CÁLCULOS MECÁNICOS DE LA RED AÉREA DE MEDIA TENSIÓN 13,2 kV

José Alejandro Noy Estrada

Alison Daniela Núñez Martínez

Director

Rolando Andrés Rincón Saravia, MBA

Magíster en Dirección de Empresas

Codirector

Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga, PhD, MSc.

Doctor en Tecnología

Magíster en Informática Industrial y Automática

Universidad Industrial de Santander

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2026

CÁLCULOS MECÁNICOS POR RUTA

Desarrollo de ecuaciones, sustitución numérica y significado de variables

Parámetros comunes utilizados

Parámetro	Valor
Conductor de fase	ACSR Sparrow 2 AWG
Conductor de guarda	ACSR No. 2
Peso lineal del ACSR No. 2, w_p	1,3337 N/m
Diámetro del ACSR No. 2, Φ	0,00801 m
Carga mínima de rotura, RTS	12.650,58 N
Área metálica, A	39,25 mm^2
Rigidez axial, EA	$2,424939 \times 10^6$ N
Coeficiente de dilatación, α	23×10^{-6} °C^{-1}
Fluencia a 60 °C, ε_f	0,0005
Tensión total diaria de fase, T_1	2.530,116 N
Tensión horizontal diaria del cable de guarda, $H_{g,1}$	2.000 N
Carga resultante diaria, w_1	1,3364 N/m
Carga resultante a 100 km/h, w_{100}	4,0138 N/m
Carga resultante a 60 km/h, w_{19}	1,9069 N/m
Altura de amarre de fase, h_f	9,4 m
Altura del cable de guarda, h_g	11,5 m
Altura mínima de diseño	6,0 m

En los cálculos del cable de guarda se emplean las propiedades mecánicas del ACSR No. 2 indicadas en la tabla anterior. La tensión horizontal diaria del cable de guarda se mantiene en 2.000 N.

T01 - Punto de conexión - Derivación A

Longitud	4.035 m	**Configuración**	Trifásica
Número de vanos	34	**Poste**	PC-12-1350

1. Distancia entre postes

La distancia uniforme entre apoyos se obtiene con:

$$a = \frac{L}{N}$$

Donde: a es la distancia entre postes, L es la longitud total de la ruta y N es el número de vanos.

$$a = \frac{4\,035}{34} = 118{,}676 \text{ m}$$

2. Componente horizontal de la tensión diaria

La tensión total diaria de fase es $T_1 = 2.530,116$ N. La componente horizontal se obtiene de la ecuación exacta de la catenaria:

$$T_1 = H_1 \cosh\left(\frac{w_1 a}{2H_1}\right)$$

Donde: T_1 es la tensión total diaria, H_1 es la componente horizontal, w_1 es la carga lineal resultante diaria y a es el vano.

$$2\,530{,}116 = H_1 \cosh\left(\frac{1{,}3364(118{,}676)}{2H_1}\right)$$

$$\boxed{H_1 = 2\,528{,}873 \text{ N}}$$

3. Vano regulador

El vano regulador se calcula mediante:

$$a_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} a_i^3}{\sum_{i=1}^{n} a_i}}$$

Donde: a_r es el vano regulador, a_i es cada vano individual y n es el número de vanos de la sección mecánica. Como todos los vanos son iguales, $a_r = a$.

$$a_r = \sqrt{\frac{34(118{,}676)^3}{34(118{,}676)}} = 118{,}676 \text{ m}$$

4. Cambio de estado y tensiones

La longitud inicial exacta de la catenaria es:

$$L_1 = 2\frac{H_1}{w_1} \sinh\left(\frac{w_1 a_r}{2H_1}\right)$$

Donde: L_1 es la longitud inicial de la catenaria, H_1 es la tensión horizontal diaria, w_1 es la carga diaria y a_r es el vano regulador.

$$L_1 = 2\frac{2\,528{,}873}{1{,}3364} \sinh\left(\frac{1{,}3364(118{,}676)}{2(2\,528{,}873)}\right) = 118{,}695921 \text{ m}$$

Para cada estado final se aplica:

$$L_2 - L_1 = \alpha L_1(\theta_2 - \theta_1) + \frac{L_1}{EA}(T_2 - T_1) + \varepsilon_f L_1$$

$$L_2 = 2\frac{H_2}{w_2}\sinh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right), \qquad T_2 = H_2\cosh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right)$$

Donde: $\theta_1 = 25$ °C; θ_2 es la temperatura final; w_2 es la carga lineal del estado; H_2 y T_2 son las tensiones horizontal y total; EA es la rigidez axial; y $\varepsilon_f = 0,0005$ se aplica únicamente a 60 °C. **Estado a 60 °C, sin viento:**

$$2\frac{H_{60}}{1{,}3337}\sinh\left(\frac{1{,}3337(118{,}676)}{2H_{60}}\right) - 118{,}695921 = 0{,}00002300(118{,}695921)(60-25) + \frac{118{,}695921}{2\,424\,939}(T_{60} - 2\,530{,}116) + 0{,}0005$$

$$\boxed{H_{60} = 1\,091{,}23 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C, viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{100}}{4{,}0138}\sinh\left(\frac{4{,}0138(118{,}676)}{2H_{100}}\right) - 118{,}695921 = 0{,}00002300(118{,}695921)(21-25) + \frac{118{,}695921}{2\,424\,939}(T_{100} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{100} = 3\,875{,}21 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C, viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{19}}{1{,}9069}\sinh\left(\frac{1{,}9069(118{,}676)}{2H_{19}}\right) - 118{,}695921 = 0{,}00002300(118{,}695921)(19-25) + \frac{118{,}695921}{2\,424\,939}(T_{19} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{19} = 3\,029{,}16 \text{ N}}$$

Las tensiones totales se obtienen con:

$$T_i = H_i\cosh\left(\frac{w_i a_r}{2H_i}\right)$$

$$T_{60} = 1\,094{,}10 \text{ N}, \qquad T_{100} = 3\,882{,}53 \text{ N}, \qquad T_{19} = 3\,031{,}28 \text{ N}$$

$$T_{\text{máx}} = 3\,882{,}53 \text{ N}, \qquad U_{RTS} = \frac{3\,882{,}53}{12\,650{,}58}(100) = 30{,}691\,\%$$

5. Flecha a 60 °C y altura libre

La flecha exacta se obtiene mediante:

$$f_{60} = \frac{H_{60}}{w_p}\left[\cosh\left(\frac{w_p a}{2H_{60}}\right) - 1\right]$$

Donde: f_{60} es la flecha a 60 °C, H_{60} es la tensión horizontal de ese estado, w_p es el peso lineal y a es el vano.

$$f_{60} = \frac{1\,091{,}23}{1{,}3337}\left[\cosh\left(\frac{1{,}3337(118{,}676)}{2(1\,091{,}23)}\right) - 1\right] = 2{,}1526 \text{ m}$$

La aproximación parabólica se usa como comprobación:

$$f_p = \frac{w_p a^2}{8H_{60}}$$

$$f_p = \frac{1{,}3337(118{,}676)^2}{8(1\,091{,}23)} = 2{,}1517 \text{ m}$$

$$h_{libre} = h_{am} - f_{60} = 9{,}4 - 2{,}1526 = 7{,}2474 \text{ m}$$

6. Vano máximo por penduleo y por altura

La separación requerida por penduleo se determina con:

$$D_{req} = k\sqrt{f_{60} + \lambda} + \frac{U}{150}$$

Donde: D_{req} es la separación requerida, $k = 0,65$ es el coeficiente de oscilación, $\lambda = 0$ m corresponde a aisladores rígidos y $U = 13,2$ kV es la tensión nominal.

$$D_{req} = 0{,}65\sqrt{2{,}1526 + 0} + \frac{13{,}2}{150} = 1{,}042 \text{ m}$$

La flecha disponible es:

$$f_{\text{máx}} = h_{am} - h_{min} = 9,4 - 6,0 = 3,4 \text{ m}$$

El vano máximo por altura se obtiene con:

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8H_{60}f_{\text{máx}}}{w_p}}$$

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8(1\,091{,}23)(3{,}4)}{1{,}3337}} = 149{,}181 \text{ m}$$

7. Vano crítico

Para el ACSR No. 2 del proyecto se utiliza el vano crítico ya obtenido con las propiedades mecánicas del conductor:

$$a_c = 47,60 \text{ m}$$

Donde: a_c es el vano crítico que permite comparar las hipótesis susceptibles de producir la mayor tensión.

8. Vano peso y vano viento

Para apoyos interiores con vanos iguales y a la misma cota:

$$a_g = a_{g1} + a_{g2}, \qquad a_v = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

Donde: a_g es el vano peso; a_{g1} y a_{g2} son las distancias desde el apoyo hasta los puntos más bajos de los vanos vecinos; a_v es el vano viento y a_1, a_2 son los vanos adyacentes.

$$a_{g1} = a_{g2} = \frac{118{,}676}{2} = 59{,}338 \text{ m}$$

$$a_g = 118{,}676 \text{ m}, \qquad a_v = 118{,}676 \text{ m}$$

9. Fuerza de viento sobre los conductores de fase

La fuerza de viento sobre un conductor de fase es:

$$F_{vc,1} = C_f q K \Phi a_v$$

Donde: $C_f = 1,20$ es el coeficiente de forma, $q = 40,162$ kgf/m^2 es la presión de viento, $K = 1,00$ es el factor de corrección, $\Phi = 0,00801$ m es el diámetro y a_v es el vano viento.

$$F_{vc,1} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(118{,}676) = 45{,}814 \text{ kgf}$$

$$F_{vc,total} = 3(45{,}814) = 137{,}441 \text{ kgf}$$

10. Cable de guarda ACSR No. 2

El cable de guarda utilizado en todas las rutas es ACSR No. 2. Se emplean $\Phi_g = 0,00801$ m, $w_g = 1,3337$ N/m, $A_g = 39,25$ mm^2, $EA_g = 2,424939 \times 10^6$ N, $\alpha_g = 23 \times 10^{-6}$ °C^{-1} y RTS$_g$ = 12.650,58 N. La tensión horizontal diaria se mantiene en $H_{g,1} = 2.000$ N.

La carga resultante diaria del cable de guarda es:

$$w_{g,1} = \sqrt{w_g^2 + p_{v,E.D.S.}^2}$$

Donde: w_g es el peso lineal del ACSR No. 2 y $p_{v,E.D.S.} = 0,0852$ N/m es la carga lineal de viento en la condición diaria.

$$w_{g,1} = \sqrt{(1,3337)^2 + (0,0852)^2} = 1,3364 \text{ N/m}$$

La longitud y la tensión total inicial se calculan con:

$$L_{g,1} = 2\frac{H_{g,1}}{w_{g,1}} \sinh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right), \qquad T_{g,1} = H_{g,1} \cosh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right)$$

$$L_{g,1} = 2\frac{2\,000}{1,3364} \sinh\left(\frac{1,3364(118,676)}{2(2\,000)}\right) = 118,707568 \text{ m}$$

$$T_{g,1} = 2\,000 \cosh\left(\frac{1,3364(118,676)}{2(2\,000)}\right) = 2\,001,572 \text{ N}$$

El cambio de estado del cable de guarda se resuelve con la misma relación elástica del ACSR No. 2:

$$L_{g,2} - L_{g,1} = \alpha_g L_{g,1}(\theta_2 - 25) + \frac{L_{g,1}}{EA_g}(T_{g,2} - T_{g,1}) + \varepsilon_f L_{g,1}$$

El término de fluencia se incluye únicamente para el estado a 60 °C. **Estado a 60 °C:**

$$2\frac{H_{g,60}}{1,3337} \sinh\left(\frac{1,3337(118,676)}{2H_{g,60}}\right) - 118,707568 = 0,00002300(118,707568)(60-25) + \frac{118,707568}{2\,424\,939}(T_{g,60} - 2\,001,572) + 0,00$$

$$\boxed{H_{g,60} = 957,819 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C y viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{g,100}}{4,0138} \sinh\left(\frac{4,0138(118,676)}{2H_{g,100}}\right) - 118,707568 = 0,00002300(118,707568)(21-25) + \frac{118,707568}{2\,424\,939}(T_{g,100} - 2\,001,572)$$

$$\boxed{H_{g,100} = 3\,477,265 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C y viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{g,19}}{1,9069} \sinh\left(\frac{1,9069(118,676)}{2H_{g,19}}\right) - 118,707568 = 0,00002300(118,707568)(19-25) + \frac{118,707568}{2\,424\,939}(T_{g,19} - 2\,001,572)$$

$$\boxed{H_{g,19} = 2\,515,825 \text{ N}}$$

La flecha a 60 °C del cable de guarda se obtiene con:

$$f_{g,60} = \frac{H_{g,60}}{w_g}\left[\cosh\left(\frac{w_g a}{2H_{g,60}}\right) - 1\right]$$

$$f_{g,60} = \frac{957,819}{1,3337}\left[\cosh\left(\frac{1,3337(118,676)}{2(957,819)}\right) - 1\right] = 2,4528 \text{ m}$$

$$T_{g,60} = 961,09 \text{ N}, \quad T_{g,100} = 3\,485,43 \text{ N}, \quad T_{g,19} = 2\,518,37 \text{ N}$$

$$T_{g,\text{máx}} = 3\,485,43 \text{ N}, \qquad U_{RTS,g} = \frac{3\,485,43}{12\,650,58}(100) = 27,552\,\%$$

