

**CABLES AISLADOS  
APANTALLADOS DE MEDIA  
Y ALTA TENSIÓN**

# INTRODUCCIÓN

(UN POCO DE HISTORIA)

CABLE API (aislación en papel impregnado)

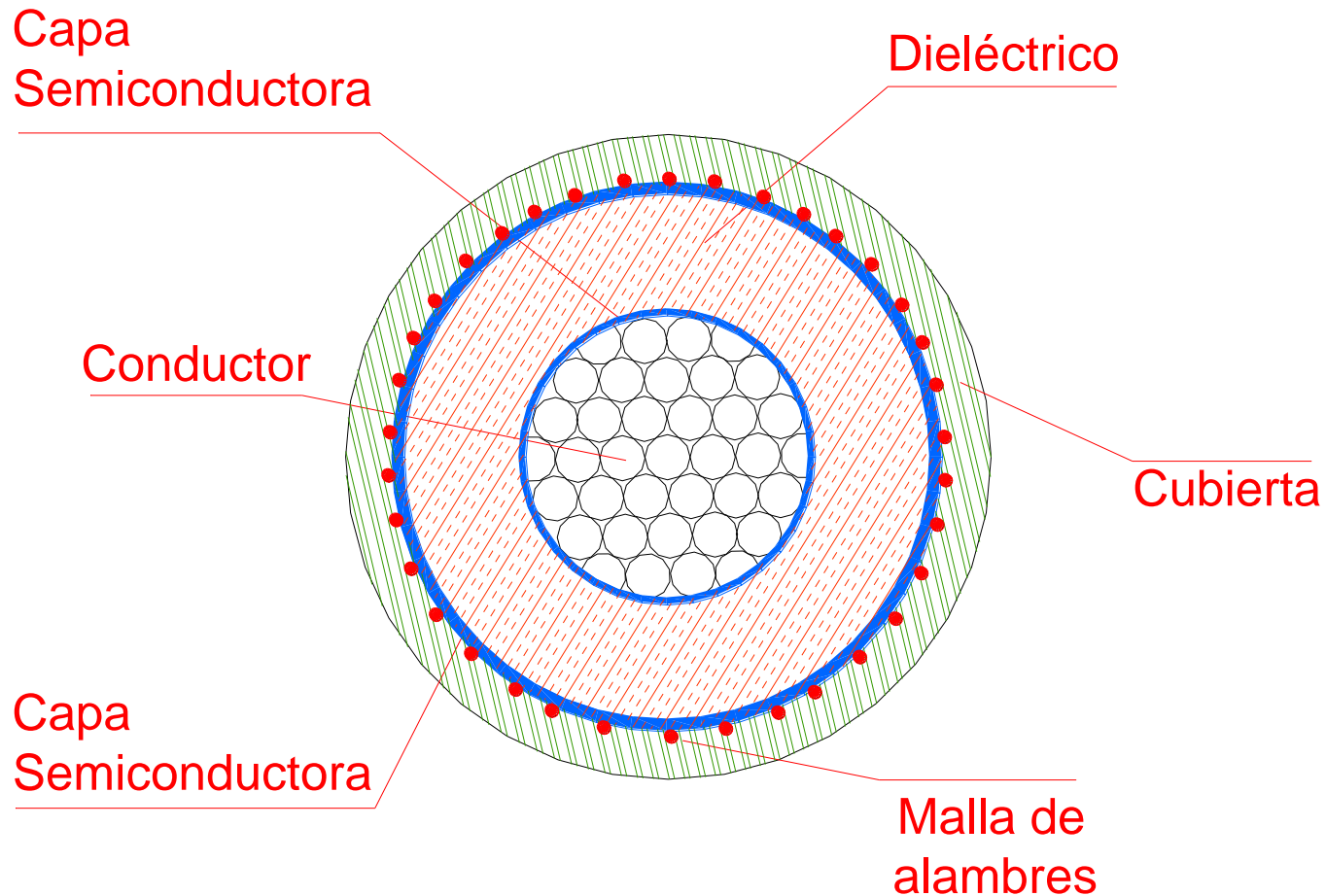
- Primer uso operativo: aprox. 1893 (10KV) en Inglaterra

CABLES “SECOS” (aislaciones plásticas)

- Comienzo de uso: años 60’ (EEUU, 10 KV, aislación de polietileno lineal no reticulado)

# Tipos de Cables apantallados

## I. Cables de campo eléctrico radial, aislación polietileno reticulado (XLPE) o EPR (goma etileno propileno)

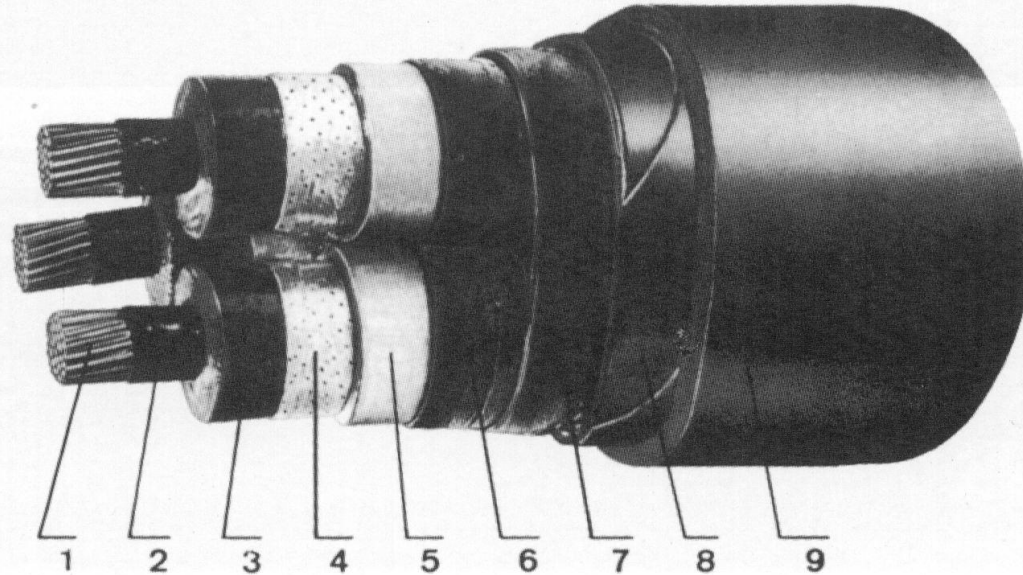


**(foto cable XLPE 1x240 mm<sup>2</sup> Al 12/20 kV)**



# Tipos de Cables apantallados

## II. Cables de campo eléctrico radial, aislación API (Papel impregnado)

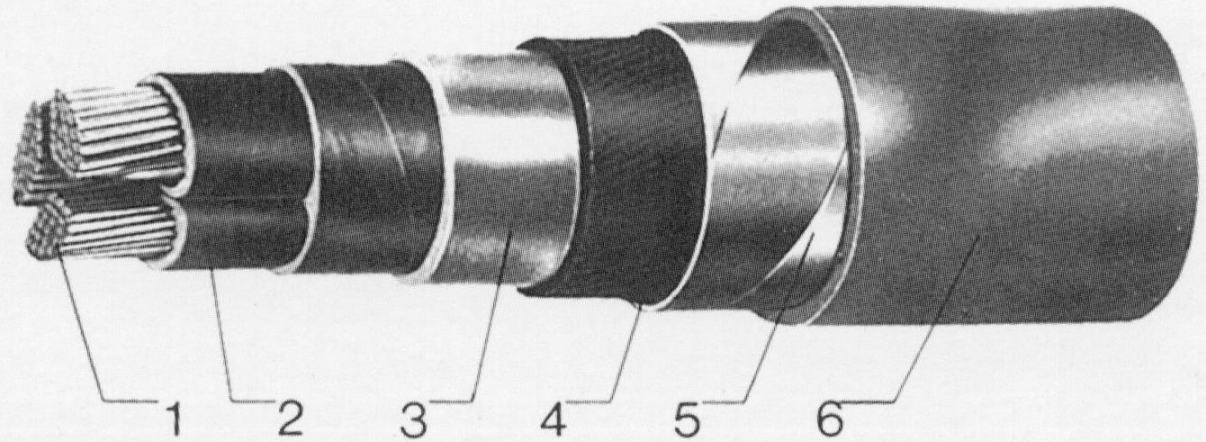


- 1- Conductor de cuerda de cobre ó aluminio
- 2- Capa de papel de carbón semiconductor
- 3- Aislación de papel impregnado con masa no migrante
- 4- Capa de papel metalizado
- 5- Envoltura de plomo puro ó aleado

- 6- Dos capas de cinta sintética compuesta y una capa de cinta de algodón engomada
- 7- Capas de papel, yute ó fibras sintéticas impregnadas
- 8- Armadura formada por dos flejes de acero solapados, colocados helicoidalmente
- 9- Envoltura de PVC

# Tipos de Cables apantallados

## III. Cables de campo eléctrico NO radial, aislación API (Papel impregnado)



- 1- Conductor de cuerda de cobre ó aluminio
- 2- Aislación de papel impregnado en masa no migrante
- 3- Envoltura de plomo puro ó aleado

