

4 DE ENERO DE 2017

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

TRABAJO DE GRADO CURSO 2016-17 LÍNEA DE 400 KV EN SUECIA

Asignatura: Centrales, Subestaciones y Líneas
Profesor: Pablo Rodríguez

GUILLERMO MAIRAL ZUERAS
JAVIER MIÑARRO MENA
CARLOS OTERO VIÑA
PEDRO PARDO POSADAS
IGNACIO SANZ SORIANO
4ºB IEM
GRUPO 8



1 Objetivo del trabajo

En este documento se expone el proceso realizado para la elaboración del diseño de una familia de apoyos de una línea eléctrica aérea. El objetivo del proyecto es obtener dicho diseño para posteriormente entregárselo a un fabricante de apoyos, pudiendo de este modo, desarrollar los planos de fabricación y montaje.

Para el despliegue del proyecto es necesario considerar ciertos datos de partida, en concreto:

- País donde se realizará el proyecto: **SUECIA**.
- Tensión de la línea y número de circuitos: 400 kV , 1.
- Conductor, número de subconductores y separación de los mismos: ACSR/AW Cardinal, 3, $0'45\text{ m}$.
- Longitud de la cadena de suspensión: 5 m .
- Longitud de la cadena de amarre: 6 m .
- Zona reglamentaria: C.

Además, se consideran ciertas condiciones para simplificar el problema, estas son:

- Las hipótesis mecánicas de cálculo de los apoyos se basan en el RD 223/2008, no en los reglamentos particulares de cada país.
- No se consideran cables de tierra.
- No se tienen en cuenta los apoyos de fin de línea y los anclajes.
- No se realizan cálculos mecánicos y eléctricos en las cadenas de aislamiento.
- No se consideran las cimentaciones de los apoyos.
- No se considera el sistema de puesta a tierra de los apoyos.

Para cumplir con el objetivo del proyecto es imprescindible obtener adecuadamente la geometría del apoyo y los árboles de carga. En el presente documento se muestran los cálculos y consideraciones necesarias para la correcta obtención de dichos elementos.

La geometría de la familia de apoyos se obtiene partiendo de las consideraciones e hipótesis recogidas en el documento CIGRE TB 348 y en los datos de partida definidos anteriormente. Se representan las cotas necesarias para poder verificar el cumplimiento de las disposiciones e hipótesis nacionales recogidas en el CIGRE TB 438.

Los árboles de carga se obtendrán utilizando las hipótesis contenidas en el RD 223/2008.

Los datos necesarios del estudio mecánico del conductor, que también se muestran en este documento, así como las comprobaciones reglamentarias sobre conductores, se obtienen resolviendo la Ecuación de Cambio de Condiciones.

Por último, se debe tener en cuenta que la familia de apoyos, como mínimo, será la siguiente:

- Apoyo de suspensión: Vanos normales.
- Apoyo de suspensión: Vanos largos.
- Apoyo de ángulo débil.
- Apoyo de ángulo fuerte.

2 Índice

1	Objetivo del trabajo.....	2
2	Índice.....	4
3	Datos del problema	6
3.1	Datos de la línea	6
3.2	Propiedades mecánicas del conductor	6
3.3	Longitud de los vanos.....	6
4	Hipótesis de cálculo y cambio de condiciones.....	7
4.1	Hipótesis inicial.....	7
4.2	Hipótesis de viento.....	7
4.3	Hipótesis de hielo	8
4.4	Hipótesis de hielo & viento	8
4.5	Resumen de las tracciones	9
5	Vano de viento y vano de peso	10
6	Esfuerzos en punta de cruceta	10
7	Árbol de cargas	11
7.1	Apoyo en suspensión	11
7.1.1	Vano Corto (450 m)	11
7.1.2	Vano Largo (650 m).....	11
7.2	Apoyo de amarre en ángulo débil ($\alpha = 15^\circ$)	12
7.2.1	Vano Corto (450 m)	12
7.2.2	Vano Largo (650 m).....	12
7.3	Apoyo de amarre en ángulo medio ($\alpha = 35^\circ$)	13
7.3.1	Vano Corto (450 m)	13
7.3.2	Vano Largo (650 m).....	13
7.4	Apoyo de amarre en ángulo fuerte ($\alpha = 60^\circ$).....	14
7.4.1	Vano Corto (450 m)	14
7.4.2	Vano Largo (650 m).....	14
8	Geometría de la cabeza.....	15
8.1	Distancias Conductor-Apoyo (fase-tierra)	15
8.2	Distancias entre conductores (fase-fase).....	16
8.2.1	Configuración horizontal:	17
8.3	Ángulo girado por la cadena de aisladores (ϕ_{aisl})	18
8.3.1	Vano corto.....	19
8.3.2	Vano largo.....	19
8.4	Diseño de la geometría de los apoyos.....	20
8.4.1	Apoyo en suspensión	20
8.4.2	Apoyo en suspensión	20
8.4.3	Apoyo de amarre	21
8.4.4	Apoyo de amarre	21
9	Altura de los apoyos.....	22
9.1	Distancia mínima al terreno según RLAT	22
9.2	Flecha máxima temperatura	22
9.2.1	Vano corto.....	22
9.2.2	Vano largo.....	22
9.3	Flecha máxima hipótesis de hielo.....	23
9.3.1	Vano corto.....	23
9.3.2	Vano largo.....	23

9.4	Flecha máxima hipótesis de viento.....	23
9.4.1	Vano corto	23
9.4.2	Vano largo	24
9.5	Altura mínima final del apoyo	24
10	Bibliografía	25
11	Anexo.....	26
11.1	Código <i>MATLAB</i> para ecuación de cambio de condiciones	26
11.2	Código <i>MATLAB</i> para cálculo de flechas y cambio de condiciones	28

3 Datos del problema

3.1 Datos de la línea

En primer lugar, se establecen las condiciones climatológicas con las que se va a trabajar en el país asignado, en este caso Suecia, así como el número y el tipo de circuitos junto con el nivel de tensión de la línea.

Tensión nominal (kV)	400
Localización	Suecia
Zona	C
Velocidad del viento (km/h)	140
Velocidad del viento + hielo (km/h)	60
Número de subconductores (n)	3
Número de circuitos	1
Presión de viento sobre conductores (kg/m^2)	68,00
Presión de viento sobre CFO (kg/m^2)	68,00
Presión de viento sobre cables con hielo (kg/m^2)	12,5

3.2 Propiedades mecánicas del conductor

En segundo lugar, se establecen las propiedades mecánicas del conductor que se empleará en la construcción de la línea.