11. Momentos y utilización del poste

Como el cable de guarda es ACSR No. 2, su fuerza de viento se calcula con el diámetro $\Phi_g = 0,00801$ m:

$$F_{v,g} = C_f q K \Phi_g a_v$$

$$F_{v,g} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(118{,}676) = 45{,}814 \text{ kgf}$$

El momento transversal se calcula mediante:

$$M_t = 2\left(F_{v,f} h_f + F_{v,g} h_g\right) + M_p$$

Donde: $F_{v,f}$ es la fuerza total de viento sobre las fases, $h_f = 9,4$ m es la altura de las fases, $F_{v,g}$ es la fuerza sobre el cable de guarda, $h_g = 11,5$ m es la altura del cable y M_p es el momento propio del poste y accesorios.

$$M_t = 2\left[(137{,}441)(9{,}4) + (45{,}814)(11{,}5)\right] + 1\,231{,}98 = 4\,869{,}57 \text{ kgf m}$$

$$M_{terminal} = M_t = 4\,869{,}57 \text{ kgf m}$$

La utilización del poste es:

$$U_{poste} = \frac{M_{sol}}{M_{re}} \times 100$$

Donde: M_{sol} es el momento solicitado y M_{re} es el momento de trabajo del poste seleccionado.

$$U_{alineamiento} = \frac{4\,869{,}57}{5\,400}(100) = 90{,}18\,\%$$

$$U_{derivación} = U_{retención} = 90{,}18\,\%$$

$$U_{transformación} = \frac{4\,869{,}57}{5\,400}(100) = 90{,}18\,\%$$

12. Retenciones intermedias por longitud

La relación utilizada para distribuir las retenciones es:

$$r_{ret} = \frac{L}{1500}$$

Donde: r_{ret} relaciona la longitud de la ruta con una sección de tiro de 1.500 m. El número de retenciones intermedias se calcula como:

$$N_{ret} = \text{máx}\left(0, \lceil r_{ret} \rceil - 1\right)$$

$$r_{ret} = \frac{4\,035}{1500} = 2{,}690$$

$$N_{ret} = \text{máx}(0, \lceil 2{,}690 \rceil - 1) = 2$$

13. Cimentación

La estabilidad se expresa con:

$$C_s = \frac{M_e}{M_v} \geq 1,5, \qquad M_e = \frac{d h^3 C_h}{52,8} \tan(0,573^\circ)$$

Donde: C_s es el coeficiente de seguridad, M_e es el momento estabilizador, M_v es el momento de vuelco, d es el diámetro, $h = 1,80$ m es la profundidad y $C_h = 5,0 \times 10^6$ kg/m^3 es el coeficiente de compresibilidad. Despejando:

$$d = \frac{1,5 M_v (52,8)}{h^3 C_h \tan(0,573^\circ)}$$

$$d = \frac{1{,}5(4\,869{,}57)(52{,}8)}{(1{,}80)^3(5.000.000)\tan(0{,}573^\circ)} = 1{,}322 \text{ m}$$

T02 - Derivación A - Finca Orión

Longitud	172 m	**Configuración**	Bifásica
Número de vanos	2	**Poste**	PC-12-1050

1. Distancia entre postes

La distancia uniforme entre apoyos se obtiene con:

$$a = \frac{L}{N}$$

Donde: a es la distancia entre postes, L es la longitud total de la ruta y N es el número de vanos.

$$a = \frac{172}{2} = 86{,}000 \text{ m}$$

2. Componente horizontal de la tensión diaria

La tensión total diaria de fase es $T_1 = 2.530,116$ N. La componente horizontal se obtiene de la ecuación exacta de la catenaria:

$$T_1 = H_1 \cosh\left(\frac{w_1 a}{2H_1}\right)$$

Donde: T_1 es la tensión total diaria, H_1 es la componente horizontal, w_1 es la carga lineal resultante diaria y a es el vano.

$$2\,530{,}116 = H_1 \cosh\left(\frac{1{,}3364(86{,}000)}{2H_1}\right)$$

$$\boxed{H_1 = 2\,529{,}463 \text{ N}}$$

3. Vano regulador

El vano regulador se calcula mediante:

$$a_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} a_i^3}{\sum_{i=1}^{n} a_i}}$$

Donde: a_r es el vano regulador, a_i es cada vano individual y n es el número de vanos de la sección mecánica. Como todos los vanos son iguales, $a_r = a$.

$$a_r = \sqrt{\frac{2(86{,}000)^3}{2(86{,}000)}} = 86{,}000 \text{ m}$$

4. Cambio de estado y tensiones

La longitud inicial exacta de la catenaria es:

$$L_1 = 2\frac{H_1}{w_1} \sinh\left(\frac{w_1 a_r}{2H_1}\right)$$

Donde: L_1 es la longitud inicial de la catenaria, H_1 es la tensión horizontal diaria, w_1 es la carga diaria y a_r es el vano regulador.

$$L_1 = 2\frac{2\,529{,}463}{1{,}3364} \sinh\left(\frac{1{,}3364(86{,}000)}{2(2\,529{,}463)}\right) = 86{,}007398 \text{ m}$$

Para cada estado final se aplica:

$$L_2 - L_1 = \alpha L_1(\theta_2 - \theta_1) + \frac{L_1}{EA}(T_2 - T_1) + \varepsilon_f L_1$$

$$L_2 = 2\frac{H_2}{w_2}\sinh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right), \qquad T_2 = H_2\cosh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right)$$

Donde: $\theta_1 = 25$ °C; θ_2 es la temperatura final; w_2 es la carga lineal del estado; H_2 y T_2 son las tensiones horizontal y total; EA es la rigidez axial; y $\varepsilon_f = 0,0005$ se aplica únicamente a 60 °C. **Estado a 60 °C, sin viento:**

$$2\frac{H_{60}}{1{,}3337}\sinh\left(\frac{1{,}3337(86{,}000)}{2H_{60}}\right) - 86{,}007398 = 0{,}00002300(86{,}007398)(60-25) + \frac{86{,}007398}{2\,424\,939}(T_{60} - 2\,530{,}116) + 0{,}0005(86,$$

$$\boxed{H_{60} = 878{,}33 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C, viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{100}}{4{,}0138}\sinh\left(\frac{4{,}0138(86{,}000)}{2H_{100}}\right) - 86{,}007398 = 0{,}00002300(86{,}007398)(21-25) + \frac{86{,}007398}{2\,424\,939}(T_{100} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{100} = 3\,514{,}90 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C, viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{19}}{1{,}9069}\sinh\left(\frac{1{,}9069(86{,}000)}{2H_{19}}\right) - 86{,}007398 = 0{,}00002300(86{,}007398)(19-25) + \frac{86{,}007398}{2\,424\,939}(T_{19} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{19} = 2\,964{,}27 \text{ N}}$$

Las tensiones totales se obtienen con:

$$T_i = H_i\cosh\left(\frac{w_i a_r}{2H_i}\right)$$

$$T_{60} = 880{,}21 \text{ N}, \qquad T_{100} = 3\,519{,}14 \text{ N}, \qquad T_{19} = 2\,965{,}41 \text{ N}$$

$$T_{\text{máx}} = 3\,519{,}14 \text{ N}, \qquad U_{RTS} = \frac{3\,519{,}14}{12\,650{,}58}(100) = 27{,}818\,\%$$

5. Flecha a 60 °C y altura libre

La flecha exacta se obtiene mediante:

$$f_{60} = \frac{H_{60}}{w_p}\left[\cosh\left(\frac{w_p a}{2H_{60}}\right) - 1\right]$$

Donde: f_{60} es la flecha a 60 °C, H_{60} es la tensión horizontal de ese estado, w_p es el peso lineal y a es el vano.

$$f_{60} = \frac{878{,}33}{1{,}3337}\left[\cosh\left(\frac{1{,}3337(86{,}000)}{2(878{,}33)}\right) - 1\right] = 1{,}4043 \text{ m}$$

La aproximación parabólica se usa como comprobación:

$$f_p = \frac{w_p a^2}{8H_{60}}$$

$$f_p = \frac{1{,}3337(86{,}000)^2}{8(878{,}33)} = 1{,}4038 \text{ m}$$

$$h_{libre} = h_{am} - f_{60} = 9{,}4 - 1{,}4043 = 7{,}9957 \text{ m}$$

6. Vano máximo por penduleo y por altura

La separación requerida por penduleo se determina con:

$$D_{req} = k\sqrt{f_{60} + \lambda} + \frac{U}{150}$$

Donde: D_{req} es la separación requerida, $k = 0,65$ es el coeficiente de oscilación, $\lambda = 0$ m corresponde a aisladores rígidos y $U = 13,2$ kV es la tensión nominal.

$$D_{req} = 0{,}65\sqrt{1{,}4043 + 0} + \frac{13{,}2}{150} = 0{,}858 \text{ m}$$

La flecha disponible es:

$$f_{\text{máx}} = h_{am} - h_{min} = 9,4 - 6,0 = 3,4 \text{ m}$$

El vano máximo por altura se obtiene con:

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8H_{60}f_{\text{máx}}}{w_p}}$$

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8(878{,}33)(3{,}4)}{1{,}3337}} = 133{,}840 \text{ m}$$

7. Vano crítico

Para el ACSR No. 2 del proyecto se utiliza el vano crítico ya obtenido con las propiedades mecánicas del conductor:

$$a_c = 47,60 \text{ m}$$

Donde: a_c es el vano crítico que permite comparar las hipótesis susceptibles de producir la mayor tensión.

8. Vano peso y vano viento

Para apoyos interiores con vanos iguales y a la misma cota:

$$a_g = a_{g1} + a_{g2}, \qquad a_v = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

Donde: a_g es el vano peso; a_{g1} y a_{g2} son las distancias desde el apoyo hasta los puntos más bajos de los vanos vecinos; a_v es el vano viento y a_1, a_2 son los vanos adyacentes.

$$a_{g1} = a_{g2} = \frac{86{,}000}{2} = 43{,}000 \text{ m}$$

$$a_g = 86{,}000 \text{ m}, \qquad a_v = 86{,}000 \text{ m}$$

9. Fuerza de viento sobre los conductores de fase

La fuerza de viento sobre un conductor de fase es:

$$F_{vc,1} = C_f q K \Phi a_v$$

Donde: $C_f = 1,20$ es el coeficiente de forma, $q = 40,162$ kgf/m^2 es la presión de viento, $K = 1,00$ es el factor de corrección, $\Phi = 0,00801$ m es el diámetro y a_v es el vano viento.

$$F_{vc,1} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(86{,}000) = 33{,}199 \text{ kgf}$$

$$F_{vc,total} = 2(33{,}199) = 66{,}398 \text{ kgf}$$

10. Cable de guarda ACSR No. 2

El cable de guarda utilizado en todas las rutas es ACSR No. 2. Se emplean $\Phi_g = 0,00801$ m, $w_g = 1,3337$ N/m, $A_g = 39,25$ mm^2, $EA_g = 2,424939 \times 10^6$ N, $\alpha_g = 23 \times 10^{-6}$ °C^{-1} y $\text{RTS}_g = 12.650,58$ N. La tensión horizontal diaria se mantiene en $H_{g,1} = 2.000$ N.