- 4- Capas de papel, yute ó fibras sintéticas impregnadas
- 5- Armadura formada por dos flejes de acero
- 6- Envoltura de PVC

# CONSTRUCCIÓN

# Conductores

- **Cobre o aluminio cableados**
- **Pantallas metálicas en alambres o cintas de cobre**

## Aislaciones usuales cables “secos”

- **Materiales: XLPE o EPR**
- **Temperatura de operación en régimen: 90 °C**
- **Compuestos “termoestables” (no se “funde”)**

## Cubiertas (subterráneos)

- **Material: PVC “poli vinil chloride”(Policloruro de vinilo), PE (polietileno) o gomas**



**Norma internacional:  
IEC 60502-2**

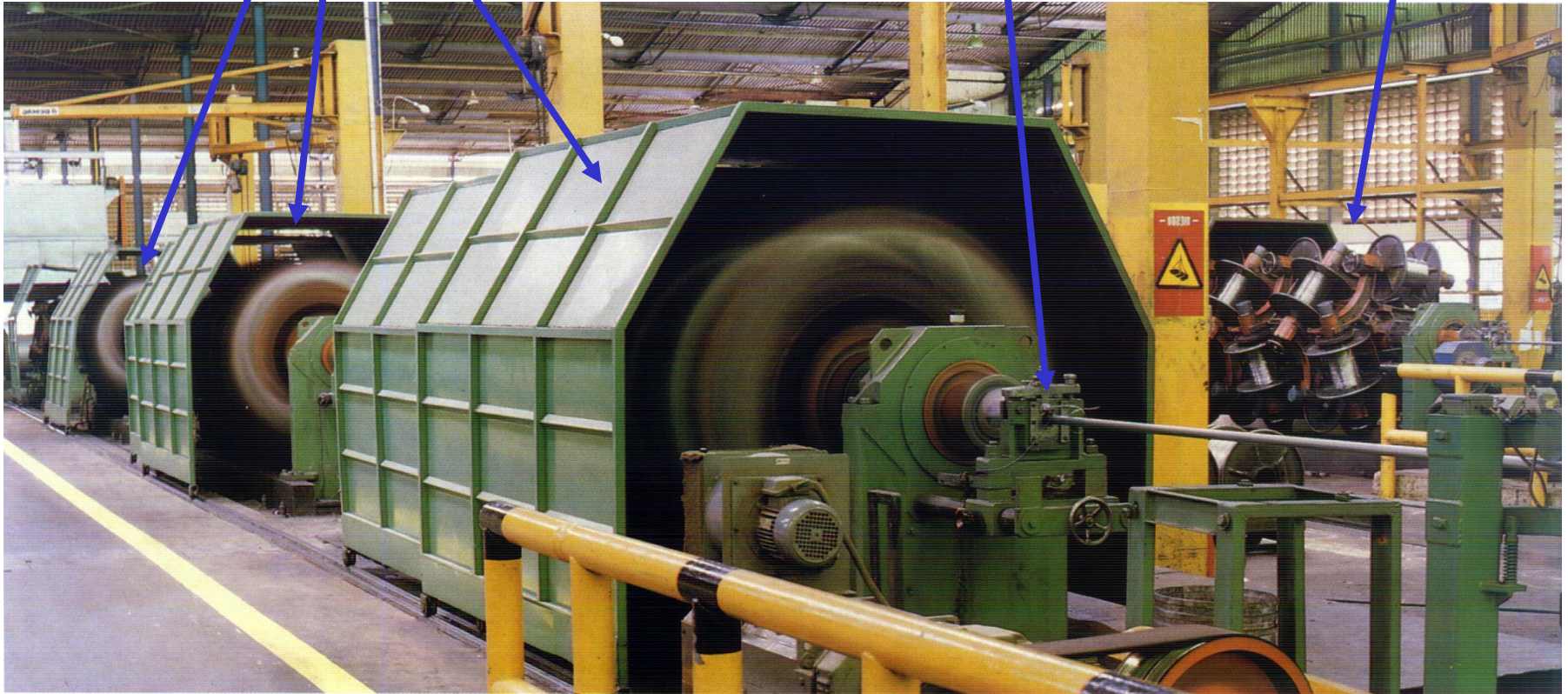


# FABRICACION DEL CONDUCTOR

**CABLEADORAS (UNA POR CAPA)**

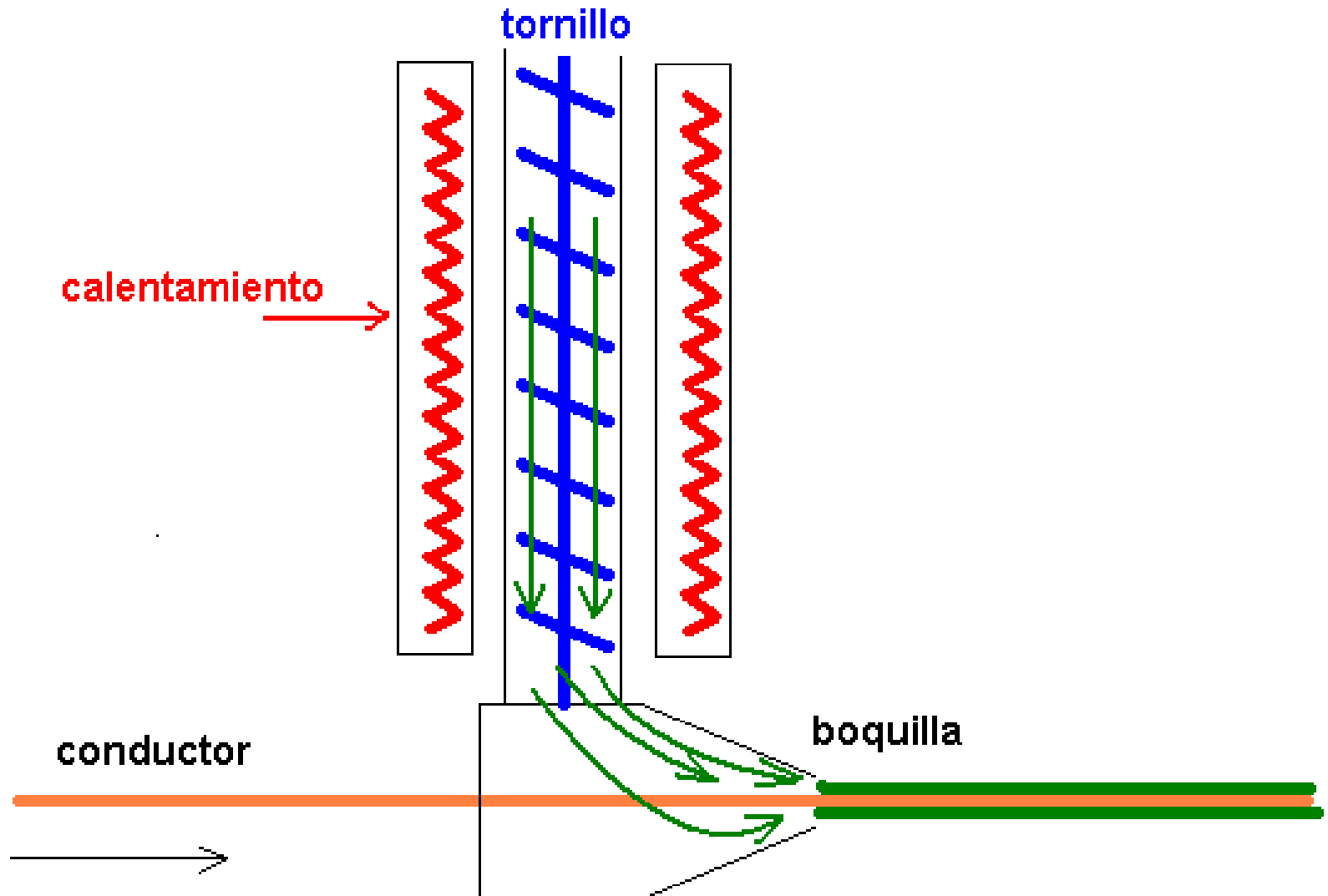
**COMPACTADO**

**Bobinas de alambres**



# PROCESO DE EXTRUSIÓN (UNA CAPA)

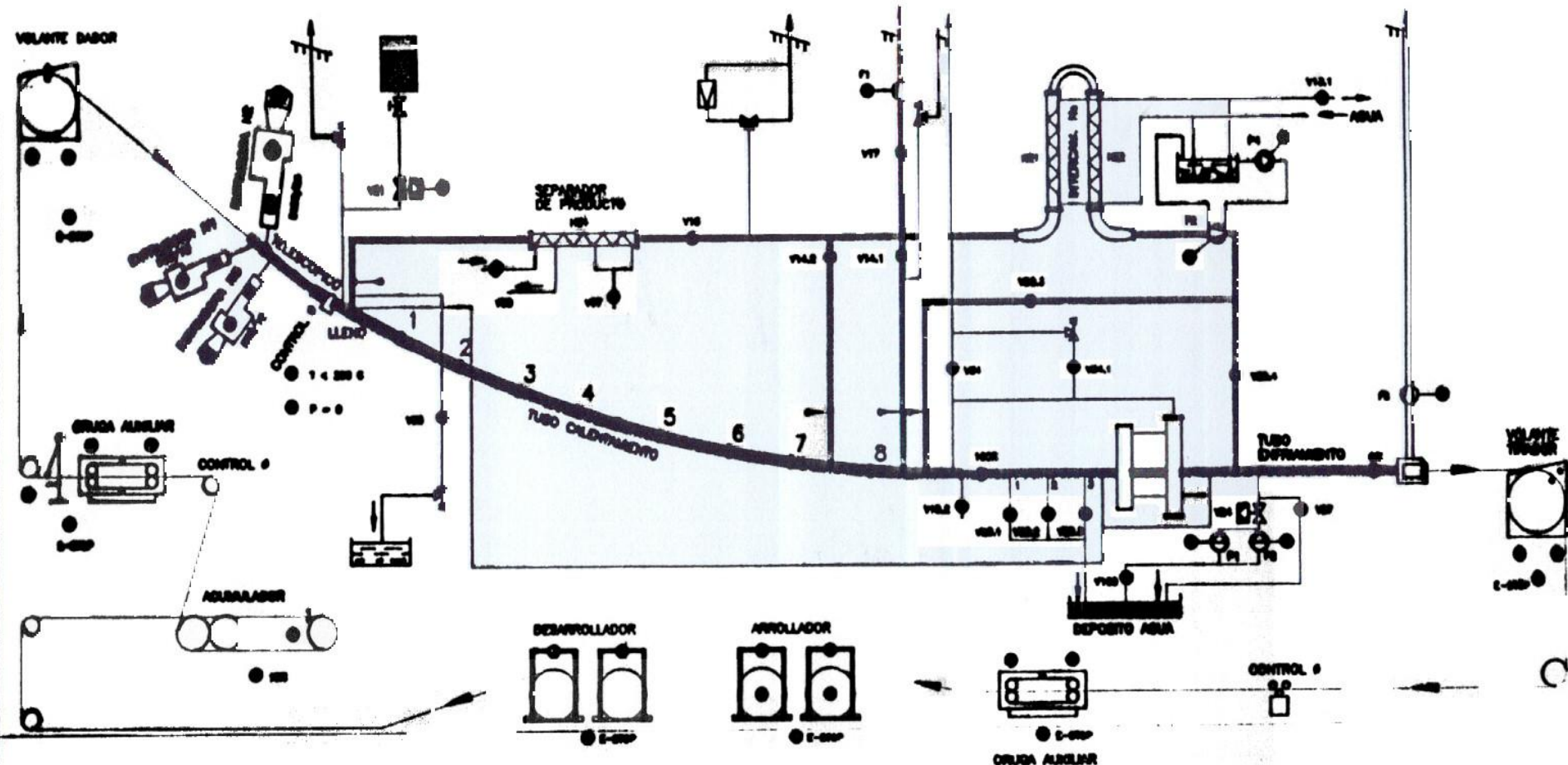
(esquema)



PARAMETRO CATENARIA - 183  
 PESO MAXIMO CABLE - 12,5kgs/mt.  
 DIAMETRO MAXIMO CABLE - 130mm.  
