

# **CURSO EIE 803-01**

## **PROYECTO SUBESTACIONES ELÉCTRICAS Y LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

**Profesor : Carlos Rojas Agüero**



## **SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DEL CONDUCTOR DE FASE**

# Temario

---



- **Selección del material del conductor.**
- **Selección de la sección mínima del conductor.**
- **Cálculo de pérdidas corona.**



# SELECCIÓN DEL MATERIAL DEL CONDUCTOR

# Selección del material del conductor



Para la transmisión de la energía eléctrica se utilizan casi exclusivamente conductores metálicos desnudos, que se componen de hilos metálicos (alambres) alrededor de un hilo central.

Los metales más utilizados en la construcción de líneas aéreas deben poseer tres características principales:

- Presentar una baja resistencia eléctrica y por lo tanto bajas pérdidas Joule.
- Presentar una elevada resistencia mecánica, de forma de ofrecer una elevada resistencia a los esfuerzos permanentes o imprevistos.
- Costo limitado.

# Selección del material del conductor



Los metales que satisfacen estas condiciones son relativamente escasos, dentro de los cuales los más utilizados son los siguientes:

- Cobre.
- Aluminio.
- Aleación de aluminio.
- Combinaciones de metales (aluminio-acero).

Pese a la menor resistencia y superiores aptitudes mecánicas, el cobre ha dejado de ser utilizado en la construcción de líneas aéreas de alta tensión, en especial por su elevado costo.

# Selección del material del conductor

---



Hay cuatro tipos de conductores que se utilizan mayormente en líneas de transmisión:

- AAC (All Aluminum Conductor).
- AAAC (All Aluminum Alloy Conductor).
- ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced).
- ACAR (Aluminum Conductor Alloy Reinforced).

# Selección del material del conductor



Desde el punto de vista de resistencia mecánica, se utiliza el esfuerzo mínimo de rotura del conductor como parámetro de referencia para la selección, en donde los materiales de los conductores normalmente usados, presentan los siguientes esfuerzos a la rotura:

- AAAC 29.5 (kg/mm<sup>2</sup>)
- ACAR 22.5 (kg/mm<sup>2</sup>)
- ACSR 30.0 (kg/mm<sup>2</sup>)
- AAC 18,5 (kg/mm<sup>2</sup>)



# SELECCIÓN DE SECCIÓN MÍNIMA DEL CONDUCTOR



# Selección sección mínima del conductor



Una vez seleccionado el material del conductor a utilizar, se determina la sección mínima del conductor a utilizar, en base a los siguientes análisis:

- Capacidad de transmisión de corriente.
- Pérdidas por el efecto Joule.
- Pérdidas por el efecto Corona.
- Campos electromagnéticos.
- Interferencia de radio.
- Ruido audible.

# Selección sección mínima del conductor



La selección del tamaño óptimo y tipo de conductor para una línea de transmisión, consiste en encontrar qué conductor hace que el valor presente del costo total de la línea, a lo largo de su vida útil, sea el menor para un material determinado.

El conductor se selecciona con criterio técnico-económico que considera minimizar los costos de inversión y de operación (pérdidas eléctricas) de la línea de transmisión, sujeto al cumplimiento de las limitaciones técnicas para una sección transversal mínima de conductor a utilizar.

# Selección sección mínima del conductor



## Costos de Inversión

- Ingeniería y Estudio de Impacto Ambiental
- Gastos de Servidumbre
- Suministros de Materiales (conductor, aislación, estructuras y ferretería)
- Construcción y Montaje
- Administración e Inspección de la Construcción

## Costos de Operación

- Pérdidas de potencia por efecto Joule
- Pérdidas por energía por efecto Joule
- Pérdidas por efecto corona

# Selección sección mínima del conductor



## Función de Costo Total

La función de costo total se puede expresar como función de la sección del conductor:

$$C_T(S) = INV(S) + C_P(S)$$

$C_T(S)$  : Costo total de la línea en función de la sección (US\$/km)

$INV(S)$  : Inversión en función de la sección (US\$/km)

$C_P(S)$  : Pérdidas de transmisión en función de la sección (US\$/km)

$S$  : Sección del conductor en (mm<sup>2</sup>)

# Selección sección mínima del conductor



## Costos de Inversión

Los costos asociados a las inversiones se pueden escribir como:

$$INV(S) = C_C(S) + C_A(S) + C_E(S) + C_{CM}(S) + C_O(S)$$

$C_C(S)$  : Costo del conductor en función de su sección (US\$/km)

$C_A(S)$  : Costo de la aislación en función de la sección (US\$/km)

