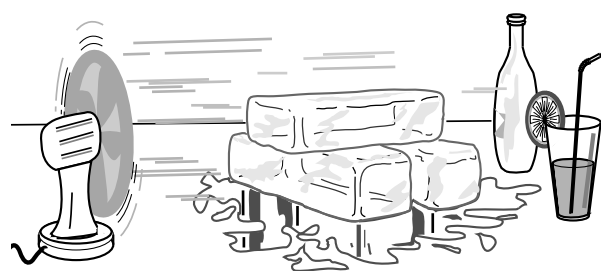


Fig. 5: Fenómenos de convección.

Desde un punto de vista práctico, el problema puede abordarse simplemente por utilización de coeficientes de intercambio donde la expresión hace intervenir:

- los parámetros que describen la transferencia de flujo del fluido (velocidad...),
- las propiedades físicas del fluido (conductividad térmica, viscosidad dinámica, capacidad calorífica, masa volumétrica...), asociadas, a menudo, bajo forma de nombres sin dimensión o características (como Nusselt, Prandtl, Reynolds, Grasshof...).

Por ejemplo: expresión del coeficiente de intercambio en convección natural para una geometría simple: placa plana vertical de altura L a una temperatura uniforme:

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{\text{Dh}},$$

siendo:

Nu = número de Nusselt: $0,53(\text{GrPr})^{0,25}$, donde Gr y Pr son respectivamente los números de Grasshof y de Prandtl, función de las propiedades físicas del fluido y del salto de temperatura entre el fluido y la superficie de transmisión,

λ = conductividad térmica del fluido ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$),
 Dh = dimensión característica (m).

Habitualmente esta magnitud corresponde a la mayor dimensión del cuerpo sólido en contacto con el fluido en movimiento, aquí L .

Importante: Es interesante notar que el coeficiente de intercambio depende del salto de temperatura solamente a la potencia 0,25. Por tanto $h = K(\Delta t)^{0,25}$.

■ **el fenómeno de movimientos convectivos** que corresponde a la transferencia de calor en el seno de un fluido por medio de los bucles de convección que explican, por ejemplo, el gradiente de temperatura observado entre las partes baja y alta de un volumen de fluido cerrado, sede de fenómenos térmicos.

Los movimientos de aire entre dos volúmenes i y j se caracterizan por las diferencias de masa, función de las secciones de paso y de la velocidad de circulación (**figura 6**).

La transferencia de calor se representa por:

$$\Phi_{ij} = \bar{M} \text{ cp } (T_i - T_j)$$

siendo:

Φ_{ij} : flujo de calor transferido entre i y j , en W,

\bar{M} : circulación másica, en kg/s,

cp : capacidad calorífica del fluido en J/kg °C,

T_i, T_j : temperatura del fluido en los volúmenes i y j , en °C.

Nota: la transferencia de calor viene impuesta por el sentido de circulación.

Expresión de la velocidad del fluido: en el caso de la convección natural, el fluido se pone en movimiento entre los puntos i y j por sus variaciones de masa volúmica con la temperatura.

La velocidad se supone será proporcional a las citadas variaciones función de la diferencia de temperatura entre i y j .

$$V_{i,j} = \text{Cste} \cdot \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho}} \text{ g } D_{ij}$$

siendo:

$\Delta \rho / \rho$: variación relativa de masa volúmica,

g : aceleración de la gravedad en m/s^2 ,

D_{ij} : distancia entre los dos puntos i y j en m.

Además, si el fluido considerado se supone que tiene un comportamiento de gas perfecto, entonces

$$\Delta \rho / \rho = \beta (T_i - T_j), \text{ de donde:}$$

$$V_{ij} = \text{Cste} \cdot \sqrt{\beta (T_i - T_j)} \text{ g } D_{ij}$$

$$\text{siendo } \beta = \frac{1}{(T_i + T_j) / 2} \text{ (en caso de un gas}$$

perfecto),

T_i, T_j : temperatura del fluido en K.

Estas fórmulas corresponden a movimientos de volúmenes de fluidos ascendentes o descendentes. En el caso de movimiento de fluido junto a una pared, se trata de un problema doble térmico-hidráulico que puede resolverse en algunos casos de forma analítica (desplazamiento laminar a lo largo de una pared).

En este caso la velocidad del fluido a lo largo de la pared presenta una expresión similar, es decir, es proporcional a una diferencia de temperaturas (fluido-pared).

Ver en la terminología, como repaso, la definición grado Celsius, Kelvin y Fahrenheit.

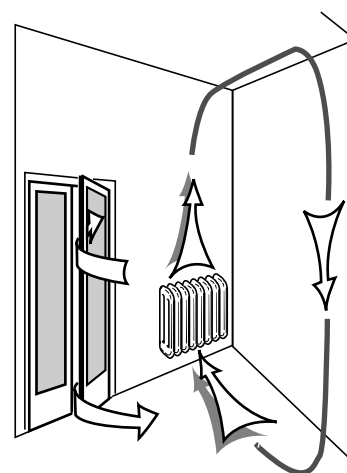


Fig. 6: Fenómenos del movimiento de convección.

3.2 intercambios al nivel de un cuadro

En el esquema de la **figura 7**, se presentan los elementos constituyentes del sistema estudiado: aire ambiente, envolvente, aire interno y las diferentes fuentes de calor. Esta descripción del estado térmico del cuadro nos muestra que todos los fenómenos de intercambios descritos hasta aquí deben tenerse en cuenta y están fuertemente interrelacionados.

Por ejemplo:

- la temperatura del aire interno resulta:
- de los intercambios por convección entre el aire interno y las superficies de los diferentes aparatos, de los conductores y de las paredes.
- del calor transportado por los movimientos convectivos del aire.
- Al nivel de la aparamenta, el calor generado por efecto Joule es intercambiado:
- por convección entre su superficie de intercambio y el aire interno.
- por conducción entre las barras y los cables.
- por radiación con las paredes de la envolvente y las superficies de los otros aparatos.

Los más importantes fenómenos que intervienen en el comportamiento del conjunto son los fenómenos de convección.