 SECCION MAXIMA Cu. - 1000mm.<sup>2</sup>  
 SECCION MINIMA Al. - 70mm.<sup>2</sup>

TIPOS VULCANIZACION

VULCANIZACION HUMEDA-VAPOR AGUA . . MT  
 VULCANIZACION SECA-NITROGENO AGUA . . MT  
 VULCANIZACION SECA-NITROGENO-NITROGENO . . AT



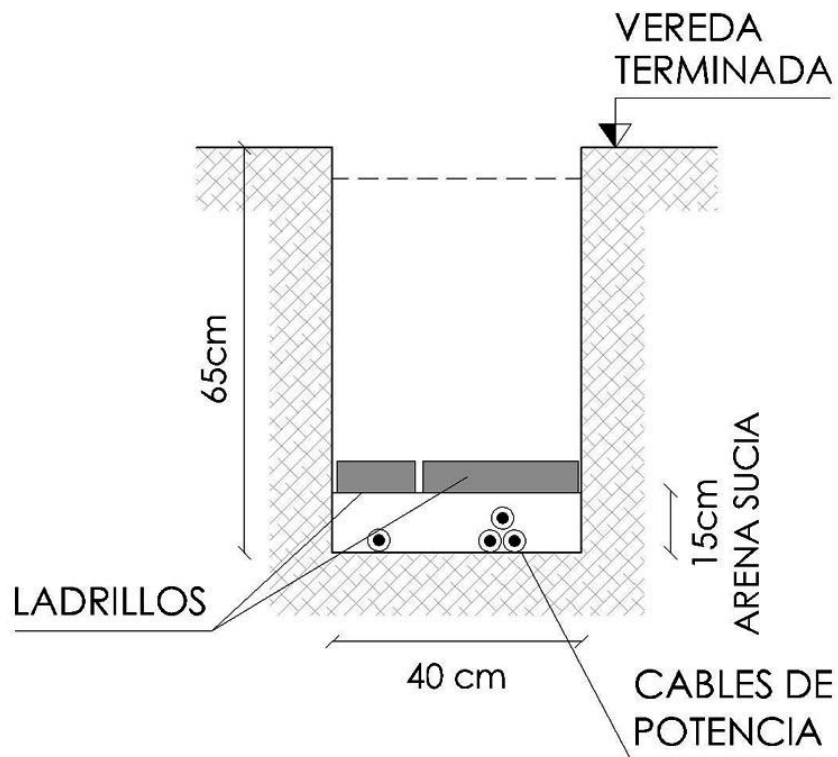
-CARACTERISTICAS TUBO VULCANIZACION-

DIAMETRO TUBO CALENTAMIENTO - 200mm.  
 DIAMETRO TUBO ENFRIAMIENTO - 150mm.  
 LONGITUD TUBO VULCANIZACION - 153,481mts.  
 LONGITUD TUBO CALENTAMIENTO - 56,280mts.  
 LONGITUD TUBO ENFRIAMIENTO - 97,201mts.  
 ANGULO CABEZAL - 20,307°  
 ANGULO TUBO ENFRIAMIENTO - 1,5°

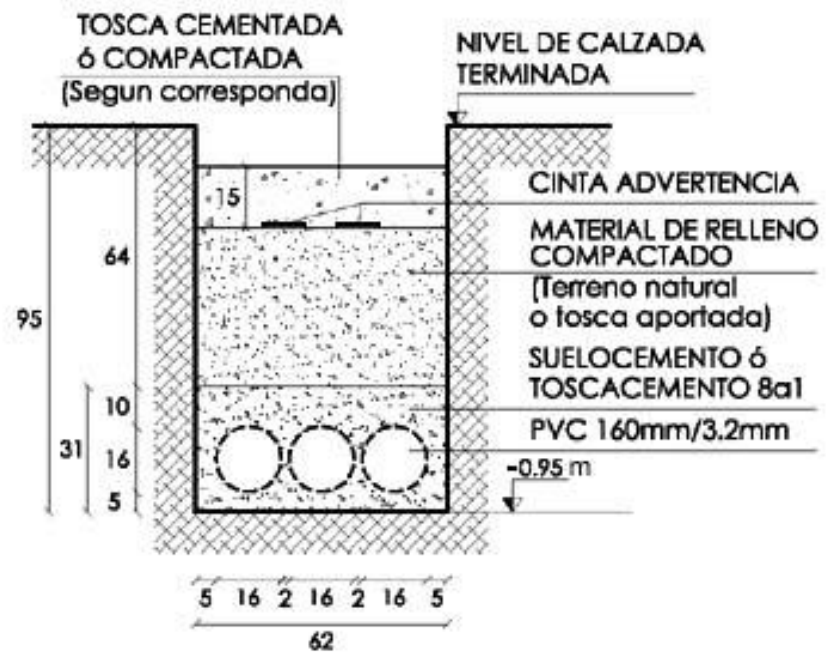
DATA	COM	FIRMA	Grupo General Cable DIVISION ENERGIA PLANTA DE MANLEU
DIBUJOS	Mayo 64	Pafelner	
CALCAT			
CONFORME			
ESCALA	LINEA DE NITROGENO		N°
	VULCA n9		SUBSTITUXX AL
			SUBSTITUIT PEL

# **INSTALACIÓN**

Directamente enterrado  
(ejemplo cables 20 kV)



En ductos, una terna por caño  
(Cruces de calles)