$C_E(S)$  : Costos de las estructuras en función de la sección (US\$/km)

$C_{CM}(S)$  : Costo de construcción y montaje en función de la sección (US\$/km)

$C_O(S)$  : Costo de ingeniería, estudio de impacto ambiental y administración de la obra (US\$/km)

# Selección sección mínima del conductor



## Costos de Pérdidas de Transmisión

Los costos asociados a las pérdidas de transmisión se pueden escribir como:

$$C_P(S) = C_{PE}(S) + C_{PP}(S) + C_{PC}(S)$$

$C_{PE}(S)$  : Costo de las pérdidas de energía actualizadas en función de la sección (US\$/km)

$C_{PP}(S)$  : Costo de las pérdidas de potencia actualizadas en función de la sección (US\$/km)

$C_{PC}(S)$  : Costo de las pérdidas por efecto corona actualizadas en función de la sección (US\$/km)

# Selección sección mínima del conductor

## Función Objetivo de Costos

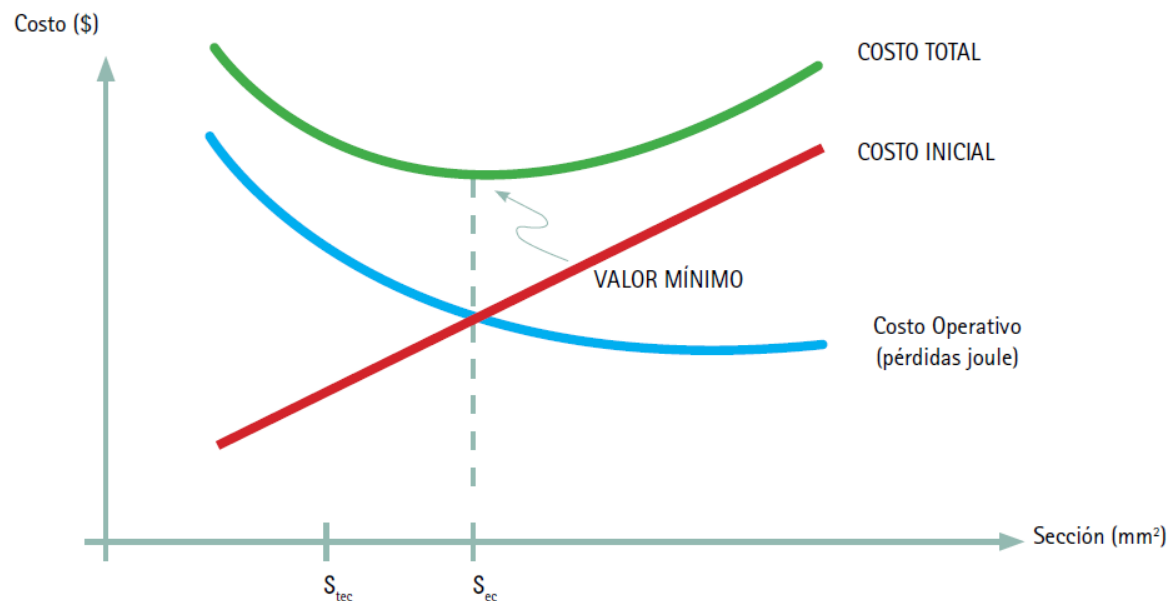
$$C_T(S) = INV(S) + C_P(S)$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial S} = 0$$



$S_{OPT}$

Sección Óptima



# Selección sección mínima del conductor



En la función objetivo de costos, se pueden tomar los siguientes supuestos y simplificaciones:

- El costo de los aisladores  $C_A(S)$  depende solamente del voltaje de la línea, por lo que puede ser expresado como una constante  $C_A$ .
- El costo de las estructuras  $C_E(S)$  tiene cierta dependencia con el tipo de conductor utilizado, sin embargo se puede considerar como una constante  $C_E$  para un rango de secciones.
- El costo de construcción y montaje  $C_{CM}(S)$  también puede ser considerado como una constante  $C_{CM}$  para cierto rango de secciones.
- El costo de los estudios, ingeniería y administración  $C_O(S)$  se pueden suponer independientes de la sección del conductor y se puede considerar como una constante  $C_O$ .



# Selección sección mínima del conductor



En la función objetivo de costos, se pueden tomar los siguientes supuestos y simplificaciones:

- En caso de que el gradiente disruptivo del aire (21 kV/cm fase-tierra) sea mayor al gradiente de voltaje del conductor, se puede asumir que los costos por pérdidas corona  $C_{PC}(S)$  son despreciables.