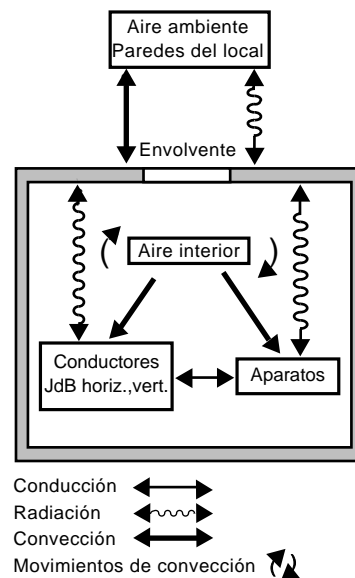


Fig. 7: Comportamiento térmico de una envolvente.

$$\Phi_{ij} = G_{ij} (T_i + T_j)$$

siendo:

Φ_{ij} = flujo energético intercambiado entre los nudos i y j.

G_{ij} = conductancia entre i y j, función del tipo de intercambio considerado,

T_i, T_j = temperaturas asociadas a los nudos i y j respectivamente.

Tomamos, como ejemplo, la modelización de una pieza en la que hay una fuente de calor.

Se ha descompuesto este sistema en 4 nudos:

- 1 para el aire interno,
- 2 para las paredes (interna y externa),
- 1 para el aire ambiente exterior.

Representación nodal (simplificada) en la **figura 9**.

Ecuaciones que traducen los flujos térmicos para este sistema simple:

nudo 1:

$$Q_1 - h_{1,2} S_{1,2} (T_1 - T_2) + \dot{M}_{4,1} c_p (T_4 - T_1) - \dot{M}_{1,4} c_p (T_1 - T_4) = \rho_1 V_1 c_p \frac{dT_1}{dt}$$

nudo 2:

$$h_{1,2} S_{1,2} (T_1 - T_2) - \frac{\lambda_2 S_{2,3}}{d_{2,3}} (T_2 - T_3) = \rho_2 V_2 c_p \frac{dT_2}{dt}$$

nudo 3:

$$\frac{\lambda_2 S_{2,3}}{d_{2,3}} (T_2 - T_3) - h_{3,4} S_{3,4} (T_3 - T_4) = \rho_3 V_3 c_p \frac{dT_3}{dt}$$

nudo 4:

$$h_{3,4} S_{3,4} (T_3 - T_4) + \dot{M}_{1,4} c_p (T_1 - T_4) - \dot{M}_{4,1} c_p (T_4 - T_1) = \rho_4 V_4 c_p \frac{dT_4}{dt}$$

Importante: los términos $\frac{dT_i}{dt}$, que corresponden a la expresión $\frac{dT_i}{dt}$. Estos términos no se toman

en consideración ya que sólo interesa el régimen permanente, es decir, con las temperaturas estabilizadas.

A partir de estas ecuaciones se deduce el sistema de ecuaciones $[G] \cdot [T] = [R]$ correspondiente, seguro, a:

$$\Phi_{ij} = G_{ij} (T_i - T_j)$$

donde:

G : la matriz de admitancia térmica,

T : el vector de temperaturas desconocidas,

R : el vector de las solicitaciones impuestas (fuentes de calor Q_1 , temperatura, ...).

Este tipo de proceso ha permitido elaborar los códigos de cálculo y las reglas propias a los problemas térmicos de los edificios.

4.2 Modelización de la convección

Como se ha indicado anteriormente, en el **capítulo 2**, en el término de convección se emparejan a menudo dos fenómenos, (intercambios cuerpo-fluido e intercambios en el mismo fluido).

La modelización de los intercambios por convección debe dividirse en dos partes; una describiendo las pérdidas máscas (movimientos de aire) y otra describiendo los intercambios térmicos (coeficientes de intercambio...) con una dependencia mutua entre ellos por transferencia máscica/térmica (**figura 10**).

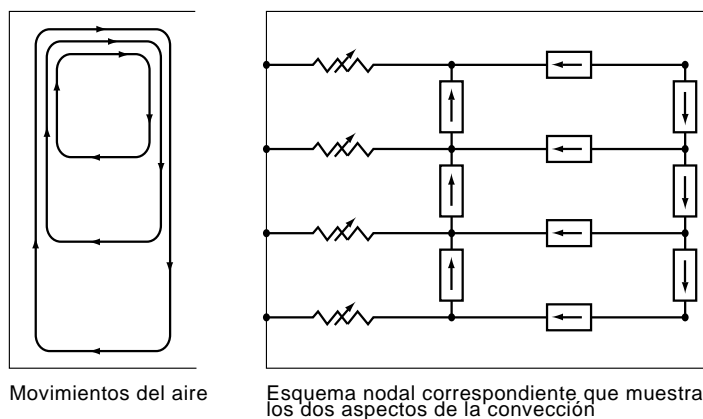


Fig. 10: Modelización máscica y térmica de la convección.

4.3 Aplicación a las envolventes en BT

Distinguimos, para la modelización, dos grandes grupos de envolventes:

Envolventes no compartimentadas (cofret, armarios,...). En este caso, el esquema nodal, como se muestra en la **figura 11**, es semejante al del esquema de la **figura 10**, integrando las fuentes de calor.

Envolventes fuertemente compartimentados con o sin ventilación natural.

A nivel de modelización son posibles dos planteamientos:

■ bien modelizando cada zona del cuadro como se ha visto anteriormente, asociando en conjunto los diferentes volúmenes. Este sistema conduce a matices demasiado complicados cuando, como es normal, aparecen una decena de zonas a asociar,

■ o bien tratando el sistema globalmente, sin modelizar los bucles de convección en el interior de los diferentes volúmenes y no teniendo en cuenta la circulación de aire entre zonas (**figura 12**).

Estas modelizaciones nos han conducido a elaborar programas informáticos adaptados a cada tipo de envoltente. Todos estos programas están estructurados de la misma forma.

Antes de entrar más en detalle en la utilización de un programa (**capítulo 6**), conviene conocer mejor las fuentes de calor (juegos de barras, aparatos, ...) para determinar el nivel de funcionamiento real de un cuadro.