Conductor	ACSR/AW CARDINAL
Peso ($kg/m=daN/m$)	1,756
Diámetro (mm)	30,4
Coeficiente de dilatación α (K^{-1})	$20,2 \cdot 10^{-6}$
Módulo de elasticidad E (GPa)	67,3

3.3 Longitud de los vanos

Se considerarán vanos de longitudes similares a las de España para líneas de categoría especial como en este caso. Debido a la alta probabilidad de manguitos de hielo alrededor del conductor, se han reducido tantos los vanos largos como los cortos en 50 m . Así, se considerarán dos tipos de vanos:

- 1) Vano corto: 450 m
- 2) Vano largo: 650 m

4 Hipótesis de cálculo y cambio de condiciones

4.1 Hipótesis inicial

Las condiciones de la línea a partir de las cuales se aplicará la ecuación de cambio de condiciones son las siguientes:

Temperatura (°C)	Peso del Conductor (daN/m)	Every Day Stress (EDS)
15	1,756	18%

Haciendo uso de la ecuación de cambio de condiciones¹, obtenida a partir de:

$$\frac{a^2 \cdot P_1^2}{24 \cdot T_1^2} - \alpha \cdot t_1 - \frac{T_1}{SE} = \frac{a^2 \cdot P_2^2}{24 \cdot T_2^2} - \alpha \cdot t_2 - \frac{T_2}{SE}$$

y reagrupando los términos, se expresa la ecuación en función de la tensión en el estado final como:

$$T_2^3 + K_2 \cdot T_2^2 - K_3 = 0$$

A través de la cual se obtiene la tracción en la hipótesis final (T_2) para los distintos parámetros de cada hipótesis.

4.2 Hipótesis de viento

Para esta hipótesis se considera que el viento ejerce una fuerza horizontal sobre el conductor:

$$P_{viento} = P \cdot \phi_{cond} = 68 \cdot 0,0304 = 2,067 \text{ daN/m}$$

dando lugar a una resultante en la hipótesis final (P_2) que se obtiene de la composición de ambas fuerzas:

$$P_2 = \sqrt{P_{cond}^2 + P_{viento}^2} = \sqrt{1,756^2 + 2,067^2} = 2,712 \text{ m}$$

Junto con el resto de condiciones, la hipótesis de viento se caracteriza por los siguientes parámetros:

Temperatura (°C)	Peso del Conductor (daN/m)	P _{VIENTO} (daN/m)	P ₂ (daN/m)
-15	1,756	2,064	2,712

Las tracciones obtenidas para los vanos corto y largo se muestran a continuación, en la siguiente tabla:

	Vano corto (450 m)	Vano largo (650 m)
T ₂ (daN)	4398,27	4345,45

¹ Se adjunta código MATLAB empleado para el cálculo en el anexo.

4.3 Hipótesis de hielo

Para esta hipótesis se considerará que el hielo ejerce una fuerza vertical² debida a su propio peso:

$$P_{hielo} = 0,36 \cdot \sqrt{\phi_{cond}} = 0,36 \cdot \sqrt{30,4} = 1,985 \text{ daN/m}$$

dando lugar a una resultante en la hipótesis final que se obtiene de la composición de ambas fuerzas:

$$P_2 = \sqrt{(P_{cond} + P_{hielo})^2} = \sqrt{(1,756 + 1,985)^2} = 3,741 \text{ m}$$

Junto con el resto de condiciones, la hipótesis de hielo se caracteriza por los siguientes parámetros:

Temperatura (°C)	Peso del Conductor (daN/m)	P _{HIELO} (daN/m)	P ₂ (daN/m)
-15	1,756	1,985	3,741

Las tracciones obtenidas para los vanos corto y largo se muestran a continuación, en la siguiente tabla:

	Vano corto (450 m)	Vano largo (650 m)
T ₂ (daN)	5813,51	5861,30

4.4 Hipótesis de hielo & viento

Para esta hipótesis se considerará que el hielo ejerce una fuerza vertical debida a su propio peso. Además, se tendrá en cuenta que la presión del viento ejerce una fuerza horizontal sobre el conductor y su correspondiente manguito de hielo.

Esto último hace necesario el cálculo del diámetro exterior del manguito de hielo. Sabiendo que la superficie de hielo se corresponde con la de una corona circular, es posible calcular el diámetro del manguito de hielo, usando el peso específico del hielo ($\rho_{hielo}=750 \text{ kg/m}^3$) como:

$$P_{hielo} = \rho_{hielo} \cdot S_{corona}$$

$$1,985 = 750 \cdot S_{corona} \rightarrow S_{corona} = \frac{1,985}{750} = 2647 \text{ mm}^2$$

Esta superficie de 2647 mm² se corresponde con el área de una corona circular, por lo que el diámetro exterior se obtiene de la siguiente expresión:

$$S_{corona} = \frac{\pi}{4} \cdot [\phi_{hielo}^2 - \phi_{cond}^2]$$

$$\phi_{hielo} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_{corona} + \phi_{cond}^2} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot 2647 + 30,4^2} = 65,53 \text{ mm}$$

² Al tratarse de zona C, el peso del hielo se calcula como: $P_{hielo} = 0,36 \cdot \sqrt{\phi_{cond}(\text{mm})}$ (daN/m)

La fuerza resultante vertical debido al hielo y al peso del conductor resulta:

$$P_{vert} = P_{hielo} + P_{cond} = 1,985 + 1,756 = 3,741 \text{ daN/m}$$

La fuerza resultante horizontal debido al viento en esta hipótesis, teniendo en cuenta que la presión del mismo es de 12.5 kg/mm^2 en estas condiciones, resulta:

$$P_{viento} = P \cdot \phi_{hielo} = 12,5 \cdot 0,06553 = 0,819 \text{ daN/m}$$

La resultante se obtendrá de la composición de las componentes horizontal y vertical:

$$P_2 = \sqrt{P_{vert}^2 + P_{viento}^2} = \sqrt{3,741^2 + 0,819^2} = 3,830 \text{ daN/m}$$

Junto con el resto de condiciones, la hipótesis de viento & hielo se caracteriza por los siguientes parámetros:

Temperatura (°C)	P _{VERT} (daN/m)	P _{VIENTO} (daN/m)	P ₂ (daN/m)
-15	3,741	0,819	3,830

Las tracciones obtenidas para los vanos corto y largo se muestran a continuación, en la siguiente tabla:

	Vano corto (450 m)	Vano largo (650 m)
T ₂ (daN)	5925,67	5986,27

4.5 Resumen de las tracciones

A continuación, se muestra una tabla con las tracciones para las distintas hipótesis:

Hipótesis de Cálculo	Vano Corto (450 m)	Vano largo (650 m)
Hipótesis de Viento	T _{1,v} = 4398,27 daN	T _{2,v} = 4345,45 daN
Hipótesis de Hielo	T _{1,h} = 5813,51 daN	T _{2,h} = 5861,30 daN
Hipótesis de Hielo + Viento	T _{1,v+h} = 5925,67 daN	T _{2,v+h} = 5986,27 daN

5 Vano de viento y vano de peso

Al tratarse de una línea de categoría especial, se escogerán los siguientes vanos de peso y de viento:

- Vano de viento: $V_v = \frac{L_1 + L_2}{2} \text{ (m)}$
- Vano de peso: $V_p = \frac{L_1 + L_2}{2} + \frac{T}{P} \cdot (tg n_1 + tg n_2) \approx 1,4 \cdot V_v \text{ (m)}$

De esta forma se calculan los vanos de viento y de peso para vano corto y vano largo en la línea:

