

4

Efecto térmico de la electricidad

Contenidos

- 4.1. Efecto Joule
- 4.2. Calor específico
- 4.3. Cálculo de la sección de conductores

Objetivos

- Describir los procesos de conversión de energía eléctrica a calorífica.
- Emplear el calor específico de los cuerpos para determinar la elevación de su temperatura.
- Distinguir los sistemas de transmisión del calor.
- Relacionar el calentamiento de un conductor con la intensidad que fluye por él y su resistencia eléctrica.
- Calcular la sección de un conductor en función de su intensidad máxima admisible.
- Determinar la caída de tensión de las líneas eléctricas y tenerla en cuenta para el cálculo de la sección de los conductores de una línea eléctrica.

Cuando la corriente eléctrica fluye por una resistencia eléctrica esta se calienta. El calor producido depende de la energía eléctrica consumida por la misma, es decir, del producto de la potencia por el tiempo. Las aplicaciones del efecto térmico de la electricidad son muy variadas: calefacción, cocinas y hornos, etc. Ahora bien, el efecto térmico también provoca inconvenientes cuando no es deseado, como por ejemplo el calentamiento que se produce en los conductores de las líneas eléctricas cuando son recorridos por corriente. Para evitar que este calentamiento sea excesivo en ellos se aumenta su sección.

4.1. Efecto Joule

Hemos visto que los conductores y las resistencias se calientan cuando son atravesados por una corriente eléctrica. Este fenómeno es también conocido por «efecto Joule».

El físico P. James Joule estudió la relación que existe entre la energía y su transformación plena en calor. A base de experimentar con un calorímetro, llegó a la conclusión de que la energía de 1 julio es equivalente a 0,24 calorías.

$$Q = 0,24 \cdot E$$

Q = Calor en calorías.

E = Energía en julios.

De esta manera, si quisiéramos determinar el calor que se produce en una resistencia R en un tiempo determinado t cuando es recorrida por una corriente eléctrica I , tendríamos que:

$E = P \cdot t$; a su vez, $P = R \cdot I^2$. Si llevamos estos valores a la primera expresión, tenemos:

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t$$

Actividad resuelta 4.1

Calcula el calor desprendido por un horno eléctrico de 2.000 W en 5 minutos de funcionamiento.

Solución:

La energía en julios consumida durante ese periodo de tiempo es:

$$E = P \cdot t = 2.000 \cdot 300 = 600.000 \text{ julios}$$

$$t = 5 \cdot 60 = 300 \text{ s}$$

Como cada julio se transforma en 0,24 calorías, tendremos que:

$$Q = 0,24E = 0,24 \cdot 600.000 = 144.000 \text{ calorías} = 144 \text{ kcal}$$

Actividad resuelta 4.2

Calcula el calor desprendido por un conductor de cobre de 100 m de longitud y 1,5 mm² de sección que alimenta un grupo de lámparas de 1.500 W de potencia a una tensión de 230 V durante un día.

Solución:

Primero se calcula la intensidad de corriente que circula por dicho conductor:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1.500}{230} = 6,5 \text{ A}$$

Calculemos ahora la resistencia del conductor de la línea:

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0,01786 \frac{100}{1,5} = 1,19 \Omega$$

El calor producido por el conductor, que eleva su temperatura y se contabiliza como energía perdida, es:

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t = 0,24 \cdot 1,19 \cdot 6,5^2 \cdot 86.400 = 1.042.554 \text{ cal}$$

$$t = 24 \text{ h} \cdot 60 \text{ m} \cdot 60 = 86.400 \text{ s}$$

La energía calorífica desarrollada por una resistencia calefactora o por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica tiende a elevar la temperatura de aquel. Esta elevación depende de varios factores, tales como el calor específico de los materiales, su masa, su temperatura, los coeficientes de transmisión por donde se propaga y disipa el calor, etcétera.

4.2. Calor específico

El calor específico de una sustancia es la cantidad de calor que se precisa para aumentar la temperatura en 1 °C una masa de 1 gramo.

Así, por ejemplo, para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado se necesita una caloría, bastante más que lo que se necesita para hacer lo mismo con un gramo de cobre (0,093 calorías). En la Tabla 4.1 se expone el calor específico de diferentes sustancias, expresado en calorías/gramo · °C.

Tabla 4.1. Calor específico de diferentes sustancias

Sustancia	Calor específico, cal/g °C
Cobre	0,093
Acero	0,110
PVC	0,210
Aluminio	0,220
Agua	1

Conociendo el calor específico de una sustancia y su masa es posible calcular la cantidad de calor que es necesario aplicar para elevar su temperatura. Para ello aplicaremos la expresión:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^\circ$$



Q = Cantidad de calor (calorías).

m = Masa (gramos).

c = Calor específico (cal/g · °C).

Δt° = Variación de temperatura.

Actividad resuelta 4.3

Determina el calor necesario para elevar la temperatura de un litro de agua de 20 a 50 °C.

Solución:

Como 1 litro de agua equivale a 1.000 gramos, el calor específico del agua es 1 y la elevación de temperatura que deseamos conseguir es $(50 - 20) = 30$ °C; el calor a aplicar es:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^\circ = 1.000 \cdot 1 \cdot 30 = 30.000 \text{ cal}$$

Actividad resuelta 4.4

Determina la potencia que deberá tener un termo eléctrico de agua para calentar un depósito de 50 litros en 1 hora. El agua entra a 12 °C y se desea calentarla hasta 60 °C. Calcula también el valor óhmico de la resistencia de caldeo para una tensión de 230 V (Figura 4.1).

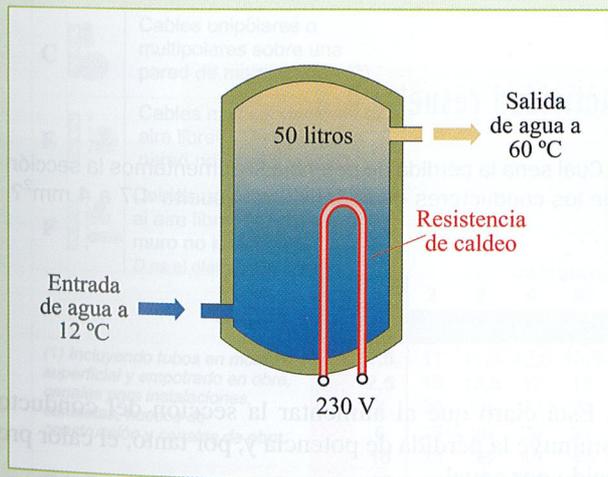


Figura 4.1.