Con estas simplificaciones, la función objetivo será:

$$C_T(S) = C_C(S) + K_1 + C_{PE}(S) + C_{CPP}(S)$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial S} = 0 \quad \longrightarrow \quad S_{OPT} \quad \text{Sección Óptima}$$

# Selección sección mínima del conductor



La función de costo del conductor  $C_c(S)$  se puede expresar como:

$$C_c(S) = C_{cu} \cdot P_c(S) = C_{cu} \cdot \delta \cdot S \cdot 10^3$$

$C_c(S)$  : Costo del conductor en (US\$/km)

$C_{cu}$  : Costo unitario del conductor en (US\$/ton)

$P_c(S)$  : Peso del conductor en (kg/km)

$\delta$  : Densidad del material del conductor en (kg/cm<sup>3</sup>)

$S$  : Sección del conductor en (mm<sup>2</sup>)

# Selección sección mínima del conductor



El costo de las pérdidas de energía  $C_{PE}(S)$  en US\$/km actualizadas se pueden escribir como:

$$C_{PE}(S) = F_R \cdot R(S) \cdot I^2 \cdot 8760 \cdot F_P \cdot C_{kWH}$$

$$F_R = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \quad : \text{Factor de recuperación de capital}$$

$$R(S) = \frac{\rho}{S} \cdot 10^3 \quad : \text{Resistencia del conductor en } (\Omega \text{ mm}^2/\text{m})$$

$$\rho \quad : \text{Resistividad del material del conductor en } (\Omega \text{ mm}^2/\text{m})$$

$$S \quad : \text{Sección del conductor en } (\text{mm}^2)$$

$$I \quad : \text{Corriente por fase en (A)}$$

$$F_P = 0.3 \cdot F_C + 0.7 \cdot F_C^2 \quad : \text{Factor de pérdidas}$$

$$F_C \quad : \text{Factor de carga de la línea}$$

$$C_{kWH} \quad : \text{Costo de las pérdidas de energía en (US$/kWH-año)}$$

# Selección sección mínima del conductor



El costo de las pérdidas de potencia  $C_{PP}(S)$  en US\$/km actualizadas se pueden escribir como:

$$C_{PP}(S) = F_R \cdot R(S) \cdot I^2 \cdot C_{kW}$$

$$F_R = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \quad : \text{Factor de recuperación de capital}$$

$$R(S) = \frac{\rho}{S} \cdot 10^3 \quad : \text{Resistencia del conductor en } (\Omega \text{ mm}^2/\text{m})$$

$$\delta \quad : \text{Resistividad del material del conductor en } (\Omega \text{ mm}^2/\text{m})$$

$$S \quad : \text{Sección del conductor en } (\text{mm}^2)$$

$$I \quad : \text{Corriente por fase en (A)}$$

$$C_{kWH} \quad : \text{Costo de las pérdidas de potencia en (US$/kWH)}$$

# Selección sección mínima del conductor



Finalmente, se puede obtener una expresión para la sección óptima del conductor, dada por:

$$S_{OPT} = \sqrt{\frac{F_R \cdot I^2 \cdot 10^{-3} \cdot (C_{KW} + 8760 \cdot F_P \cdot C_{kWH})}{C_{CU} \cdot \delta}}$$

# Selección sección mínima del conductor



## EJEMPLO CÁLCULO CONDUCTOR DE FASE

Se requiere calcular la sección transversal del conductor de una línea de 220 kV simple circuito, cuyos datos son los siguientes:

- Potencia nominal máxima : 60 MW
- Factor de Potencia : 0,9 inductivo
- Factor de carga : 0,84
- Vida útil de la línea : 30 años
- Tasa de interés evaluación pérdidas : 10%
- Costo pérdidas de energía : 0,0175 US\$/kWH-año
- Costo pérdidas de potencia : 41 US\$/kW-año
- Costo unitario del conductor : 4000 US\$/Ton

Considere la utilización de conductores tipo AAC, AAAC, ACSR y ACAR.

# Selección sección mínima del conductor



## EJEMPLO CÁLCULO CONDUCTOR DE FASE

Considerando la expresión de la sección óptima y los parámetros de los materiales de cada uno de los conductores a evaluar, se tiene que:

Tipo de Material	Resistividad $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$	Densidad $\text{kg}/\text{cm}^3$	Sección Óptima $\text{mm}^2$
AAC	29,80	0,00276	348,73
AAAC	34,35	0,00276	374,41
ACSR	33,80	0,00348	330,76
ACAR	32,40	0,00276	363,63



# CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS CORONA



# Pérdidas Corona – Método Peek



## Método de Peek

Las pérdidas corona Peek, en kW/km/fase, queda expresada en la formula:

$$P_{Peek} = \frac{241}{\delta} * (f + 25) * \sqrt{\frac{r}{DMG}} * \left( \frac{v}{\sqrt{3}} - \frac{v_c}{\sqrt{3}} \right)^2 * n * 10^{-5}$$

$\delta$ : Densidad relativa del aire.