	Vano Corto (450 m)	Vano Largo (650 m)
Vano de Viento (m)	450	650
Vano de Peso (m)	630	910

6 Esfuerzos en punta de cruceta

Ahora se enumeran las fases de 1 a 3, sabiendo que en cada fase hay tres subconductores. Se calculan para cada fase los esfuerzos que se transmiten a la torre como se indica en la siguiente tabla:

Esfuerzo Vertical $V \text{ (daN)}$	$V = V_p \cdot P_u \cdot n$
Esfuerzo Transversal $T \text{ (daN)}$	$T = V_v \cdot P_v \cdot \phi_{cond} \cdot n$
Esfuerzo transversal Ángulo $T \text{ (daN)}$	$T = 2 \cdot T \cdot \sin (\alpha/2)$

7 Árbol de cargas

7.1 Apoyo en suspensión

7.1.1 Vano Corto (450 m)

Apoyo de Suspensión						
Hipótesis para Vano Corto (450 m).						
		1 (Viento)	2 (Hielo)	5 (H + V)	3 (Deseq.Tr. +H)	4b (Rotura fase R)
1	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	2790,72	0,00	1105,82	0,00	1105,82
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	2666,55	4444,25
2	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	2790,72	0,00	1105,82	0,00	1105,82
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	2666,55	4444,25
3	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	2790,72	0,00	1105,82	0,00	1105,82
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	2666,55	4444,25
Coef. Seguridad		1,5	1,5	1,5	1,2	1,2
Viento		Si	No	Si	No	No

7.1.2 Vano Largo (650 m)

Apoyo de Suspensión						
Hipótesis para Vano Largo (650 m).						
		1 (Viento)	2 (Hielo)	5 (H + V)	3 (Deseq.Tr. +H)	4b (Rotura fase R)
1	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	4031,04	0,00	1597,29	0,00	1597,29
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	2693,82	4489,70
2	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	4031,04	0,00	1597,29	0,00	1597,29
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	2693,82	4489,70
3	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	4031,04	0,00	1597,29	0,00	1597,29
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	2693,82	4489,70
Coef. Seguridad		1,5	1,5	1,5	1,2	1,2
Viento		Si	No	Si	No	No

7.2 Apoyo de amarre en ángulo débil ($\alpha = 15^\circ$)

7.2.1 Vano Corto (450 m)

Apoyo de Amarre de Ángulo Débil						
Hipótesis para Vano Corto (450 m).						
		1 (Viento)	2 (Hielo)	5 (H + V)	3 (Deseq.Tr. +H)	4b (Rotura fase R)
1	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	6235,26	4552,89	5746,55	4552,89	4640,73
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4444,25	5925,67
2	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	6235,26	4552,89	5746,55	4552,89	4640,73
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4444,25	5925,67
3	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	6235,26	4552,89	5746,55	4552,89	4640,73
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4444,25	5925,67
Coef. Seguridad		1,5	1,5	1,5	1,2	1,2
Viento		Si	No	Si	No	No

7.2.2 Vano Largo (650 m)

Apoyo de Amarre de Ángulo Débil						
Hipótesis para Vano Largo (650 m).						
		1 (Viento)	2 (Hielo)	3 (H + V)	3 (Deseq.Tr. +H)	4b (Rotura fase R)
1	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	7434,21	4590,32	6285,48	4590,32	4688,19
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4489,70	5986,27
2	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	7434,21	4590,32	6285,48	4590,32	4688,19
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4489,70	5986,27
3	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	7434,21	4590,32	6285,48	4590,32	4688,19
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4489,70	5986,27
Coef. Seguridad		1,5	1,5	1,5	1,2	1,2
Viento		Si	No	Si	No	No

7.3 Apoyo de amarre en ángulo medio ($\alpha = 35^\circ$)

7.3.1 Vano Corto (450 m)

Apoyo de Amarre de Ángulo Medio						
Hipótesis para Vano Corto (450 m).						
		1 (Viento)	2 (Hielo)	5 (H + V)	3 (Deseq.Tr.+H)	4b (Rotura fase R)
1	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	10726,23	10488,94	11797,12	10488,94	10691,30
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4444,25	5925,67
2	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	10726,23	10488,94	11797,12	10488,94	10691,30
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4444,25	5925,67
3	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	10726,23	10488,94	11797,12	10488,94	10691,30
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4444,25	5925,67
Coef. Seguridad		1,5	1,5	1,5	1,2	1,2
Viento		Si	No	Si	No	No

7.3.2 Vano Largo (650 m)

Apoyo de Amarre de Ángulo Medio						
Hipótesis para Vano Largo (650 m).						
		1 (Viento)	2 (Hielo)	3 (H + V)	3 (Deseq.Tr. +H)	4b (Rotura fase R)
1	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	11871,25	10575,16	12397,93	10575,16	10800,64
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4489,70	5986,27
2	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	11871,25	10575,16	12397,93	10575,16	10800,64
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4489,70	5986,27
3	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	11871,25	10575,16	12397,93	10575,16	10800,64
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4489,70	5986,27
Coef. Seguridad		1,5	1,5	1,5	1,2	1,2
Viento		Si	No	Si	No	No

7.4 Apoyo de amarre en ángulo fuerte ($\alpha = 60^\circ$)

7.4.1 Vano Corto (450 m)

Apoyo de Amarre de Ángulo Fuerte						
Hipótesis para Vano Corto (450 m).						
		1 (Viento)	2 (Hielo)	5 (H + V)	3 (Deseq.Tr. +H)	4b (Rotura fase R)
1	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	15985,53	17440,53	18882,83	17440,53	17777,01
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4444,25	5925,67
2	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	15985,53	17440,53	18882,83	17440,53	17777,01
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4444,25	5925,67
3	V (daN)	3347,19	7098,84	7098,84	7098,84	7098,84
	T (daN)	15985,53	17440,53	18882,83	17440,53	17777,01
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4444,25	5925,67
Coef. Seguridad		1,5	1,5	1,5	1,2	1,2
Viento		Si	No	Si	No	No

7.4.2 Vano Largo (650 m)

Apoyo de Amarre de Ángulo Fuerte						
Hipótesis para Vano Largo (650 m).						
		1 (Viento)	2 (Hielo)	3 (H + V)	3 (Deseq.Tr. +H)	4b (Rotura fase R)
1	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	17067,39	17583,90	19556,10	17583,90	17958,81
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4489,70	5986,27
2	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	17067,39	17583,90	19556,10	17583,90	17958,81
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4489,70	5986,27
3	V (daN)	4834,83	10253,88	10253,88	10253,88	10253,88
	T (daN)	17067,39	17583,90	19556,10	17583,90	17958,81
	L (daN)	0,00	0,00	0,00	4489,70	5986,27
Coef. Seguridad		1,5	1,5	1,5	1,2	1,2
Viento		Si	No	Si	No	No

8 Geometría de la cabeza

8.1 Distancias Conductor-Apoyo (fase-tierra)

Tipo de distancia	1		2		3	
	$D_{pe} (m)$	$D_{pp} (m)$	$k_1 \cdot D_{pe} (m)$	$k_1 \cdot D_{pp} (m)$	$D_{pf_{pe}} (m)$	$D_{pf_{pp}} (m)$
	2,60	3,00	2,20	2,53	1,20	1,38

Las distancias tipo 1, tipo 2 y tipo 3 mencionadas son recomendadas según las distintas condiciones climáticas a las que se encuentra expuesta la línea. Estas condiciones y las correspondientes distancias establecidas (tipo 1,2 o 3) se especifican en las tablas 1.5 y 1.6 del documento “*TOWER TOP GEOMETRY AND MID SPAN CLEARANCES*, Cigre, 2008.”