La carga resultante diaria del cable de guarda es:

$$w_{g,1} = \sqrt{w_g^2 + p_{v,E.D.S.}^2}$$

Donde: w_g es el peso lineal del ACSR No. 2 y $p_{v,E.D.S.} = 0,0852$ N/m es la carga lineal de viento en la condición diaria.

$$w_{g,1} = \sqrt{(1,3337)^2 + (0,0852)^2} = 1,3364 \text{ N/m}$$

La longitud y la tensión total inicial se calculan con:

$$L_{g,1} = 2\frac{H_{g,1}}{w_{g,1}} \sinh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right), \qquad T_{g,1} = H_{g,1} \cosh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right)$$

$$L_{g,1} = 2\frac{2\,000}{1,3364} \sinh\left(\frac{1,3364(86,000)}{2(2\,000)}\right) = 86,011834 \text{ m}$$

$$T_{g,1} = 2\,000 \cosh\left(\frac{1,3364(86,000)}{2(2\,000)}\right) = 2\,000,826 \text{ N}$$

El cambio de estado del cable de guarda se resuelve con la misma relación elástica del ACSR No. 2:

$$L_{g,2} - L_{g,1} = \alpha_g L_{g,1}(\theta_2 - 25) + \frac{L_{g,1}}{EA_g}(T_{g,2} - T_{g,1}) + \varepsilon_f L_{g,1}$$

El término de fluencia se incluye únicamente para el estado a 60 °C. **Estado a 60 °C:**

$$2\frac{H_{g,60}}{1,3337} \sinh\left(\frac{1,3337(86,000)}{2H_{g,60}}\right) - 86,011834 = 0,00002300(86,011834)(60-25) + \frac{86,011834}{2\,424\,939}(T_{g,60} - 2\,000,826) + 0,0005(8$$

$$\boxed{H_{g,60} = 766,034 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C y viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{g,100}}{4,0138} \sinh\left(\frac{4,0138(86,000)}{2H_{g,100}}\right) - 86,011834 = 0,00002300(86,011834)(21-25) + \frac{86,011834}{2\,424\,939}(T_{g,100} - 2\,000,826)$$

$$\boxed{H_{g,100} = 3\,121,289 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C y viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{g,19}}{1,9069} \sinh\left(\frac{1,9069(86,000)}{2H_{g,19}}\right) - 86,011834 = 0,00002300(86,011834)(19-25) + \frac{86,011834}{2\,424\,939}(T_{g,19} - 2\,000,826)$$

$$\boxed{H_{g,19} = 2\,452,290 \text{ N}}$$

La flecha a 60 °C del cable de guarda se obtiene con:

$$f_{g,60} = \frac{H_{g,60}}{w_g}\left[\cosh\left(\frac{w_g a}{2H_{g,60}}\right) - 1\right]$$

$$f_{g,60} = \frac{766,034}{1,3337}\left[\cosh\left(\frac{1,3337(86,000)}{2(766,034)}\right) - 1\right] = 1,6103 \text{ m}$$

$$T_{g,60} = 768,18 \text{ N}, \quad T_{g,100} = 3\,126,06 \text{ N}, \quad T_{g,19} = 2\,453,66 \text{ N}$$

$$T_{g,\text{máx}} = 3\,126,06 \text{ N}, \qquad U_{RTS,g} = \frac{3\,126,06}{12\,650,58}(100) = 24,711\,\%$$

11. Momentos y utilización del poste

Como el cable de guarda es ACSR No. 2, su fuerza de viento se calcula con el diámetro $\Phi_g = 0,00801$ m:

$$F_{v,g} = C_f q K \Phi_g a_v$$

$$F_{v,g} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(86{,}000) = 33{,}199 \text{ kgf}$$

El momento transversal se calcula mediante:

$$M_t = 2\left(F_{v,f} h_f + F_{v,g} h_g\right) + M_p$$

Donde: $F_{v,f}$ es la fuerza total de viento sobre las fases, $h_f = 9,4$ m es la altura de las fases, $F_{v,g}$ es la fuerza sobre el cable de guarda, $h_g = 11,5$ m es la altura del cable y M_p es el momento propio del poste y accesorios.

$$M_t = 2\left[(66{,}398)(9{,}4) + (33{,}199)(11{,}5)\right] + 1\,230{,}92 = 3\,242{,}79 \text{ kgf m}$$

$$M_{transformación} = M_t + M_e = 3\,242{,}79 + 412 = 3\,654{,}79 \text{ kgf m}$$

Donde: $M_e = 412$ kgf $\cdot$ m es el momento adicional de los equipos de transformación. La utilización del poste es:

$$U_{poste} = \frac{M_{sol}}{M_{re}} \times 100$$

Donde: M_{sol} es el momento solicitado y M_{re} es el momento de trabajo del poste seleccionado.

$$U_{alineamiento} = \frac{3\,242{,}79}{4\,200}(100) = 77{,}21\,\%$$

$$U_{derivación} = U_{retención} = 77{,}21\,\%$$

$$U_{transformación} = \frac{3\,654{,}79}{4\,200}(100) = 87{,}02\,\%$$

12. Retenciones intermedias por longitud

La relación utilizada para distribuir las retenciones es:

$$r_{ret} = \frac{L}{1500}$$

Donde: r_{ret} relaciona la longitud de la ruta con una sección de tiro de 1.500 m. El número de retenciones intermedias se calcula como:

$$N_{ret} = \text{máx}\left(0, \lceil r_{ret} \rceil - 1\right)$$

$$r_{ret} = \frac{172}{1500} = 0{,}115$$

$$N_{ret} = \text{máx}(0, \lceil 0{,}115 \rceil - 1) = 0$$

13. Cimentación

La estabilidad se expresa con:

$$C_s = \frac{M_e}{M_v} \geq 1,5, \qquad M_e = \frac{dh^3 C_h}{52,8} \tan(0,573^\circ)$$

Donde: C_s es el coeficiente de seguridad, M_e es el momento estabilizador, M_v es el momento de vuelco, d es el diámetro, $h = 1,80$ m es la profundidad y $C_h = 5,0 \times 10^6$ kg/m^3 es el coeficiente de compresibilidad. Despejando:

$$d = \frac{1,5 M_v (52,8)}{h^3 C_h \tan(0,573^\circ)}$$

$$d = \frac{1{,}5(3\,654{,}79)(52{,}8)}{(1{,}80)^3(5.000.000)\tan(0{,}573^\circ)} = 0{,}993 \text{ m}$$

T03 - Derivación A - Derivación B

Longitud	2.117 m	**Configuración**	Trifásica
Número de vanos	18	**Poste**	PC-12-1350

1. Distancia entre postes

La distancia uniforme entre apoyos se obtiene con:

$$a = \frac{L}{N}$$

Donde: a es la distancia entre postes, L es la longitud total de la ruta y N es el número de vanos.

$$a = \frac{2\,117}{18} = 117{,}611 \text{ m}$$

2. Componente horizontal de la tensión diaria

La tensión total diaria de fase es $T_1 = 2.530,116$ N. La componente horizontal se obtiene de la ecuación exacta de la catenaria:

$$T_1 = H_1 \cosh\left(\frac{w_1 a}{2H_1}\right)$$

Donde: T_1 es la tensión total diaria, H_1 es la componente horizontal, w_1 es la carga lineal resultante diaria y a es el vano.

$$2\,530{,}116 = H_1 \cosh\left(\frac{1{,}3364(117{,}611)}{2H_1}\right)$$

$$\boxed{H_1 = 2\,528{,}895 \text{ N}}$$

3. Vano regulador

El vano regulador se calcula mediante:

$$a_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} a_i^3}{\sum_{i=1}^{n} a_i}}$$

Donde: a_r es el vano regulador, a_i es cada vano individual y n es el número de vanos de la sección mecánica. Como todos los vanos son iguales, $a_r = a$.

$$a_r = \sqrt{\frac{18(117{,}611)^3}{18(117{,}611)}} = 117{,}611 \text{ m}$$

4. Cambio de estado y tensiones

La longitud inicial exacta de la catenaria es:

$$L_1 = 2\frac{H_1}{w_1} \sinh\left(\frac{w_1 a_r}{2H_1}\right)$$

Donde: L_1 es la longitud inicial de la catenaria, H_1 es la tensión horizontal diaria, w_1 es la carga diaria y a_r es el vano regulador.

$$L_1 = 2\frac{2\,528{,}895}{1{,}3364} \sinh\left(\frac{1{,}3364(117{,}611)}{2(2\,528{,}895)}\right) = 117{,}630042 \text{ m}$$

Para cada estado final se aplica:

$$L_2 - L_1 = \alpha L_1(\theta_2 - \theta_1) + \frac{L_1}{EA}(T_2 - T_1) + \varepsilon_f L_1$$

$$L_2 = 2\frac{H_2}{w_2}\sinh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right), \qquad T_2 = H_2\cosh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right)$$

Donde: $\theta_1 = 25$ °C; θ_2 es la temperatura final; w_2 es la carga lineal del estado; H_2 y T_2 son las tensiones horizontal y total; EA es la rigidez axial; y $\varepsilon_f = 0,0005$ se aplica únicamente a 60 °C. **Estado a 60 °C, sin viento:**

$$2\frac{H_{60}}{1{,}3337}\sinh\left(\frac{1{,}3337(117{,}611)}{2H_{60}}\right) - 117{,}630042 = 0{,}00002300(117{,}630042)(60-25) + \frac{117{,}630042}{2\,424\,939}(T_{60} - 2\,530{,}116) + 0{,}0005$$

$$\boxed{H_{60} = 1\,084{,}89 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C, viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{100}}{4{,}0138}\sinh\left(\frac{4{,}0138(117{,}611)}{2H_{100}}\right) - 117{,}630042 = 0{,}00002300(117{,}630042)(21-25) + \frac{117{,}630042}{2\,424\,939}(T_{100} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{100} = 3\,863{,}92 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C, viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{19}}{1{,}9069}\sinh\left(\frac{1{,}9069(117{,}611)}{2H_{19}}\right) - 117{,}630042 = 0{,}00002300(117{,}630042)(19-25) + \frac{117{,}630042}{2\,424\,939}(T_{19} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{19} = 3\,027{,}02 \text{ N}}$$

Las tensiones totales se obtienen con:

$$T_i = H_i\cosh\left(\frac{w_i a_r}{2H_i}\right)$$

$$T_{60} = 1\,087{,}72 \text{ N}, \qquad T_{100} = 3\,871{,}13 \text{ N}, \qquad T_{19} = 3\,029{,}09 \text{ N}$$

$$T_{\text{máx}} = 3\,871{,}13 \text{ N}, \qquad U_{RTS} = \frac{3\,871{,}13}{12\,650{,}58}(100) = 30{,}600\,\%$$

5. Flecha a 60 °C y altura libre

La flecha exacta se obtiene mediante:

$$f_{60} = \frac{H_{60}}{w_p}\left[\cosh\left(\frac{w_p a}{2H_{60}}\right) - 1\right]$$

Donde: f_{60} es la flecha a 60 °C, H_{60} es la tensión horizontal de ese estado, w_p es el peso lineal y a es el vano.

$$f_{60} = \frac{1\,084{,}89}{1{,}3337}\left[\cosh\left(\frac{1{,}3337(117{,}611)}{2(1\,084{,}89)}\right) - 1\right] = 2{,}1265 \text{ m}$$

La aproximación parabólica se usa como comprobación:

$$f_p = \frac{w_p a^2}{8H_{60}}$$

$$f_p = \frac{1{,}3337(117{,}611)^2}{8(1\,084{,}89)} = 2{,}1256 \text{ m}$$

$$h_{libre} = h_{am} - f_{60} = 9{,}4 - 2{,}1265 = 7{,}2735 \text{ m}$$

6. Vano máximo por penduleo y por altura

La separación requerida por penduleo se determina con:

$$D_{req} = k\sqrt{f_{60} + \lambda} + \frac{U}{150}$$

Donde: D_{req} es la separación requerida, $k = 0,65$ es el coeficiente de oscilación, $\lambda = 0$ m corresponde a aisladores rígidos y $U = 13,2$ kV es la tensión nominal.

$$D_{req} = 0{,}65\sqrt{2{,}1265 + 0} + \frac{13{,}2}{150} = 1{,}036 \text{ m}$$

La flecha disponible es:

$$f_{\text{máx}} = h_{am} - h_{min} = 9,4 - 6,0 = 3,4 \text{ m}$$

El vano máximo por altura se obtiene con:

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8H_{60}f_{\text{máx}}}{w_p}}$$

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8(1\,084{,}89)(3{,}4)}{1{,}3337}} = 148{,}747 \text{ m}$$

7. Vano crítico

Para el ACSR No. 2 del proyecto se utiliza el vano crítico ya obtenido con las propiedades mecánicas del conductor:

$$a_c = 47,60 \text{ m}$$

Donde: a_c es el vano crítico que permite comparar las hipótesis susceptibles de producir la mayor tensión.

8. Vano peso y vano viento

Para apoyos interiores con vanos iguales y a la misma cota:

$$a_g = a_{g1} + a_{g2}, \qquad a_v = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

Donde: a_g es el vano peso; a_{g1} y a_{g2} son las distancias desde el apoyo hasta los puntos más bajos de los vanos vecinos; a_v es el vano viento y a_1, a_2 son los vanos adyacentes.

$$a_{g1} = a_{g2} = \frac{117{,}611}{2} = 58{,}806 \text{ m}$$

$$a_g = 117{,}611 \text{ m}, \qquad a_v = 117{,}611 \text{ m}$$

9. Fuerza de viento sobre los conductores de fase

La fuerza de viento sobre un conductor de fase es:

$$F_{vc,1} = C_f q K \Phi a_v$$

Donde: $C_f = 1,20$ es el coeficiente de forma, $q = 40,162$ kgf/m^2 es la presión de viento, $K = 1,00$ es el factor de corrección, $\Phi = 0,00801$ m es el diámetro y a_v es el vano viento.

$$F_{vc,1} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(117{,}611) = 45{,}402 \text{ kgf}$$

$$F_{vc,total} = 3(45{,}402) = 136{,}207 \text{ kgf}$$

10. Cable de guarda ACSR No. 2

El cable de guarda utilizado en todas las rutas es ACSR No. 2. Se emplean $\Phi_g = 0,00801$ m, $w_g = 1,3337$ N/m, $A_g = 39,25$ mm^2, $EA_g = 2,424939 \times 10^6$ N, $\alpha_g = 23 \times 10^{-6}$ °C^{-1} y RTS$_g$ = 12.650,58 N. La tensión horizontal diaria se mantiene en $H_{g,1} = 2.000$ N.