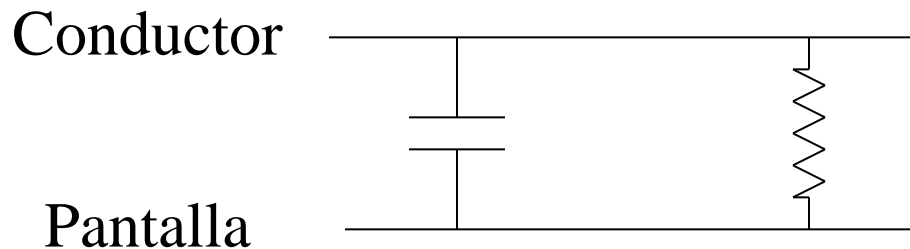


# **Cálculo de gradiente eléctrico en el aislante**

# Cálculo de gradiente eléctrico en el aislante

Modelo simplificado del dielectrico:

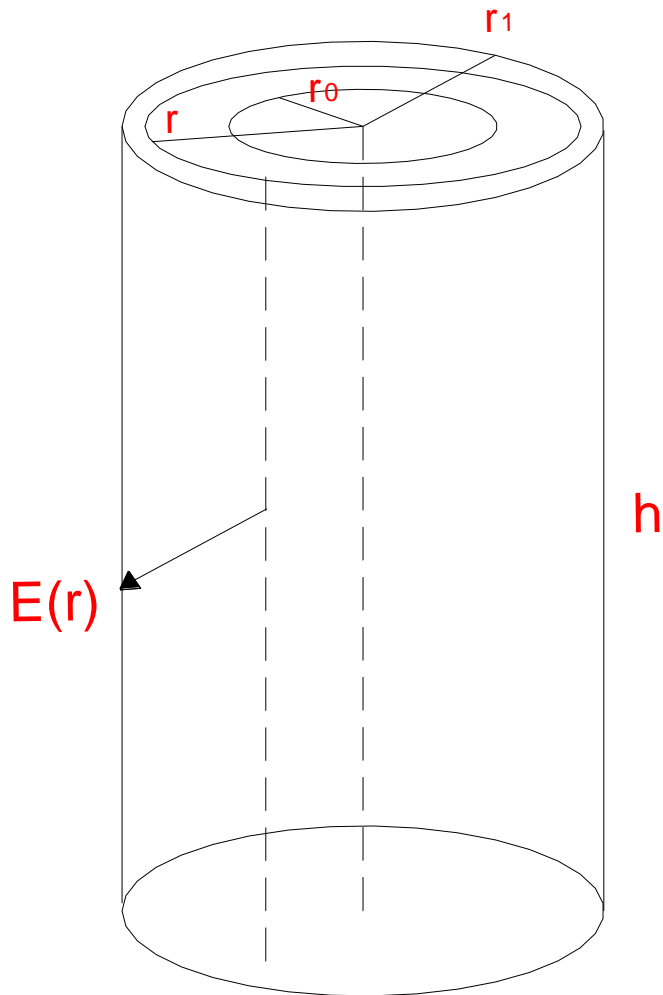
( $\epsilon$  y  $\rho$  independientes de temperatura, humedad, frecuencia)



$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)} \quad [F/m] \quad R = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) \quad [\Omega/m]$$

Para frecuencia industrial (50 Hz) se calcula despreciando componente asociado a la resistividad

# Cálculo de campo eléctrico en un cable cilíndrico apantallado



$$\int_{r_0}^{r_1} E(r) dr = U_0 \Rightarrow E(r) = \frac{U_0}{\text{Ln}\left(\frac{r_1}{r_0}\right)} \cdot \frac{1}{r}$$

**$E(r_0)$  = Gradiente eléctrico de diseño del cable [kV/mm]**



A modo de ejemplo se grafica el campo eléctrico en un cable 12/20 KV, 240 mm<sup>2</sup> de sección:

$U_0=12$ ; %KV tensión fase-pantalla

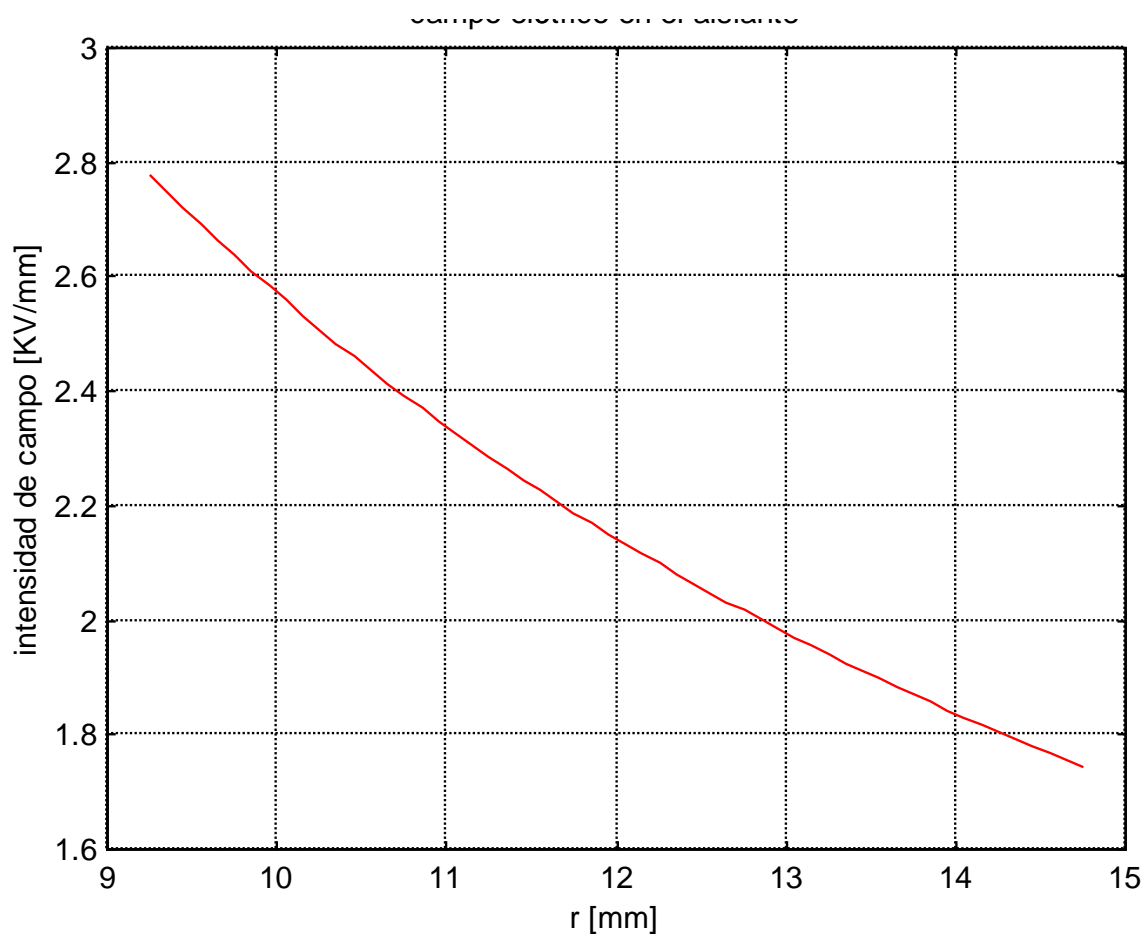
$r_0= 18.5/2$ ; %mm radio del conductor

$e= 5.5$ ; %mm espesor nominal de aislación

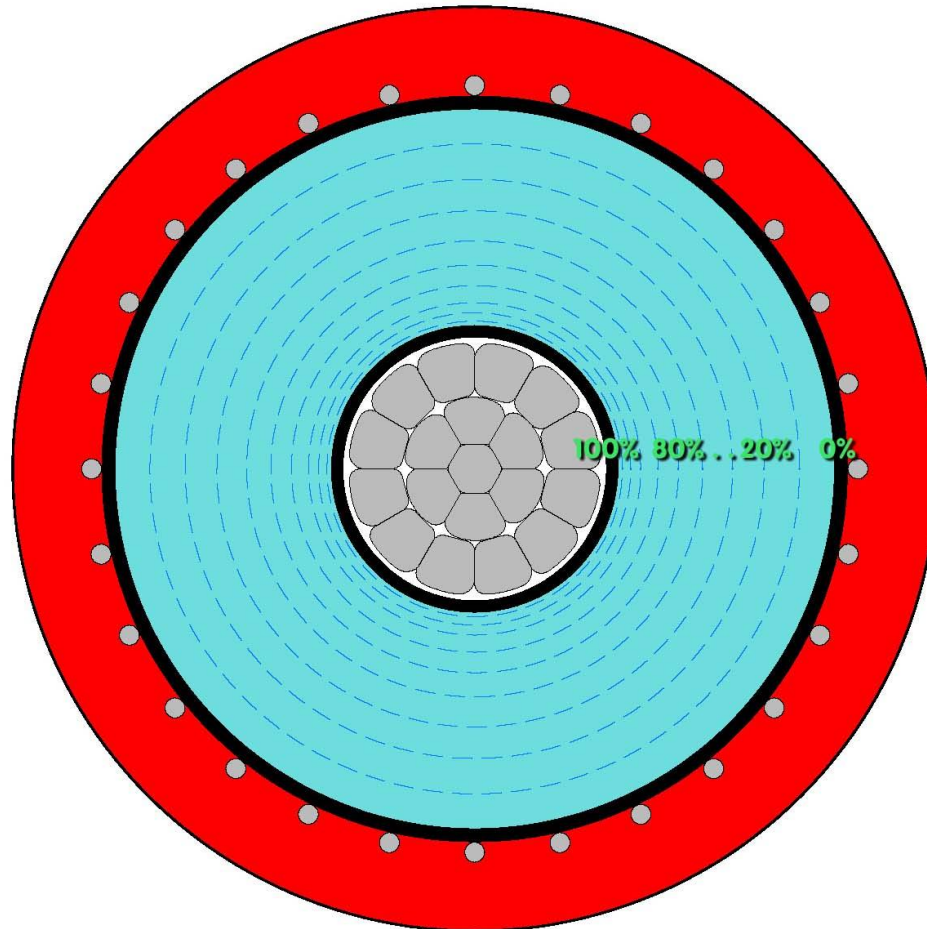
$r_1= r_0+e$ ; %mm

$r=r_0:0.1:r_1$ ;