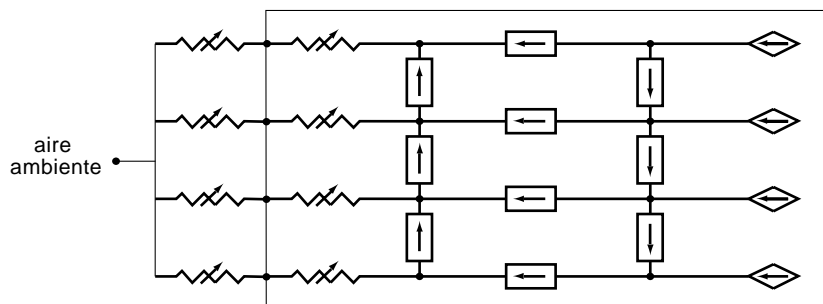


Fig. 11: Envolvente no-cerrada.

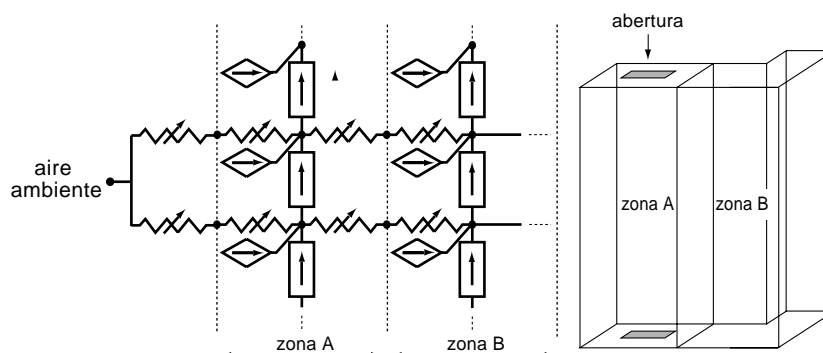


Fig. 12: Caso de una envolvente cerrada.

5 Comportamiento de las fuentes de calor. Características

Las fuentes de calor consideradas en la modelización son los juegos de barras, los conductores de interconexión y los aparatos eléctricos.

Referente a estos últimos, los consideramos como «las cajas negras» disipando calorías y

no como nudos de la modelización. Es decir, que no se calcula su temperatura de funcionamiento sino la intensidad máxima que pueden soportar para una configuración de instalación determinada con el fin de no rebasar su temperatura límite de utilización.

5.1 Los juegos de barras

Los juegos de barras se calculan de forma que verifiquen dos condiciones:

- poder soportar el paso de la corriente nominal necesaria sin provocar un calentamiento de las barras que pueda provocar un deterioro de los aislantes que soportan las barras. Por ejemplo, las barras pueden estar dimensionadas de forma que no rebasen, en régimen permanente, una temperatura de 110°C, valor este que es enteramente dependiente de la naturaleza de los materiales aislantes en contacto con las barras; por ejemplo: los soportes. La tabla de la **figura 13** da, para una temperatura ambiente de 50°C y 65°C unos valores de temperatura para los juegos de barras,

- poder soportar una corriente de cortocircuito sin provocar deformaciones notables en las barras, rotura de los soportes aislantes o calentamiento excesivo.

La segunda condición corresponde a un problema de esfuerzos electrodinámicos y puede estudiarse separadamente; por contra, la primera necesita conocer el nivel de funcionamiento del conjunto.

En particular hay que tener en cuenta la temperatura del aire que envuelve las barras para dimensionarlas de forma precisa y evitar que sobrepasen una temperatura crítica que es función principalmente de la naturaleza del material utilizado para los soportes.

Así, conociendo la temperatura del aire en las diferentes zonas del cuadro, podemos determinar, con el programa, la temperatura de las barras en función de sus características (dimensiones, forma, disposición,...) y validar el dimensionamiento.

Importante: En referencia a los cálculos de flujo térmico, se considera que las barras disipan el calor principalmente por convección y radiación al aire interno.

Temperatura aprox. de las barras	Sección	Intensidad disipada (A)	Potencia de las barras (W)	Temperatura (°C)
50	1 barra 100 x 5	1000	45	79
50	1 barra 100 x 5	1500	107	109
50	3 barras 100 x 5	1500	10	65
50	3 barras 100 x 5	3400	61	110
65	1 barra 100 x 5	1000	45	92
65	3 barras 100 x 5	1500	11	80

Fig. 13: Valores térmicos relativos a un juego de barras, de una longitud de 1 m, situados en un ambiente dado.

5.2 La aparamenta

En los armarios de distribución eléctrica, los interruptores automáticos constituyen el núcleo principal de la aparamenta de potencia. Ellos y los demás componentes, que son los contactores y seccionadores-fusibles, disipan sus calorías cuando son recorridos por la corriente eléctrica.

La tabla de la **figura 14** nos facilita, a título indicativo, algunos valores de potencia disipada por fase, (por polo). Es interesante constatar que las potencias disipadas con la intensidad nominal son de la misma magnitud con ventaja para el interruptor automático respecto al seccionador fusible y también al contactor que tiene contactos duros pero resistentes.

Interruptores automáticos:

Potencia medida con vatímetro y no calculada a partir de la medida de la resistencia

In (A)	250	400	630	800
Pw - versión fija	14,1	19	40	41,6
con In en versión desenchufable	19,7	30	52	58

Seccionadores-fusibles:

In (A)	250	400	630	800
Pw con In	30	44	67	-

Contactores:

In (A)	265	400	630	780
Pw con In	22	45	48	60

Fig. 14: Potencia disipada, por polo, a In, en la aparamenta clásica.

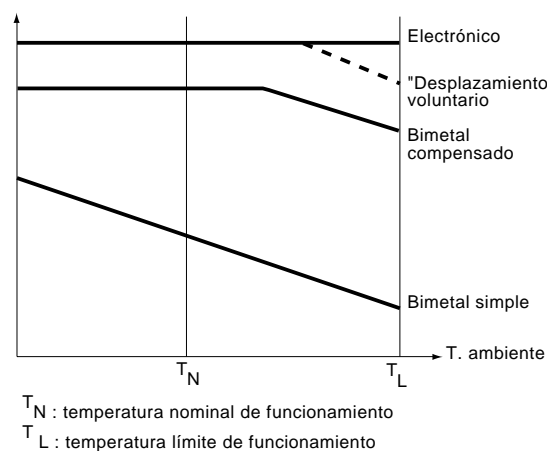


Fig. 15: Curvas de desplazamiento tipo de los relés en función de la temperatura.