Nota: Para hacer los cálculos no se debe tener en cuenta el calentamiento de la cuba ni de la resistencia calefactora.

Solución:

El calor que debe aportar la resistencia de caldeo es:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^\circ = 50.000 \cdot 1 \cdot (60 - 12) = 2.400.000 \text{ cal}$$

La energía eléctrica necesaria para producir este calor es:

$$Q = 0,24 E, \text{ despejando } E = \frac{Q}{0,24} = \frac{2.400.000}{0,24} = 10.000.000 \text{ julios}$$

La potencia para desarrollar esta energía en 1 hora (3.600 s) será:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{10.000.000}{3.600} = 2.778 \text{ W} = 2,8 \text{ kW}$$

La resistencia podemos calcularla así:

$$P = \frac{U^2}{R}; \text{ despejando: } R = \frac{U^2}{P} = \frac{230^2}{2.778} = 19 \Omega$$

Actividad resuelta 4.5

Averigua cuál será el coste de la energía de la Actividad resuelta 4.4 si el precio del kWh es de 0,088 €.

Solución:

La energía en kWh es:

$$E = P \cdot t = 2,8 \cdot 1 = 2,8 \text{ kWh}$$

$$\text{Gasto} = 2,8 \cdot 0,088 = 0,25 \text{ €}$$

Actividad resuelta 4.6

Determina el aumento de temperatura que experimentará una plancha eléctrica de acero si se la calienta mediante una resistencia de caldeo de 10 ohmios a 125 V durante 10 minutos. La plancha posee una masa de 7 kg y se supone que se pierde un 25 % del calor generado.

Solución:

Calculamos primero el calor generado:

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t = 0,24 \cdot 10 \cdot 12,5^2 \cdot 600 = 225.000 \text{ cal}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{125}{10} = 12,5 \text{ A}, t = 10 \cdot 60 = 600 \text{ s}$$

El calor transmitido a la plancha será solo el 75 % del total generado:

$$Q = \frac{75}{100} \cdot 225.000 = 168.750 \text{ cal}$$

Como el calor específico del acero es 0,11, el incremento de temperatura será:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^\circ, \text{ despejando:}$$

$$\Delta t^\circ = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{168.750}{7.000 \cdot 0,11} = 219 \text{ °C}$$

4.3. Cálculo de la sección de conductores

Uno de los efectos perjudiciales del efecto Joule es el calentamiento que se produce en los conductores eléctricos cuando son recorridos por una corriente eléctrica. Para evitar que este calentamiento alcance valores que sean perjudiciales para los conductores, estos se construyen de diferentes secciones.

Cuanta más intensidad de corriente se prevé que vaya a fluir por un conductor, mayor será su sección.

La sección de un conductor es la superficie que aparece cuando lo cortamos perpendicularmente a su longitud. Por lo general los conductores son cilíndricos, por lo que la sección suele ser un área circular (Figura 4.2). La sección de los conductores se suele expresar en mm^2 .



Figura 4.2. Sección de un conductor.

Dado que los conductores no son perfectos y poseen una cierta resistencia eléctrica, cuando son atravesados por una corriente eléctrica se producen dos fenómenos:

- Se calientan y pierden potencia.
- Al estar conectados en serie con los aparatos eléctricos que alimentan, se produce una caída de tensión, que hace que se reduzca apreciablemente la tensión, al final de la línea.

Estos son los dos factores más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de seleccionar la sección más adecuada para una instalación eléctrica.

4.3.1. Cálculo de la sección teniendo en cuenta el calentamiento de los conductores

El calor que producen los conductores es proporcional a la potencia P_{PL} que se pierde en ellos. Esta aumenta con la resistencia del conductor (R_L) y con la intensidad de corriente al cuadrado (I^2) que conduce.

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2$$

Dado que la resistencia del conductor depende de su sección, si queremos conseguir pérdidas de potencias bajas deberemos aumentar considerablemente su sección.

La potencia perdida en un conductor produce calor que, al acumularse, eleva su temperatura y puede llegar a fundir el aislante del conductor (el plástico que rodea el conductor). Esto puede llegar a ser muy peligroso ya que podrían originarse incendios. Por otro lado, los aislantes, al estar sometidos a estas temperaturas, pierden parte de su capacidad para aislar y envejecen con rapidez, lo que los hace quebradizos y prácticamente inservibles.

Actividad resuelta 4.7

Calcula la potencia que se pierde en un conductor de cobre de 100 m de longitud y $1,5 \text{ mm}^2$ de sección que alimenta un motor eléctrico de 3 kW de potencia a una tensión de 230 V.

Solución:

Primero se calcula la intensidad de corriente que fluye por el conductor:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3.000}{230} = 13 \text{ A}$$

Ahora calcularemos la resistencia del conductor:

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0,01786 \frac{100}{1,5} = 1,19 \Omega$$

Ya podemos calcular la potencia perdida en el conductor que se transforma en calor:

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2 = 1,19 \cdot 13^2 = 201 \text{ W}$$

Actividad resuelta 4.8

¿Cuál sería la pérdida de potencia si aumentamos la sección de los conductores de la Actividad resuelta 4.7 a 4 mm^2 ?

Solución:

$$P_{PL} = \dots = 75,5 \text{ W}$$

Está claro que al aumentar la sección del conductor disminuye la pérdida de potencia y, por tanto, el calor producido por aquel.

El calentamiento de un conductor, entre otros factores, depende de la intensidad de corriente que circule por él. Luego, cuanto mayor sea la corriente que circula por un conductor, mayor tendrá que ser la sección de este para que no se caliente excesivamente.

Dado que el calor se va a concentrar más en un conductor instalado bajo tubo que en un conductor instalado al aire, también habrá que tener en cuenta, a la hora de determinar la sección, la forma de instalar los conductores. Por el mismo



razonamiento, también hay que tener en cuenta la forma de agrupación de los conductores (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Conductores agrupados

	Conductores aislados unipolares: línea formada por conductores separados.
	Cable bipolar (multipolar 2x): línea formada por dos conductores unidos por material aislante.
	Cable tripolar (multipolar 3x): línea formada por tres conductores unidos por material aislante.

Son los fabricantes de conductores eléctricos los que tienen que indicar la intensidad que soportan estos (intensidad máxima admisible) en función de las condiciones de instalación. Pero, con el fin de aumentar la seguridad de las instalaciones eléctricas, el *Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT)* nos dicta las normas a seguir para el cálculo de las secciones, facilitando diferentes tablas de consulta que ayudan a dicho cálculo.