A continuación, se enumeran en las condiciones consideradas para el caso de Suecia.

1. Temperatura máxima de operación del conductor, ausencia de viento y hielo.
2. Temperatura mínima del conductor, ausencia de viento y hielo.
3. Otra temperatura, ausencia de viento y hielo.
4. Velocidad de viento baja, ausencia de hielo.
5. Velocidad del viento reducida, ausencia de hielo.
7. Carga de hielo característica o extrema, ausencia de viento.
9. Carga de hielo característica o extrema, velocidad del viento reducida.
23. Mínima temperatura, velocidad reducida, ausencia de hielo.
- E. Fórmula empírica propia del país, que tiene en cuenta las hipótesis de carga.

Condiciones de carga de los conductores y distancias asociadas					
Condición de Carga	Temperatura (°C)	Carga de hielo	Velocidad media de viento (m/s)	Presión del viento (Pa)	Tipo de distancia
1	75	-	-	-	1
2	-50/-25	-	-	-	1
3	15	-	-	-	1
4	15	-	-	150	2
5	15	-	-	500	3
7	0	Extrema	-	-	3
9	0	Extrema	-	500	3
23	-30/-5	-	-	500	2
E	-	Extrema	-	-	E

También se exponen condiciones climáticas cuyas distancias no están tabuladas, sino que requiere de cálculo con la fórmula empírica recomendada propia del país. En la siguiente tabla se exponen todas las correspondencias entre condiciones ambientales de carga de los conductores y distancias.

No se ha considerado el caso de conductores con cargas distintas de hielo, ya que la fórmula empírica propia de Suecia propone una solución gráfica para estos casos que no está disponible en el documento.

Posteriormente, las distancias entre fases y entre fase y tierra obtenidas con la fórmula empírica, han de ser como mínimo 1.15 veces mayor que las distancias fase tierra obtenidas de la tabla anterior para las distintas hipótesis.

8.2 Distancias entre conductores (fase-fase)

Para el cálculo de las distancias entre conductores similares habrá que hacer distinción según la posición relativa de los conductores:

- Configuración horizontal:

La separación horizontal entre conductores ha de ser $c_{min} = h$ suponiendo carga de hielo uniforme en ambos conductores, donde h queda definido según la fórmula:

$$h = k_c \cdot \sqrt{f + l_{ins}} + k \cdot U_s + b$$

- Configuración vertical:

La separación vertical entre conductores ha de ser $c_{min} = v$ suponiendo carga de hielo uniforme en el conductor superior y ausencia de hielo en el inferior, donde v queda definido según la fórmula:

$$v = (k_v \cdot \Delta f + \Delta l_{ins}) + k \cdot U_s + b$$

- Configuración angular:

La componente horizontal h_c de la separación oblicua (c_{min}) ha de ser determinado en función de la componente vertical V_c , h y v y viceversa, cumpliéndose las siguientes fórmulas:

$$h_c = h \cdot \sqrt{1 - (v_c/v)^2}$$

$$v_c = v \cdot \left[1 - (h_c/h)^2 \right]$$

Dado que la línea a diseñar posee un único circuito, las disposiciones posibles serán:

- Horizontal o Capa.
- Vertical o Bandera.
- Tresbolillo.

En función de la disposición elegida será necesario calcular las distancias para una configuración u otra.

La disposición vertical o bandera se utiliza en corredores estrechos. Este requisito no parece necesario según nuestras condiciones, por lo que no se utilizará esta disposición.

La línea discurrirá por zona C, esto es, situada a una altura superior a 1000 m sobre el nivel del mar, esto, unido a la latitud de Suecia, hace que se esperen condiciones climatológicas adversas, por lo que interesará minimizar la altura de los apoyos.

Teniendo esto en cuenta, se elegirá la **disposición horizontal o en capa**, con la que se consiguen unas solicitaciones menores.

De entre los posibles, el apoyo a utilizar será en **celosía**.

Una vez elegida la disposición, la distancia entre conductores a calcular será la horizontal.

8.2.1 Configuración horizontal:

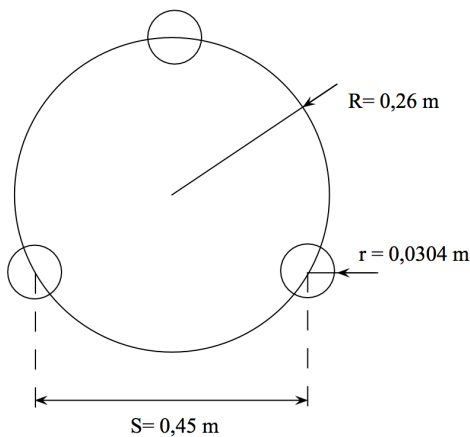
La separación horizontal entre conductores ha de ser $c_{min} = h$, suponiendo carga de hielo uniforme en ambos conductores, donde h queda definido según la fórmula:

$$h = k_c \cdot \sqrt{f + l_{ins}} + k \cdot U_s + b$$

Siendo:

- k_c es un factor para la configuración horizontal, y vale 0,45 (-)
- f es la flecha del conductor con carga de hielo uniforme y sin viento (m)
- l_{ins} es la longitud media del conjunto de aisladores de suspensión ortogonal a la dirección de la línea (m).
- k es un coeficiente de valor 0,007 para la separación fase-fase (-)
- U_s es la tensión más elevada del sistema (kV)
- b es el diámetro exterior del haz de subconductores (m):

- Cálculo del diámetro exterior del haz de subconductores (b):



$$R = \frac{s}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} = \frac{0,45}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} = 0,26 \text{ m}$$

$$b = 2 \cdot R = 0,52 \text{ m}$$

Esta distancia h será distinta según el tipo de apoyo utilizado (suspensión o amarre) y la longitud del vano. Se distingue entre dos longitudes de vano:

1) Vano corto: 450 m

La flecha del conductor con carga de hielo uniforme y sin viento será:

$$f = \frac{a^2}{8 \cdot h} = \frac{a^2}{8 \cdot \frac{T_{1,H}}{P_{hielo} + P_{cond}}} = \frac{450^2}{8 \cdot \frac{5813,51}{3,741}} = 16,284 \text{ m}$$