Examinemos con más detalle los interruptores automáticos frente a los problemas térmicos:

■ La potencia disipada es proporcional al cuadrado de la intensidad que los recorre:

$$P_W = P_N \left(\frac{I}{I_n} \right)^2$$

donde P_N representa la potencia disipada a la intensidad nominal de empleo I_n .

■ La intensidad nominal de empleo (I_n) de un interruptor automático corresponde a una temperatura ambiente determinada, por ejemplo 40°C, fijada por la norma de construcción. De hecho, para ciertos interruptores automáticos, la temperatura ambiente correspondiente a I_n puede alcanzar e incluso rebasar los 50°C, dato que debe de dar una seguridad, por ejemplo, en los países cálidos.

■ la intensidad de funcionamiento (I_{th} o I_{the}) puede variar en función de la temperatura ambiente y según el tipo de relé: térmico simple, térmico compensado, electrónico, (**figura 15**) lo que puede permitir definir una corriente máxima de empleo diferente de I_n .

Los parámetros que intervienen en la determinación de desplazamiento por temperatura tienen en cuenta, además de la temperatura del aire alrededor del aparato (T_i):

■ la temperatura límite (T_L) de los componentes internos del interruptor automático:

□ temperatura máxima de funcionamiento del bimetal para un interruptor automático con relé magnetotérmico,

□ temperatura de los componentes electrónicos para interruptores automáticos con relé electrónico incorporado,

□ la temperatura no debe transmitirse a los materiales plásticos, los más sensibles en un interruptor automático con electrónica intercambiable (relé exterior/interruptor abierto). Estas temperaturas límite están comprendidas entre 100 y 150°C.

■ la razón entre la I_r del relé y la corriente real de disipa cuando éste está a la temperatura de definición de I_n : $K_1 = \frac{I_r}{I_n}$, (**figura 16**).

■ las secciones de los cables o las barras de conexión que juegan un papel de radiador. Su influencia se toma en cuenta para un coeficiente K_2 .

Importante: Debe tenerse en cuenta que la sección de los conductores utilizados es raramente igual a la que se emplea para los ensayos de certificación de los interruptores automáticos.

El desplazamiento que tiene en cuenta estos diversos criterios puede expresarse matemáticamente.

Fórmula de desplazamiento:

El interruptor automático y sus conductores de conexión disipan esencialmente por convección. Aparece, por ello, la relación:

$$W_1 = h S (T_L - T_i)$$

siendo:

W_1 : potencia disipada, en W, para un aparato conectado dentro de una envoltura con un volumen de aire a la temperatura T_i ,

h = coeficiente de intercambio en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$,

S : superficie de intercambio en m^2 ,

T_L : temperatura del punto caliente en $^\circ C$ (por ejemplo, el bimetálico),

T_i : temperatura del aire interno alrededor del aparato en $^\circ C$,

$$h = Cste S (T_L - T_i)^\alpha$$

de donde $W_1 = Cste S (T_L - T_i)^{1+\alpha}$.

Cuando el aparato se halla al aire libre a $40^\circ C$ se tiene una relación similar.

$$W_2 = Cste S (T_L - 40)^{1+\alpha}$$

de donde:

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{T_L - T_i}{T_L - 40} \right)^{1+\alpha}$$

Además, se sabe que:

$$W_1 = R I_{the}^2 \text{ y que } W_2 = R I_r^2$$

$$\text{y por tanto } I_{the} = I_r \left(\frac{T_L - T_i}{T_L - 40} \right)^\beta$$

siendo I_{the} la intensidad que recorre el aparato,

$$I_d = K_1 \times I_n \text{ y } \beta = (1 + \alpha)/2$$

β : coeficiente que caracteriza el tipo de aparato. Se determina experimentalmente o por un análisis más fino del comportamiento térmico del aparato. Su valor está comprendido entre 0,2 y 0,7.

Relación final, integrando, además, el efecto de las secciones (coeficiente K_2)

$$I_{the} = I_n K_1 K_2 \left(\frac{T_L - T_i}{T_L - 40} \right)^\beta$$

■ Los datos que corresponden al comportamiento del interruptor automático y que intervienen en esta fórmula están en los ficheros que utiliza el programa informático al calcular las temperaturas en el interior del armario.

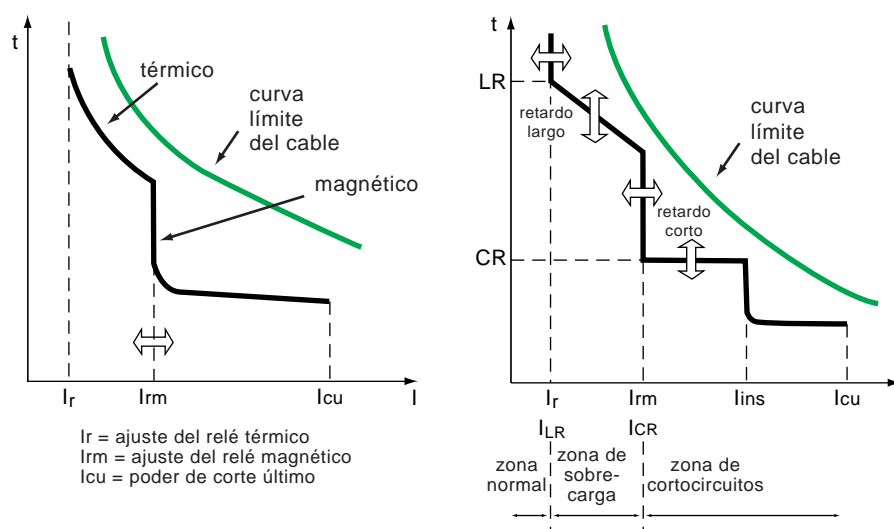


Fig. 16: Curvas de disparo de un interruptor automático.