La carga resultante diaria del cable de guarda es:

$$w_{g,1} = \sqrt{w_g^2 + p_{v,E.D.S.}^2}$$

Donde: w_g es el peso lineal del ACSR No. 2 y $p_{v,E.D.S.} = 0,0852$ N/m es la carga lineal de viento en la condición diaria.

$$w_{g,1} = \sqrt{(1,3337)^2 + (0,0852)^2} = 1,3364 \text{ N/m}$$

La longitud y la tensión total inicial se calculan con:

$$L_{g,1} = 2\frac{H_{g,1}}{w_{g,1}} \sinh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right), \qquad T_{g,1} = H_{g,1} \cosh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right)$$

$$L_{g,1} = 2\frac{2\,000}{1,3364} \sinh\left(\frac{1,3364(117,611)}{2(2\,000)}\right) = 117,641379 \text{ m}$$

$$T_{g,1} = 2\,000 \cosh\left(\frac{1,3364(117,611)}{2(2\,000)}\right) = 2\,001,544 \text{ N}$$

El cambio de estado del cable de guarda se resuelve con la misma relación elástica del ACSR No. 2:

$$L_{g,2} - L_{g,1} = \alpha_g L_{g,1}(\theta_2 - 25) + \frac{L_{g,1}}{EA_g}(T_{g,2} - T_{g,1}) + \varepsilon_f L_{g,1}$$

El término de fluencia se incluye únicamente para el estado a 60 °C. **Estado a 60 °C:**

$$2\frac{H_{g,60}}{1,3337} \sinh\left(\frac{1,3337(117,611)}{2H_{g,60}}\right) - 117,641379 = 0,00002300(117,641379)(60-25) + \frac{117,641379}{2\,424\,939}(T_{g,60} - 2\,001,544) + 0,00$$

$$\boxed{H_{g,60} = 952,163 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C y viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{g,100}}{4,0138} \sinh\left(\frac{4,0138(117,611)}{2H_{g,100}}\right) - 117,641379 = 0,00002300(117,641379)(21-25) + \frac{117,641379}{2\,424\,939}(T_{g,100} - 2\,001,544)$$

$$\boxed{H_{g,100} = 3\,466,456 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C y viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{g,19}}{1,9069} \sinh\left(\frac{1,9069(117,611)}{2H_{g,19}}\right) - 117,641379 = 0,00002300(117,641379)(19-25) + \frac{117,641379}{2\,424\,939}(T_{g,19} - 2\,001,544)$$

$$\boxed{H_{g,19} = 2\,513,848 \text{ N}}$$

La flecha a 60 °C del cable de guarda se obtiene con:

$$f_{g,60} = \frac{H_{g,60}}{w_g}\left[\cosh\left(\frac{w_g a}{2H_{g,60}}\right) - 1\right]$$

$$f_{g,60} = \frac{952,163}{1,3337}\left[\cosh\left(\frac{1,3337(117,611)}{2(952,163)}\right) - 1\right] = 2,4233 \text{ m}$$

$$T_{g,60} = 955,39 \text{ N}, \quad T_{g,100} = 3\,474,50 \text{ N}, \quad T_{g,19} = 2\,516,35 \text{ N}$$

$$T_{g,\text{máx}} = 3\,474,50 \text{ N}, \qquad U_{RTS,g} = \frac{3\,474,50}{12\,650,58}(100) = 27,465\,\%$$

11. Momentos y utilización del poste

Como el cable de guarda es ACSR No. 2, su fuerza de viento se calcula con el diámetro $\Phi_g = 0,00801$ m:

$$F_{v,g} = C_f q K \Phi_g a_v$$

$$F_{v,g} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(117{,}611) = 45{,}402 \text{ kgf}$$

El momento transversal se calcula mediante:

$$M_t = 2\left(F_{v,f} h_f + F_{v,g} h_g\right) + M_p$$

Donde: $F_{v,f}$ es la fuerza total de viento sobre las fases, $h_f = 9,4$ m es la altura de las fases, $F_{v,g}$ es la fuerza sobre el cable de guarda, $h_g = 11,5$ m es la altura del cable y M_p es el momento propio del poste y accesorios.

$$M_t = 2\left[(136{,}207)(9{,}4) + (45{,}402)(11{,}5)\right] + 1\,231{,}98 = 4\,836{,}92 \text{ kgf m}$$

$$M_{terminal} = M_t = 4\,836{,}92 \text{ kgf m}$$

La utilización del poste es:

$$U_{poste} = \frac{M_{sol}}{M_{re}} \times 100$$

Donde: M_{sol} es el momento solicitado y M_{re} es el momento de trabajo del poste seleccionado.

$$U_{alineamiento} = \frac{4\,836{,}92}{5\,400}(100) = 89{,}57\,\%$$

$$U_{derivación} = U_{retención} = 89{,}57\,\%$$

$$U_{transformación} = \frac{4\,836{,}92}{5\,400}(100) = 89{,}57\,\%$$

12. Retenciones intermedias por longitud

La relación utilizada para distribuir las retenciones es:

$$r_{ret} = \frac{L}{1500}$$

Donde: r_{ret} relaciona la longitud de la ruta con una sección de tiro de 1.500 m. El número de retenciones intermedias se calcula como:

$$N_{ret} = \text{máx}\left(0, \lceil r_{ret} \rceil - 1\right)$$

$$r_{ret} = \frac{2\,117}{1500} = 1{,}411$$

$$N_{ret} = \text{máx}(0, \lceil 1{,}411 \rceil - 1) = 1$$

13. Cimentación

La estabilidad se expresa con:

$$C_s = \frac{M_e}{M_v} \geq 1,5, \qquad M_e = \frac{d h^3 C_h}{52,8} \tan(0,573^\circ)$$

Donde: C_s es el coeficiente de seguridad, M_e es el momento estabilizador, M_v es el momento de vuelco, d es el diámetro, $h = 1,80$ m es la profundidad y $C_h = 5,0 \times 10^6$ kg/m^3 es el coeficiente de compresibilidad. Despejando:

$$d = \frac{1,5 M_v (52,8)}{h^3 C_h \tan(0,573^\circ)}$$

$$d = \frac{1{,}5(4\,836{,}92)(52{,}8)}{(1{,}80)^3(5.000.000)\tan(0{,}573^\circ)} = 1{,}314 \text{ m}$$

T04 - Derivación B - Finca Ponderosa

Longitud	212 m	**Configuración**	Bifásica
Número de vanos	2	**Poste**	PC-12-1050

1. Distancia entre postes

La distancia uniforme entre apoyos se obtiene con:

$$a = \frac{L}{N}$$

Donde: a es la distancia entre postes, L es la longitud total de la ruta y N es el número de vanos.

$$a = \frac{212}{2} = 106{,}000 \text{ m}$$

2. Componente horizontal de la tensión diaria

La tensión total diaria de fase es $T_1 = 2.530,116$ N. La componente horizontal se obtiene de la ecuación exacta de la catenaria:

$$T_1 = H_1 \cosh\left(\frac{w_1 a}{2H_1}\right)$$

Donde: T_1 es la tensión total diaria, H_1 es la componente horizontal, w_1 es la carga lineal resultante diaria y a es el vano.

$$2\,530{,}116 = H_1 \cosh\left(\frac{1{,}3364(106{,}000)}{2H_1}\right)$$

$$\boxed{H_1 = 2\,529{,}124 \text{ N}}$$

3. Vano regulador

El vano regulador se calcula mediante:

$$a_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} a_i^3}{\sum_{i=1}^{n} a_i}}$$

Donde: a_r es el vano regulador, a_i es cada vano individual y n es el número de vanos de la sección mecánica. Como todos los vanos son iguales, $a_r = a$.

$$a_r = \sqrt{\frac{2(106{,}000)^3}{2(106{,}000)}} = 106{,}000 \text{ m}$$

4. Cambio de estado y tensiones

La longitud inicial exacta de la catenaria es:

$$L_1 = 2\frac{H_1}{w_1} \sinh\left(\frac{w_1 a_r}{2H_1}\right)$$

Donde: L_1 es la longitud inicial de la catenaria, H_1 es la tensión horizontal diaria, w_1 es la carga diaria y a_r es el vano regulador.

$$L_1 = 2\frac{2\,529{,}124}{1{,}3364} \sinh\left(\frac{1{,}3364(106{,}000)}{2(2\,529{,}124)}\right) = 106{,}013857 \text{ m}$$

Para cada estado final se aplica:

$$L_2 - L_1 = \alpha L_1(\theta_2 - \theta_1) + \frac{L_1}{EA}(T_2 - T_1) + \varepsilon_f L_1$$

$$L_2 = 2\frac{H_2}{w_2}\sinh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right), \qquad T_2 = H_2\cosh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right)$$

Donde: $\theta_1 = 25$ °C; θ_2 es la temperatura final; w_2 es la carga lineal del estado; H_2 y T_2 son las tensiones horizontal y total; EA es la rigidez axial; y $\varepsilon_f = 0,0005$ se aplica únicamente a 60 °C. **Estado a 60 °C, sin viento:**

$$2\frac{H_{60}}{1{,}3337}\sinh\left(\frac{1{,}3337(106{,}000)}{2H_{60}}\right) - 106{,}013857 = 0{,}00002300(106{,}013857)(60-25) + \frac{106{,}013857}{2\,424\,939}(T_{60} - 2\,530{,}116) + 0{,}0005$$

$$\boxed{H_{60} = 1\,013{,}26 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C, viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{100}}{4{,}0138}\sinh\left(\frac{4{,}0138(106{,}000)}{2H_{100}}\right) - 106{,}013857 = 0{,}00002300(106{,}013857)(21-25) + \frac{106{,}013857}{2\,424\,939}(T_{100} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{100} = 3\,738{,}72 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C, viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{19}}{1{,}9069}\sinh\left(\frac{1{,}9069(106{,}000)}{2H_{19}}\right) - 106{,}013857 = 0{,}00002300(106{,}013857)(19-25) + \frac{106{,}013857}{2\,424\,939}(T_{19} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{19} = 3\,003{,}64 \text{ N}}$$

Las tensiones totales se obtienen con:

$$T_i = H_i\cosh\left(\frac{w_i a_r}{2H_i}\right)$$

$$T_{60} = 1\,015{,}72 \text{ N}, \qquad T_{100} = 3\,744{,}78 \text{ N}, \qquad T_{19} = 3\,005{,}34 \text{ N}$$

$$T_{\text{máx}} = 3\,744{,}78 \text{ N}, \qquad U_{RTS} = \frac{3\,744{,}78}{12\,650{,}58}(100) = 29{,}602\,\%$$

5. Flecha a 60 °C y altura libre

La flecha exacta se obtiene mediante:

$$f_{60} = \frac{H_{60}}{w_p}\left[\cosh\left(\frac{w_p a}{2H_{60}}\right) - 1\right]$$

Donde: f_{60} es la flecha a 60 °C, H_{60} es la tensión horizontal de ese estado, w_p es el peso lineal y a es el vano.

$$f_{60} = \frac{1\,013{,}26}{1{,}3337}\left[\cosh\left(\frac{1{,}3337(106{,}000)}{2(1\,013{,}26)}\right) - 1\right] = 1{,}8494 \text{ m}$$

La aproximación parabólica se usa como comprobación:

$$f_p = \frac{w_p a^2}{8H_{60}}$$

$$f_p = \frac{1{,}3337(106{,}000)^2}{8(1\,013{,}26)} = 1{,}8487 \text{ m}$$

$$h_{libre} = h_{am} - f_{60} = 9{,}4 - 1{,}8494 = 7{,}5506 \text{ m}$$

6. Vano máximo por penduleo y por altura

La separación requerida por penduleo se determina con:

$$D_{req} = k\sqrt{f_{60} + \lambda} + \frac{U}{150}$$

Donde: D_{req} es la separación requerida, $k = 0,65$ es el coeficiente de oscilación, $\lambda = 0$ m corresponde a aisladores rígidos y $U = 13,2$ kV es la tensión nominal.

$$D_{req} = 0{,}65\sqrt{1{,}8494 + 0} + \frac{13{,}2}{150} = 0{,}972 \text{ m}$$

La flecha disponible es:

$$f_{\text{máx}} = h_{am} - h_{min} = 9,4 - 6,0 = 3,4 \text{ m}$$

El vano máximo por altura se obtiene con:

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8H_{60}f_{\text{máx}}}{w_p}}$$

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8(1\,013{,}26)(3{,}4)}{1{,}3337}} = 143{,}752 \text{ m}$$

7. Vano crítico

Para el ACSR No. 2 del proyecto se utiliza el vano crítico ya obtenido con las propiedades mecánicas del conductor:

$$a_c = 47,60 \text{ m}$$

Donde: a_c es el vano crítico que permite comparar las hipótesis susceptibles de producir la mayor tensión.