- **Apoyo en suspensión:** ($l_{ins} = 5 \text{ m}$)

$$h = 0,45 \cdot \sqrt{16,284 + 5} + 0,007 \cdot 420 + 0,52 = 5,536 \text{ m}$$

- **Apoyo de amarre:** ($l_{ins} = 6 \text{ m}$)

$$h = 0,45 \cdot \sqrt{16,284 + 6} + 0,007 \cdot 420 + 0,52 = 5,584 \text{ m}$$

2) Vano largo: 650 m

La flecha del conductor con carga de hielo uniforme y sin viento será:

$$f = \frac{a^2}{8 \cdot h} = \frac{a^2}{8 \cdot \frac{T_{2,H}}{P_{hielo} + P_{cond}}} = \frac{650^2}{8 \cdot \frac{5861,30}{3,741}} = 33,707 \text{ m}$$

- **Apoyo en suspensión:** ($l_{ins} = 5 \text{ m}$)

$$h = 0,45 \cdot \sqrt{33,707 + 5} + 0,007 \cdot 420 + 0,52 = 6,260 \text{ m}$$

- **Apoyo de amarre:** ($l_{ins} = 6 \text{ m}$)

$$h = 0,45 \cdot \sqrt{33,707 + 6} + 0,007 \cdot 420 + 0,52 = 6,296 \text{ m}$$

A continuación, se comprueba que las distancias obtenidas de estos cálculos son mayores que 1.15 veces las distancias obtenidas en la tabla de condiciones de carga de los conductores para el caso considerado en la fórmula empírica (Carga de hielo)

Condición de carga 7 \rightarrow tipo de distancia 3: $D_{pfp_e} = 1,20 \text{ m}$

La menor distancia horizontal anteriormente calculada, se da para vanos cortos con apoyo en suspensión: $h = 5,536 \text{ m}$

Se comprueba como: $5,536 > 1,15 \cdot 1,20 \text{ m}$

8.3 Ángulo girado por la cadena de aisladores (ϕ_{aisl})

El cálculo del ángulo de oscilación de la cadena de aisladores, que es el ángulo que gira la cadena con respecto a su vertical, se ha obtenido para las diferentes hipótesis como:

$$\phi_{aisl} = \tan^{-1} \left(\frac{V_v \cdot n \cdot \phi_{cond} \cdot P_v + \frac{V_{ais}}{2}}{V_p \cdot n \cdot P_c + \frac{P_{ais}}{2}} \right)$$

y asumiendo que:

$$\begin{aligned} V_v \cdot n \cdot \phi_{cond} \cdot P_v &\gg \frac{V_{ais}}{2} \\ V_p \cdot n \cdot P_c &\gg \frac{P_{ais}}{2} \end{aligned}$$

se puede aproximar el cálculo como:

$$\phi_{aisl} = \tan^{-1} \left(\frac{V_v \cdot n \cdot \phi_{cond} \cdot P_v + \frac{V_{ais}}{2}}{V_p \cdot n \cdot P_c + \frac{P_{ais}}{2}} \right) \approx \tan^{-1} \left(\frac{V_v \cdot n \cdot \phi_{cond} \cdot P_v}{V_p \cdot n \cdot P_c} \right)$$

8.3.1 Vano corto

Se consideran las dos hipótesis que pueden dar lugar a un valor considerable del ángulo de oscilación de la cadena de aisladores.

1. **Hipótesis de viento:** En esta hipótesis el ángulo que oscila la cadena de aisladores se calcula como:

$$\phi_{aisl}^{viento} = \tan^{-1} \left(\frac{V_v \cdot n \cdot \phi_{cond} \cdot P_v}{V_p \cdot n \cdot P_c} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{2790,72}{3347,19} \right) = 39,82^\circ$$

2. **Hipótesis de hielo y viento:** En esta hipótesis el ángulo que oscila la cadena de aisladores se calcula como:

$$\phi_{aisl}^{viento\&hielo} = \tan^{-1} \left(\frac{V_v \cdot n \cdot \phi_{cond} \cdot P_v}{V_p \cdot n \cdot P_c} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1105,82}{7098,84} \right) = 8,85^\circ$$

Para realizar el diseño, se ha optado por coger la misma hipótesis con la que se han realizado el resto de cálculos: hielo y viento, pese a no ser la más desfavorable.

El ángulo de oscilación de la cadena de aisladores es:

$$\phi_{aisl}^{viento\&hielo} = 8,85^\circ$$

8.3.2 Vano largo

Se consideran las dos hipótesis que pueden dar lugar a un valor considerable del ángulo de oscilación de la cadena de aisladores.

1. **Hipótesis de viento.** En esta hipótesis el ángulo que oscila la cadena de aisladores se calcula como:

$$\phi_{aisl}^{viento} = \tan^{-1} \left(\frac{V_v \cdot n \cdot \phi_{cond} \cdot P_v}{V_p \cdot n \cdot P_c} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{4031,04}{4834,83} \right) = 39,82^\circ$$

2. **Hipótesis de hielo y viento.** En esta hipótesis el ángulo que oscila la cadena de aisladores se calcula como:

$$\phi_{aisl}^{viento\&hielo} = \tan^{-1} \left(\frac{V_v \cdot n \cdot \phi_{cond} \cdot P_v}{V_p \cdot n \cdot P_c} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1597,9}{10253,88} \right) = 8,85^\circ$$

Para realizar el diseño, se ha optado por coger la misma hipótesis con la que se han realizado el resto de cálculos: hielo y viento, pese a no ser la más desfavorable.

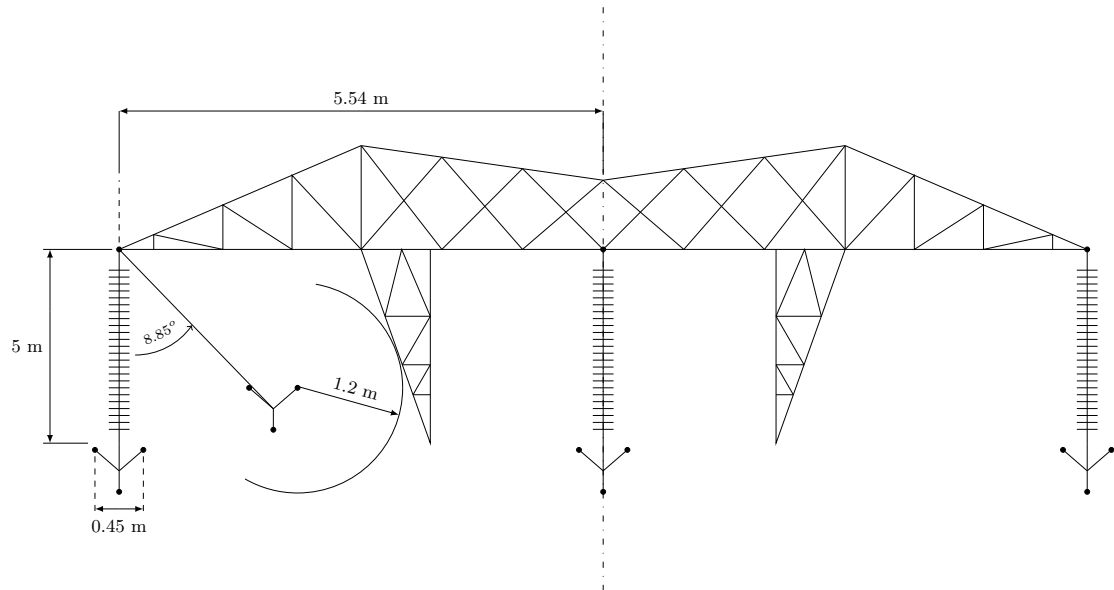
El ángulo de oscilación de la cadena de aisladores es:

