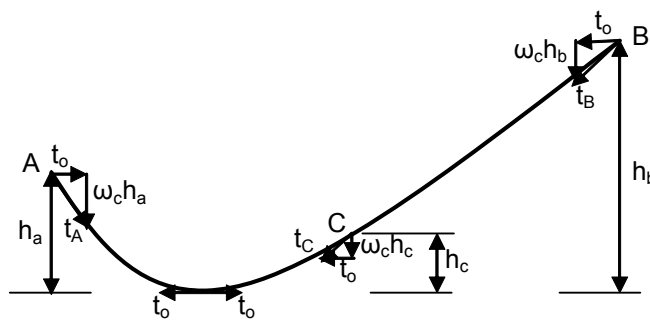


LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

CÁLCULO MECÁNICO DEL
CONDUCTOR y CABLE DE GUARDA
Ing. Carlos Huayllasco Montalva

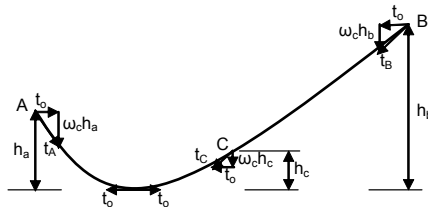
PROPIEDADES DE LA CATENARIA



$$T_B > T_A > T_C > T_0$$

PROPIEDADES DE LA CATENARIA

La componente horizontal del tiro del conductor (T_0) es igual para todos los puntos de la curva, y su valor es el de la tensión en el punto más bajo de la catenaria

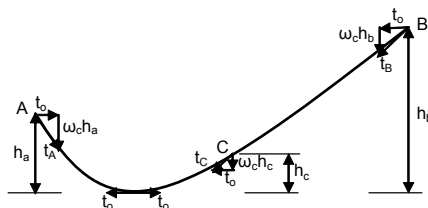


PROPIEDADES DE LA CATENARIA

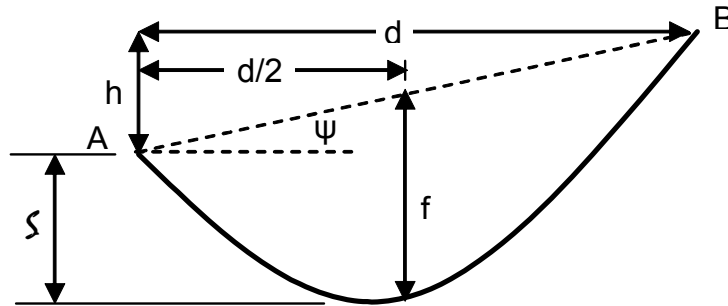
Para un conductor con un Tiro de Rotura de 2.000 kg y un Coeficiente de Seguridad de 2

El Tiro Máximo será = $2\ 000 / 2 = 1\ 000$ kg

El Tiro Máximo será en el punto B: $T_B < 1\ 000$ kg



FLECHA Y SAETA



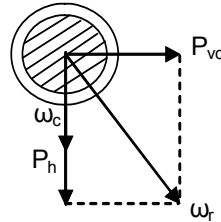
CÁLCULO DE LA FLECHA

$$f = \frac{Kx\omega_r xd^2}{8xt_o x \text{Cos}\psi} = \frac{Kx\omega_r xd^2}{8xt_o} \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2}$$

- K = Coeficiente de Schmidt y Rosental
 ω_r = peso unitario resultante
 d = vano
 t_o = tiro horizontal
 $\text{Cos}\psi$ = coseno del arcotangente entre desnivel y vano
 h = desnivel

$$K = 1 + \left[\frac{1}{48} \left(\frac{\omega_r xd}{T_o} \right)^2 \right]$$

CÁLCULO DEL PESO UNITARIO RESULTANTE



$$\omega_r = \sqrt{(\omega_c + P_h)^2 + P_{VC}^2}$$

ω_r = peso unitario resultante (kg/m)

ω_c = peso unitario del conductor (propio del conductor) (kg/m)

P_h = peso unitario de eventual costra de hielo (kg/m)

P_{VC} = presión unitaria de viento sobre los conductores (kg/m)

