

Trabajo Fin de Grado

Potenciación de una línea eléctrica aérea de alta
tensión de 132 kV

Upgrading transmission capacity of a AC 132 kV
overhead power line

Autor

Adrián Trigo Revuelto

Director/es

Antonio Usón Sardaña

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2019-2020

Agradecimientos:

A mi tutor, Antonio.

Zaragoza, febrero de 2020.

POTENCIACIÓN DE UNA LÍNEA ELÉCTRICA AÉREA DE ALTA TENSIÓN DE 132 kV.

RESUMEN.

El presente documento es un estudio de cómo afecta la potenciación de una línea eléctrica a la estructura de la misma, quedando justificado mediante los cálculos pertinentes a lo largo de éste. En este trabajo, se parte de una línea eléctrica de primera categoría de 132 kV, objeto de un Proyecto Final de Carrera anterior, y se analizan los cambios que se producen en ella al subir la tensión de la misma a 220 kV, convirtiéndose así en una línea de categoría especial.

El trabajo consta de un documento principal (memoria) en el que se exponen los resultados y dos anexos justificativos.

En primer lugar, se realiza en la memoria una introducción de cuáles son las maneras posibles mediante las que se puede realizar la potenciación de una línea. Después se tiene un apartado de objetivos en el que se explica el punto de partida y cómo será la estructura del proyecto, exponiendo aquí el tipo de potenciación elegida en el desarrollo de este trabajo.

Seguidamente, se presentan los datos que se usan para el cálculo de los parámetros que sean oportunos, así como los resultados obtenidos de los cálculos eléctricos y los cálculos mecánicos realizados en los anexos.

Por último, el documento principal finaliza con un apartado de conclusiones en el que se muestran cuáles han sido los cambios derivados del proceso de la potenciación en la línea.

Después de este documento principal se encuentra el desarrollo íntegro de los dos anexos elaborados.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO.....	4
3. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN	5
3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA LÍNEA 132 kv.....	5
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS CABLES CONDUCTORES.	5
3.3. CARACTERÍSTICAS DEL CABLE DE TIERRA.....	6
3.4. CONSTANTES CALCULADAS EN EL PROYECTO INICIAL PARA LÍNEA DE 132 kv.	6
3.5. CONSTANTES AUXILIARES DE LA LÍNEA DE 132 kv PARA LAS ECUACIONES DE PROPAGACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA MISMA A PLENA CARGA.	6
3.6. CADENAS DE AMARRE.....	7
3.6. CADENAS DE SUSPENSIÓN.	7
4. CÁLCULOS ELÉCTRICOS.....	8
4.1. COMPROBACIÓN DE CÁLCULOS DE LÍNEA DE 132 kv.....	8
4.2. CÁLCULOS PARA LA LÍNEA DE 220 kv.....	11
5. CÁLCULOS MECÁNICOS.	25
5.1. COMPROBACIÓN DE CÁLCULOS DE LÍNEA DE 132 kv.....	33
5.1.1. ELECCIÓN DE APOYOS DE LA LÍNEA DE 132 kv.	36
5.2. CÁLCULOS PARA LA LÍNEA DE 220 kv.....	52
5.2.1. ELECCIÓN DE LOS APOYOS DE LA LÍNEA.	54
6. CONCLUSIONES.	64
7. BIBLIOGRAFÍA.	65
ANEXO I: EXPLICACIÓN DEL CÁLCULO NUMÉRICO DEL CAMPO ELÉCTRICO E.....	66
ANEXO II: CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS.....	72

1. INTRODUCCIÓN¹

El consumo de energía eléctrica se ha visto incrementado en gran medida estos últimos años como consecuencia de diversos factores que afectan a la sociedad actual. Debido a esto, cada año se instalan nuevos generadores, aumentando la potencia instalada. Esta energía ha de ser transmitida desde su generación hasta su consumo por algún camino. En primer lugar podría pensarse que este camino podrían ser las líneas eléctricas actuales que ya se encontraban instaladas antes de este aumento masivo de demanda. No obstante, si la energía total actual fuera transmitida por dichas líneas, éstas alcanzarían valores críticos de capacidad de conducción y de caídas de tensión, ya que se verían saturadas.