6 Método de cálculo de la temperatura en las envolventes

La modelización presentada hasta ahora debe servir de base al desarrollo de nuestro método de cálculo que debe permitirnos determinar el funcionamiento real del cuadro (intensidad máxima en cada derivación...) y con ello utilizar el conjunto al máximo con una seguridad garantizada.

Como acostumbra a suceder en térmica, las numerosas relaciones entre parámetros precisan de una definición iterativa con la elaboración de un programa del que vamos a presentar el principio.

6.1 Principio

El programa se desarrolla con dos bucles de iteraciones imbricadas con el fin de determinar el nivel permanente. El uno concierne a la resolución del problema térmico, el otro a los coeficientes de desplazamiento.

El esquema de cálculo se presenta en la **figura 17**.

1ª etapa: descripción de la configuración, es decir, tipo de envolvente utilizado, número de aparatos y su posición relativa. A este nivel el programa utiliza el fichero de aparatos para recuperar los datos descritos con anterioridad.

2ª etapa: descomposición de la envolvente en sus volúmenes isotermos (nudos de la modelización nodal).

3ª etapa: inicio de los núcleos de iteración con cálculo:

- de la potencia disipada (en la primera iteración los coeficientes de desplazamiento, se toman igual a 1),
- de los coeficientes de la matriz de admitancia a partir de las ecuaciones de balance,
- de las temperaturas internas (resolución del problema térmico),

- de los nuevos coeficientes de desplazamiento comparándolos con los anteriores. Si el salto se juzga poco importante (prueba de paro de la iteración) se procede a un nuevo bucle, calculando las nuevas intensidades que atraviesan cada aparato, de nuevo la potencia disipada...

4ª etapa: salida de los resultados.

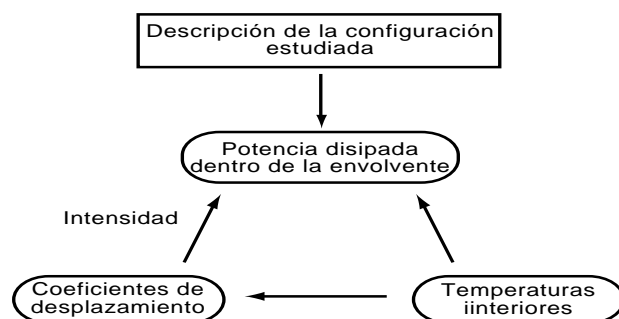


Fig. 17: Principio de funcionamiento de los programas.

6.2 Descripción de los datos a suministrar y de los resultados obtenidos

Datos:

- tipo de envolvente (cofre, armario, cuadro) y material,
- índice de protección,
- temperatura ambiente alrededor de la envolvente,
- número de filas de aparatos,

- denominación de los aparatos que permiten su localización en el fichero,
- configuración del cuadro y posición de la aparatura.

Resultados:

- elección de un juego de barras horizontal y vertical (sección) e intensidad en estas barras.

- potencia térmica total disipada en el cuadro,
- coeficiente de desplazamiento para cada aparato debido a las intensidades circulantes,
- eventualmente la temperatura alcanzada por las barras y su nivel en las diferentes zonas del cuadro.

6.3 Configuraciones modelizadas

Bien entendido que en un programa como el que se indica no pueden considerarse todas las configuraciones de instalación imaginables. Solamente se consideran las más comunes, es decir, las que permiten responder al 90% de los casos deseados. Un ejemplo en la **figura 18**.

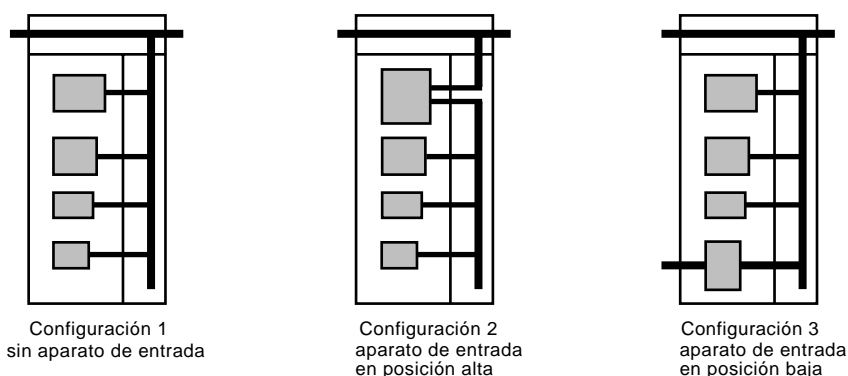


Fig. 18: Configuraciones modelizadas

6.4 Resultados

Este progreso en el cálculo informático de modelos es especialmente interesante porque permite efectuar los diversos estudios:

Estudio detallado de una configuración determinada para optimizar la posición de un aparato o la elección de un juego de barras, conocer la potencia disipada por el conjunto para dimensionar una climatización adaptada...

El ejemplo siguiente se ha efectuado con una columna de un cuadro industrial de potencia compartimentado, forma 2, conteniendo:

- un juego de barras horizontal alimentando un aparato de entrada y la columna adyacente,
- un aparato de entrada, de 2500 A,
- diferentes interruptores automáticos de caja moldeada.

El programa nos facilita, entre otros:

- los coeficientes de desplazamiento K_{desp} ,
- las intensidades que circulan por cada aparato I_r .

Advertencia sobre el coeficiente K_{div} :

Este coeficiente nos permite tener en cuenta el coeficiente de diversidad o de esponjamiento, derivación por derivación.

Es decir, los niveles de funcionamiento en un instante dado de los diferentes aparatos.

Por ejemplo, en un instante dado, 2 derivaciones son solicitadas al máximo y las otras hasta el 0,5 de sus posibilidades, afectando al sistema térmico del conjunto.

Los resultados se presentan en la hoja de cálculo de la **figura 19**.