En la Tabla 4.3 se indican las intensidades admisibles para cables de cobre a una temperatura ambiente del aire de 40 °C y para distintos métodos de instalación, agrupamientos y tipos de cables. Esta tabla es un resumen de la Norma UNE-HD 60364-5-52, que data de diciembre de 2014. Para otras temperaturas, métodos de instalación, agrupamientos

Tabla 4.3. Intensidades admisibles (A) para conductores de cobre con una temperatura ambiente de 40 °C

Método de instalación	Número de conductores cargados y tipo de aislamiento																			
	PVC 3	PVC 2	PVC 3	PVC 2	XLPE 3	XLPE 2														
A1 																				
A2 																				
B1 																				
B2 																				
C 																				
E 																				
F 																				
	Sección mm ²	2	3	4	5a	5b	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9a	9b	10a	10b	11	12	13	
		INTENSIDADES MÁXIMAS ADMISIBLES (A)																		
(1) Incluyendo tubos en montaje superficial y empotrado en obra, canales para instalaciones, canaletas, huecos de construcción y canales de obra.	COBRE	1,5	11	11,5	12,5	13,5	14	14,5	15,5	16	16,5	17	17,5	19	20	20	20	21	23	—
		2,5	15	15,5	17	18	19	20	20	21	22	23	24	26	27	26	28	30	32	—
		4	20	20	22	24	25	26	28	29	30	31	32	34	36	36	38	40	44	—
		6	25	26	29	31	32	34	36	37	39	40	41	44	46	46	49	52	57	—
		10	33	36	40	43	45	46	49	52	54	54	57	60	63	65	68	72	78	—
		16	45	48	53	59	61	63	66	69	72	73	77	81	85	87	91	97	104	—
		25	59	63	69	77	80	82	86	87	91	95	100	103	108	110	115	122	135	146
		35	—	—	—	95	100	101	106	109	114	119	124	127	133	137	143	153	168	182
		50	—	—	—	116	121	122	128	133	139	145	151	155	162	167	174	188	204	220
		70	—	—	—	148	155	155	162	170	178	185	193	199	208	214	223	243	262	282
		95	—	—	—	180	188	187	196	207	216	224	234	241	252	259	271	298	320	343
		120	—	—	—	207	217	216	226	240	251	260	272	280	293	301	314	350	373	397
		150	—	—	—	—	—	—	247	259	276	289	299	313	322	337	343	359	401	430
185	—	—	—	—	—	—	281	294	314	329	341	356	368	385	391	409	460	493	523	
240	—	—	—	—	—	—	330	345	368	385	401	419	435	455	468	489	545	583	617	

(1) Incluyendo tubos en montaje superficial y empotrado en obra, canales para instalaciones, canaletas, huecos de construcción y canales de obra.

(2) Incluyendo en bandeja no perforada

(3) Incluyendo bandeja perforada, sobre escalera de cables y sobre abrazaderas o rejillas

PVC2 = línea formada por dos conductores unipolares o un cable bipolar, aislados con policloruro de vinilo
 PVC3 = línea formada por tres conductores unipolares o un cable tripolar, aislados con policloruro de vinilo
 XLPE2 = línea formada por dos conductores unipolares o un cable bipolar, aislados con polietileno reticulado (XLPE) o etileno propileno (EPR)
 XLPE3 = línea formada por tres conductores unipolares o un cable tripolar, aislados con polietileno reticulado (XLPE) o etileno propileno (EPR)

4. EFECTO TÉRMICO DE LA ELECTRICIDAD

y tipos de cable, así como para conductores enterrados, es necesario consultar de forma directa dicha Norma.



En la Instrucción Técnica Complementaria ITC-BT 19 del REBT se indican las normas a seguir para el cálculo de secciones de conductores en instalaciones interiores o receptoras. Si consultas dicha ITC en el REBT, observarás que la tabla que aparece en el texto reglamentario sobre las intensidades admisibles difiere un poco de la que aquí se expone. Eso es debido a que el REBT todavía no se ha actualizado al contenido de la nueva Norma UNE-HD 60364-5-52 que desde el año 2015 sustituye a la Norma UNE 20460-5-23 (que es la que figura en el texto del Reglamento).

Actividad resuelta 4.9

¿Cuál será la intensidad máxima que podrán conducir los conductores de una línea bipolar aislada con PVC instalada directamente sobre la pared si su sección es de 10 mm^2 ? ¿Y si se instala bajo tubo empotrado en obra?

Solución:

Consultando la Tabla 4.3:

Para «cables multiconductores directamente sobre la pared» (fila C) «PVC 2» nos encontramos en la columna 8a, que nos indica que para una sección de 10 mm^2 la intensidad máxima admisible para este conductor es de 54 A.

Para «cables multiconductores en tubos empotrados en obra» (fila B2) «PVC 2» nos encontramos en la columna 5a, que nos indica que para una sección de 10 mm^2 la intensidad máxima es de 43 A.

Actividad resuelta 4.10

Para la alimentación eléctrica de un horno se utiliza una línea formada por dos conductores unipolares aislados con polietileno reticulado (XLPE) instalados bajo tubo en pared aislante. Calcula la sección de los conductores si la corriente que absorbe el horno es de 25 A.

Solución:

Consultando la Tabla 4.3, para «conductores aislados en tubos empotrados en paredes aislantes» (fila A1) «XLPE 2» nos encontramos en la columna 7a, que nos indica que un conductor de 4 mm^2 sería suficiente ya que posee una intensidad máxima admisible de 29 A.

Actividad propuesta 4.1

Consigue el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión y extrae todas aquellas tablas que se utilicen para

determinar la intensidad máxima admisible de los conductores eléctricos para diferentes tipos de instalaciones.



Consulta en el REBT las Instrucciones Técnicas Complementarias: ITC-BT 06 (Redes aéreas para distribución en baja tensión), ITC-BT 07 (Redes subterráneas para distribución en baja tensión, e ITC-BT 19 (Instalaciones interiores o receptoras).

4.3.2. Densidad de corriente de un conductor

La densidad de corriente de un conductor nos indica los amperios por milímetro cuadrado que circulan por él:

$$\delta = \frac{I}{S} \text{ en A/mm}^2$$

La densidad de corriente del conductor de la Actividad resuelta 4.10 sería, entonces:

$$\delta = \frac{I}{S} = \frac{25}{4} = 6,25 \text{ A/mm}^2$$

La densidad de corriente admisible por un conductor depende de las condiciones de instalación, tipo de cable y sección del conductor (según aumenta la sección, el calor se disipa peor y la densidad admisible disminuye).