$$\phi_{aisl}^{viento\&hielo} = 8,85^\circ$$

8.4 Diseño de la geometría de los apoyos

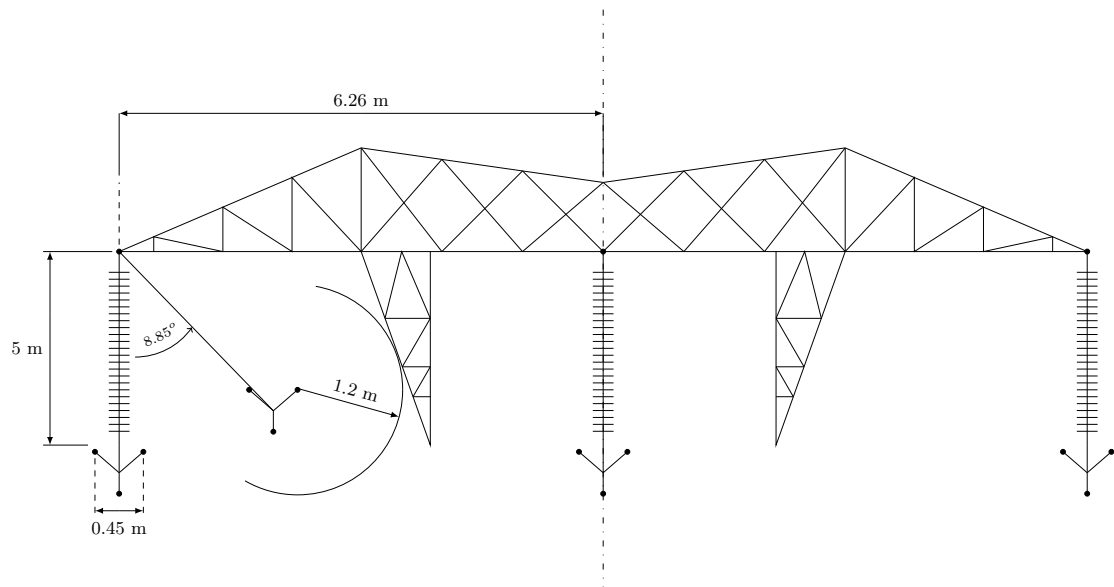
8.4.1 Apoyo en suspensión

8.4.1.1 Vano Corto (450 m)



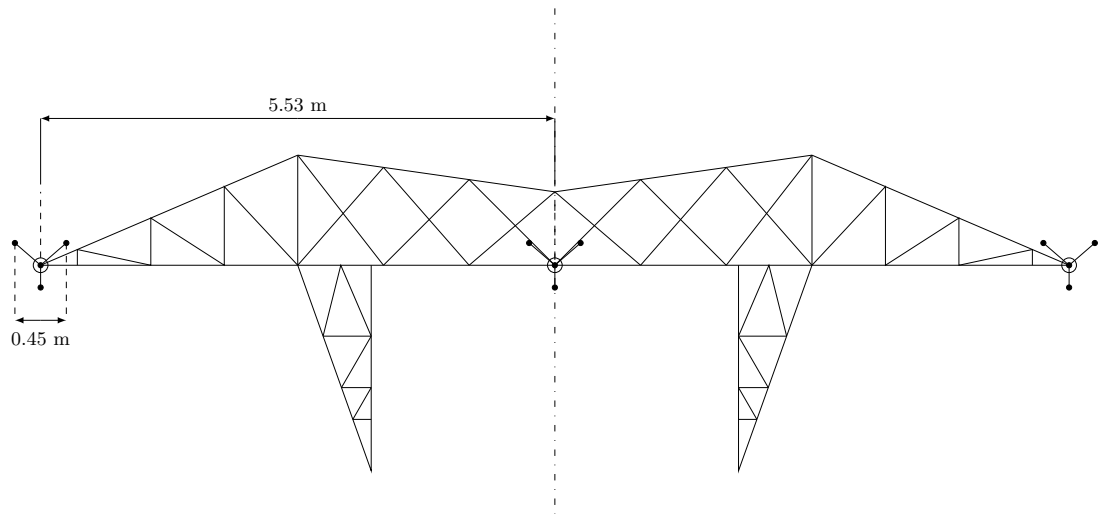
8.4.2 Apoyo en suspensión

8.4.2.1 Vano Largo (650 m)



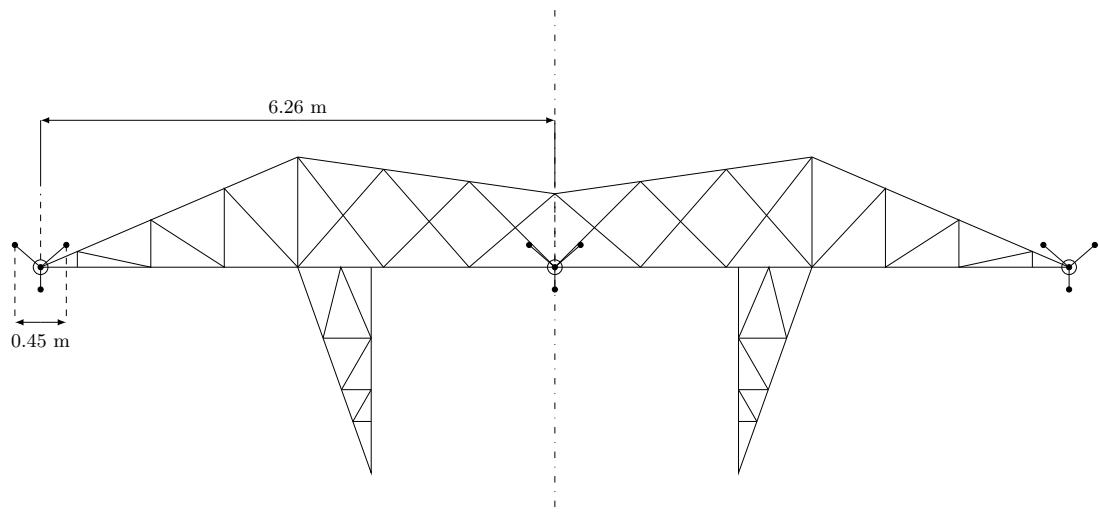
8.4.3 Apoyo de amarre

8.4.3.1 Vano Corto (450 m)



8.4.4 Apoyo de amarre

8.4.4.1 Vano Largo (650 m)



9 Altura de los apoyos

El cálculo de la altura mínima que han de presentar los apoyos ha de tener en consideración tanto las distancias al suelo requeridas por el reglamento por tratarse de una línea de categoría especial, como el cálculo de las flechas en las hipótesis más desfavorables.