Una posible solución a este problema sería la construcción de nuevas líneas eléctricas aéreas que se encargaran de apoyar en las tareas de distribución y transporte de la energía, frente a la nueva demanda energética, a las líneas ya instaladas. Sin embargo, esto resulta poco interesante debido a la dificultad existente en la obtención de los derechos pertinentes que dicho proceso conlleva.

Teniendo en cuenta lo anterior, una solución que resulta factible es la mejora de las líneas aéreas existentes, de manera que, sin necesidad de realizar nuevos trazados, se pueda hacer frente a la demanda actual, aprovechando el máximo posible de la instalación. Es decir: hacer en las mismas las modificaciones oportunas para que sean capaces de transportar una potencia mayor, o dicho de otra forma: potenciar las líneas ya existentes. Esto representa una solución más barata que hacer nuevas líneas aéreas o que realizar el trazado de una nueva línea por vía subterránea.

Es importante considerar que la capacidad de transmisión de potencia de las líneas en régimen permanente se ve limitada por diversos factores, como son: las características del aparellaje, las condiciones ambientales, las caídas de tensión o la estabilidad del sistema.

Existen varias formas mediante las cuales se puede llevar a cabo la potenciación de una línea:

¹ Este apartado es un resumen de [1].

1. Potenciación mediante un aumento de la tensión.

La potencia transportada por la línea, para ser finalmente entregada al cliente, puede incrementarse si se consigue aumentar el nivel de tensión de la línea, manteniendo el nivel de corriente. Esto puede hacerse realizando las modificaciones oportunas en la línea ya existente, o mediante la sustitución de las antiguas líneas de corriente alterna de transmisión por nuevas líneas de corriente alterna compactas.

A lo largo de una línea eléctrica puede haber caídas de tensión que pueden causar, si se excede un determinado límite, una operación inadecuada en los equipos y daños en las diversas máquinas eléctricas. Dichas caídas de tensión son, prácticamente, directamente proporcionales al flujo de energía reactiva a través de la línea y a la reactancia que presenta ésta. Para poder controlar estas caídas de tensión, se instalan condensadores y reactancias. También puede ocurrir el caso contrario: que se den picos de sobretensión en la línea que excedan el máximo nivel de tensión para el cual ha sido diseñada dicha instalación, lo cual pueda dar lugar a cortocircuitos, interferencias, etc.

Es importante mantener unos niveles de tensión y corriente estables, evitando que estas caídas y picos de tensión se produzcan, ya que éstos son los que determinan qué potencia le será entregada al usuario.

2. Potenciación mediante un aumento de la densidad de corriente.

Cuando una determinada corriente circula a través de un conductor, aquella produce calor en éste, lo cual provoca que la temperatura de dicho conductor aumente. Para realizar una potenciación de una línea aumentando su densidad de corriente, se deberá hacer un estudio exhaustivo del índice térmico del conductor en cuestión, con objeto de ver si puede aumentarse, permitiendo una mayor circulación de corriente a través del mismo.

Cabe destacar que, debido a motivos económicos, la gran mayoría de las líneas eléctricas aéreas están diseñadas con conductores de aluminio con acero reforzado (ACSR; Aluminium Conductor Steel Reinforced).

Hay diferentes maneras de lograr el incremento del índice térmico mencionado:

2.1. Aumento de la temperatura de funcionamiento de los conductores ACSR a 100°C. Estos conductores pueden operar de forma continua a temperaturas cercanas a los 100°C

sin problema e incluso llegar a temperaturas cercanas a los 125°C en casos de emergencia, sin presentar ningún cambio notable en sus propiedades físicas.

2.2. Uso de índices dinámicos o condiciones ambientales menos conservadoras en lo que respecta a la velocidad del viento y a la temperatura ambiente.

2.3. Sustitución del conductor por uno más grande o por otro capaz de operar por encima de los 100°C.

Esta última opción puede resultar la más interesante debido a que podemos aumentar casi un 50% el índice térmico de un conductor reemplazando éste por otro del mismo tipo pero con el doble de área de aluminio. El inconveniente que esto presenta es que, al haber aumentado considerablemente la carga que ejercen los cables sobre los apoyos de la línea, será necesario un refuerzo o una sustitución de la estructura de la misma. Podemos solucionar dicho impedimento utilizando conductores HTLS (High Temperature Low Sag/Alta Temperatura Baja Flecha) en lugar de cables con un área de aluminio dos veces mayor. Éstos presentan la ventaja de que pueden instalarse de un diámetro aproximadamente igual a los iniciales pero, al contrario que los de aluminio con acero reforzado, pueden trabajar a temperaturas superiores a los 100°C sin presentar problema alguno.