4.3.3. Por qué se emplean altas tensiones en el transporte de energía eléctrica

Veamos un ejemplo. Deseamos generar y transportar por una línea eléctrica una pequeña potencia de 1.000 W. ¿Qué tensión utilizaremos? Estudiaremos dos casos extremos:

- Con una tensión de 1.000 V:

$$I_1 = \frac{P}{U_1} = \frac{1.000}{1.000} = 1 \text{ A}$$

Con una tensión de 1 V:

$$I_2 = \frac{P}{U_2} = \frac{1.000}{1} = 1.000 \text{ A}$$

Queda claro con este ejemplo que al aumentar la tensión reducimos la intensidad y, por tanto, la sección de los conductores podrá ser más reducida. A su vez, se reducen las pérdidas caloríficas en los conductores ($P_{PL} = R_L I^2$).



Tampoco conviene utilizar tensiones demasiado elevadas, ya que esto trae consigo un encarecimiento de los aislantes (torres más altas, cables más separados, aislantes más perfectos, inclusión de sofisticados sistemas de seguridad, etc.). En general se busca un equilibrio entre la potencia a transportar, la tensión a utilizar y la intensidad de la línea. La solución que resulte más económica es la que se empleará.

4.3.4. Caída de tensión en las líneas eléctricas

Seguro que habrás podido observar cómo en ciertas ocasiones la luz que emiten las lámparas eléctricas que están conectadas a la red eléctrica disminuye durante un breve periodo de tiempo su luminosidad.

Estos fenómenos son debidos a que las líneas producen una cierta pérdida de tensión.

Como todos sabemos, las líneas que transportan la energía eléctrica están compuestas por conductores eléctricos de una cierta resistencia que, al ser recorridos por una corriente eléctrica, se calientan y, por tanto, producen una pérdida de potencia. Pues bien, también hay que pensar que los conductores de las líneas están conectados en serie con los receptores, y que al ser recorridos por la corriente ocasionan una caída de tensión. De tal forma que la tensión que le llega al receptor es menor que la que existe al principio de la línea.

Actividad resuelta 4.11

Se desea suministrar energía eléctrica a un motor de 10 kW a 230 V. Para ello, se tiende una línea de cobre de 6 mm² de sección desde un transformador de distribución situado a 75 m (Figura 4.3). Calcula: **a)** la resistencia de la línea; **b)** la intensidad del circuito; **c)** la caída de tensión en la línea; **d)** la tensión que tiene que suministrar el transformador; **e)** la potencia perdida en la línea.

Solución:

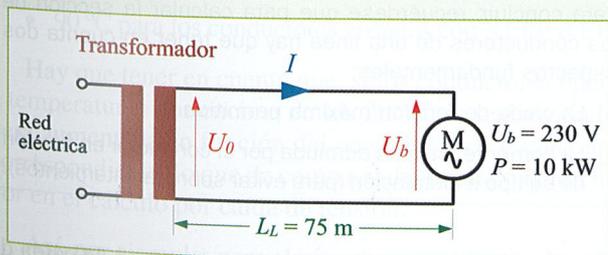


Figura 4.3.

- a)** Para calcular la resistencia de la línea hay que tener en cuenta que la longitud total del conductor son 75 + 75 = 150 m (conductor de ida + conductor de vuelta).

$$R_L = \rho \frac{L}{S} = 0,01786 \frac{150}{6} = 0,447 \Omega$$

Esta resistencia la podemos representar como si estuviese concentrada en un punto de la línea (Figura 4.4).

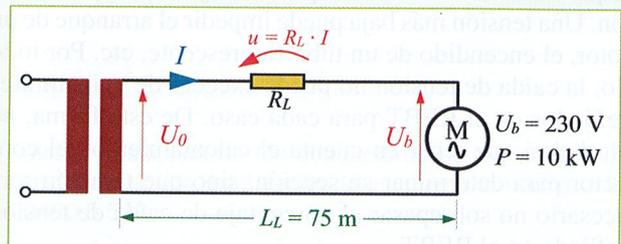


Figura 4.4.

- b)** La intensidad de la línea es:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{10.000}{230} = 43,48 \text{ A}$$

- c)** La caída de tensión u la calculamos aplicando la ley de Ohm entre los terminales de la hipotética resistencia de línea R_L cuando es recorrida por la intensidad I .

$$u = R_L \cdot I = 0,447 \cdot 43,48 = 19,4 \text{ V}$$

A veces, conviene expresar este resultado en tantos por ciento referidos a la tensión de alimentación. En nuestro caso:

$$u \% = \frac{19,4}{230} \cdot 100 = 8,4 \%$$

Si aplicásemos las normas contempladas en el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT), habría que aumentar la sección de los conductores de la línea, ya que este porcentaje de caída de tensión es en cualquier caso inadmisibles. El porcentaje máximo que se suele admitir para instalaciones de BT entre el origen de estas y cualquier punto de consumo es del 3 % del valor nominal para circuitos de alumbrado, y del 5 % para los demás usos (contrasta lo indicado con la Instrucción Técnica Complementaria ITC-BT-19 Apartado 2.2.2).

- d)** La tensión u en el transformador es (Figura 4.5):

$$U_0 = U_b + u = 230 + 19,4 = 249,4 \text{ V}$$

- e)** La potencia que se pierde en la línea la calculamos con la expresión:

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2 = 0,447 \cdot 43,48^2 = 845 \text{ W}$$

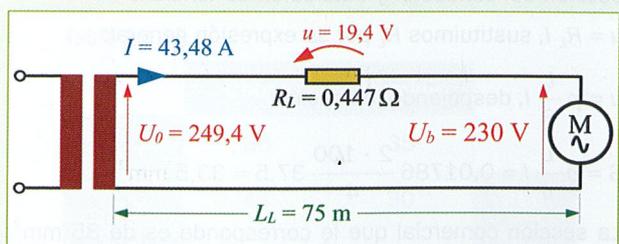


Figura 4.5.

4.3.5. Cálculo de la sección teniendo en cuenta la caída de tensión

La caída de tensión en las líneas puede llegar a ser un problema para el correcto funcionamiento de los receptores, ya que estos están diseñados para trabajar a una cierta tensión. Una tensión más baja puede impedir el arranque de un motor, el encendido de un tubo fluorescente, etc. Por todo ello, la caída de tensión no puede exceder de unos límites prefijados en el REBT para cada caso. De esta forma, no solo habrá que tener en cuenta el calentamiento del conductor para determinar su sección, sino que también será necesario no sobrepasar el porcentaje de caída de tensión prefijado en el REBT.