8. Vano peso y vano viento

Para apoyos interiores con vanos iguales y a la misma cota:

$$a_g = a_{g1} + a_{g2}, \qquad a_v = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

Donde: a_g es el vano peso; a_{g1} y a_{g2} son las distancias desde el apoyo hasta los puntos más bajos de los vanos vecinos; a_v es el vano viento y a_1, a_2 son los vanos adyacentes.

$$a_{g1} = a_{g2} = \frac{106{,}000}{2} = 53{,}000 \text{ m}$$

$$a_g = 106{,}000 \text{ m}, \qquad a_v = 106{,}000 \text{ m}$$

9. Fuerza de viento sobre los conductores de fase

La fuerza de viento sobre un conductor de fase es:

$$F_{vc,1} = C_f q K \Phi a_v$$

Donde: $C_f = 1,20$ es el coeficiente de forma, $q = 40,162$ kgf/m^2 es la presión de viento, $K = 1,00$ es el factor de corrección, $\Phi = 0,00801$ m es el diámetro y a_v es el vano viento.

$$F_{vc,1} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(106{,}000) = 40{,}920 \text{ kgf}$$

$$F_{vc,total} = 2(40{,}920) = 81{,}840 \text{ kgf}$$

10. Cable de guarda ACSR No. 2

El cable de guarda utilizado en todas las rutas es ACSR No. 2. Se emplean $\Phi_g = 0,00801$ m, $w_g = 1,3337$ N/m, $A_g = 39,25$ mm^2, $EA_g = 2,424939 \times 10^6$ N, $\alpha_g = 23 \times 10^{-6}$ °C^{-1} y RTS$_g$ = 12.650,58 N. La tensión horizontal diaria se mantiene en $H_{g,1} = 2.000$ N.

La carga resultante diaria del cable de guarda es:

$$w_{g,1} = \sqrt{w_g^2 + p_{v,E.D.S.}^2}$$

Donde: w_g es el peso lineal del ACSR No. 2 y $p_{v,E.D.S.} = 0,0852$ N/m es la carga lineal de viento en la condición diaria.

$$w_{g,1} = \sqrt{(1,3337)^2 + (0,0852)^2} = 1,3364 \text{ N/m}$$

La longitud y la tensión total inicial se calculan con:

$$L_{g,1} = 2\frac{H_{g,1}}{w_{g,1}} \sinh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right), \qquad T_{g,1} = H_{g,1} \cosh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right)$$

$$L_{g,1} = 2\frac{2\,000}{1,3364} \sinh\left(\frac{1,3364(106,000)}{2(2\,000)}\right) = 106,022159 \text{ m}$$

$$T_{g,1} = 2\,000 \cosh\left(\frac{1,3364(106,000)}{2(2\,000)}\right) = 2\,001,254 \text{ N}$$

El cambio de estado del cable de guarda se resuelve con la misma relación elástica del ACSR No. 2:

$$L_{g,2} - L_{g,1} = \alpha_g L_{g,1}(\theta_2 - 25) + \frac{L_{g,1}}{EA_g}(T_{g,2} - T_{g,1}) + \varepsilon_f L_{g,1}$$

El término de fluencia se incluye únicamente para el estado a 60 °C. **Estado a 60 °C:**

$$2\frac{H_{g,60}}{1,3337} \sinh\left(\frac{1,3337(106,000)}{2H_{g,60}}\right) - 106,022159 = 0,00002300(106,022159)(60-25) + \frac{106,022159}{2\,424\,939}(T_{g,60} - 2\,001,254) + 0,00$$

$$\boxed{H_{g,60} = 888,037 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C y viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{g,100}}{4,0138} \sinh\left(\frac{4,0138(106,000)}{2H_{g,100}}\right) - 106,022159 = 0,00002300(106,022159)(21-25) + \frac{106,022159}{2\,424\,939}(T_{g,100} - 2\,001,254)$$

$$\boxed{H_{g,100} = 3\,345,197 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C y viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{g,19}}{1,9069} \sinh\left(\frac{1,9069(106,000)}{2H_{g,19}}\right) - 106,022159 = 0,00002300(106,022159)(19-25) + \frac{106,022159}{2\,424\,939}(T_{g,19} - 2\,001,254)$$

$$\boxed{H_{g,19} = 2\,491,804 \text{ N}}$$

La flecha a 60 °C del cable de guarda se obtiene con:

$$f_{g,60} = \frac{H_{g,60}}{w_g}\left[\cosh\left(\frac{w_g a}{2H_{g,60}}\right) - 1\right]$$

$$f_{g,60} = \frac{888,037}{1,3337}\left[\cosh\left(\frac{1,3337(106,000)}{2(888,037)}\right) - 1\right] = 2,1105 \text{ m}$$

$$T_{g,60} = 890,85 \text{ N}, \quad T_{g,100} = 3\,351,96 \text{ N}, \quad T_{g,19} = 2\,493,85 \text{ N}$$

$$T_{g,\text{máx}} = 3\,351,96 \text{ N}, \qquad U_{RTS,g} = \frac{3\,351,96}{12\,650,58}(100) = 26,497\,\%$$

11. Momentos y utilización del poste

Como el cable de guarda es ACSR No. 2, su fuerza de viento se calcula con el diámetro $\Phi_g = 0,00801$ m:

$$F_{v,g} = C_f q K \Phi_g a_v$$

$$F_{v,g} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(106{,}000) = 40{,}920 \text{ kgf}$$

El momento transversal se calcula mediante:

$$M_t = 2\left(F_{v,f} h_f + F_{v,g} h_g\right) + M_p$$

Donde: $F_{v,f}$ es la fuerza total de viento sobre las fases, $h_f = 9,4$ m es la altura de las fases, $F_{v,g}$ es la fuerza sobre el cable de guarda, $h_g = 11,5$ m es la altura del cable y M_p es el momento propio del poste y accesorios.

$$M_t = 2\left[(81{,}840)(9{,}4) + (40{,}920)(11{,}5)\right] + 1\,230{,}92 = 3\,710{,}67 \text{ kgf m}$$

$$M_{transformación} = M_t + M_e = 3\,710{,}67 + 412 = 4\,122{,}67 \text{ kgf m}$$

Donde: $M_e = 412$ kgf $\cdot$ m es el momento adicional de los equipos de transformación. La utilización del poste es:

$$U_{poste} = \frac{M_{sol}}{M_{re}} \times 100$$

Donde: M_{sol} es el momento solicitado y M_{re} es el momento de trabajo del poste seleccionado.

$$U_{alineamiento} = \frac{3\,710{,}67}{4\,200}(100) = 88{,}35\,\%$$

$$U_{derivación} = U_{retención} = 88{,}35\,\%$$

$$U_{transformación} = \frac{4\,122{,}67}{4\,200}(100) = 98{,}16\,\%$$

12. Retenciones intermedias por longitud

La relación utilizada para distribuir las retenciones es:

$$r_{ret} = \frac{L}{1500}$$

Donde: r_{ret} relaciona la longitud de la ruta con una sección de tiro de 1.500 m. El número de retenciones intermedias se calcula como:

$$N_{ret} = \text{máx}\left(0, \lceil r_{ret} \rceil - 1\right)$$

$$r_{ret} = \frac{212}{1500} = 0{,}141$$

$$N_{ret} = \text{máx}(0, \lceil 0{,}141 \rceil - 1) = 0$$

13. Cimentación

La estabilidad se expresa con:

$$C_s = \frac{M_e}{M_v} \geq 1,5, \qquad M_e = \frac{dh^3 C_h}{52,8} \tan(0,573^\circ)$$

Donde: C_s es el coeficiente de seguridad, M_e es el momento estabilizador, M_v es el momento de vuelco, d es el diámetro, $h = 1,80$ m es la profundidad y $C_h = 5,0 \times 10^6$ kg/m^3 es el coeficiente de compresibilidad. Despejando:

$$d = \frac{1,5 M_v (52,8)}{h^3 C_h \tan(0,573^\circ)}$$

$$d = \frac{1{,}5(4\,122{,}67)(52{,}8)}{(1{,}80)^3(5.000.000)\tan(0{,}573^\circ)} = 1{,}120 \text{ m}$$

T05 - Derivación B - Finca El Zafiro

Longitud	1.377 m	**Configuración**	Trifásica
Número de vanos	10	**Poste**	PC-12-1350

1. Distancia entre postes

La distancia uniforme entre apoyos se obtiene con:

$$a = \frac{L}{N}$$

Donde: a es la distancia entre postes, L es la longitud total de la ruta y N es el número de vanos.

$$a = \frac{1\,377}{10} = 137{,}700 \text{ m}$$

2. Componente horizontal de la tensión diaria

La tensión total diaria de fase es $T_1 = 2.530,116$ N. La componente horizontal se obtiene de la ecuación exacta de la catenaria:

$$T_1 = H_1 \cosh\left(\frac{w_1 a}{2H_1}\right)$$

Donde: T_1 es la tensión total diaria, H_1 es la componente horizontal, w_1 es la carga lineal resultante diaria y a es el vano.

$$2\,530{,}116 = H_1 \cosh\left(\frac{1{,}3364(137{,}700)}{2H_1}\right)$$

$$\boxed{H_1 = 2\,528{,}442 \text{ N}}$$

3. Vano regulador

El vano regulador se calcula mediante:

$$a_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} a_i^3}{\sum_{i=1}^{n} a_i}}$$

Donde: a_r es el vano regulador, a_i es cada vano individual y n es el número de vanos de la sección mecánica. Como todos los vanos son iguales, $a_r = a$.

$$a_r = \sqrt{\frac{10(137{,}700)^3}{10(137{,}700)}} = 137{,}700 \text{ m}$$

4. Cambio de estado y tensiones

La longitud inicial exacta de la catenaria es:

$$L_1 = 2\frac{H_1}{w_1} \sinh\left(\frac{w_1 a_r}{2H_1}\right)$$

Donde: L_1 es la longitud inicial de la catenaria, H_1 es la tensión horizontal diaria, w_1 es la carga diaria y a_r es el vano regulador.

$$L_1 = 2\frac{2\,528{,}442}{1{,}3364} \sinh\left(\frac{1{,}3364(137{,}700)}{2(2\,528{,}442)}\right) = 137{,}730394 \text{ m}$$

Para cada estado final se aplica:

$$L_2 - L_1 = \alpha L_1(\theta_2 - \theta_1) + \frac{L_1}{EA}(T_2 - T_1) + \varepsilon_f L_1$$

$$L_2 = 2\frac{H_2}{w_2}\sinh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right), \qquad T_2 = H_2\cosh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right)$$

Donde: $\theta_1 = 25$ °C; θ_2 es la temperatura final; w_2 es la carga lineal del estado; H_2 y T_2 son las tensiones horizontal y total; EA es la rigidez axial; y $\varepsilon_f = 0,0005$ se aplica únicamente a 60 °C. **Estado a 60 °C, sin viento:**

$$2\frac{H_{60}}{1{,}3337}\sinh\left(\frac{1{,}3337(137{,}700)}{2H_{60}}\right) - 137{,}730394 = 0{,}00002300(137{,}730394)(60-25) + \frac{137{,}730394}{2\,424\,939}(T_{60} - 2\,530{,}116) + 0{,}0005$$

$$\boxed{H_{60} = 1\,198{,}71 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C, viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{100}}{4{,}0138}\sinh\left(\frac{4{,}0138(137{,}700)}{2H_{100}}\right) - 137{,}730394 = 0{,}00002300(137{,}730394)(21-25) + \frac{137{,}730394}{2\,424\,939}(T_{100} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{100} = 4\,071{,}05 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C, viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{19}}{1{,}9069}\sinh\left(\frac{1{,}9069(137{,}700)}{2H_{19}}\right) - 137{,}730394 = 0{,}00002300(137{,}730394)(19-25) + \frac{137{,}730394}{2\,424\,939}(T_{19} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{19} = 3\,067{,}22 \text{ N}}$$

Las tensiones totales se obtienen con:

$$T_i = H_i\cosh\left(\frac{w_i a_r}{2H_i}\right)$$

$$T_{60} = 1\,202{,}23 \text{ N}, \qquad T_{100} = 4\,080{,}43 \text{ N}, \qquad T_{19} = 3\,070{,}03 \text{ N}$$

$$T_{\text{máx}} = 4\,080{,}43 \text{ N}, \qquad U_{RTS} = \frac{4\,080{,}43}{12\,650{,}58}(100) = 32{,}255\,\%$$

5. Flecha a 60 °C y altura libre

La flecha exacta se obtiene mediante:

$$f_{60} = \frac{H_{60}}{w_p}\left[\cosh\left(\frac{w_p a}{2H_{60}}\right) - 1\right]$$

Donde: f_{60} es la flecha a 60 °C, H_{60} es la tensión horizontal de ese estado, w_p es el peso lineal y a es el vano.

$$f_{60} = \frac{1\,198{,}71}{1{,}3337}\left[\cosh\left(\frac{1{,}3337(137{,}700)}{2(1\,198{,}71)}\right) - 1\right] = 2{,}6384 \text{ m}$$

La aproximación parabólica se usa como comprobación:

$$f_p = \frac{w_p a^2}{8H_{60}}$$

$$f_p = \frac{1{,}3337(137{,}700)^2}{8(1\,198{,}71)} = 2{,}6371 \text{ m}$$

$$h_{libre} = h_{am} - f_{60} = 9{,}4 - 2{,}6384 = 6{,}7616 \text{ m}$$

6. Vano máximo por penduleo y por altura

La separación requerida por penduleo se determina con:

$$D_{req} = k\sqrt{f_{60} + \lambda} + \frac{U}{150}$$

Donde: D_{req} es la separación requerida, $k = 0,65$ es el coeficiente de oscilación, $\lambda = 0$ m corresponde a aisladores rígidos y $U = 13,2$ kV es la tensión nominal.

$$D_{req} = 0{,}65\sqrt{2{,}6384 + 0} + \frac{13{,}2}{150} = 1{,}144 \text{ m}$$

La flecha disponible es:

$$f_{\text{máx}} = h_{am} - h_{min} = 9,4 - 6,0 = 3,4 \text{ m}$$

El vano máximo por altura se obtiene con:

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8H_{60}f_{\text{máx}}}{w_p}}$$

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8(1\,198{,}71)(3{,}4)}{1{,}3337}} = 156{,}355 \text{ m}$$

7. Vano crítico

Para el ACSR No. 2 del proyecto se utiliza el vano crítico ya obtenido con las propiedades mecánicas del conductor:

$$a_c = 47,60 \text{ m}$$

Donde: a_c es el vano crítico que permite comparar las hipótesis susceptibles de producir la mayor tensión.