3. Potenciación mediante el uso de líneas de CA para transmitir CC.

En la actualidad, el avance que están experimentando los dispositivos de potencia basados en los nuevos y poderosos semiconductores está dando lugar a la creación de tecnologías innovadoras. Éste es el caso de la HVDC (High Voltage Direct Current), transmisión de potencia de alta tensión en corriente continua, la cual puede ser aplicada a sistemas de transmisión y distribución de energía, presentando beneficios técnicos y económicos al postularse como alternativa a los sistemas de corriente alterna. Aprovechando las instalaciones de las líneas aéreas de alterna, e instalando en ambos extremos de la línea los convertidores oportunos (CA-CC en el punto más cercano a la generación para su inmediato transporte y CC-CA en el punto más cercano al consumo), podemos realizar dicho transporte de la energía en corriente continua.

Al transportar energía en continua, podemos aumentar la capacidad de transporte y, además, las pérdidas son notablemente menores que si se transporta la energía en corriente alterna, por lo que resulta realmente rentable cuando queremos transportar

grandes cantidades de energía. La potencia transportada puede aumentar hasta un 147% con unas pérdidas porcentuales en la línea un 68% menores.

Estas tres formas de potenciar una línea son las más comunes en la actualidad, quedando la última todavía con numerosas cuestiones por resolver y mejorar.

2. OBJETIVO.

En este proyecto se ha optado por la realización de una potenciación de una línea eléctrica aérea mediante el incremento de la tensión de la misma. La línea que se escoge como punto de partida es la diseñada por Ricardo Cordero como objeto de su Trabajo Fin de Grado titulado "Línea aérea alta tensión 132 kV, Alcañiz-Valderrobles", por la Universidad de Zaragoza [2].

Se realiza el estudio y el análisis, tanto para los cálculos eléctricos como para los cálculos mecánicos de la línea, de cómo afectaría el pasar de una línea de primera categoría de 132 kV, a una línea de categoría especial de 220 kV. Dicho estudio consiste en observar las consecuencias de ese aumento en la tensión manteniendo los mismos cables conductores y cable de tierra que presentaba el proyecto de partida, el mismo número de circuitos de la línea y el mismo número de conductores por fase. Todo ello se realiza de acuerdo a lo establecido en los apartados correspondientes del Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias (RLAT) [3][4].

Para la realización de los distintos cálculos se han empleado unas fórmulas distintas a las que empleó el autor del proyecto inicial, debido a que se ha considerado oportuno utilizar unas fórmulas más modernas.

El proyecto finaliza con un apartado de conclusiones donde se comparan y analizan los resultados expuestos a lo largo del documento.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN²

Se define en esta parte del documento los distintos datos que serán necesarios para el posterior desarrollo de los cálculos de la línea a 220 kV. Dichos datos están sacados del trabajo original sobre el cual se basa este proyecto, ya sean características de los elementos o cálculos de alguna constante que el autor realizó durante su trabajo para la línea de 132 kV.

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA LÍNEA 132 kV

Sistema: Corriente alterna trifásica.

Frecuencia: $f = 50$ Hz

Tensión nominal: $U_n = 132$ kV

Temperatura máxima conductor: 50 °C

Longitud de la línea: $l_{línea} = 35\ 540,56$ m

Número de circuitos: $n = 1$.

Número de conductores por fase: $n_{circ.} = 1$.

Tipo de conductor: 242-AL1/39-ST1A.

Tipo de cable de tierra: OPGW 34F42Z.

Zonas: A (entre apoyos 1-55) y B (entre apoyos 56-137).

Tipo de aislamiento: Vidrio.

Tipo de apoyos y material: Apoyos metálicos de celosía Ac. Galv.

Número de apoyos de suspensión: 92.

Número de apoyos de amarre: 45.

Disposición de los cables: tresbolillo.

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS CABLES CONDUCTORES.

Denominación: 242-AL1/39-ST1A (LA-280 HAWK).

Composición: 26 de 3,44 mm (Al) + 7 de 2,68 mm (Ac).