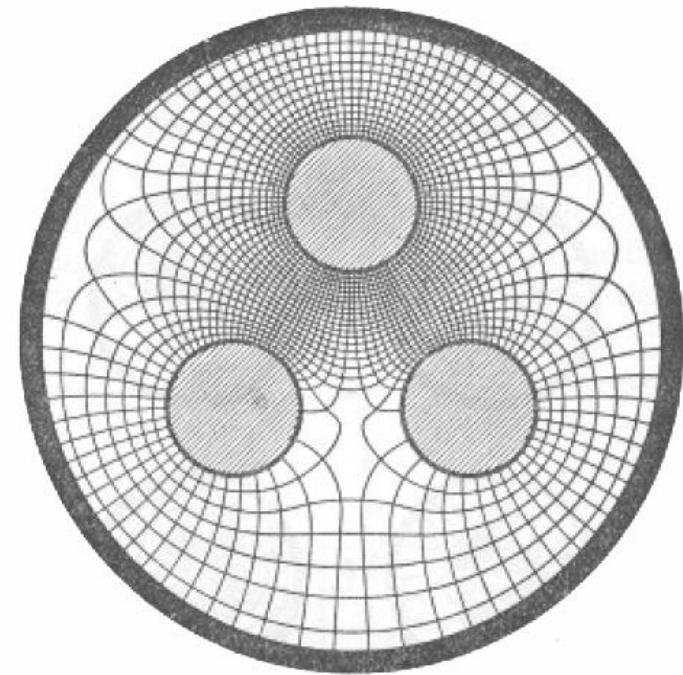
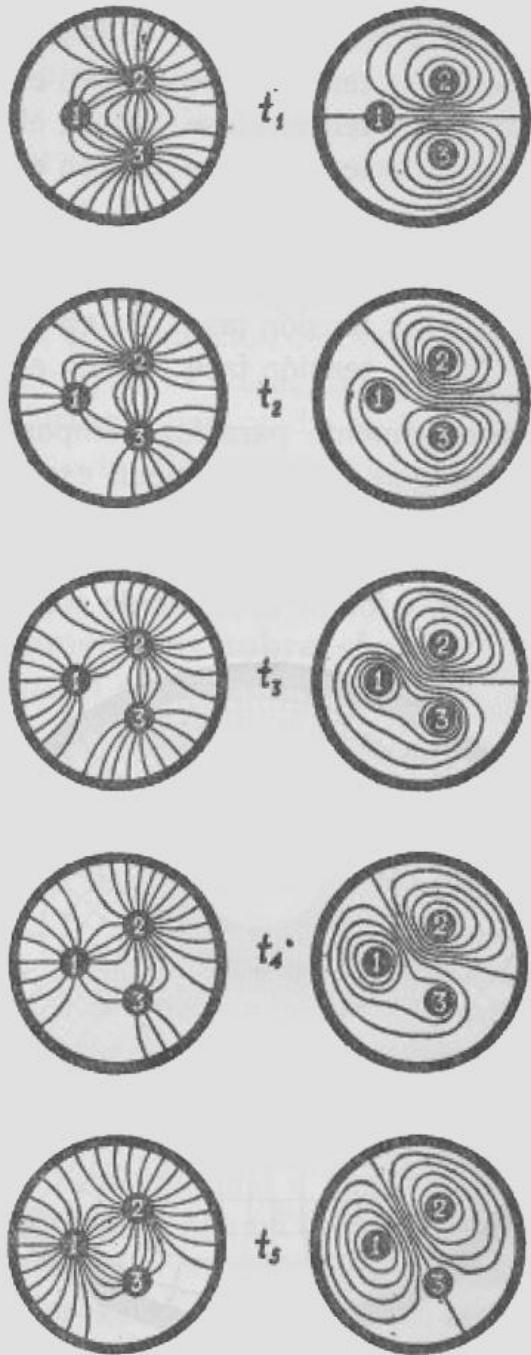
$E=(U_0/\log(r_1/r_0)).*(1./r)$ ; % KV/mm



# Equipotenciales en un cable apantallado de “campo radial”



# Equipotenciales en un cable apantallado de “campo NO radial”



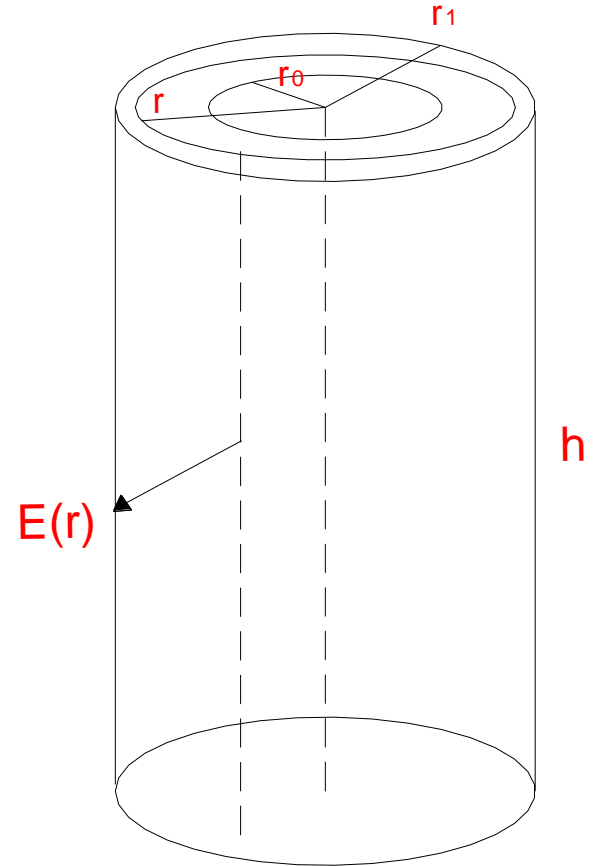
**Detalle equipotenciales y líneas de campo eléctrico en  $t_3$**

# Capacidad del cable y medida de tangente de delta

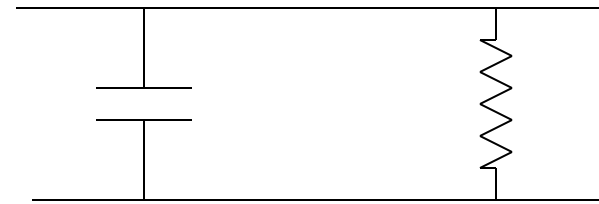
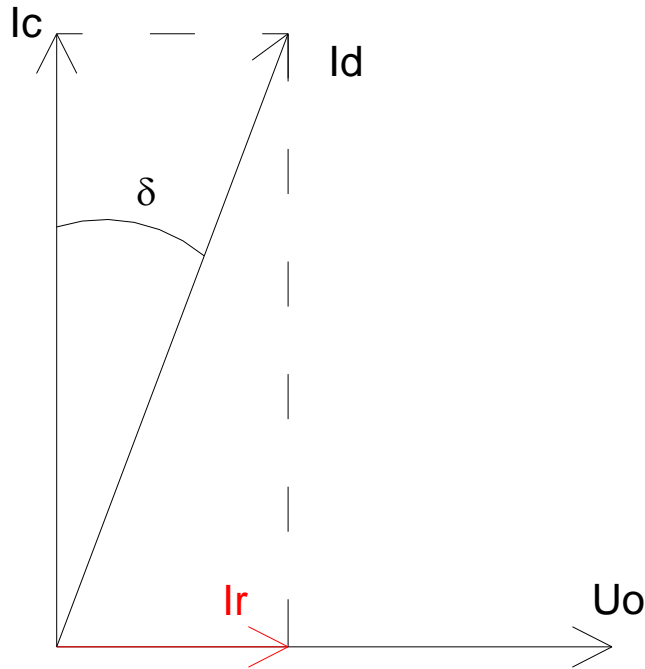
$$E_d = \frac{1}{2} CU_0^2 \quad E_d = \int_V \frac{1}{2} \varepsilon \cdot E^2(r) dV$$

$$E_d = \int_V \frac{1}{2} \varepsilon \frac{U_0^2}{\text{Ln}^2\left(\frac{r_1}{r_0}\right)} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot r d\theta dh = \frac{\varepsilon U_0^2 \pi h}{\text{Ln}\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}$$