CÁLCULO DEL PESO DE EVENTUAL COSTRA DE HIELO

$$P_h = 0,0029(i^2 \times \varphi_c)$$

P_h = peso unitario de eventual costra de hielo (kg/m)

i = espesor de eventual costra de hielo (mm)

φ_c = diámetro del conductor

CÁLCULO DE LA PRESIÓN DEL VIENTO

Cargas debidas al viento

$$P_v = KxV^2 \times Sf \times A$$

P_v = Carga en Newton

K = 0,613 hasta 3 000 msnm, 0,455 para más de 3 000 msnm

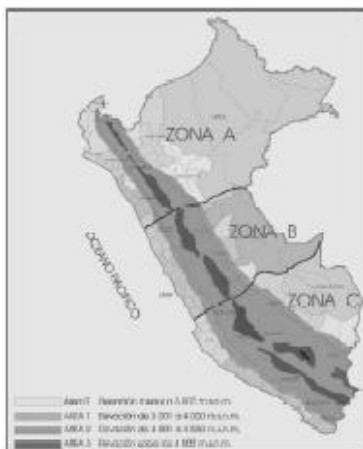
V = Velocidad del viento en m/s

Sf = Factor de forma

A = Área proyectada en m²

CÁLCULO DE LA PRESIÓN DEL VIENTO

Cargas debidas al viento



| Zona de Carga | A Ligera | B Regular | C Fuerte |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| Velocidad horizontal del viento | 19,5 m/s (70 km/h) | 22,2 m/s (80 km/h) | 25 m/s (90 km/h) |
| Temperatura | 20 °C | 15 °C | 10 °C |

CNE

CÁLCULO DE LA PRESIÓN DEL VIENTO

Viento, Hielo y Temperatura

| Zona de carga | Área 0 elevación menor de 3 000 m.s.n.m. | Área 1 elevación 3 000-4 000 m.s.n.m. | Área 2 elevación 4 001-4 500 m.s.n.m. | Área 3 elevación a partir de 4 500 m.s.n.m. |
|---|---|--|--|--|
| Caso de sólo viento | | | | |
| Velocidad horizontal del viento | 26 m/s (94 km/h) | 29 m/s (104 km/h) | 31,5 m/s (113 km/h) | 33,5 m/s (120 km/h) |
| Temperatura °C | 10 °C | 5 °C | 0 °C | -5 °C |
| Caso de sólo hielo | | | | |
| Grosor radial del hielo mm | No hay | 6 mm | 25 mm | 50 mm |
| Temperatura | 0 °C | 0 °C | -5 °C | -10 °C |
| Caso combinado de hielo y viento | | | | |
| Grosor radial del hielo | No hay | 3 mm | 12 mm | 25 mm |
| Velocidad horizontal del viento | 14 m/s (50 km/h) | 14,5 m/s (52 km/h) | 15,5 m/s (56 km/h) | 17 m/s (61 km/h) |
| Temperatura | 5 °C | 0 °C | -5 °C | -10 °C |

CNE

CÁLCULO DE LA PRESIÓN DEL VIENTO

Cuando se diseñan soportes relativamente altos de líneas, se debe corregir la velocidad del viento medida en las estaciones meteorológicas

$$v_h = v_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^{1/7}$$

v_h = velocidad del viento a la altura de los conductores

v_{10} = velocidad del viento a 10 m del suelo (dato meteorológico)

h = altura promedio de los soportes

CÁLCULO DE LA PRESIÓN DEL VIENTO SOBRE CONDUCTOR O CABLE DE GUARDA

La presión que el viento ejerce sobre el conductor o cable de guarda se obtiene de:

$$P_{vc} = P_v \times \phi_c$$

P_{vc} = Presión del viento
 ϕ_c = diámetro del conductor

HIPÓTESIS DE CÁLCULO DE CONDUCTORES y CABLE DE GUARDA

Hipótesis I.- Esfuerzos máximos

IA.-

- Temperatura mínima
- Presión de viento máxima
- Coeficiente de Seguridad (respecto al tiro máximo)

IB.-

- Temperatura mínima
- Costra de hielo máxima
- Coeficiente de Seguridad

HIPÓTESIS DE CÁLCULO DE CONDUCTORES y CABLE DE GUARDA

Hipótesis II.- Condiciones medias

- Temperatura promedio
- Presión de viento media
- Coeficiente de Seguridad alto (Tensión de Cada Día)

Hipótesis III.- Temperatura máxima

- Máxima flecha
- Temperatura máxima
- Presión de viento nula

HIPÓTESIS DE CÁLCULO DE CONDUCTORES y CABLE DE GUARDA

La información se obtiene de la estadística meteorológica.