Actividad resuelta 4.12

Calcula la sección que le correspondería a una línea compuesta por dos conductores de cobre unipolares instalados bajo tubo empotrado en obra y aislados con PVC de 100 metros de longitud, que alimenta a un taller de 15 kW/400 V, si la caída máxima de tensión que se admite es del 1 % de la de alimentación (Figura 4.6).

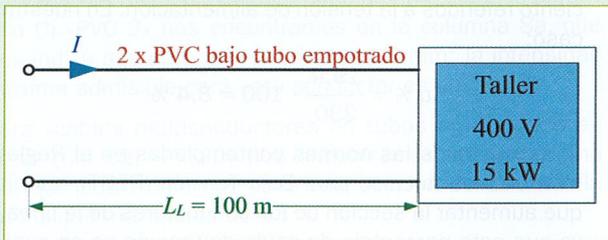


Figura 4.6.

Solución:

Primero calculamos la intensidad:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{15.000}{400} = 37,5 \text{ A}$$

La caída de tensión en voltios la calculamos así:

$$u = \frac{400}{100} 1\% = 4 \text{ V}$$

Ahora, vamos a encontrar la relación que existe entre la sección del conductor y esta caída de tensión:

$u = R_L I$, sustituimos R_L por su expresión general:

$u = \rho \frac{L}{S} I$, despejando la sección:

$$S = \rho \frac{L}{u} I = 0,01786 \frac{2 \cdot 100}{4} 37,5 = 33,5 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es de 35 mm². Ahora comprobamos la intensidad máxima que admite este

conductor según la Tabla 4.3: dos conductores unipolares instalados bajo tubo empotrado en obra y aislados con PVC de 35 mm² admiten una intensidad de 101 amperios sin calentarse excesivamente. Como la intensidad de la línea es inferior (37,5 A), damos como válido el resultado de 35 mm² (Figura 4.7).

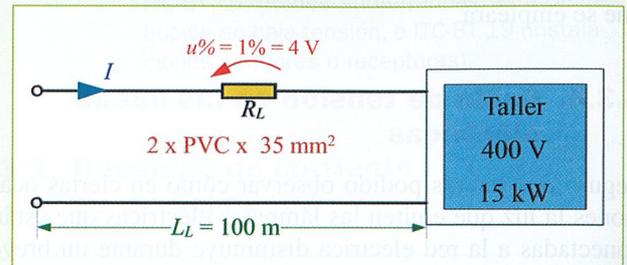


Figura 4.7.

En el caso de que el conductor tuviese una intensidad máxima admisible inferior a la que circula por la línea, habría que tomar una sección superior, predominando en este caso el cálculo de la sección por calentamiento de los conductores al cálculo por caída de tensión.

¿Qué sección le correspondería a esta línea si no se tuviese en cuenta la caída de tensión de la misma?... $S = 10 \text{ mm}^2$.

En resumen, siempre que necesitemos determinar la sección de un conductor emplearemos la siguiente expresión:

$$S = \rho \frac{2L_L}{u} I$$

ρ = Resistividad del conductor ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$).

u = Caída de tensión máxima en la línea (V).

L_L = Distancia de la carga al punto de alimentación (m).

I = Intensidad por la línea (A).

S = Sección del conductor de la línea (mm²).

Para concluir, recuérdese que para calcular la sección de los conductores de una línea hay que tener en cuenta dos aspectos fundamentales:

- La caída de tensión máxima permitida.
- La corriente máxima admitida por el conductor en función de su tipo e instalación (para evitar sobrecalentamientos).

Cuando se trata de líneas de corta longitud, la caída de tensión es pequeña y, por tanto, predominará en el cálculo la sección determinada mediante la corriente admisible. Para líneas más largas, la caída de tensión se hace considerable y, por lo general, es la que exige una sección mayor en el cálculo.



Actividad resuelta 4.13

Determina la sección de los conductores de una línea compuesta por un cable bipolar de cobre y aislado con PVC e instalado bajo conducto en pared aislante que alimenta una vivienda unifamiliar mediante paneles fotovoltaicos. La longitud de la línea es de 8 m y se admite una caída de tensión del 4 %. La carga prevista es de 2 kW a 24 V.

Solución:

Primero calculamos la intensidad:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2.000}{24} = 83 \text{ A}$$

La caída de tensión máxima que se permite en voltios es:

$$u = \frac{24}{100} \cdot 4 \% = 0,96 \text{ V}$$

La sección necesaria para no superar esta caída es:

$$S = \rho \frac{2L_L}{u} I = 0,01786 \frac{2 \cdot 8}{0,96} 83 = 24,7 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que se fabrica es la superior: 25 mm².

Al comprobar la intensidad admisible en la Tabla 4.3 observamos que este conductor admite 63 A. Dado que la intensidad nominal que va a transcurrir por él es de 83 A, habrá que aumentar la sección hasta 50 mm² para que no se caliente excesivamente.

En el caso de que el conductor fuese de cobre y estuviese aislado con PVC, la resistividad a 70 °C la calcularíamos así:

$$\rho_{70^\circ\text{C}} = \rho_{20^\circ\text{C}} (1 + \alpha \Delta t) = 0,01786 [1 + 0,0039(70 - 20)] = 0,02134 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

Actividad resuelta 4.14

Calcula la sección de los conductores de la línea de la Actividad resuelta 4.12, teniendo en cuenta la norma UNE 20460-5-523.

Solución:

Lo que hacemos es tener en cuenta que para un conductor de cobre aislado con PVC, la resistividad a 70 °C es de 0,02134 Ω · mm²/m.

$$S = \rho \frac{2L_L}{u} I = 0,02134 \frac{2 \cdot 100}{4} 37,5 = 40 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que se fabrica es la superior: 50 mm².

Observamos cómo en este caso al aplicar la norma UNE-HD 60364-5-52 la sección final de los conductores calculada es mayor que en el caso de no haberla aplicado (en la Actividad resuelta 4.12 el resultado fue de 35 mm²).

4.3.6. Cálculo de la sección teniendo en cuenta la norma UNE-HD 60364-5-52

Esta norma nos indica que hay que tener en cuenta la resistividad o conductividad del material conductor a utilizar, en las peores condiciones de temperatura que pueda trabajar.