8. Vano peso y vano viento

Para apoyos interiores con vanos iguales y a la misma cota:

$$a_g = a_{g1} + a_{g2}, \qquad a_v = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

Donde: a_g es el vano peso; a_{g1} y a_{g2} son las distancias desde el apoyo hasta los puntos más bajos de los vanos vecinos; a_v es el vano viento y a_1, a_2 son los vanos adyacentes.

$$a_{g1} = a_{g2} = \frac{137{,}700}{2} = 68{,}850 \text{ m}$$

$$a_g = 137{,}700 \text{ m}, \qquad a_v = 137{,}700 \text{ m}$$

9. Fuerza de viento sobre los conductores de fase

La fuerza de viento sobre un conductor de fase es:

$$F_{vc,1} = C_f q K \Phi a_v$$

Donde: $C_f = 1,20$ es el coeficiente de forma, $q = 40,162$ kgf/m^2 es la presión de viento, $K = 1,00$ es el factor de corrección, $\Phi = 0,00801$ m es el diámetro y a_v es el vano viento.

$$F_{vc,1} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(137{,}700) = 53{,}157 \text{ kgf}$$

$$F_{vc,total} = 3(53{,}157) = 159{,}472 \text{ kgf}$$

10. Cable de guarda ACSR No. 2

El cable de guarda utilizado en todas las rutas es ACSR No. 2. Se emplean $\Phi_g = 0,00801$ m, $w_g = 1,3337$ N/m, $A_g = 39,25$ mm^2, $EA_g = 2,424939 \times 10^6$ N, $\alpha_g = 23 \times 10^{-6}$ °C^{-1} y RTS$_g$ = 12.650,58 N. La tensión horizontal diaria se mantiene en $H_{g,1} = 2.000$ N.

La carga resultante diaria del cable de guarda es:

$$w_{g,1} = \sqrt{w_g^2 + p_{v,E.D.S.}^2}$$

Donde: w_g es el peso lineal del ACSR No. 2 y $p_{v,E.D.S.} = 0,0852$ N/m es la carga lineal de viento en la condición diaria.

$$w_{g,1} = \sqrt{(1,3337)^2 + (0,0852)^2} = 1,3364 \text{ N/m}$$

La longitud y la tensión total inicial se calculan con:

$$L_{g,1} = 2\frac{H_{g,1}}{w_{g,1}} \sinh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right), \qquad T_{g,1} = H_{g,1} \cosh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right)$$

$$L_{g,1} = 2\frac{2\,000}{1,3364} \sinh\left(\frac{1,3364(137,700)}{2(2\,000)}\right) = 137,748579 \text{ m}$$

$$T_{g,1} = 2\,000 \cosh\left(\frac{1,3364(137,700)}{2(2\,000)}\right) = 2\,002,117 \text{ N}$$

El cambio de estado del cable de guarda se resuelve con la misma relación elástica del ACSR No. 2:

$$L_{g,2} - L_{g,1} = \alpha_g L_{g,1}(\theta_2 - 25) + \frac{L_{g,1}}{EA_g}(T_{g,2} - T_{g,1}) + \varepsilon_f L_{g,1}$$

El término de fluencia se incluye únicamente para el estado a 60 °C. **Estado a 60 °C:**

$$2\frac{H_{g,60}}{1,3337} \sinh\left(\frac{1,3337(137,700)}{2H_{g,60}}\right) - 137,748579 = 0,00002300(137,748579)(60-25) + \frac{137,748579}{2\,424\,939}(T_{g,60} - 2\,002,117) + 0,00$$

$$\boxed{H_{g,60} = 1\,052,831 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C y viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{g,100}}{4,0138} \sinh\left(\frac{4,0138(137,700)}{2H_{g,100}}\right) - 137,748579 = 0,00002300(137,748579)(21-25) + \frac{137,748579}{2\,424\,939}(T_{g,100} - 2\,002,117)$$

$$\boxed{H_{g,100} = 3\,661,576 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C y viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{g,19}}{1,9069} \sinh\left(\frac{1,9069(137,700)}{2H_{g,19}}\right) - 137,748579 = 0,00002300(137,748579)(19-25) + \frac{137,748579}{2\,424\,939}(T_{g,19} - 2\,002,117)$$

$$\boxed{H_{g,19} = 2\,549,622 \text{ N}}$$

La flecha a 60 °C del cable de guarda se obtiene con:

$$f_{g,60} = \frac{H_{g,60}}{w_g}\left[\cosh\left(\frac{w_g a}{2H_{g,60}}\right) - 1\right]$$

$$f_{g,60} = \frac{1\,052,831}{1,3337}\left[\cosh\left(\frac{1,3337(137,700)}{2(1\,052,831)}\right) - 1\right] = 3,0044 \text{ m}$$

$$T_{g,60} = 1\,056,84 \text{ N}, \quad T_{g,100} = 3\,672,01 \text{ N}, \quad T_{g,19} = 2\,553,00 \text{ N}$$

$$T_{g,\text{máx}} = 3\,672,01 \text{ N}, \qquad U_{RTS,g} = \frac{3\,672,01}{12\,650,58}(100) = 29,026\,\%$$

11. Momentos y utilización del poste

Como el cable de guarda es ACSR No. 2, su fuerza de viento se calcula con el diámetro $\Phi_g = 0,00801$ m:

$$F_{v,g} = C_f q K \Phi_g a_v$$

$$F_{v,g} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(137{,}700) = 53{,}157 \text{ kgf}$$

El momento transversal se calcula mediante:

$$M_t = 2\left(F_{v,f} h_f + F_{v,g} h_g\right) + M_p$$

Donde: $F_{v,f}$ es la fuerza total de viento sobre las fases, $h_f = 9,4$ m es la altura de las fases, $F_{v,g}$ es la fuerza sobre el cable de guarda, $h_g = 11,5$ m es la altura del cable y M_p es el momento propio del poste y accesorios.

$$M_t = 2\left[(159{,}472)(9{,}4) + (53{,}157)(11{,}5)\right] + 1\,231{,}98 = 5\,452{,}67 \text{ kgf m}$$

$$M_{transformación} = M_t + M_e = 5\,452{,}67 + 412 = 5\,864{,}67 \text{ kgf m}$$

Donde: $M_e = 412$ kgf $\cdot$ m es el momento adicional de los equipos de transformación. La utilización del poste es:

$$U_{poste} = \frac{M_{sol}}{M_{re}} \times 100$$

Donde: M_{sol} es el momento solicitado y M_{re} es el momento de trabajo del poste seleccionado.

$$U_{alineamiento} = \frac{5\,452{,}67}{5\,400}(100) = 100{,}98\,\%$$

$$U_{derivación} = U_{retención} = 100{,}98\,\%$$

$$U_{transformación} = \frac{5\,864{,}67}{5\,400}(100) = 108{,}61\,\%$$

12. Retenciones intermedias por longitud

La relación utilizada para distribuir las retenciones es:

$$r_{ret} = \frac{L}{1500}$$

Donde: r_{ret} relaciona la longitud de la ruta con una sección de tiro de 1.500 m. El número de retenciones intermedias se calcula como:

$$N_{ret} = \text{máx}\left(0, \lceil r_{ret} \rceil - 1\right)$$

$$r_{ret} = \frac{1\,377}{1500} = 0{,}918$$

$$N_{ret} = \text{máx}(0, \lceil 0{,}918 \rceil - 1) = 0$$

13. Cimentación

La estabilidad se expresa con:

$$C_s = \frac{M_e}{M_v} \geq 1,5, \qquad M_e = \frac{dh^3 C_h}{52,8} \tan(0,573^\circ)$$

Donde: C_s es el coeficiente de seguridad, M_e es el momento estabilizador, M_v es el momento de vuelco, d es el diámetro, $h = 1,80$ m es la profundidad y $C_h = 5,0 \times 10^6$ kg/m^3 es el coeficiente de compresibilidad. Despejando:

$$d = \frac{1,5 M_v (52,8)}{h^3 C_h \tan(0,573^\circ)}$$

$$d = \frac{1{,}5(5\,864{,}67)(52{,}8)}{(1{,}80)^3(5.000.000)\tan(0{,}573^\circ)} = 1{,}593 \text{ m}$$

T06 - Finca Orión - Finca Oasis

Longitud	1.974 m	**Configuración**	Bifásica
Número de vanos	15	**Poste**	PC-12-1350

1. Distancia entre postes

La distancia uniforme entre apoyos se obtiene con:

$$a = \frac{L}{N}$$

Donde: a es la distancia entre postes, L es la longitud total de la ruta y N es el número de vanos.

$$a = \frac{1\,974}{15} = 131{,}600 \text{ m}$$

2. Componente horizontal de la tensión diaria

La tensión total diaria de fase es $T_1 = 2.530,116$ N. La componente horizontal se obtiene de la ecuación exacta de la catenaria:

$$T_1 = H_1 \cosh\left(\frac{w_1 a}{2H_1}\right)$$

Donde: T_1 es la tensión total diaria, H_1 es la componente horizontal, w_1 es la carga lineal resultante diaria y a es el vano.

$$2\,530{,}116 = H_1 \cosh\left(\frac{1{,}3364(131{,}600)}{2H_1}\right)$$

$$\boxed{H_1 = 2\,528{,}587 \text{ N}}$$

3. Vano regulador

El vano regulador se calcula mediante:

$$a_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} a_i^3}{\sum_{i=1}^{n} a_i}}$$

Donde: a_r es el vano regulador, a_i es cada vano individual y n es el número de vanos de la sección mecánica. Como todos los vanos son iguales, $a_r = a$.

$$a_r = \sqrt{\frac{15(131{,}600)^3}{15(131{,}600)}} = 131{,}600 \text{ m}$$

4. Cambio de estado y tensiones

La longitud inicial exacta de la catenaria es:

$$L_1 = 2\frac{H_1}{w_1} \sinh\left(\frac{w_1 a_r}{2H_1}\right)$$

Donde: L_1 es la longitud inicial de la catenaria, H_1 es la tensión horizontal diaria, w_1 es la carga diaria y a_r es el vano regulador.

$$L_1 = 2\frac{2\,528{,}587}{1{,}3364} \sinh\left(\frac{1{,}3364(131{,}600)}{2(2\,528{,}587)}\right) = 131{,}626528 \text{ m}$$

Para cada estado final se aplica:

$$L_2 - L_1 = \alpha L_1(\theta_2 - \theta_1) + \frac{L_1}{EA}(T_2 - T_1) + \varepsilon_f L_1$$

$$L_2 = 2\frac{H_2}{w_2}\sinh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right), \qquad T_2 = H_2\cosh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right)$$

Donde: $\theta_1 = 25$ °C; θ_2 es la temperatura final; w_2 es la carga lineal del estado; H_2 y T_2 son las tensiones horizontal y total; EA es la rigidez axial; y $\varepsilon_f = 0,0005$ se aplica únicamente a 60 °C. **Estado a 60 °C, sin viento:**

$$2\frac{H_{60}}{1{,}3337}\sinh\left(\frac{1{,}3337(131{,}600)}{2H_{60}}\right) - 131{,}626528 = 0{,}00002300(131{,}626528)(60-25) + \frac{131{,}626528}{2\,424\,939}(T_{60} - 2\,530{,}116) + 0{,}0005$$

$$\boxed{H_{60} = 1\,165{,}42 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C, viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{100}}{4{,}0138}\sinh\left(\frac{4{,}0138(131{,}600)}{2H_{100}}\right) - 131{,}626528 = 0{,}00002300(131{,}626528)(21-25) + \frac{131{,}626528}{2\,424\,939}(T_{100} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{100} = 4\,009{,}46 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C, viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{19}}{1{,}9069}\sinh\left(\frac{1{,}9069(131{,}600)}{2H_{19}}\right) - 131{,}626528 = 0{,}00002300(131{,}626528)(19-25) + \frac{131{,}626528}{2\,424\,939}(T_{19} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{19} = 3\,055{,}10 \text{ N}}$$