Tabla de desplazamiento para una configuración dada

Esta posibilidad de utilización del programa semejante a la utilización anterior permite reunir para una configuración frecuente los desplazamientos de los diferentes aparatos teniendo en cuenta su posición real en el

cuadro, las secciones de los conductores utilizados, los índices de protección y de la temperatura ambiente exterior.

En la **figura 20** se puede ver un ejemplo de un cuadro industrial de potencia, con los datos detallados de los aparatos instalados en columna.

Tabla de desplazamiento para un tipo de aparato

Para la mayor parte de interruptores automáticos de caja moldeada el desplazamiento es relativamente independiente de la configuración.

Masterbloc: MB200 IP = 31

Tabla con aparato de llegada en posición alta alimentada con JdB horizontal

Referencia	Posición	K _{despl}	K _{div}	I _a (A)	Or(A)
M25H	1 12	.88	1	2200	2200
NS630/ST	17 21	.93	1	586	518
NS630/ST	22 26	.96	1	605	534
NS400/ST	27 31	1	1	400	353
NS400/ST	32 36	1	1	400	353
NS250/D250	37 40	1	1	250	221
NS250/D250	41 44	1	1	250	221

Juego de barras horizontal:

intensidad: 2200 A
sección: 1 * 4 barras de 100 * 5

Juego de barras vertical:

intensidad: 2200 A
sección: 1 * 4 barras de 80 * 5

Potencia total disipada: 1953 W

detalle en aparatos: 593 W

en auxiliares: 0 W

juegos de barras + derivaciones: 1271 W

juego de barras horizontal: 89 W

Temperatura JdB horizontal: 95°C
Temperatura JdB vertical: 104°C
Temperatura ambiente: 35°C
Temperatura del techo: 70°C
Temperatura JdB horizontal: 75°C
Temperatura aparellaje: alto: 68°C, bajo: 35°C
Temperatura auxiliar: alto: 52°C, bajo: 35°C
Temperatura JdB + derivaciones: alto: 77°C, bajo: 35°C
Temperatura conexiones: alto: 58°C, bajo: 35°C

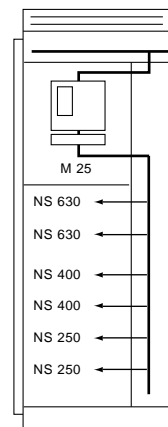


Fig. 19: Resultados del cálculo para una configuración determinada.

IP31					
T° amb	35	40	45	50	55
M25	0,9	0,87	0,84	0,81	0,79
M16	0,97	0,94	0,91	0,88	0,86
M08	1	1	1	1	1

IP 42/54					
T° amb	35	40	45	50	55
M25	0,79	0,77	0,75	0,73	0,71
M16	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79
M08	1	1	1	1	1

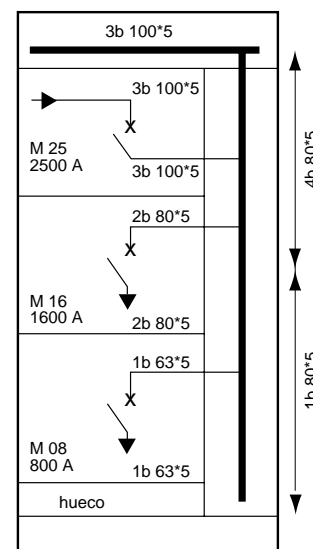


Fig. 20: Desplazamiento de los interruptores automáticos descritos en función de la temperatura ambiente.

Los coeficientes de desplazamiento se establecen por exceso situando los aparatos en lo alto del armario o del compartimento.

Ver, a título de ejemplo, la **figura 21**.

Curvas características del comportamiento térmico de un tipo de envolvente

Se establecen dos tipos gráficos:

- un conjunto de curvas que permiten determinar la temperatura media en el interior de una envolvente determinada en función de la potencia disipada y de la temperatura ambiente exterior.

En la **figura 22** se indican estas curvas para un cuadro de distribución no compartimentado.

- unas curvas que permiten determinar la potencia que estas envolventes pueden disipar para un calentamiento definido, en función de sus características dimensionales.

Ejemplo: temperatura ambiente exterior: 35 °C, calentamiento máximo admisible $\Delta T^a = 30$ °C.

□ armario: altura 2 m, anchura 0,9 m, profundidad 0,4 m

potencia disipable 850 W,

□ armario: altura 2 m, anchura 0,9 m, profundidad 0,6 m

potencia disipable 1000 W, según curvas de la **figura 23**.

	IP 31					IP 42/54				
T° amb	35	40	45	50	55	35	40	45	50	55
NS100	100	100	100	100	95	100	95	90	85	80
NS160	160	155	150	145	140	150	140	135	125	120
NS250	235	225	220	210	200	205	195	180	170	165
NS400	380	370	360	350	340	350	340	330	320	310
NS630	540	520	510	500	485	485	475	465	450	440

Fig. 21: Ejemplo de intensidades de corriente (en A) de disparo de interruptores automáticos Compact NS instalados dentro de una envolvente de BT determinada.

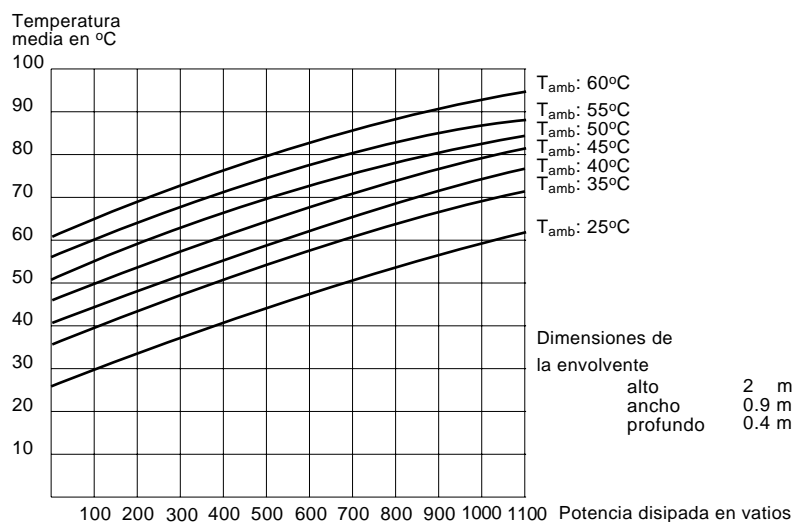


Fig. 22: Temperatura media del aire en el interior de un armario de distribución metálico IP2 y de forma 1.