En líneas largas se analiza de preferencia la línea dividida por zonas

Ej. Línea Lima-Chimbote, 220 kV, 450 km:

| | |
|----------------|---|
| Hipótesis I: | Temperatura 0°C Viento 90 km/h C.S. 2,5 |
| Hipótesis II: | Temperatura 20°C Viento 54 km/h |
| Hipótesis III: | Temperatura 60°C Viento nulo |

ECUACIÓN DE CAMBIO DE ESTADO

Variación Geométrica = Variación por Dilatación + Variación por Tensión

Denominamos con subíndices 1 a las condiciones iniciales y con subíndice 2 a las condiciones finales

$$L_2 - L_1 = \alpha d(t_2 - t_1) + d \frac{T_{02} - T_{01}}{SxE}$$

- L_2, L_1 = longitud final e inicial del conductor
 α = coeficiente de dilatación
 d = vano
 t_2, t_1 = temperatura final e inicial
 T_{02}, T_{01} = tensión final e inicial en el punto más bajo
 S = sección del conductor
 E = módulo de elasticidad

ECUACIÓN DE CAMBIO DE ESTADO

MODULOS DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTES DE DILATACION DE MATERIALES

| MATERIAL | HILOS | E (kg/mm ²) | | α (°C ⁻¹) |
|----------------|--------|-------------------------|--------|------------------------------|
| | | INICIAL | FINAL | |
| COBRE Y BRONCE | 1 | 10,200 | 11,930 | 0,0001492 |
| | 3 y 12 | 9,840 | 11,930 | 0,0001492 |
| | Otros | 10,200 | 11,930 | 0,0001492 |
| ALUMINIO | 1 | - | 7,020 | 0,0002304 |
| | 7 | 5,340 | 6,180 | 0,0002304 |
| | 19 | 5,060 | 6,080 | 0,0002304 |
| | 37 | 4,920 | 5,970 | 0,0002304 |
| ACERO | 1 | - | 19,470 | 0,0001152 |
| | 7 | - | 19,300 | 0,0001152 |
| ACSR | 18/1 | 5,270 | 6,750 | 0,0002124 |
| | 6/7 | 5,760 | 7,350 | 0,0001953 |
| | 8/7 | 7,030 | 8,790 | 0,0001764 |
| | 12/7 | 9,770 | 10,540 | 0,0001530 |
| | 20/7 | 6,180 | 7,710 | 0,0001899 |
| | 30/7 | 6,250 | 7,875 | 0,0001773 |
| | 54/7 | 5,100 | 6,820 | 0,0001935 |
| | 16/19 | 10,330 | 11,730 | 0,0001422 |
| | 18/19 | 11,590 | 11,800 | 0,0001350 |
| | 30/19 | 6,210 | 7,350 | 0,0001755 |
| ALDREY | 42/19 | 8,220 | 9,300 | 0,0001370 |
| | 54/19 | 4,890 | 6,300 | 0,0001926 |
| | 3/4 | 11,390 | 12,650 | 0,0001359 |
| ALDREY | 4/3 | 9,140 | 11,070 | 0,0001353 |
| | - | 4,800 | 6,000 | 0,0002300 |
| | 37 | 5,700 | 6,200 | 0,0002300 |

ECUACIÓN DE CAMBIO DE ESTADO

La longitud del cable desarrollada por series es:

$$L = d + \frac{d^3}{24} x \frac{\omega_r^2}{T_0^2}$$

Tomando en cuenta que:

$$\sigma_{01} = \frac{T_{01}}{S} \quad \text{y} \quad \sigma_{02} = \frac{T_{02}}{S}$$