Las tensiones totales se obtienen con:

$$T_i = H_i\cosh\left(\frac{w_i a_r}{2H_i}\right)$$

$$T_{60} = 1\,168{,}72 \text{ N}, \qquad T_{100} = 4\,018{,}16 \text{ N}, \qquad T_{19} = 3\,057{,}68 \text{ N}$$

$$T_{\text{máx}} = 4\,018{,}16 \text{ N}, \qquad U_{RTS} = \frac{4\,018{,}16}{12\,650{,}58}(100) = 31{,}763\,\%$$

5. Flecha a 60 °C y altura libre

La flecha exacta se obtiene mediante:

$$f_{60} = \frac{H_{60}}{w_p}\left[\cosh\left(\frac{w_p a}{2H_{60}}\right) - 1\right]$$

Donde: f_{60} es la flecha a 60 °C, H_{60} es la tensión horizontal de ese estado, w_p es el peso lineal y a es el vano.

$$f_{60} = \frac{1\,165{,}42}{1{,}3337}\left[\cosh\left(\frac{1{,}3337(131{,}600)}{2(1\,165{,}42)}\right) - 1\right] = 2{,}4786 \text{ m}$$

La aproximación parabólica se usa como comprobación:

$$f_p = \frac{w_p a^2}{8H_{60}}$$

$$f_p = \frac{1{,}3337(131{,}600)^2}{8(1\,165{,}42)} = 2{,}4774 \text{ m}$$

$$h_{libre} = h_{am} - f_{60} = 9{,}4 - 2{,}4786 = 6{,}9214 \text{ m}$$

6. Vano máximo por penduleo y por altura

La separación requerida por penduleo se determina con:

$$D_{req} = k\sqrt{f_{60} + \lambda} + \frac{U}{150}$$

Donde: D_{req} es la separación requerida, $k = 0,65$ es el coeficiente de oscilación, $\lambda = 0$ m corresponde a aisladores rígidos y $U = 13,2$ kV es la tensión nominal.

$$D_{req} = 0{,}65\sqrt{2{,}4786 + 0} + \frac{13{,}2}{150} = 1{,}111 \text{ m}$$

La flecha disponible es:

$$f_{\text{máx}} = h_{am} - h_{min} = 9,4 - 6,0 = 3,4 \text{ m}$$

El vano máximo por altura se obtiene con:

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8H_{60}f_{\text{máx}}}{w_p}}$$

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8(1\,165{,}42)(3{,}4)}{1{,}3337}} = 154{,}169 \text{ m}$$

7. Vano crítico

Para el ACSR No. 2 del proyecto se utiliza el vano crítico ya obtenido con las propiedades mecánicas del conductor:

$$a_c = 47,60 \text{ m}$$

Donde: a_c es el vano crítico que permite comparar las hipótesis susceptibles de producir la mayor tensión.

8. Vano peso y vano viento

Para apoyos interiores con vanos iguales y a la misma cota:

$$a_g = a_{g1} + a_{g2}, \qquad a_v = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

Donde: a_g es el vano peso; a_{g1} y a_{g2} son las distancias desde el apoyo hasta los puntos más bajos de los vanos vecinos; a_v es el vano viento y a_1, a_2 son los vanos adyacentes.

$$a_{g1} = a_{g2} = \frac{131{,}600}{2} = 65{,}800 \text{ m}$$

$$a_g = 131{,}600 \text{ m}, \qquad a_v = 131{,}600 \text{ m}$$

9. Fuerza de viento sobre los conductores de fase

La fuerza de viento sobre un conductor de fase es:

$$F_{vc,1} = C_f q K \Phi a_v$$

Donde: $C_f = 1,20$ es el coeficiente de forma, $q = 40,162$ kgf/m^2 es la presión de viento, $K = 1,00$ es el factor de corrección, $\Phi = 0,00801$ m es el diámetro y a_v es el vano viento.

$$F_{vc,1} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(131{,}600) = 50{,}802 \text{ kgf}$$

$$F_{vc,total} = 2(50{,}802) = 101{,}605 \text{ kgf}$$

10. Cable de guarda ACSR No. 2

El cable de guarda utilizado en todas las rutas es ACSR No. 2. Se emplean $\Phi_g = 0,00801$ m, $w_g = 1,3337$ N/m, $A_g = 39,25$ mm^2, $EA_g = 2,424939 \times 10^6$ N, $\alpha_g = 23 \times 10^{-6}$ °C^{-1} y RTS$_g$ = 12.650,58 N. La tensión horizontal diaria se mantiene en $H_{g,1} = 2.000$ N.

La carga resultante diaria del cable de guarda es:

$$w_{g,1} = \sqrt{w_g^2 + p_{v,E.D.S.}^2}$$

Donde: w_g es el peso lineal del ACSR No. 2 y $p_{v,E.D.S.} = 0,0852$ N/m es la carga lineal de viento en la condición diaria.

$$w_{g,1} = \sqrt{(1,3337)^2 + (0,0852)^2} = 1,3364 \text{ N/m}$$

La longitud y la tensión total inicial se calculan con:

$$L_{g,1} = 2\frac{H_{g,1}}{w_{g,1}} \sinh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right), \qquad T_{g,1} = H_{g,1} \cosh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right)$$

$$L_{g,1} = 2\frac{2\,000}{1,3364} \sinh\left(\frac{1,3364(131,600)}{2(2\,000)}\right) = 131,642404 \text{ m}$$

$$T_{g,1} = 2\,000 \cosh\left(\frac{1,3364(131,600)}{2(2\,000)}\right) = 2\,001,933 \text{ N}$$

El cambio de estado del cable de guarda se resuelve con la misma relación elástica del ACSR No. 2:

$$L_{g,2} - L_{g,1} = \alpha_g L_{g,1}(\theta_2 - 25) + \frac{L_{g,1}}{EA_g}(T_{g,2} - T_{g,1}) + \varepsilon_f L_{g,1}$$

El término de fluencia se incluye únicamente para el estado a 60 °C. **Estado a 60 °C:**

$$2\frac{H_{g,60}}{1,3337} \sinh\left(\frac{1,3337(131,600)}{2H_{g,60}}\right) - 131,642404 = 0,00002300(131,642404)(60-25) + \frac{131,642404}{2\,424\,939}(T_{g,60} - 2\,001,933) + 0,00$$

$$\boxed{H_{g,60} = 1\,023,560 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C y viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{g,100}}{4,0138} \sinh\left(\frac{4,0138(131,600)}{2H_{g,100}}\right) - 131,642404 = 0,00002300(131,642404)(21-25) + \frac{131,642404}{2\,424\,939}(T_{g,100} - 2\,001,933)$$

$$\boxed{H_{g,100} = 3\,604,241 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C y viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{g,19}}{1,9069} \sinh\left(\frac{1,9069(131,600)}{2H_{g,19}}\right) - 131,642404 = 0,00002300(131,642404)(19-25) + \frac{131,642404}{2\,424\,939}(T_{g,19} - 2\,001,933)$$

$$\boxed{H_{g,19} = 2\,539,108 \text{ N}}$$

La flecha a 60 °C del cable de guarda se obtiene con:

$$f_{g,60} = \frac{H_{g,60}}{w_g}\left[\cosh\left(\frac{w_g a}{2H_{g,60}}\right) - 1\right]$$

$$f_{g,60} = \frac{1\,023,560}{1,3337}\left[\cosh\left(\frac{1,3337(131,600)}{2(1\,023,560)}\right) - 1\right] = 2,8225 \text{ m}$$

$$T_{g,60} = 1\,027,32 \text{ N}, \quad T_{g,100} = 3\,613,92 \text{ N}, \quad T_{g,19} = 2\,542,21 \text{ N}$$

$$T_{g,\text{máx}} = 3\,613,92 \text{ N}, \qquad U_{RTS,g} = \frac{3\,613,92}{12\,650,58}(100) = 28,567\,\%$$

11. Momentos y utilización del poste

Como el cable de guarda es ACSR No. 2, su fuerza de viento se calcula con el diámetro $\Phi_g = 0,00801$ m:

$$F_{v,g} = C_f q K \Phi_g a_v$$

$$F_{v,g} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(131{,}600) = 50{,}802 \text{ kgf}$$

El momento transversal se calcula mediante:

$$M_t = 2\left(F_{v,f} h_f + F_{v,g} h_g\right) + M_p$$

Donde: $F_{v,f}$ es la fuerza total de viento sobre las fases, $h_f = 9,4$ m es la altura de las fases, $F_{v,g}$ es la fuerza sobre el cable de guarda, $h_g = 11,5$ m es la altura del cable y M_p es el momento propio del poste y accesorios.

$$M_t = 2\left[(101{,}605)(9{,}4) + (50{,}802)(11{,}5)\right] + 1\,230{,}92 = 4\,309{,}55 \text{ kgf m}$$

$$M_{transformación} = M_t + M_e = 4\,309{,}55 + 412 = 4\,721{,}55 \text{ kgf m}$$

Donde: $M_e = 412$ kgf $\cdot$ m es el momento adicional de los equipos de transformación. La utilización del poste es:

$$U_{poste} = \frac{M_{sol}}{M_{re}} \times 100$$

Donde: M_{sol} es el momento solicitado y M_{re} es el momento de trabajo del poste seleccionado.

$$U_{alineamiento} = \frac{4\,309{,}55}{5\,400}(100) = 79{,}81\,\%$$

$$U_{derivación} = U_{retención} = 79{,}81\,\%$$

$$U_{transformación} = \frac{4\,721{,}55}{5\,400}(100) = 87{,}44\,\%$$

12. Retenciones intermedias por longitud

La relación utilizada para distribuir las retenciones es:

$$r_{ret} = \frac{L}{1500}$$

Donde: r_{ret} relaciona la longitud de la ruta con una sección de tiro de 1.500 m. El número de retenciones intermedias se calcula como:

$$N_{ret} = \text{máx}\left(0, \lceil r_{ret} \rceil - 1\right)$$

$$r_{ret} = \frac{1\,974}{1500} = 1{,}316$$

$$N_{ret} = \text{máx}(0, \lceil 1{,}316 \rceil - 1) = 1$$

13. Cimentación

La estabilidad se expresa con:

$$C_s = \frac{M_e}{M_v} \geq 1,5, \qquad M_e = \frac{dh^3 C_h}{52,8} \tan(0,573^\circ)$$

Donde: C_s es el coeficiente de seguridad, M_e es el momento estabilizador, M_v es el momento de vuelco, d es el diámetro, $h = 1,80$ m es la profundidad y $C_h = 5,0 \times 10^6$ kg/m^3 es el coeficiente de compresibilidad. Despejando:

$$d = \frac{1,5 M_v (52,8)}{h^3 C_h \tan(0,573^\circ)}$$

$$d = \frac{1{,}5(4\,721{,}55)(52{,}8)}{(1{,}80)^3(5.000.000)\tan(0{,}573^\circ)} = 1{,}282 \text{ m}$$

T07 - Finca Oasis - Finca Antares

Longitud	4.398 m	**Configuración**	Bifásica
Número de vanos	35	**Poste**	PC-12-1350

1. Distancia entre postes

La distancia uniforme entre apoyos se obtiene con:

$$a = \frac{L}{N}$$

Donde: a es la distancia entre postes, L es la longitud total de la ruta y N es el número de vanos.

$$a = \frac{4\,398}{35} = 125{,}657 \text{ m}$$

2. Componente horizontal de la tensión diaria

La tensión total diaria de fase es $T_1 = 2.530,116$ N. La componente horizontal se obtiene de la ecuación exacta de la catenaria:

$$T_1 = H_1 \cosh\left(\frac{w_1 a}{2H_1}\right)$$

Donde: T_1 es la tensión total diaria, H_1 es la componente horizontal, w_1 es la carga lineal resultante diaria y a es el vano.

$$2\,530{,}116 = H_1 \cosh\left(\frac{1{,}3364(125{,}657)}{2H_1}\right)$$

$$\boxed{H_1 = 2\,528{,}722 \text{ N}}$$

3. Vano regulador

El vano regulador se calcula mediante:

$$a_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} a_i^3}{\sum_{i=1}^{n} a_i}}$$

Donde: a_r es el vano regulador, a_i es cada vano individual y n es el número de vanos de la sección mecánica. Como todos los vanos son iguales, $a_r = a$.

$$a_r = \sqrt{\frac{35(125{,}657)^3}{35(125{,}657)}} = 125{,}657 \text{ m}$$

4. Cambio de estado y tensiones

La longitud inicial exacta de la catenaria es:

$$L_1 = 2\frac{H_1}{w_1} \sinh\left(\frac{w_1 a_r}{2H_1}\right)$$

Donde: L_1 es la longitud inicial de la catenaria, H_1 es la tensión horizontal diaria, w_1 es la carga diaria y a_r es el vano regulador.

$$L_1 = 2\frac{2\,528{,}722}{1{,}3364} \sinh\left(\frac{1{,}3364(125{,}657)}{2(2\,528{,}722)}\right) = 125{,}680234 \text{ m}$$