² Los datos presentados en este apartado están extraídos de [2].

Sección total: $S = 281,1 \text{ mm}^2$

Diámetro total: $d = 21,80 \text{ mm}$

Peso del cable: $p = 0,958 \text{ daN/m} = 0,978 \text{ kg/m}$

Módulo de elasticidad: $E = 7554 \text{ daN/mm}^2 = 75,54 \text{ GPa}$

Coefficiente de dilatación lineal: $\alpha = 18,9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Carga de rotura: $T_{rot} = 8456 \text{ daN}$

3.3. CARACTERÍSTICAS DEL CABLE DE TIERRA.

Denominación: OPGW 34F42Z.

Sección total: $S = 78,9 \text{ mm}^2$

Diámetro total: $d = 13,4 \text{ mm}$

Peso del cable: $p = 0,417 \text{ daN/m} = 0,426 \text{ kg/m}$

Módulo de elasticidad: $E = 11650 \text{ daN/mm}^2 = 116,50 \text{ GPa}$

Coefficiente de dilatación lineal: $\alpha = 17,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Carga de rotura: $T_{rot} = 5396 \text{ daN}$

3.4. CONSTANTES CALCULADAS EN EL PROYECTO INICIAL PARA LÍNEA DE 132 kV.

Intensidad máxima admisible: $I = 581 \text{ A}$

Resistencia eléctrica por km: $R_k = 0,119 \text{ } \Omega/\text{km}$

Reactancia media por km: $X_k = 0,414 \text{ } \Omega/\text{km}$

3.5. CONSTANTES AUXILIARES DE LA LÍNEA DE 132 kV PARA LAS ECUACIONES DE PROPAGACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA MISMA A PLENA CARGA.

$$\bar{A} = \bar{D} = 0,999 \angle 0,011^\circ$$

$$\bar{C} = 9,76 \cdot 10^{-5} \angle 90^\circ \text{ S}$$

$$\bar{B} = 15,323 \angle 73,92^\circ \text{ } \Omega$$

3.6. CADENAS DE AMARRE.

Cada cadena de amarre está compuesta por 10 elementos de vidrio templado de tipo caperuza y vástago con las siguientes características:

Denominación: U120BS.

Material: Vidrio templado.

Paso: 146 mm.

Diámetro: 255 mm.

Línea de fuga: 315 mm.

Carga de rotura: 120 kN

Norma de acoplamiento: 16A

Las características eléctricas del conjunto de aisladores, según CEI 383/1993, son las siguientes:

Tensión mantenida a frecuencia industrial en seco: 490 kV

Tensión mantenida a frecuencia industrial bajo lluvia: 345 kV

Tensión mantenida a impulso tipo rayo 1,2/50 micros: 760 kV

Longitud de la línea de fuga: 3150 mm.

Línea de fuga específica: 21,72 mm/kV

3.6. CADENAS DE SUSPENSIÓN.

Cada cadena de suspensión está compuesta por 10 elementos de vidrio templado de tipo caperuza y vástago con las siguientes características:

Denominación: U100BS.

Material: Vidrio templado.

Paso: 127 mm

Diámetro: 255 mm

Línea de fuga: 315 mm

Carga de rotura: 100 kN

Norma de acoplamiento: 16A

Las características eléctricas del conjunto de aisladores, según CEI 383/1993, son las siguientes:

Tensión mantenida a frecuencia industrial en seco: 440 kV

Tensión mantenida a frecuencia industrial bajo lluvia: 320 kV

Tensión mantenida a impulso tipo rayo 1,2/50 micros: 675 kV

Longitud de la línea de fuga: 3150 mm

Línea de fuga específica: 21,72 mm/kV

4. CÁLCULOS ELÉCTRICOS.

Este apartado se divide en dos partes importantes. En primer lugar, una comprobación de los cálculos eléctricos de la línea de 132 kV del proyecto inicial, complementada con los cálculos y gráficas pertinentes y, en segundo lugar, los cálculos eléctricos correspondientes a la línea de tensión de 220 kV.