9.1 Distancia mínima al terreno según RLAT

El reglamento de líneas de alta tensión (RLAT) establece que la mínima distancia al terreno en las hipótesis más desfavorables de flecha máxima es de 8,1 m para el caso de líneas de categoría especial (400 kV).

Se comprobará que se cumple esta distancia de los conductores a tierra bajo la hipótesis de flecha máxima, que podrá darse a una temperatura de 85°C, en condiciones de hielo, o sometida a la presión del viento.

9.2 Flecha máxima temperatura

Para una temperatura máxima de 75°C, (tal y como se especifica en la tabla 1.6 del documento “*TOWER TOP GEOMETRY AND MID SPAN CLEARANCES*, Cigre, 2008”), sin viento, se ha calculado la flecha máxima que presenta el conductor en estas condiciones para vano corto y vano largo a partir de la ecuación de cambio de condiciones, utilizando como condiciones iniciales:

Temperatura (°C)	Peso del Conductor (daN/m)	Every Day Stress (EDS)
15	1,756	18%

9.2.1 Vano corto

Para vano corto (450 m), se tiene una flecha máxima de:

$$f_{\max} = \frac{a^2}{8 \cdot h} = \frac{a^2}{8 \cdot \frac{T_{1,h}}{P_{\text{cond}}}} = \frac{450^2}{8 \cdot \frac{2408,73}{1,756}} = 18,45 \text{ m}$$

9.2.2 Vano largo

Para vano largo (650 m), se tiene una flecha máxima de:

$$f_{\max} = \frac{a^2}{8 \cdot h} = \frac{a^2}{8 \cdot \frac{T_{1,h}}{P_{\text{cond}}}} = \frac{650^2}{8 \cdot \frac{2573,93}{1,756}} = 36,03 \text{ m}$$

9.3 Flecha máxima hipótesis de hielo

Para una temperatura de 0°C, sin viento, y considerando el peso del manguito de hielo se ha calculado la flecha máxima que presenta el conductor en estas condiciones para vano corto y vano largo a partir de la ecuación de cambio de condiciones, utilizando de nuevo condiciones iniciales:

Temperatura (°C)	Peso del Conductor (daN/m)	Every Day Stress (EDS)
15	1,756	18%

9.3.1 Vano corto

Para vano corto (450 m), se tiene una flecha máxima de:

$$f_{\max} = \frac{a^2}{8 \cdot h} = \frac{a^2}{8 \cdot \frac{T_{1,h}}{P_{hielo} + P_{cond}}} = \frac{450^2}{8 \cdot \frac{5554,79}{3,741}} = 17,05 \text{ m}$$

9.3.2 Vano largo

Para vano largo (650 m), se tiene una flecha máxima de:

$$f_{\max} = \frac{a^2}{8 \cdot h} = \frac{a^2}{8 \cdot \frac{T_{2,h}}{P_{hielo} + P_{cond}}} = \frac{650^2}{8 \cdot \frac{5717,94}{3,741}} = 34,55 \text{ m}$$

9.4 Flecha máxima hipótesis de viento

A partir de la ecuación de cambio de condiciones, para una temperatura de 15°C, con una presión de viento de 68,00 kg/mm², y considerando únicamente el peso del conductor se ha calculado la flecha máxima que presenta el mismo en estas condiciones para vano corto y vano largo, utilizando como condiciones iniciales:

Temperatura (°C)	Peso del Conductor (daN/m)	Every Day Stress (EDS)
15	1,756	18%

9.4.1 Vano corto

Para vano corto (450 m), se tiene una flecha máxima de:

$$f_{\max} = \frac{a^2}{8 \cdot h} = \frac{a^2}{8 \cdot \frac{T_{1,v}}{\sqrt{(P_{viento})^2 + (P_{cond})^2}}} = \frac{450^2}{8 \cdot \frac{4080,45}{2,712}} = 16,83 \text{ m}$$

9.4.2 Vano largo

Para vano largo (650 m), se tiene una flecha máxima de:

$$f_{\max} = \frac{a^2}{8 \cdot h} = \frac{a^2}{8 \cdot \frac{T_{2,v}}{\sqrt{(P_{viento})^2 + (P_{cond})^2}}} = \frac{650^2}{8 \cdot \frac{4178,12}{2,712}} = 34,28 \text{ m}$$

9.5 Altura mínima final del apoyo

Considerando todo lo anterior, la altura mínima a la que se puede instalar el conductor con menor cota de toda la torre será como mínimo la suma de la distancia mínima establecida por el RLAT más la flecha de mayor longitud en la hipótesis que, a su vez, dé una flecha mayor. Este cálculo ha de hacerse tanto para los vanos cortos como para los largos.

1) Vano corto:

$$h_{\min} = d_{\min} + \max\{f_{\max}^{T^a}, f_{\max}^{hielo}, f_{\max}^{viento}\} = 8.1 + \max\{18.45, 17.05, 16.83\}$$

$$h_{\min} = 8.1 + 18,45 = 26,55 \text{ m}$$

2) Vano largo:

$$h_{\min} = d_{\min} + \max\{f_{\max}^{T^a}, f_{\max}^{hielo}, f_{\max}^{viento}\} = 8.1 + \max\{36.03, 34.55, 34.28\}$$

$$h_{\min} = 8.1 + 36,03 = 44,13 \text{ m}$$

Al encontrarnos en Suecia, la hipótesis de máxima temperatura del conductor será poco probable que se produzca debido a las bajas temperaturas existentes, pese a ello, al ser ésta hipótesis la que produce la flecha máxima, será la elegida para el correcto dimensionamiento de los apoyos.

10 Bibliografía

B2.06, W. G. (2008). *CIGRE TB 348 Tower Top Geometry and Mid Span Clearances*. CIGRE.

ECN. (2010). *Technical Data Sheet for ACSR/AW Conductors*. ECN.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2008). *REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES TÉCNICAS Y GARANTÍAS DE SEGURIDAD EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN*. BOE num.68.