Para cada estado final se aplica:

$$L_2 - L_1 = \alpha L_1(\theta_2 - \theta_1) + \frac{L_1}{EA}(T_2 - T_1) + \varepsilon_f L_1$$

$$L_2 = 2\frac{H_2}{w_2}\sinh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right), \qquad T_2 = H_2\cosh\left(\frac{w_2 a_r}{2H_2}\right)$$

Donde: $\theta_1 = 25$ °C; θ_2 es la temperatura final; w_2 es la carga lineal del estado; H_2 y T_2 son las tensiones horizontal y total; EA es la rigidez axial; y $\varepsilon_f = 0,0005$ se aplica únicamente a 60 °C. **Estado a 60 °C, sin viento:**

$$2\frac{H_{60}}{1{,}3337}\sinh\left(\frac{1{,}3337(125{,}657)}{2H_{60}}\right) - 125{,}680234 = 0{,}00002300(125{,}680234)(60-25) + \frac{125{,}680234}{2\,424\,939}(T_{60} - 2\,530{,}116) + 0{,}0005$$

$$\boxed{H_{60} = 1\,131{,}94 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C, viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{100}}{4{,}0138}\sinh\left(\frac{4{,}0138(125{,}657)}{2H_{100}}\right) - 125{,}680234 = 0{,}00002300(125{,}680234)(21-25) + \frac{125{,}680234}{2\,424\,939}(T_{100} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{100} = 3\,948{,}36 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C, viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{19}}{1{,}9069}\sinh\left(\frac{1{,}9069(125{,}657)}{2H_{19}}\right) - 125{,}680234 = 0{,}00002300(125{,}680234)(19-25) + \frac{125{,}680234}{2\,424\,939}(T_{19} - 2\,530{,}116)$$

$$\boxed{H_{19} = 3\,043{,}21 \text{ N}}$$

Las tensiones totales se obtienen con:

$$T_i = H_i\cosh\left(\frac{w_i a_r}{2H_i}\right)$$

$$T_{60} = 1\,135{,}04 \text{ N}, \qquad T_{100} = 3\,956{,}41 \text{ N}, \qquad T_{19} = 3\,045{,}57 \text{ N}$$

$$T_{\text{máx}} = 3\,956{,}41 \text{ N}, \qquad U_{RTS} = \frac{3\,956{,}41}{12\,650{,}58}(100) = 31{,}275\,\%$$

5. Flecha a 60 °C y altura libre

La flecha exacta se obtiene mediante:

$$f_{60} = \frac{H_{60}}{w_p}\left[\cosh\left(\frac{w_p a}{2H_{60}}\right) - 1\right]$$

Donde: f_{60} es la flecha a 60 °C, H_{60} es la tensión horizontal de ese estado, w_p es el peso lineal y a es el vano.

$$f_{60} = \frac{1\,131{,}94}{1{,}3337}\left[\cosh\left(\frac{1{,}3337(125{,}657)}{2(1\,131{,}94)}\right) - 1\right] = 2{,}3266 \text{ m}$$

La aproximación parabólica se usa como comprobación:

$$f_p = \frac{w_p a^2}{8H_{60}}$$

$$f_p = \frac{1{,}3337(125{,}657)^2}{8(1\,131{,}94)} = 2{,}3255 \text{ m}$$

$$h_{libre} = h_{am} - f_{60} = 9{,}4 - 2{,}3266 = 7{,}0734 \text{ m}$$

6. Vano máximo por penduleo y por altura

La separación requerida por penduleo se determina con:

$$D_{req} = k\sqrt{f_{60} + \lambda} + \frac{U}{150}$$

Donde: D_{req} es la separación requerida, $k = 0,65$ es el coeficiente de oscilación, $\lambda = 0$ m corresponde a aisladores rígidos y $U = 13,2$ kV es la tensión nominal.

$$D_{req} = 0{,}65\sqrt{2{,}3266 + 0} + \frac{13{,}2}{150} = 1{,}079 \text{ m}$$

La flecha disponible es:

$$f_{\text{máx}} = h_{am} - h_{min} = 9,4 - 6,0 = 3,4 \text{ m}$$

El vano máximo por altura se obtiene con:

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8H_{60}f_{\text{máx}}}{w_p}}$$

$$a_{\text{máx},h} = \sqrt{\frac{8(1\,131{,}94)(3{,}4)}{1{,}3337}} = 151{,}938 \text{ m}$$

7. Vano crítico

Para el ACSR No. 2 del proyecto se utiliza el vano crítico ya obtenido con las propiedades mecánicas del conductor:

$$a_c = 47,60 \text{ m}$$

Donde: a_c es el vano crítico que permite comparar las hipótesis susceptibles de producir la mayor tensión.

8. Vano peso y vano viento

Para apoyos interiores con vanos iguales y a la misma cota:

$$a_g = a_{g1} + a_{g2}, \qquad a_v = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

Donde: a_g es el vano peso; a_{g1} y a_{g2} son las distancias desde el apoyo hasta los puntos más bajos de los vanos vecinos; a_v es el vano viento y a_1, a_2 son los vanos adyacentes.

$$a_{g1} = a_{g2} = \frac{125{,}657}{2} = 62{,}829 \text{ m}$$

$$a_g = 125{,}657 \text{ m}, \qquad a_v = 125{,}657 \text{ m}$$

9. Fuerza de viento sobre los conductores de fase

La fuerza de viento sobre un conductor de fase es:

$$F_{vc,1} = C_f q K \Phi a_v$$

Donde: $C_f = 1,20$ es el coeficiente de forma, $q = 40,162$ kgf/m^2 es la presión de viento, $K = 1,00$ es el factor de corrección, $\Phi = 0,00801$ m es el diámetro y a_v es el vano viento.

$$F_{vc,1} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(125{,}657) = 48{,}508 \text{ kgf}$$

$$F_{vc,total} = 2(48{,}508) = 97{,}017 \text{ kgf}$$

10. Cable de guarda ACSR No. 2

El cable de guarda utilizado en todas las rutas es ACSR No. 2. Se emplean $\Phi_g = 0,00801$ m, $w_g = 1,3337$ N/m, $A_g = 39,25$ mm^2, $EA_g = 2,424939 \times 10^6$ N, $\alpha_g = 23 \times 10^{-6}$ °C^{-1} y RTS$_g$ = 12.650,58 N. La tensión horizontal diaria se mantiene en $H_{g,1} = 2.000$ N.

La carga resultante diaria del cable de guarda es:

$$w_{g,1} = \sqrt{w_g^2 + p_{v,E.D.S.}^2}$$

Donde: w_g es el peso lineal del ACSR No. 2 y $p_{v,E.D.S.} = 0,0852$ N/m es la carga lineal de viento en la condición diaria.

$$w_{g,1} = \sqrt{(1,3337)^2 + (0,0852)^2} = 1,3364 \text{ N/m}$$

La longitud y la tensión total inicial se calculan con:

$$L_{g,1} = 2\frac{H_{g,1}}{w_{g,1}} \sinh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right), \qquad T_{g,1} = H_{g,1} \cosh\left(\frac{w_{g,1} a_r}{2H_{g,1}}\right)$$

$$L_{g,1} = 2\frac{2\,000}{1,3364} \sinh\left(\frac{1,3364(125,657)}{2(2\,000)}\right) = 125,694058 \text{ m}$$

$$T_{g,1} = 2\,000 \cosh\left(\frac{1,3364(125,657)}{2(2\,000)}\right) = 2\,001,763 \text{ N}$$

El cambio de estado del cable de guarda se resuelve con la misma relación elástica del ACSR No. 2:

$$L_{g,2} - L_{g,1} = \alpha_g L_{g,1}(\theta_2 - 25) + \frac{L_{g,1}}{EA_g}(T_{g,2} - T_{g,1}) + \varepsilon_f L_{g,1}$$

El término de fluencia se incluye únicamente para el estado a 60 °C. **Estado a 60 °C:**

$$2\frac{H_{g,60}}{1,3337} \sinh\left(\frac{1,3337(125,657)}{2H_{g,60}}\right) - 125,694058 = 0,00002300(125,694058)(60-25) + \frac{125,694058}{2\,424\,939}(T_{g,60} - 2\,001,763) + 0,00$$

$$\boxed{H_{g,60} = 993,976 \text{ N}}$$

Estado a 21 °C y viento de 100 km/h:

$$2\frac{H_{g,100}}{4,0138} \sinh\left(\frac{4,0138(125,657)}{2H_{g,100}}\right) - 125,694058 = 0,00002300(125,694058)(21-25) + \frac{125,694058}{2\,424\,939}(T_{g,100} - 2\,001,763)$$

$$\boxed{H_{g,100} = 3\,546,794 \text{ N}}$$

Estado a 19 °C y viento de 60 km/h:

$$2\frac{H_{g,19}}{1,9069} \sinh\left(\frac{1,9069(125,657)}{2H_{g,19}}\right) - 125,694058 = 0,00002300(125,694058)(19-25) + \frac{125,694058}{2\,424\,939}(T_{g,19} - 2\,001,763)$$

$$\boxed{H_{g,19} = 2\,528,566 \text{ N}}$$

La flecha a 60 °C del cable de guarda se obtiene con:

$$f_{g,60} = \frac{H_{g,60}}{w_g}\left[\cosh\left(\frac{w_g a}{2H_{g,60}}\right) - 1\right]$$

$$f_{g,60} = \frac{993,976}{1,3337}\left[\cosh\left(\frac{1,3337(125,657)}{2(993,976)}\right) - 1\right] = 2,6499 \text{ m}$$

$$T_{g,60} = 997,51 \text{ N}, \quad T_{g,100} = 3\,555,76 \text{ N}, \quad T_{g,19} = 2\,531,41 \text{ N}$$

$$T_{g,\text{máx}} = 3\,555,76 \text{ N}, \qquad U_{RTS,g} = \frac{3\,555,76}{12\,650,58}(100) = 28,108\,\%$$

11. Momentos y utilización del poste

Como el cable de guarda es ACSR No. 2, su fuerza de viento se calcula con el diámetro $\Phi_g = 0,00801$ m:

$$F_{v,g} = C_f q K \Phi_g a_v$$

$$F_{v,g} = 1{,}20(40{,}162)(1{,}00)(0{,}00801)(125{,}657) = 48{,}508 \text{ kgf}$$

El momento transversal se calcula mediante:

$$M_t = 2\left(F_{v,f} h_f + F_{v,g} h_g\right) + M_p$$

Donde: $F_{v,f}$ es la fuerza total de viento sobre las fases, $h_f = 9,4$ m es la altura de las fases, $F_{v,g}$ es la fuerza sobre el cable de guarda, $h_g = 11,5$ m es la altura del cable y M_p es el momento propio del poste y accesorios.

$$M_t = 2\left[(97{,}017)(9{,}4) + (48{,}508)(11{,}5)\right] + 1\,230{,}92 = 4\,170{,}52 \text{ kgf m}$$

$$M_{transformación} = M_t + M_e = 4\,170{,}52 + 412 = 4\,582{,}52 \text{ kgf m}$$

Donde: $M_e = 412$ kgf $\cdot$ m es el momento adicional de los equipos de transformación. La utilización del poste es:

$$U_{poste} = \frac{M_{sol}}{M_{re}} \times 100$$

Donde: M_{sol} es el momento solicitado y M_{re} es el momento de trabajo del poste seleccionado.

$$U_{alineamiento} = \frac{4\,170{,}52}{5\,400}(100) = 77{,}23\,\%$$

$$U_{derivación} = U_{retención} = 77{,}23\,\%$$

$$U_{transformación} = \frac{4\,582{,}52}{5\,400}(100) = 84{,}86\,\%$$

12. Retenciones intermedias por longitud

La relación utilizada para distribuir las retenciones es:

$$r_{ret} = \frac{L}{1500}$$

Donde: r_{ret} relaciona la longitud de la ruta con una sección de tiro de 1.500 m. El número de retenciones intermedias se calcula como:

$$N_{ret} = \text{máx}\left(0, \lceil r_{ret} \rceil - 1\right)$$

$$r_{ret} = \frac{4\,398}{1500} = 2{,}932$$

$$N_{ret} = \text{máx}(0, \lceil 2{,}932 \rceil - 1) = 2$$

13. Cimentación

La estabilidad se expresa con:

$$C_s = \frac{M_e}{M_v} \geq 1,5, \qquad M_e = \frac{dh^3 C_h}{52,8} \tan(0,573^\circ)$$

Donde: C_s es el coeficiente de seguridad, M_e es el momento estabilizador, M_v es el momento de vuelco, d es el diámetro, $h = 1,80$ m es la profundidad y $C_h = 5,0 \times 10^6$ kg/m^3 es el coeficiente de compresibilidad. Despejando:

$$d = \frac{1,5 M_v (52,8)}{h^3 C_h \tan(0,573^\circ)}$$

$$d = \frac{1{,}5(4\,582{,}52)(52{,}8)}{(1{,}80)^3(5.000.000)\tan(0{,}573^\circ)} = 1{,}245 \text{ m}$$