ECUACIÓN DE CAMBIO DE ESTADO

Reemplazando, reagrupando y despejando términos se llega a:

$$\sigma_{02}^2 \left[\sigma_{02} + \alpha E(t_2 - t_1) + \frac{\omega_{r1}^2 d^2 E}{24S^2 \sigma_{01}^2} - \sigma_{01} \right] = \frac{\omega_{r2}^2 d^2 E}{24S^2}$$

Ecuación de Cambio de Estado para Vanos Cortos y Sin Desnivel

ECUACIÓN DE CAMBIO DE ESTADO

Vanos desnivelados de longitud promedio

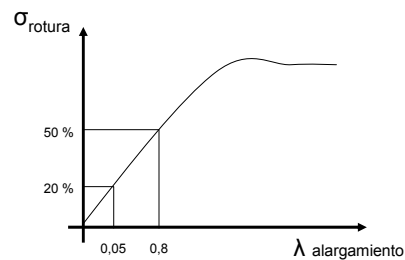
HOJA DE CÁLCULO

$$\sigma_{02}^2 \left[\sigma_{02} + \alpha E \cos \psi (t_2 - t_1) + \frac{\omega_{r1}^2 d^2 E \cos^3 \psi}{24 S^2 \sigma_{01}^2} - \sigma_{01} \right] = \frac{\omega_{r2}^2 d^2 E \cos^3 \psi}{24 S^2}$$

Ecuación de Cambio de Estado para Vanos de Longitud Promedio y Desnivel

ALARGAMIENTO POR ASENTAMIENTO

Los conductores trabajan para tensiones mecánicas en la zona de proporcionalidad



ALARGAMIENTO POR ASENTAMIENTO

Puede suceder que los conductores y cable de guarda tengan un proceso de pretensión, que consiste en darles un tiro mayor al tiro máximo al que estarán sometidos, en un 10 a 15%, por un tiempo mayor o igual a 12 horas

Cuando no se efectúa pretensión se puede efectuar un cálculo racional de los valores iniciales del tiro T_0 y la flecha, con base al alargamiento (λ)

ALARGAMIENTO POR ASENTAMIENTO

Por dilatación:

$$L_2 = L_1(1 + \alpha\Delta t)$$

$$L_2 = L_1 + L_1\alpha\Delta t$$

$$\frac{L_2 - L_1}{L_1} = \alpha\Delta t = \lambda$$

λ = alargamiento

ALARGAMIENTO POR ASENTAMIENTO

Si se conoce λ y α se puede obtener un Δt ficticio que considere el alargamiento

$$\Delta t = \frac{\lambda}{\alpha}$$

Este Δt se suma a la temperatura real en el cambio de estado, cuando se hace este cálculo se emplea el módulo de elasticidad inicial

MÓDULOS DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTES DE DILATACION DE MATERIALES

| MATERIAL | HILOS | E (kg/cm ²) | | α (*C ⁻¹) |
|----------------|---------|-------------------------|------------|------------------------------|
| | | INICIAL | FINAL | |
| COBRE Y BRONCE | 1 | 10,200 | 11,950 | 0.0001692 |
| | 3 y 12 | 9,880 | 11,950 | 0.0001692 |
| | Diferen | 10,500 | 11,950 | 0.0001692 |
| ALUMINIO | 1 | - | 7,020 | 0.00002504 |
| | 7 | 5,340 | 6,180 | 0.00002504 |
| | 19 | 5,040 | 6,090 | 0.00002504 |
| | 37 | 4,920 | 5,970 | 0.00002504 |
| 41 | 4,750 | 5,870 | 0.00002504 | |
| ACERO | 1 | - | 19,670 | 0.0001152 |
| | 7 | - | 19,300 | 0.0001152 |
| | 19 | - | 18,970 | 0.0001152 |
| | 37 | - | 18,270 | 0.0001152 |
| ACSR | 6/1 | 6,115 | 8,080 | 0.0001899 |
| | 8/1 | 6,080 | 8,820 | 0.0001715 |
| | 18/1 | 5,270 | 6,790 | 0.0000124 |
| | 6/7 | 5,740 | 7,350 | 0.00001925 |
| | 8/7 | 7,030 | 8,790 | 0.00001744 |
| | 12/7 | 9,770 | 10,540 | 0.00001530 |
| | 22/7 | 11,120 | 12,740 | 0.00001898 |
| | 30/7 | 6,250 | 7,875 | 0.00001773 |
| | 54/7 | 5,100 | 6,820 | 0.00001925 |
| | 18/19 | 10,250 | 11,750 | 0.00001822 |
| | 18/19 | 11,290 | 11,800 | 0.00001350 |
| | 30/19 | 6,210 | 7,350 | 0.00001725 |
| | 42/19 | 4,620 | 5,350 | 0.00001373 |
| | 54/19 | 4,950 | 6,500 | 0.00001926 |
| 3/4 | 11,290 | 12,650 | 0.00001359 | |
| 4/5 | 9,140 | 11,070 | 0.00001926 | |
| ALBREV | - | 4,800 | 6,000 | 0.00002300 |
| | 37 | 5,700 | 6,200 | 0.00002300 |