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\text{Ln}\left(\frac{r_1}{r_0}\right)} \quad [\text{F/m}]$$



# Capacidad del cable y medida de tangente de delta



$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\text{Ln}\left(\frac{r_1}{r_0}\right)} \quad [F/m] \quad R = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \text{Ln}\left(\frac{r_1}{r_0}\right) \quad [\Omega/m]$$

$$W_d = U_0 \cdot I_r = U_0 \cdot I_c \cdot \text{tg } \delta \quad I_c = U_0 \cdot C \cdot \omega$$

$$W_d = U_0^2 \cdot \text{tg } \delta \cdot C \cdot \omega \quad \text{P\u00e9rdidas diel\u00e9ctricas (W/m)}$$

# **Efectos de los distintos sistemas de aterramiento y continuidad de pantallas**

## 1) Pantalla no aterrada:

- Si la pantalla no está aterrada, el potencial de la misma queda “flotante” en un valor entre tierra y el potencial de fase
- Este potencial depende de la capacidad entre la pantalla y el conductor, y de la capacidad entre pantalla y tierra
- Esta situación es muy peligrosa, ya que el potencial sobre la cubierta del cable no queda controlado, y además se originan corrientes superficiales que dañan los cables.
- **En conclusión: la pantalla debe estar aterrada en al menos un extremo !!**

Ejemplo de tracking  
(corrientes superficiales) en  
la cubierta de cables MT  
con pantallas no aterradas





## 2) Pantalla aterrada en un extremo:

- Si la pantalla está aterrada en un solo extremo, se induce en la pantalla un potencial debido a la corriente en el conductor
- Este potencial es proporcional al largo del cable y por supuesto, a la dicha corriente
- Precauciones deben tomarse para evitar que ese potencial sea peligroso y/o dañe la cubierta del cable (peor caso: cuando por el conductor del cable esta pasando una corriente de cortocircuito)
- Por ejemplo: uso de descargadores en el extremo no aterrado
- En el caso de tramos cortos, el efecto es despreciable

## Como estimar el potencial inducido

$$U_{ind} = j\omega\phi_{shR} = I_R \cdot j\omega \left( \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_1}\right) \right) \cdot h \quad \text{f.e.m inducida en la pantalla de la fase R}$$

h= largo del tramo de cable

d= distancia ente fases (caso tresbolillo)

$r_1$  = radio de la pantalla del cable

Obs: separar las fases de los cables, aumenta el potencial inducido por metro (ademas de la propia inductancia de la terna)

### 3) Pantalla aterrada en ambos extremos:

- Se elimina el problema de las tensiones potencialmente peligrosas en la pantalla y sus consecuencias
- Pero ahora aparece una corriente inducida en la pantalla, que debe tomarse en cuenta a la hora de calcular las pérdidas del cable.
- La pérdida adicional  $W_{shR}$  se expresa como un coeficiente  $\lambda_1$  multiplicando las pérdidas en el conductor ( $\lambda_1 * W_R$ )

### 3) Pantalla aterrada en ambos extremos:

Ahora se cumple: 
$$j\omega\phi_{shR} + R_{sh} \cdot I_{shR} = 0$$

...y ahora la f.e.m. Inducida vale:

$$j\omega\phi_{shR} = j\omega I_R \cdot \left( \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_1}\right) \right) \cdot h + j\omega I_{shR} \left( \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_1}\right) \right) \cdot h$$

Donde:

$R_{sh}$  = resistencia por unidad de longitud de la pantalla

$I_{shR}$  = corriente por la pantalla de la fase R

### 3) Pantalla aterrada en ambos extremos:

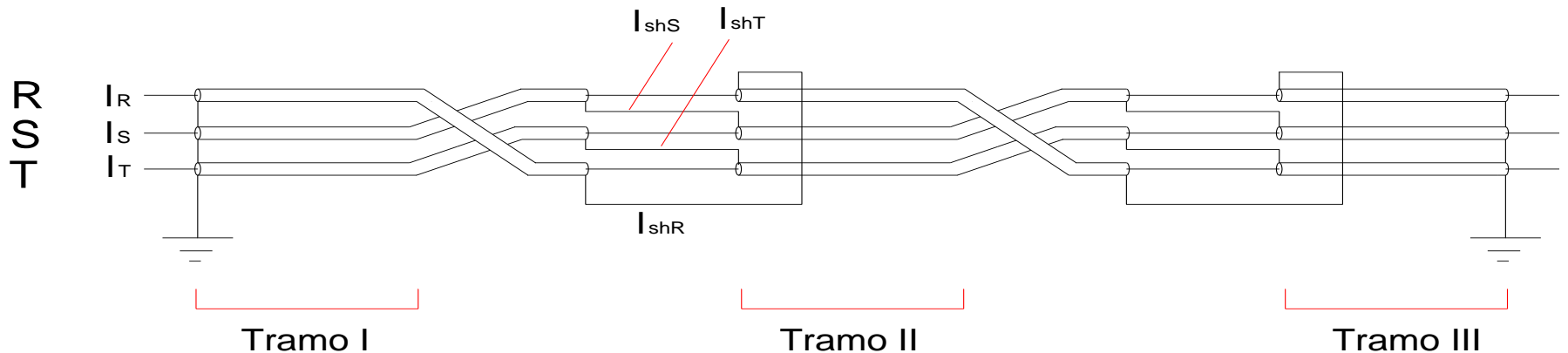
Llamando  $X_{sh} = \omega \cdot \left( \frac{\mu_0}{2\pi} \operatorname{Ln} \left( \frac{d}{r_1} \right) \right)$  se tiene que:

$$jX_{sh} \cdot I_R + I_{shR} (R_{sh} + jX_{sh}) = 0 \quad \Rightarrow \quad |I_{shR}| = \frac{|X_{sh}| \cdot |I_R|}{\sqrt{(R_{sh}^2 + X_{sh}^2)}}$$

$$W_{shR} = R_{sh} \cdot \frac{X_{sh}^2 \cdot |I_R|^2}{(R_{sh}^2 + X_{sh}^2)} = \frac{R_{sh}}{R_R} \cdot \frac{X_{sh}^2 \cdot |I_R|^2 \cdot R_R}{(R_{sh}^2 + X_{sh}^2)} = W_R \cdot \frac{R_{sh}}{R_R} \cdot \frac{1}{\left( \frac{R_{sh}^2}{X_{sh}^2} + 1 \right)}$$

$$\Rightarrow W_{shR} = W_R \cdot \lambda_1 \quad \text{siendo} \quad \lambda_1 = \frac{R_{sh}}{R_R} \cdot \frac{1}{\left( \frac{R_{sh}^2}{X_{sh}^2} + 1 \right)}$$

## 4) Entrecruzamientos de Pantallas (“crossbonding”)

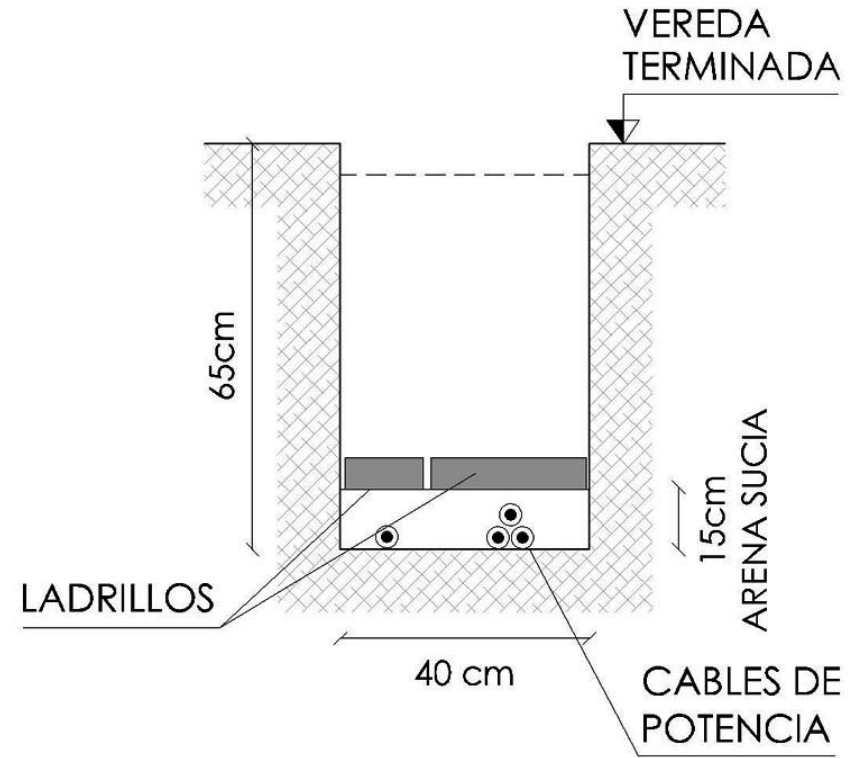


- Se puede demostrar que las corrientes en las pantallas se anulan
- Se utiliza asociado al tendido plano con fases separadas, de forma de maximizar la corriente admisible (minimizando pérdidas y acople térmico a la vez)
- Desventaja: implica cajas de empalme especiales
- Generalmente se usa en sistemas de cables unipolares de 60 kV o mas)