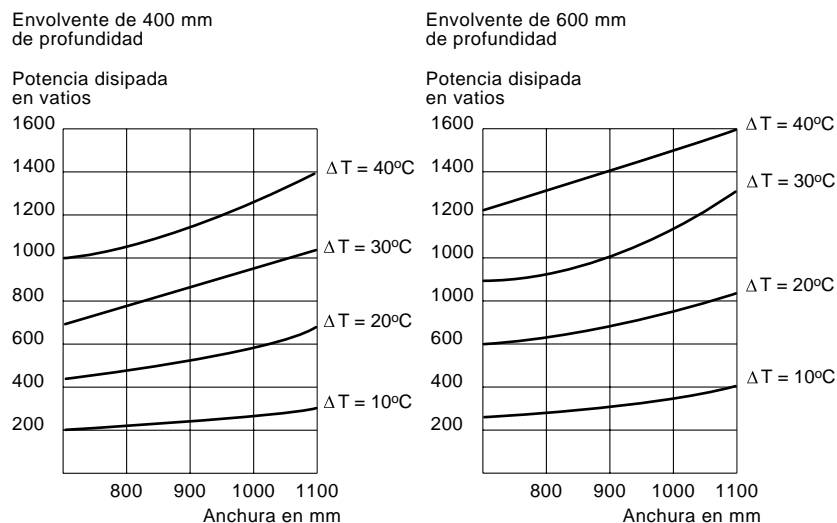


Fig. 23: Potencia disipable por calentamiento en una envolvente dada en función de su anchura. Curvas que se refieren a un armario metálico de formas 1 de 2 metros de altura.

6.5 Resultados experimentales

Se han efectuado ensayos de calentamiento en el laboratorio Ampère de ASEFA con diversos tipos de envolventes: cofrets de plancha o plástico, armarios Prisma, cuadros de distribución Masterbloc.

Durante estos ensayos, se han medido:

- temperaturas
- del aire en diferentes zonas de la envolvente,
- de los conductores: juego de barras y derivaciones,
- de los puntos calientes de los aparatos (bimetal, ambiente electrónico).
- intensidades
- parámetros que intervienen en la modelización, en particular los coeficientes de intercambio aire/paredes.

Estas mediciones han permitido, por una parte verificar la conformidad a la norma CEI 431.1 de ciertos valores (límites de calentamiento mencionados en el **capítulo 1.2** sobre las normas) y por otra parte, para validar el modelo.

En lo referente a las temperaturas del aire, la diferencia entre los valores medidos y calculados depende del tipo de envolvente modelizada, ya que al nivel de la modelización, los supuestos difieren según que se considere las envolventes compartimentadas o no.

Sobre el conjunto de ensayos efectuados en cuadros de diferentes formas (compartimentados, o no), las diferencias máximas constatadas han sido siempre inferiores a 6°C .

Las temperaturas calculadas para los juegos de barras muestran también una concordancia con las mediciones y han permitido validar el programa informático.

En referencia a las intensidades, las desviaciones, en valor medio, son inferiores al 5%. En una homologación reciente de una configuración de cuadro Masterbloc en calentamiento, el programa ha permitido prever el nivel de funcionamiento del cuadro.

7 Método propuesto por el documento CEI 890

No ha mucho tiempo que los armarios eléctricos se escogían, equipaban y llenaban en función de la experiencia; también en lo que se refiere a la tasa de llenado y a la variación de la temperatura en el armario durante el funcionamiento.

Por ejemplo: Temperatura exterior máxima 30°C y 60°C en el interior (los fabricantes de aparatación dan de margen hasta los 60°C).

Esta práctica conducía o a una pobre utilización del material o a actuaciones intempestivas de las protecciones, teniéndose la necesidad de trabajar con las puertas abiertas.

El método, propuesto por la recomendación CEI, aunque no se trate de una norma sino de una guía, es de un interés evidente. Se presenta detalladamente en el anexo de la norma NFC 63410 o en la recomendación de la CEI N° 890.

Debemos de recordar los fundamentos, mostrando los límites y comparando con el método presentado en este Cuaderno Técnico.

En principio, este método se aplica a envolventes a las que se puedan aplicar las siguientes hipótesis:

- reparto uniforme de la potencia disipada,
- el aparellaje se dispone de manera que no se dificulte la circulación de aire,
- no más de 3 separaciones horizontales.

Datos necesarios:

- dimensiones de la envolvente,
- potencia disipada en el interior (aparellaje, conductores),
- tipo de instalación (envolvente aislada o situado en un extremo...) (figura 24).

Cálculo :

la temperatura se calcula únicamente en 2 puntos de la envolvente:

a media altura:

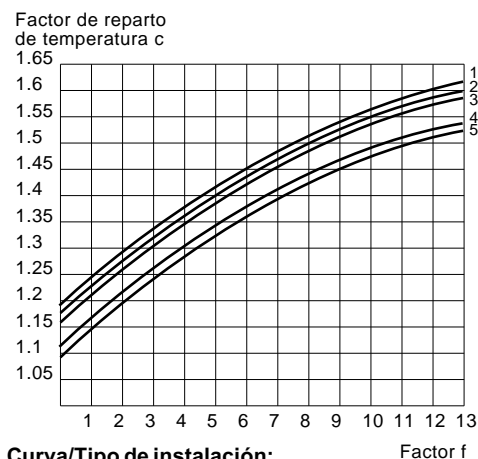
$$T_{0,5} = T_a + \Delta T_{0,5}$$

$$\text{siendo } \Delta T_{0,5} = dk P_w^{0,804}$$

■ d es un coeficiente que tiene en cuenta la existencia de separaciones horizontales:

□ Si $A_e < 1,25 \text{ m}^2$, $d = 1$ (definición de A_e que veremos inmediatamente).