ALARGAMIENTO POR ASENTAMIENTO

Para el caso del ACSR el esfuerzo es para la sección total (Aluminio + Acero), Se obtiene el esfuerzo del aluminio mediante:

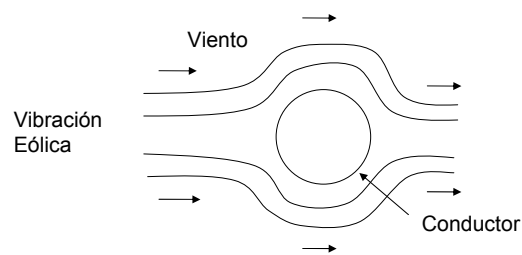
$$\sigma_A = \sigma_{total} \times \frac{E_A}{E_{total}}$$

Este valor debe estar dentro del límite que fija el coeficiente de seguridad

TENSIÓN DE CADA DÍA

Los conductores están sometidos a fenómenos vibratorios, cuyas probabilidades se incrementan cuanto mayor es la tensión mecánica

Para evitar o atenuar este fenómeno se recomienda límites para la tensión mecánica del conductor



TENSIÓN DE CADA DÍA

Tensión de Cada Día

“La tensión máxima admisible en un conductor durante el periodo de tiempo más largo del año sin que experimente vibración eólica”

Se expresa como porcentaje del Tiro de Rotura
Está relacionado con la “temperatura de cada día”
(temperatura media diaria promedio)

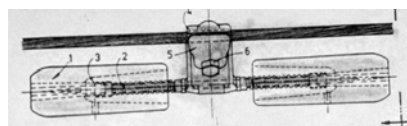
TCD en % del TIRO DE ROTURA

| Tipo de Conductor | Líneas sin protección | Líneas con Protección | | |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|
| | | Con Base de Varillas | Con Antivibradores | Con Base y Antivibradores |
| Cobre | 26 | | | |
| AAC | 17 | | | |
| AAAC | 18 | | 26 | |
| ACSR | 18 | 22 | 24 | 24 |
| Cable acero grapa rígida | 11 | | | |
| Cable acero grapa giratoria | 13 | | | |

PROTECCIÓN CONTRA LA VIBRACIÓN EÓLICA

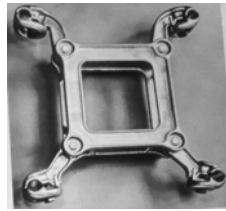


Varillas de Armar



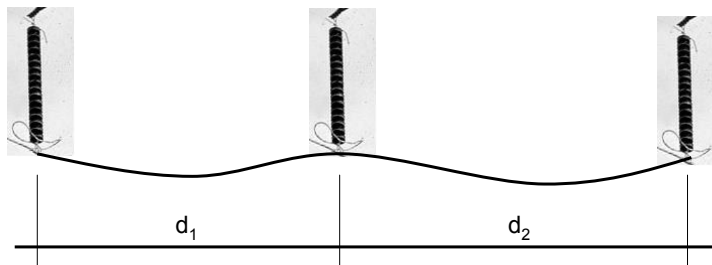
Stock Bridge

PROTECCIÓN CONTRA LA VIBRACIÓN EÓLICA



Las líneas con conductores múltiples o subconductores tienen menos vibraciones debido al efecto de amortiguación de los separadores