# **Cálculo de las corrientes admisibles en cables**

## Elementos que intervienen:

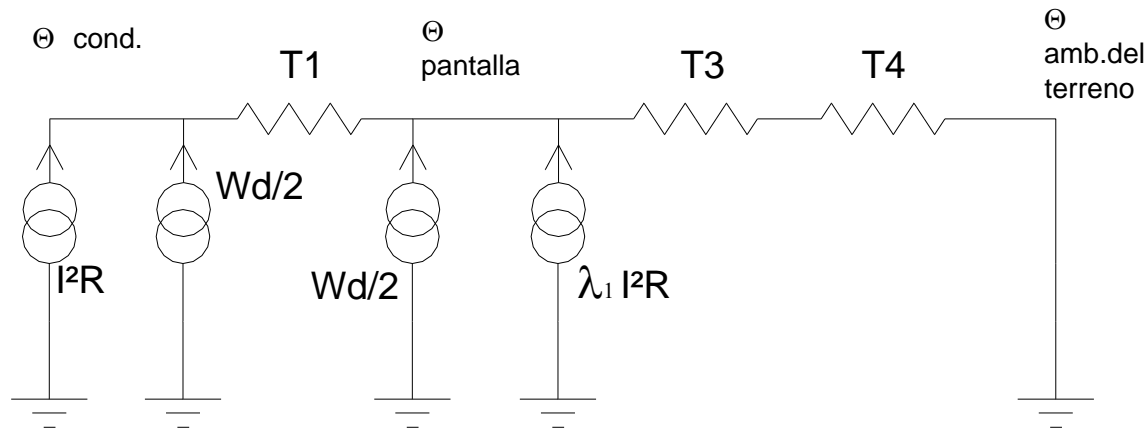
- Material y sección del conductor
- Dimension y tipo de aislante
- Sección de la pantalla
- Espesor y tipo de cubierta
- Tipo de conexión de las pantallas
- Profundidad de enterrado
- Separación de las fases (unipolares)
- Resistividad térmica del terreno circundante (cables directamente enterrados)
- Temperatura del medio ambiente
- Exposición a otra fuentes térmicas (radiación solar en cables instalados al aire)



Los fabricantes garantizan la corriente admisible a través de tablas según variación de estos parámetros (para régimen permanente de carga) Veremos el circuito térmico a partir del cual se estima la misma.



# Circuito térmico equivalente (IEC 60287) terna de cables directamente enterrados



Donde:

$\theta_{\text{cond}}$  = Temperatura del conductor [°C]

$\theta_{\text{pantalla}}$  = Temperatura en la pantalla metálica [°C]

$\theta_{\text{amb}}$  = Temperatura ambiente (terreno) [°C]

$T1$  = Resistencia térmica del aislante [°C.m/W]

$T3$  = Resistencia térmica de la cubierta [°C.m/W]

$T4$  = Resistencia térmica del terreno [°C.m/W] (\*)

$I^2R$  = Pérdidas Joule en el conductor [W/m]

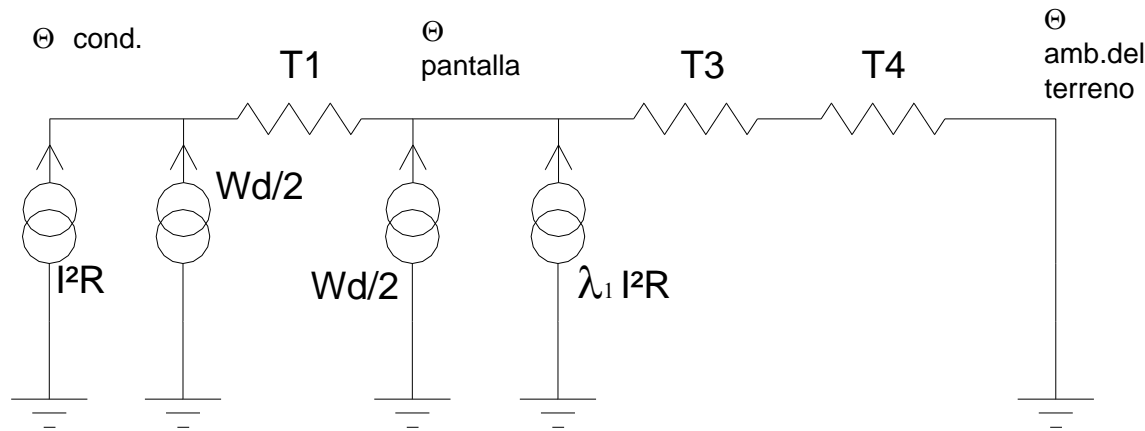
$Wd$  = Pérdidas en el dieléctrico [W/m]

$\lambda_1 I^2R$  = Pérdidas Joule en la pantalla [W/m] (\*\*)

(\*)- incluyendo en este parámetro el efecto térmico de las otras fases

(\*\*) – Para pantallas aterradas en un solo extremo  $\lambda_1 = 0$

# Circuito térmico equivalente (IEC 60287) terna de cables directamente enterrados



$$I^2 R + \frac{W_d}{2} = \frac{\theta_{cond} - \theta_{pantalla}}{T_1} \qquad \lambda_1 \cdot I^2 R + \frac{W_d}{2} + \frac{\theta_{cond} - \theta_{pantalla}}{T_1} = \frac{\theta_{pantalla} - \theta_{amb.}}{T_3 + T_4}$$

...operando en base a estos dos balances de potencia, se llega a despejar la corriente admisible (fórmula de IEC 60287)

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_{cond} - \theta_{amb.}) - W_d \cdot \left( \frac{T_1}{2} + T_3 + T_4 \right)}{R \cdot T_1 + R \cdot (\lambda_1 + 1) \cdot (T_3 + T_4)}}$$

# Regímenes transitorios

El cálculo para regimen permanente no contempla:

**1) Condiciones de emergencia: cable falla y las cargas deben ser transferidas a otros cables con el objetivo de continuar con el servicio**

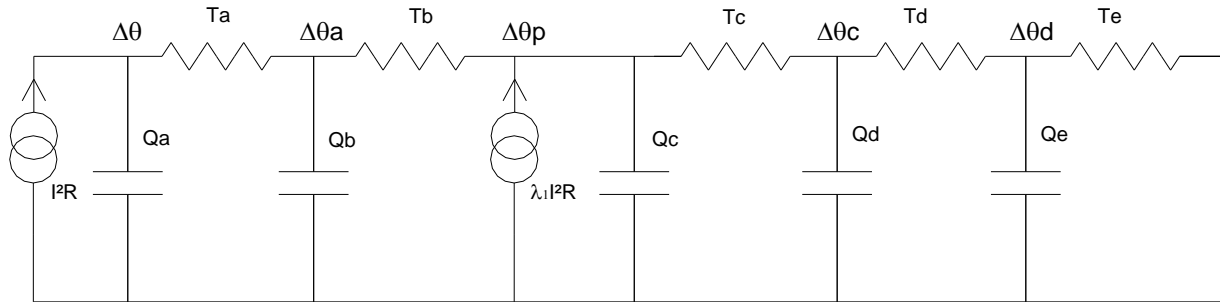
En este caso se estudia la respuesta térmica del sistema de cables a una entrada de tipo “escalón”

**2) Regímenes de carga cíclica, o sea el estado de funcionamiento normal del sistema.**

La forma de estudiar este fenómeno es reducir la variación temporal de la corriente a una secuencia de intervalos de tiempo en los que ésta permanece constante (escalones). El estudio se basa en la respuesta del sistema a una entrada de tipo “escalón” y luego se aplica superposición para obtener la evolución de las temperaturas del sistema.