Según esta norma las temperaturas máximas de servicio para los conductores que aparecen en la Tabla 4.3 de intensidades máximas admisibles son:

- 70 °C para los conductores aislados con PVC.
- 90 °C para los conductores aislados con XLPE o EPR.

Hay que tener en cuenta que, si los conductores operan a temperaturas por encima de los 20 °C, su resistividad se verá aumentada en función del coeficiente de temperatura correspondiente, lo que da como resultado una sección mayor en el cálculo por caída de tensión.

Así, por ejemplo, para el caso de un conductor de cobre aislado con XLPE o EPR, la resistividad a 90 °C la calcularíamos como sigue:

$$\rho_{90^\circ\text{C}} = \rho_{20^\circ\text{C}} (1 + \alpha \Delta t) = 0,01786 [1 + 0,0039(90 - 20)] = 0,02274 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

4.3.7. Cálculo de la sección de conductores teniendo en cuenta la conductividad

Es muy habitual encontrar el término de la conductividad en las expresiones de cálculo de la sección de conductores por caída de tensión. La conductividad suele ser un número entero que da mayor precisión al cálculo.

$$S = \rho \frac{2L_L}{u} I = \frac{2L_L}{\gamma u} I$$

En la Tabla 4.4 se ha calculado la conductividad que poseerían los conductores para diferentes temperaturas con la idea de tener en cuenta estos resultados a la hora de aplicar la norma UNE-HD 60364-5-52.

Tabla 4.4.

	Cobre	Aluminio	
$\gamma_{20^\circ\text{C}}$	56	35	
$\gamma_{70^\circ\text{C}}$	48	30	PVC
$\gamma_{90^\circ\text{C}}$	44	28	XLPE EPR

Actividad resuelta 4.15

Calcula la sección de los conductores de una línea eléctrica que alimenta a un grupo de lámparas de 4.000 W a 230 V. La línea posee una longitud de 110 m y consta de un cable bipolar de cobre aislado con PVC instalado directamente sobre la pared. La caída de tensión máxima que se admite es del 0,5 %. Calcula la sección para el caso de que el conductor esté aislado con XLPE.

Solución:

Calculamos la intensidad:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{4.000}{230} = 17,4 \text{ A}$$

La caída de tensión máxima que se permite en voltios es:

$$u = \frac{230}{100} \cdot 0,5\% = 1,15 \text{ V}$$

La sección necesaria para no superar esta caída en el conductor aislado con PVC es:

$$S = \frac{2L_L}{\gamma_{70^\circ\text{C}} \cdot u} I = \frac{2 \cdot 110}{48 \cdot 1,15} \cdot 17,4 = 69 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que se fabrica es la superior: 70 mm².

Al comprobar la intensidad admisible en la Tabla 4.3 observamos que este conductor admite 185 A.

En el caso de que el conductor estuviese aislado con XLPE:

$$S = \frac{2L_L}{\gamma_{90^\circ\text{C}} \cdot u} I = \frac{2 \cdot 110}{44 \cdot 1,15} \cdot 17,4 = 75 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que se fabrica es la superior: 95 mm².

En este ejemplo hemos comprobado cómo puede llegar a influir la temperatura de funcionamiento del conductor en el cálculo de la sección de conductores por caída de tensión. De tal forma que si utilizamos un conductor con aislamiento de XLPE tendremos que utilizar un conductor de 95 mm² de sección, mientras que si hubiéramos utilizado conductores aislados con PVC, la sección de estos sería de 70 mm².

4.3.8. La caída de tensión según el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión

En el REBT se pueden consultar las caídas de tensión máximas admitidas según el tipo de instalación. En la Tabla 4.6 se expone un extracto de las más significativas.

Como ejemplo, y para entender mejor los datos de la Tabla 4.6, en la Figura 4.8 se muestra el esquema eléctrico de la instalación de enlace de un edificio de viviendas con los contadores totalmente centralizados.

Actividad propuesta 4.2

Calcula la sección de los conductores de cobre de las líneas para las instalaciones interiores que aparecen en la Tabla 4.5 (aplicar en todos los casos la norma UNE-HD 60364-5-52).

Tabla 4.5.

Ejerc.	P (kW)	U (V)	u (%)	L _L (m)	Instalación	Conduc.
1.º	2	230	1	10	Unipolares bajo tubo en montaje superficial	PVC 2
2.º	6	400	2	50	Multipolar en bandeja perforada	XLPE 2
3.º	9	230	5	30	Unipolares bajo tubo empotrado en pared aislante	EPR 2
4.º	2,5	100	1,5	15	Multipolar bajo tubo empotrado en obra	PVC 2
5.º	3	400	3	100	Multipolar directamente sobre la pared	XLPE 2



La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.



Tabla 4.6. Caída de tensión admisible para líneas de alimentación según el tipo de instalación

Instalación de los contadores	Instalaciones de enlace		Instalación interior		
	Línea general de alimentación	Derivación individual	Viviendas	Otras instalaciones	
				Alumbrado	Otros usos
Para un solo usuario	No existe línea general de alimentación	1,5 %	3 %	3 %	5 %
Para dos usuarios alimentados desde el mismo lugar					
Contadores totalmente centralizados	0,5 %	1 %			
Contadores centralizados en más de un lugar	1 %	0,5 %			
TOTAL en el conjunto de la instalación	1,5 %		4,5 %	4,5 %	6,5 %

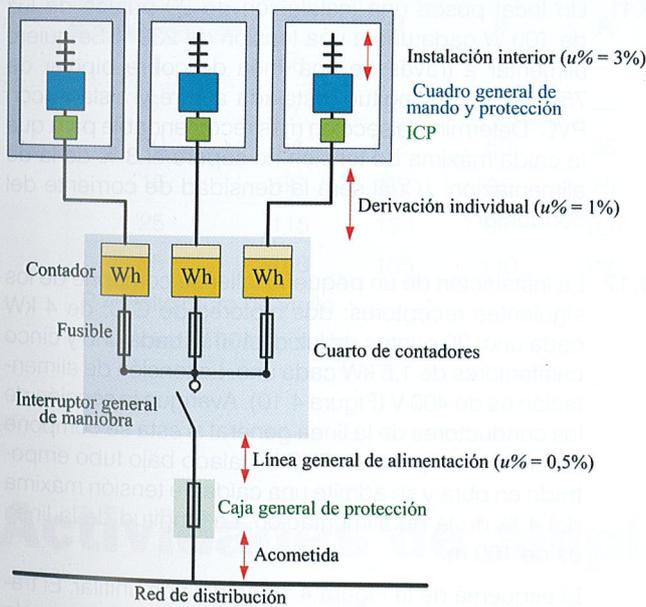


Figura 4.8. Esquema eléctrico unifilar de las instalaciones de enlace de un edificio de viviendas.

se realizarán en las Unidades 13, 14 y 15), calcular la sección de los conductores de las derivaciones individuales de un edificio con viviendas de grado de electrificación básica según el esquema de la Figura 4.9. Los conductores empleados son multipolares de polietileno reticulado en montaje empotrado y los contadores están totalmente centralizados.