VANO BÁSICO O IDEAL DE REGULACIÓN



$$d_1 < d_2$$

VANO BÁSICO SI NO HAY DESNIVEL

$$VanoBásico = \sqrt{\frac{d_1^3 + d_2^3 + d_3^3 + \dots + d_n^3}{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}}$$

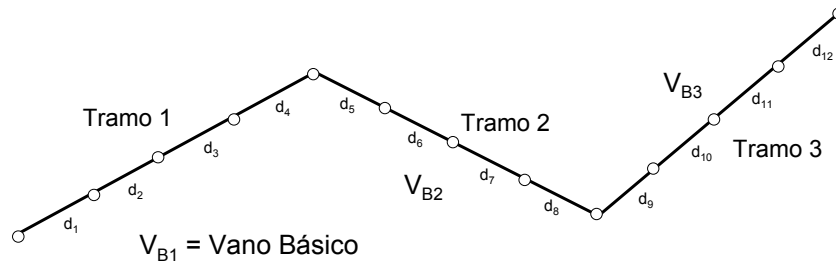
d1, d2, dn = longitud de vano que conforman cada tramo de línea

VANO BÁSICO SI HAY DESNIVEL

$$VanoBásico = \sqrt{\frac{d_1^3 / \cos \psi + d_2^3 / \cos \psi + \dots + d_n^3 / \cos \psi}{d_1 + d_2 + \dots + d_n}}$$

d1, d2, dn = longitud de vano que conforman cada tramo de línea

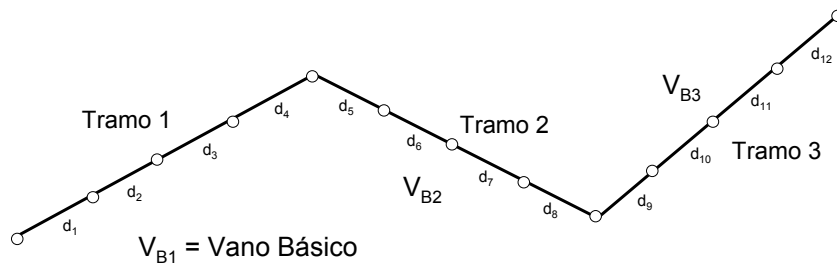
TABLA DE REGULACIÓN



Los vanos (d) no son necesariamente iguales, dependen en mucho de la topología del terreno

TABLA DE REGULACIÓN

Al momento de realizar el montaje se aplica el tiro horizontal (T_o) que corresponde al vano básico del tramo que se tiempla



Dado que la temperatura puede ser cualquiera, considerando esta temperatura y vanos comprendidos entre el menor y mayor posibles, se calculan las flechas y tiros

TABLA DE REGULACIÓN

Flechas para vanos diferentes al Básico y una determinada temperatura

$$f_1 = \frac{\omega_{r1} \cdot x d_1^2}{8 \cdot x T_o}$$

$$f_2 = \frac{\omega_{r2} \cdot x d_2^2}{8 \cdot x T_o}$$

Haciendo:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

$$f_2 = f_1 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2$$

TABLA DE REGULACIÓN

Hipótesis de Cálculo

- Hipótesis I (máximo esfuerzo)

$$t_1 \text{ (mín)} = 10^\circ\text{C}$$

$$P_{v1} = 30 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{C.S.} = 3$$

- Hipótesis II (templado)

$$t_2 \text{ (prom.)} = 20^\circ\text{C}$$

$$P_{v2} = 0$$

$$\text{T.C.D.} = 22\%$$

TABLA DE REGULACIÓN

Flecha en metros

| Temperatura (°C) | σ_0 (kg/mm ²) | Vano (m) | | | |
|---------------------|----------------------------------|----------|------|------|-------|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 |
| 10°C | 6,35 | 0,54 | 2,15 | 4,84 | 8,60 |
| 20°C | 5,69 | 0,60 | 2,41 | 5,41 | 9,62 |
| 30°C | 5,13 | 0,66 | 2,66 | 5,99 | 10,65 |