$f$ : Frecuencia del sistema, en Hz.

$r$ : Radio del subconductor, en cm.

DMG: Distancia media geométrica entre fases, en cm

$V$ : Voltaje efectivo fase a fase, en kV.

$V_c$ : Voltaje efectivo crítico disruptivo, en kV.

# Pérdidas Corona – Método Peek

El voltaje efectivo crítico disruptivo, está dado por:

$$V_c = \sqrt{3} \cdot m_t \cdot m_c \cdot E_p \cdot \delta \cdot \frac{r}{\beta} \cdot \ln \left( \frac{DMG}{r_{eq}} \right)$$

$m_c$ : Factor superficial del conductor

$m_t$ : Factor ambiental.

$m_c = 1$  para hilos de superficie lisa  
 $m_c = 0,93$  a  $0,98$  para hilos oxidados y rugosos  
 $m_c = 0,83$  a  $0,87$  para cables  
 $m_t = 1$  con buen tiempo  
 $m_t = 0,8$  con tiempo lluvioso

$E_p$ : Campo superficial en condiciones normales  $E_p = 21.21$  kVrms/cm.

$\beta$ : Factor de disposición de haces  $\beta = \frac{1 + (n - 1) \cdot \frac{r}{R}}{n}$

$R$ : Radio del círculo de los subconductores en cm, expuesto en la ecuación

$n$ : Números de subconductores por haz.

# Pérdidas Corona – Método Peek



$$\delta = \frac{0.3921 \cdot P}{273 + T} \quad \text{Densidad relativa del aire}$$

$$P = 10^{\log(760) - \frac{y}{18336}} \quad T = 25 - \frac{y}{200}$$

P: presión del aire, en mm Hg.

T: temperatura del aire, en °C.

y= altura

**Si  $V_C > V_{MAX}$   $\Rightarrow$  No hay efecto corona**

**Si  $V_C < V_{MAX}$   $\Rightarrow$  Sí hay efecto corona**

## EJEMPLO CÁLCULO PÉRDIDAS CORONA

Calcular las pérdidas por efecto corona en una línea 220 kV de 90 km de longitud, una altitud sobre el nivel del mar de 500 metros, con separación de fases 7,3 metros (configuración horizontal), el conductor es ACSR de sección 455,1 mm<sup>2</sup> y diámetro del cable 27,72 mm.

# Pérdidas Corona – Método Peek

Temperatura, °C	$\theta = \frac{4780 - h}{162}$	26,42
Densidad relativa del aire	$\delta = \frac{3,926h}{273 + \theta}$	0,936
Radio, cm		1,386
Distancia entre fases, cm		730
Presión barométrica, cm de Hg	$\log b = \log 76 - \frac{h}{18.336}$	71,37
Altura sobre el nivel del mar, m		500
Tensión Crítica para buen tiempo, kV	$U_c = \frac{29,8}{\sqrt{2}} \sqrt{3} \times 0,8 \times \delta \times r \times \ln\left(\frac{D}{r}\right)$	201,73
Tensión Crítica para mal tiempo, kV	$U_c = \frac{29,8}{\sqrt{2}} \sqrt{3} \times 0,8 \times 0,8 \times \delta \times r \times \ln\left(\frac{D}{r}\right)$	161,38
Tensión máxima de la línea, kV	$U_{\max} = 245$	245

Se presentarán pérdidas corona en buen y mal tiempo ya que las tensiones críticas son menores a la tensión máxima de la línea, por lo tanto se deben evaluar las pérdidas por km.

# Pérdidas Corona – Método Peek



Pérdidas corona en buen tiempo:

$$P = \frac{241}{0,936} (60 + 25) \sqrt{\frac{1,386}{730}} (141,6 - 116,6)^2 10^{-5} = 7,20 \text{ kW / km por fase}$$

Pérdidas corona en mal tiempo:

$$P = \frac{241}{0,936} (60 + 25) \sqrt{\frac{1,386}{730}} (141,6 - 93,28)^2 10^{-5} = 26,92 \text{ kW / km por fase}$$