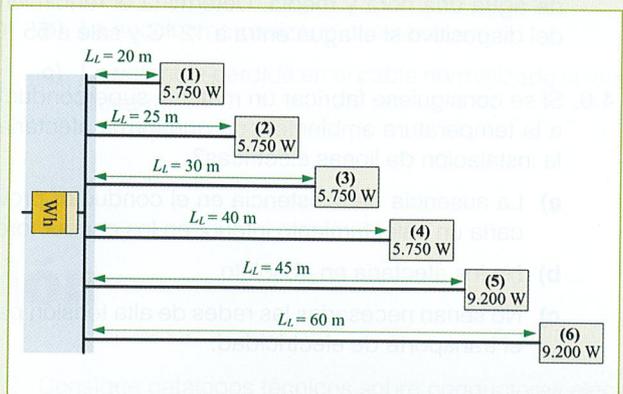


Figura 4.9.

Para resolver este ejemplo se ha tenido en cuenta la Instrucción Técnica Complementaria **ITC-BT-15** del REBT que indica que la sección mínima será de 6 mm^2 para este tipo de instalación.



La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

Actividad propuesta 4.3

Suponiendo que las instalaciones de enlace de un edificio de viviendas son de C.C. (lo habitual es que el suministro sea de C.A., por lo que las fórmulas empleadas para calcular la intensidad de corriente y de la sección por caída de tensión serían algo diferentes. Estos cálculos

Actividades de comprobación

- 4.1.** Suponiendo dos conductores de la misma masa, uno de cobre y otro de aluminio, que al ser recorridos por una corriente eléctrica se calientan, ¿en cuál de los dos conductores se elevará más la temperatura?
- Toman los dos la misma temperatura, por tener la misma masa.
 - El cobre, por poseer un menor calor específico.
 - El aluminio, por poseer un mayor calor específico.
- 4.2.** Una plancha eléctrica basa su funcionamiento en la transmisión de calor por:
- Radiación.
 - Convección.
 - Conducción.
- 4.3.** Calcula el calor generado por un termo eléctrico de características 2.000 W/230 V durante 2 horas de funcionamiento.
- 4.4.** Calcula el tiempo aproximado que hay que tener conectada la resistencia calefactora de un calentador eléctrico de agua sanitaria de 3.500 vatios de potencia, si la capacidad de su depósito es de 75 litros y el agua se calienta de 10 °C a 50 °C.
- 4.5.** Un termo eléctrico de 1.500 W tarda en calentar 40 litros de agua una hora y media. Determina el rendimiento del dispositivo si el agua entra a 12 °C y sale a 55 °C.
- 4.6.** Si se consiguiese fabricar un material superconductor a la temperatura ambiente, ¿de qué forma afectaría a la instalación de líneas eléctricas?
- La ausencia de resistencia en el conductor provocaría un calentamiento inferior en los conductores.
 - No los afectaría en absoluto.
 - No serían necesarias las redes de alta tensión para el transporte de electricidad.

4.7. Con la ayuda de la Tabla 4.3, comprueba la densidad de corriente admisible para todas las secciones correspondientes a conductores de 4 mm² en diferentes formas de instalación y agrupación de conductores.

4.8. Se necesita instalar una motobomba de 6 kW a 230 V. Para ello, se tiende una línea bajo tubo en pared aislante, consistente en dos cables unipolares.

¿Cuál será la sección de los conductores, como mínimo, si estos son de cobre aislados con PVC? Averigua también la densidad de corriente del conductor (se su-

pone que la longitud de este es muy corta, por lo que se prescinde de la caída de tensión).

*** Para calcular la sección de los conductores de las Actividades de comprobación 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12, téngase en cuenta la aplicación de la norma UNE-HD 60364-5-52.*

4.9. ¿Cuál sería la sección del conductor y la densidad de corriente si para instalar la motobomba de la actividad anterior optamos por realizar la instalación mediante un cable bipolar instalado directamente en la pared?

4.10. La potencia máxima que se espera que pueda consumir una cocina eléctrica de uso doméstico es de unos 5.000 W. Sabiendo esto, calcula la sección de los conductores del circuito que la alimenta, teniendo en cuenta que está conectada a una red de 230 V y que los conductores son unipolares de cobre aislados con PVC y que están instalados bajo tubo empotrado en obra.

4.11. Un local posee una instalación de 20 puntos de luz de 100 W cada uno a una tensión de 230 V. Se quiere alimentar a través de una línea de cobre bipolar de 75 metros de longitud instalada al aire y aislada con PVC. Determina la sección más recomendable para que la caída máxima de tensión no supere el 3 % de la de alimentación. ¿Cuál será la densidad de corriente del conductor?

4.12. La instalación de un pequeño taller se compone de los siguientes receptores: dos motores de C.C. de 4 kW cada uno, 20 puntos de luz de 100 W cada uno y cinco calefactores de 1,5 kW cada uno. La tensión de alimentación es de 400 V (Figura 4.10). Averigua la sección de los conductores de la línea general si esta se compone de un cable bipolar de PVC instalado bajo tubo empotrado en obra y se admite una caída de tensión máxima del 4 % de la de alimentación. La longitud de la línea es de 100 m.

El esquema de la Figura 4.10 es del tipo unifilar. El trazo representa a la línea y el número de conductores de esta se representa por unas rayitas cruzadas (como en nuestro caso la línea tiene dos conductores: //).

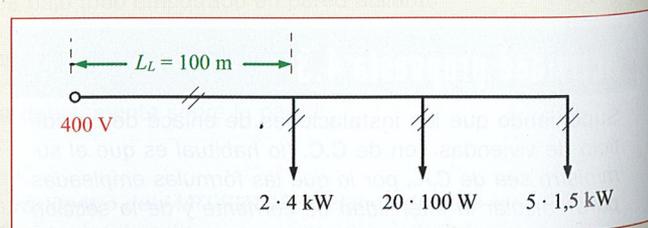


Figura 4.10.