**Para ver el comportamiento transitorio de las temperaturas es necesario modelar incorporando las “capacidades térmicas” del cable y el terreno circundante**

**...el modelo del cable (incluyendo la posibilidad que estuviera dentro de un ducto) sería el siguiente:**

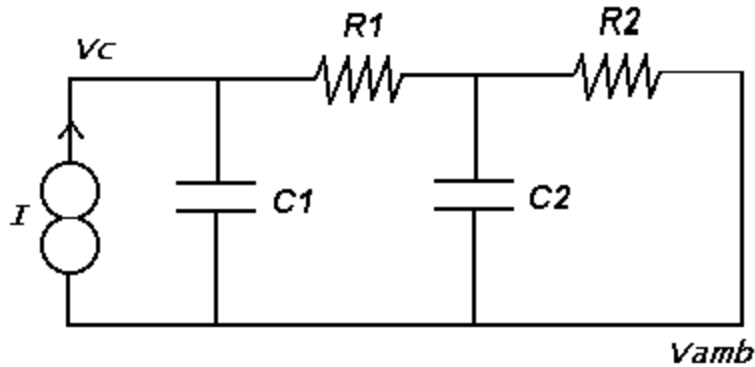


Donde:

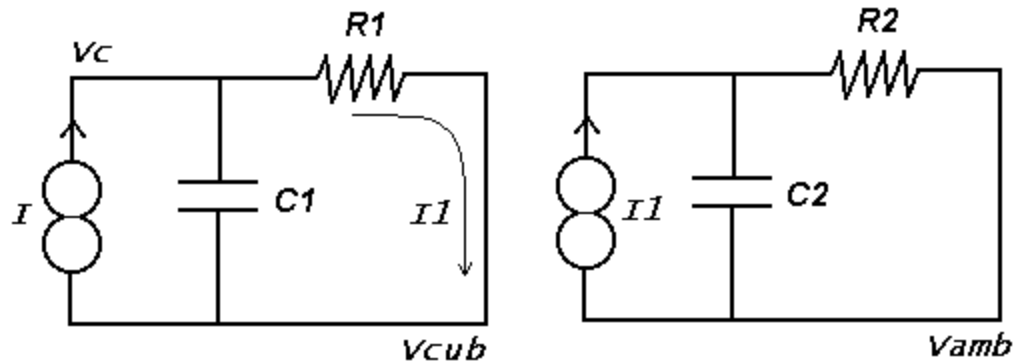
- $\Delta\theta$  - incremento de temperatura del conductor respecto de la temperatura de la cubierta (o ducto, si existe)
- $\Delta\theta_a$  - incremento de temperatura del punto “ $r_m$ ” del aislante, respecto de la temperatura de la cubierta (o ducto, si existe)
- $\Delta\theta_p$  - incremento de temperatura de la pantalla metálica respecto de la temperatura de la cubierta (o ducto, si existe)
- $\Delta\theta_c$  - incremento de temperatura de la superficie exterior de la cubierta respecto de la temperatura de la superficie exterior del ducto, si existe éste (si no existe ducto vale cero, porque la referencia sería entonces  $\theta_{cub}$ )
- $\Delta\theta_d$  - incremento de temperatura de la superficie interior del ducto respecto de la superficie exterior del mismo, si existe éste (si no existe ducto vale cero, porque la referencia sería entonces  $\theta_{cub}$ )

**Las resistencias térmicas  $T_a...T_e$  y las capacidades térmicas  $Q_a...Q_e$  representan en el modelo los distintos componentes del cable y eventualmente al ducto**

**El modelado del terreno** es complejo, y de hecho debería “acoplarse” luego del modelo del cable. En un modelo aun mas simple si  $R1$ ,  $C1$  representa el cable y  $R1$ ,  $C2$  el terreno circundante, el modelo sería:

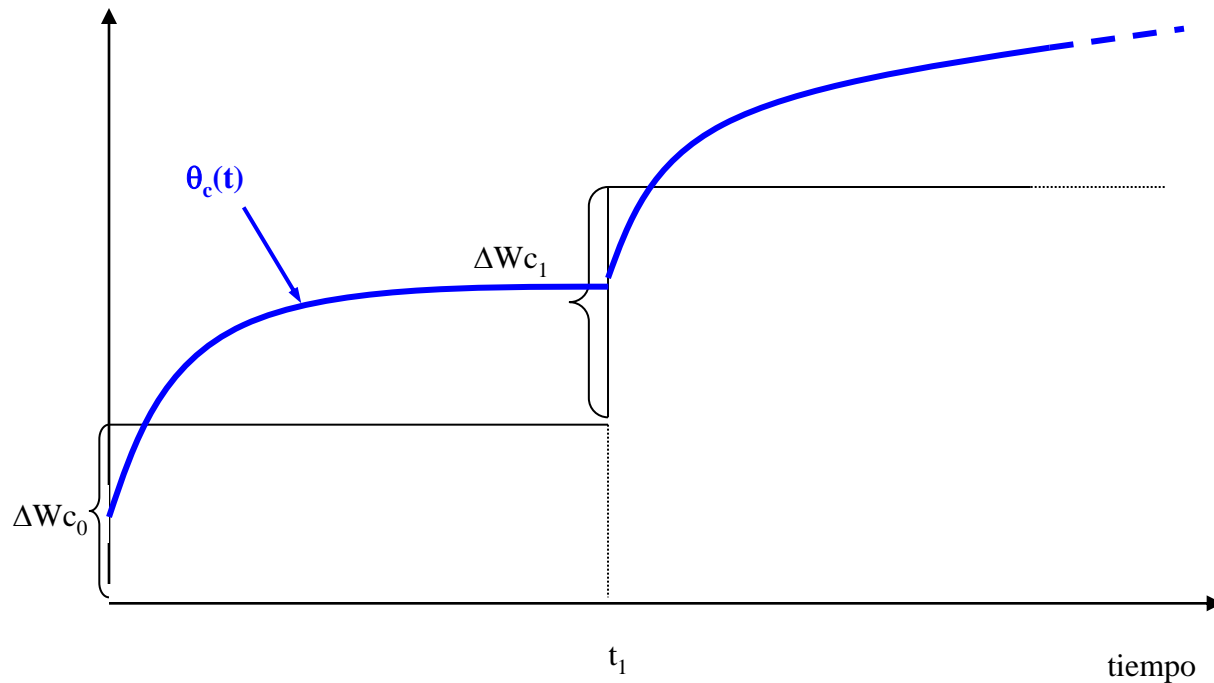


No obstante, la norma IEC60287 simplifica el modelo a uno equivalente, “desacoplando” el problema (esto es válido porque la inercia térmica del terreno circundante es mucho mayor que la del propio cable,  $C2 \gg C1$ )

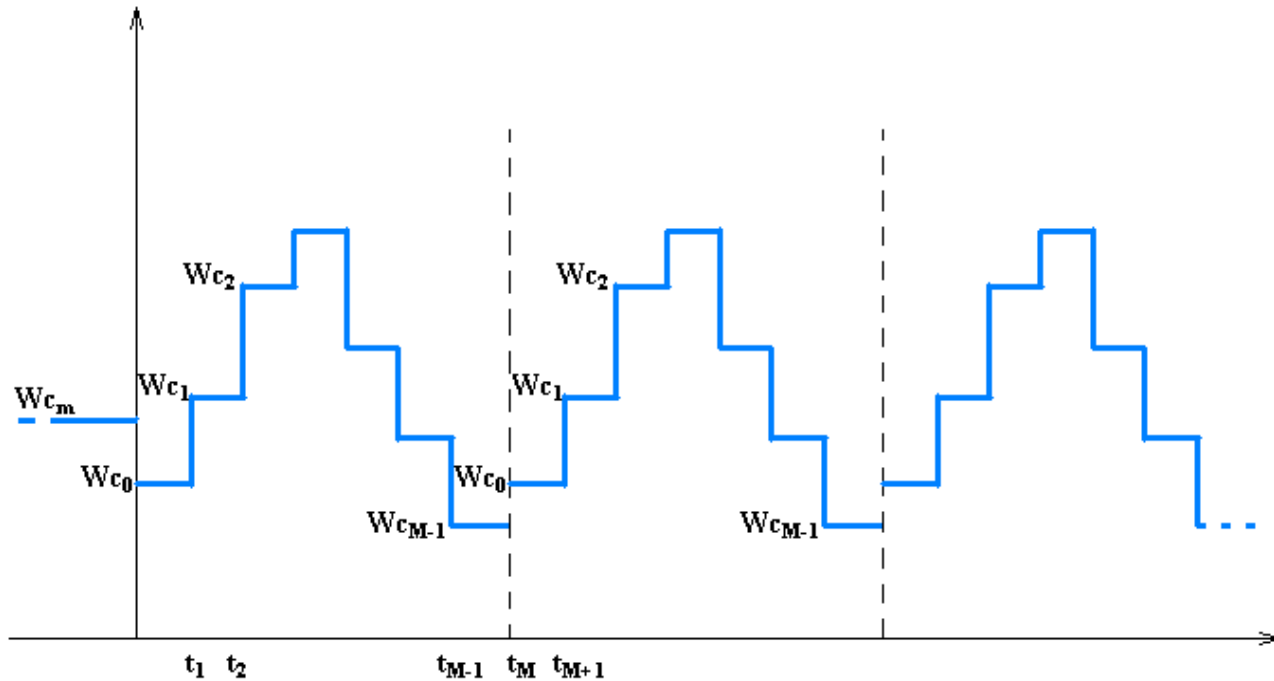


**Regimen de emergencia:** Dadas las pérdidas del cable ( $W_c$ ) podríamos usando el modelo calcular la evolución de la temperatura en el conductor.

**Debe verificarse que ésta nunca alcance la temperatura máxima admisible en el tiempo que dura el régimen de emergencia**



# Carga cíclica



- Partiendo de unas pérdidas promedio del ciclo (típicamente diario) se superpone el efecto de varios “escalones”
- Al cabo de unos pocos ciclos la evolución de la temperatura del conductor también se vuelve periódica
- Nuevamente el criterio es verificar que dicha temperatura nunca alcance la máxima admisible**