■ Si $A_e > 1,25 \text{ m}^2$:



Curva/Tipo de instalación:

- 1 Tapas separadas, quitadas por todos los lados;
- 3 Tapas separadas, en montaje mural;
- 2 Primera o última tapa quitada;
- 3 Tapa central, quitada;
- 5 Tapa central, en montaje mural;
- 4 Tapa central, en montaje mural y con la parte superior abierta.

Fig. 24: Factor de distribución de temperatura c para envolventes sin orificios de ventilación y con una superficie efectiva de enfriamiento $A_e > 1,25 \text{ m}^2$.

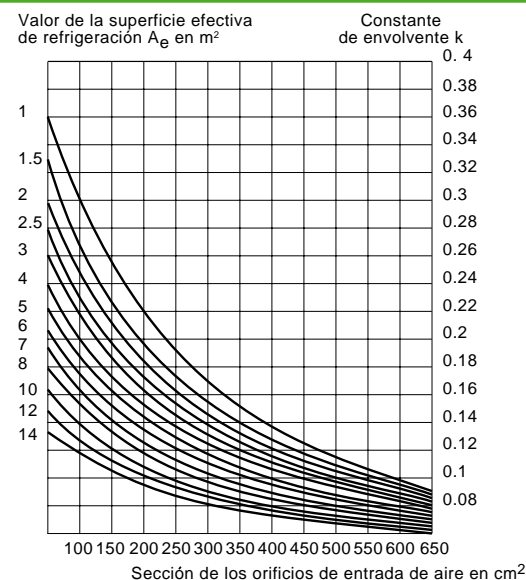


Fig. 25: Constante de la envolvente k para una envolvente con orificio de ventilación y una superficie efectiva de enfriamiento $A_e > 1,25 \text{ m}^2$.

$d = 1$ con o sin orificios de ventilación sin ninguna separación,

$d = 1,05$, con o sin orificios de ventilación para 1 de separación,

$d = 1,15$ ó $1,10$ con orificios de ventilación para 2 separaciones,

$d = 1,30$ ó $1,15$ con orificios de ventilación para 3 separaciones.

■ k es una constante que caracteriza la envolvente; su valor se determina con ábacos (figura 25) y es función de la superficie de intercambio de la envolvente A_e (m^2).

$A_e = \Sigma A_o b$ ó A_o es la superficie geométrica de las diferentes paredes de la envolvente;

b es una constante que tiene en cuenta el tipo de instalación.

Valores de b :

□ parte superior abierta	$b = 1,4$
□ parte superior cubierta	$b = 0,7$
□ paredes laterales abiertas	$b = 0,9$
□ paredes laterales tapadas	$b = 0,5$
□ paredes laterales de envolventes centrales	$b = 0,5$
□ parte inferior	$b = 0.$

■ P_w potencia disipada, en vatios, en la parte alta de la envolvente:

$$T_1 = T_a + \Delta T_1$$

siendo $\Delta T_1 = c \Delta T_{0,5}$ o $\Delta T_{0,5}$, representa el calentamiento precedente.

■ c es una constante de calentamiento determinada a partir de ábacos.

Por ejemplo: en el ábaco de la figura 24, c es función de A_e y de uno de los factores f o g :

$$f = h^{1,35}/(L P), \text{ si } A_e > 1,25 m^2,$$

$$g = h^{1,35}/L, \text{ si } A_e < 1,25 m^2.$$

Límites

Los límites esenciales de este método son:

■ que se aplica bien a las envolventes no compartimentadas de tipo armario, y no a los cuadros de potencia muy compartimentados,

■ que no tiene en cuenta la posición de las fuentes de calor, que, la mayor parte de veces, no están repartidas de forma uniforme.

Comparación con nuestra aproximación

Se constata que las aproximaciones dan resultados similares para los armarios no compartimentados y con fuentes de calor repartidas (figura 26).

En lo que se refiere a las envolventes muy cerradas, la localización de las fuentes de calor y los intercambios entre las diferentes zonas influyen mucho en el calentamiento!

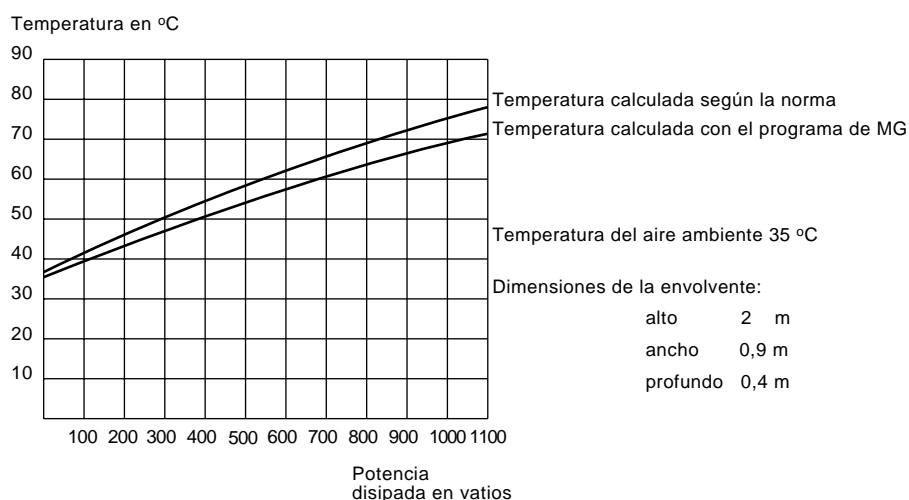


Fig. 26: Temperatura del aire a media altura en un armario metálico de distribución IP2 y de la forma 1.

8 Conclusión

La importancia de los cuadros eléctricos en la distribución no hay que demostrarla.

En cuanto a la disponibilidad de la energía eléctrica y de la seguridad de funcionamiento, resulta indiscutible que el control térmico de los cuadros eléctricos es un objetivo fundamental.

Las normas que se refieren a las envolventes y a los productos determinan los límites térmicos que no hay que sobrepasar.

Les queda a los profesionales convertirse en «arquitectos térmicos» del diseño de las envolventes y cuadros eléctricos; hoy es ya cosa hecha, incluso para los cuadros de serie.