Actividades de evaluación resueltas



A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

- 4.1.** Un generador de corriente continua alimenta una instalación que absorbe 20 kW a una tensión de 400 V mediante un línea bifilar. La línea tiene una longitud de 300 m y la sección del conductor 20 mm². Sabiendo que la resistividad del conductor es $\rho = 0,017 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, halla:
- Resistencia que presenta la línea de alimentación.
 - Caída de tensión en la línea.
 - Tensión a la salida del generador.

- 4.2.** A partir de la información de la Tabla 4.7:

Tabla 4.7. Intensidad máxima admisible en amperios para cables aislados trenzados en haz (tripolar o tetrapolar) para $t = 40^\circ\text{C}$

Sección mm ²	Cobre		Aluminio	
	P	R	P	R
4	36	41	—	—
6	47	52	—	—
10	64	72	50	56
16	86	95	67	75
25	115	130	89	100
35	140	155	110	120

P = Policloruro de vinilo.
R = Polietileno reticulado.

- Calcula la densidad de corriente en un cable de aluminio, aislado con policloruro de vinilo, trenzado en haz de 16 mm².
- Calcula la sección de un cable trifásico de cobre, aislado con polietileno reticulado, trenzado en haz, que alimenta a un motor trifásico de 30 CV, rendimiento 0,9, factor de potencia 0,8 y tensión nominal 380 V (se supone despreciable la distancia de alimentación).

- 4.3.** Un horno eléctrico monofásico se conecta a una tensión alterna de valor eficaz $U = 230 \text{ V}$ durante 1 hora y genera una cantidad de calor de 1.500 kcal. Se pide:
- La potencia eléctrica del horno.
 - La resistencia eléctrica del horno. (DATO: 1 cal = 4,18 J).

- 4.4.** Una instalación fotovoltaica alimenta a 24 V, en corriente continua, una casa aislada con los siguientes receptores: frigorífico (120 W), televisión (240 W), bomba de agua (420 W), lámparas (3 × 40 W).

Si la distancia entre el cuarto de baterías y la caja de derivación que reparte a los receptores es de 16 m, determina (si todas las cargas están alimentadas al mismo tiempo):

- La sección teórica del cable de cobre, si se desea que la caída de tensión de la línea sea del 1 % (cobre $\rho = 0,0178 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$).
- La sección normalizada a instalar.
- La potencia perdida en el cable normalizado seleccionado.

Actividades de ampliación



Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de «**actividades de evaluación propuestas de ampliación (4)**» para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

- 4.1.** Toma el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e indica en qué Instrucciones Técnicas Complementarias aparece información sobre las caídas de tensión máximas admitidas para conductores de alimentación.

- 4.2.** Consigue catálogos técnicos sobre conductores eléctricos (directamente de los fabricantes o en internet), analiza sus características técnicas y su campo de aplicación. ¿Qué es el CPR?

CPR y marcado CE de cables eléctricos por su reacción al fuego

El Reglamento de Productos de la Construcción (CPR, del inglés *Construction Products Regulation*) es la nueva legislación europea en la que se establecen los requisitos básicos y características esenciales armonizadas de todos los productos destinados a la construcción.

4. EFECTO TÉRMICO DE LA ELECTRICIDAD

Uno de los requisitos básicos de la CPR se refiere a la seguridad que deben presentar los cables de energía, de telecomunicaciones, datos y control en caso de incendio.

El reglamento CPR introduce las llamadas euroclases, que establece unos criterios para el desarrollo de cables eléctricos con baja emisión de humos y gases tóxicos. Estos cables conceden más tiempo para realizar la evacuación en caso de incendio y son menos dañinos para los equipos de protección, facilitando las labores de rescate.

La **reacción frente al fuego** de un cable en relación con el CPR tiene en cuenta:

1. El calor emitido en la propia combustión del cable.
2. La cantidad y transparencia de los humos emitidos.
3. La acidez de los gases desprendidos.

Siguiendo estos criterios los cables eléctricos se clasifican en **euroclases** según se muestra en la Tabla 4.8.

Para adaptar la legislación española a los requisitos CPR, el Ministerio de Industria publicó el pasado julio de 2016 los documentos de adaptación al REBT. La Tabla 4.9 muestra un resumen de estas adaptaciones.

Tabla 4.9. Adaptación del REBT a los requisitos CPR

REBT	Instalación	Clase CPR mínima
ITC-BT 14	Línea general de alimentación.	C _{ca} -s1b, d1, a1
ITC-BT 15	Derivaciones individuales.	C _{ca} -s1b, d1, a1
ITC-BT 16	Contadores.	C _{ca} -s1b, d1, a1
ITC-BT 20	Instalaciones interiores.	E _{ca}
ITC-BT 28	Instalaciones en locales de pública concurrencia.	C _{ca} -s1b, d1, a1
ITC-BT 29	Locales con riesgo de incendio o explosión.	C _{ca} -s1b, d1, a1

Tabla 4.8. Euroclases de los cables eléctricos

Según la energía liberada y propagación del fuego	
A_{ca}	Incombustible.
B1_{ca}	Combustible no inflamable. Con muy baja o nula propagación del fuego.
B2_{ca}	Combustible difícilmente inflamable. No propagan el fuego de forma continua y emiten muy poco calor. Propagación del fuego muy limitada.
C_{ca}	Combustible difícilmente inflamable. No propagan el fuego de forma continua y emiten muy poco calor. Propagación del fuego limitada.
D_{ca}	Moderadamente combustible. Mejor comportamiento frente a la llama que los cables sin retardante de la misma.
E_{ca}	Combustible fácilmente inflamable. Cables que tienen fácil propagación del fuego con la exposición a las llamas.
F_{ca}	Sin comportamiento declarado.
Clasificación adicional según la opacidad de humos	
s1	Escasa producción y lenta propagación de humo.
s1a	s1 y transparencia de humos superior al 80 %.
s1b	s1 y transparencia de humos superior al 60 % e inferior al 80 %.
s2	Valores intermedios de producción y propagación de humo.
s3	Ni s1 ni s2.
Clasificación adicional según el desprendimiento de gotas durante la combustión	
d0	Sin caída de gotas y partículas inflamadas durante 1.200 s.
d1	Sin caída de gotas y partículas inflamadas durante más de 10 s.
d2	Ni d0 ni d1
Clasificación adicional según la acidez de los humos	
a1	Baja acidez, conductividad < 2,5 μS/mm y pH > 4,3.
a2	Valor intermedio de acidez, conductividad < 10 μS/mm y pH > 4,3.
a3	Ni a1 ni a2.