11 Anexo

11.1 Código MATLAB para ecuación de cambio de condiciones

```
%% CENTRALES, LÍNEAS Y SUBESTACIONES, Diciembre 2/12/2016
% Ecuación de cambio de estado para líneas eléctricas
clc
% ACSR/AW Cardinal: Características mecánicas del conductor
E = 6700; % kg/mm^2 Módulo de Young
S = 547.3; % (mm^2) Sección
alpha = 20.2e-6; % (C^-1) Coeficiente de dilatación
Tmax = 154.3e3/10; % (daN) Tensión máxima del conductor
diametro = 30.4e-3; % (mm) Diámetro sin hielo
d_hielo = 65.53e-3; % (mm) Diámetro con manguito de hielo

%% Estado Inicial (Constante, 15°C, EDS = 18%Tmax)
a = 450; % Vano corto 450 y vano largo 650
P1 = 1.756; % Peso del conductor
t1 = 15; % Temperatura inicial
T1 = 0.18*Tmax; % EDS (18%)
K1 = a^2*P1^2/(24*T1^2)-alpha*t1-T1/(E*S);

%% Hipótesis 1. Tracción máxima viento (-15°C, sqrt(P_cond+P_v))
% 1. Condiciones iniciales
Presion_viento = 68; % Presión del viento (daN/m^2)
P_hielo = 0; % Peso del hielo (daN/m)
fprintf('\n1. Tracción máxima Viento\n')

% 2. Cálculos de resultantes viento, hielo etc
P_v = Presion_viento*diametro;
P2 = sqrt(P1^2+P_v^2);
fprintf('Resultado Hip.1: %.4f daN\n', P2)
t2 = -15;

% 3. Ecuación cambio de estado y coeficientes K2 y K3
K2 = (K1 + alpha*t2)*S*E;
K3 = a^2*P2^2*S*E/24;

y = [1 K2 0 -K3];
r = roots(y);

for i=1:3;
    if imag(r(i)) == 0
        T2 = real(r(i));
    end
end

% 4. Tensión en el estado final
fprintf('Hipótesis 1 T2: %.2f daN\n', T2)

%% Hipótesis 2. Tracción máxima hielo (-20°C, P=P_h+P_v)
% 1. Condiciones iniciales
Presion_viento = 0; % Presión del viento (daN/m^2)
t2 = -20; % Temperatura
fprintf('\n2. Tracción máxima Hielo\n')
```

```
% 2. Cálculos de resultantes viento, hielo etc
P_hielo = 0.36*sqrt(diametro*1000);
P2 = P_hielo + P1;
fprintf('Resultante Hip.2: %.4f daN\n', P2)

% 3. Ecuación cambio de estado y coeficientes K2 y K3
K2 = (K1 + alpha*t2)*S*E;
K3 = a^2*P2^2*S*E/24;

y = [1 K2 0 -K3];
r = roots(y);

for i=1:3;
    if imag(r(i)) == 0
        T2 = real(r(i));
    end
end

% 4. Tensión en el estado final
fprintf('Hipótesis 2 T2: %.2f daN\n',T2)

% flecha = a^2/(8*T2/P1);
% fprintf('Flecha hipótesis 2: %.2f\n',flecha)

%% Hipótesis 3. Tracción máxima hielo + viento
% 1. Condiciones iniciales
Presion_viento = 12.5; % Presión del viento
(daN/m^2)
P_hielo = 750*pi*(d_hielo^2-diametro^2)/4; % Peso del hielo (daN/m)
t2 = -20;
fprintf('\n3. Tracción máxima Hielo + Viento\n')

% 2. Cálculos de resultantes viento, hielo etc
P_v = Presion_viento*d_hielo; % Resultante viento
P = P_hielo + P1; % Resultante hielo +
conductor
P2 = sqrt(P^2 + P_v^2); % Resultante total
fprintf('Resultante Hip.3: %.4f daN\n', P2)

% 3. Ecuación cambio de estado y coeficientes K2 y K3
K2 = (K1 + alpha*t2)*S*E;
K3 = a^2*P2^2*S*E/24;

y = [1 K2 0 -K3];% Devuelve T2
r = roots(y);
for i=1:3;
    if imag(r(i)) == 0
        T2 = real(r(i));
    end
end

% 4. Tensión en el estado final
fprintf('Hipótesis 3 T2: %.2f daN\n',T2)
```

11.2 Código MATLAB para cálculo de flechas y cambio de condiciones

```
%% Hipótesis 4. Flecha máxima temperatura (75°C)
% 1. Condiciones iniciales
Presion_viento = 0; % Presión del viento (daN/m^2)
t2 = 75; % Tª máxima
a = [450 650]; % Vano corto 450 y vano largo 650
fprintf('\n4. Flecha máxima Temperatura\n')

% 2. Cálculos de resultantes viento, hielo etc
P_v = Presion_viento*diametro;
P2a = sqrt(P1^2+P_v^2);
fprintf('\nResultante Hip.4: %.4f daN\n', P2a)

% 3. Ecuación cambio de estado y coeficientes K1, K2 y K3
for j=1:2
    K1 = a(j)^2*P1^2/(24*T1^2)-alpha*t1-T1/(E*S);
    K2 = (K1 + alpha*t2)*S*E;
    K3 = a(j)^2*P2a^2*S*E/24;

    y = [1 K2 0 -K3]; % Devuelve T2
    r = roots(y);
    for i=1:3
        if imag(r(i)) == 0
            T2a = real(r(i));
        end
    end
end

% 4. Tracción para flecha máxima temperatura
fprintf('\nHipótesis fmax temperatura T2: %.2f N\n', T2a)

% 5. Flecha máxima
fmax_hiptempc = a(j)^2/(8*(T2a/P2a))

end

%% Hipótesis 5. Flecha máxima hielo
% 1. Condiciones iniciales
t2 = 0;
P_hielo = 750*pi*(d_hielo^2-diametro^2)/4;
a = [450 650];
fprintf('\n5. Flecha máxima Hielo\n')

% 2. Cálculo de resultantes viento, hielo etc
P_flechamax_hielo = P_hielo+P1;
fprintf('\nResultante Hip.5: %.4f daN\n', P_flechamax_hielo)

% 3. Ecuación cambio de estado y coeficientes K2 y K3
for j=1:2
    K1 = a(j)^2*P1^2/(24*T1^2)-alpha*t1-T1/(E*S);
    K2 = (K1 + alpha*t2)*S*E;
    K3 = a(j)^2*P_flechamax_hielo^2*S*E/24;

    y = [1 K2 0 -K3]; % Devuelve T2
    r = roots(y);
    for i=1:3
        if imag(r(i)) == 0
            T2a = real(r(i));
        end
    end
end
```

```

        end
    end
% 4. Tracción para flecha máxima hielo
fprintf('\nHipótesis fmax Hielo T2: %.2f N\n', T2a)

% 5. Flecha máxima
fmax_hip_hielo = a(j)^2/(8*(T2a/P_flechamax_hielo))

end

%% Hipótesis 6. Flecha máxima viento
% 1. Condiciones iniciales
P_vientofmax = 68*diametro; %(daN/m)
t2 = 15;
a = [450 650];
fprintf('\n6. Flecha máxima Viento\n')

% 2. Cálculo de resultantes viento, hielo etc
P_vientofmaxres = sqrt(P1^2+P_vientofmax^2)
fprintf('\nResultante Hip.6: %.4f daN\n', P_vientofmaxres)

% 3. Ecuación cambio de estado y coeficientes K2 y K3
for j=1:2
    K1 = a(j)^2*P1^2/(24*T1^2)-alpha*t1-T1/(E*S);
    K2 = (K1 + alpha*t2)*S*E;
    K3 = a(j)^2*P_vientofmaxres^2*S*E/24;

    y = [1 K2 0 -K3]; % Devuelve T2
    r = roots(y);
    for i=1:3
        if imag(r(i)) == 0
            T2a = real(r(i));
        end
    end
end
% 4. Tracción para flecha máxima viento
fprintf('\nHipótesis fmax Viento T2: %.2f N\n', T2a)

% 5. Flecha máxima
fmax_hip_viento = a(j)^2/(8*(T2a/P_vientofmaxres))

end

```