4.1. COMPROBACIÓN DE CÁLCULOS DE LÍNEA DE 132 kV.

Inicialmente se realiza el cálculo de la potencia que puede ser transportada por la línea mediante la corriente máxima que puede circular por el conductor (intensidad máxima admisible). Ésta es la potencia máxima, calculada por criterio térmico. También se calcula el momento eléctrico para la posterior obtención de la longitud hasta la cual puede ser transportada dicha potencia máxima, sin que haya pérdidas por caída de tensión. Después de esto, se realiza el cálculo de la potencia que puede ser entregada al final de la línea, teniendo en cuenta la caída de tensión máxima permitida. Estos cálculos se realizan para distintos $\cos\varphi$: $\cos\varphi = 1$; $\cos\varphi = 0,95$; $\cos\varphi = 0,90$; $\cos\varphi = 0,85$; $\cos\varphi = 0,80$.

En este apartado se muestra el resultado del proceso explicado en el párrafo anterior, encontrándose recogido el desarrollo de los cálculos en el apartado 1.1. Cálculos para línea de 132 kV del anexo II complementario.

Las fórmulas que se usarán a lo largo del documento, tanto en este apartado de cálculos eléctricos como posteriormente en los mecánicos, provienen de [5].

1. Fórmula para el cálculo de la potencia máxima:

$$P_{\text{Máx.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I \cdot \cos\varphi}{1000000} \quad [\text{MW}] \quad (4.1)$$

$\cos\varphi$: Factor de potencia de la línea.

2. Fórmula para el cálculo del momento eléctrico:

$$M_e = \frac{u \cdot U_n^2}{R_k + X_k \cdot \tan\varphi} \quad [\text{W/km}] \quad (4.2)$$

donde:

u : caída de tensión en la línea. Para una línea de 132 kV, el RLAT establece que esta caída de tensión no ha de sobrepasar un valor máximo de 9,85 %. No obstante, se usa un valor de caída de tensión del 5% ya que es más restrictivo, siendo éste un valor de cálculo habitual usado por las compañías eléctricas.

TENSIÓN NOMINAL DE LA RED (U_n) KV	TENSIÓN MAS ELEVADA DE LA RED (U_s) KV
3	3,6
6	7,2
10	12
15	17,5
20*	24
25	30
30	36
45	52
66*	72,5
110	123
132*	145
150	170
220*	245
400*	420

* Tensiones de uso preferente en redes eléctricas de compañía.

Fig.1: Tabla 1. Tensiones nominales y tensiones más elevadas de la red [3].

Cálculo máxima caída de tensión permitida:

$$u = \frac{145 \cdot 10^3 - 132 \cdot 10^3}{132 \cdot 10^3} \cdot 100 = 9,85 \% \quad (4.3)$$

3. Fórmula para el cálculo de la longitud máxima hasta la cual se puede transportar potencia por criterio térmico (mediante la intensidad máxima admisible):

$$l_{\text{térmica}} = \frac{M_c \text{ [MW/km]}}{P_{\text{Máx.}} \text{ [MW]}} \quad (4.4)$$

Una vez se han obtenido estos valores, se procede al cálculo del rendimiento de la línea y a la caída de tensión real que se produce en la misma. Para ello, se ha de resolver inicialmente el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\bar{U}_{1F} = \bar{A} \cdot \bar{U}_{2F} + \bar{B} \cdot \bar{I}_{2F} \quad (4.5)$$

$$\bar{I}_{1F} = \bar{C} \cdot \bar{U}_{2F} + \bar{D} \cdot \bar{I}_{2F} \quad (4.6)$$

Éstas son las ecuaciones de propagación y funcionamiento de la línea en las que \bar{U}_{1F} representa la tensión de fase en el extremo del generador e \bar{I}_{1F} la corriente de fase en el extremo del generador.

La corriente de fase \bar{I}_{2F} cedida a la carga se obtiene con las fórmulas:

$$\bar{I}_{2F} = \frac{P_{\text{Máx}}}{3 \cdot \bar{U}_{2F} \cdot \cos\varphi} \quad (4.7)$$

$\varphi_{\bar{I}_{2F}} = \arccos(\varphi)$ ya que se toma como origen de fases la tensión \bar{U}_{2F} .

Resueltas estas ecuaciones, se obtiene la caída de tensión en la línea y su rendimiento de la siguiente manera:

Caída de tensión:

$$u = \frac{\bar{U}_{1F} - \bar{U}_{2F}}{\bar{U}_{1F}} \cdot 100 \quad (4.8)$$

Rendimiento de la línea:

$$P_1 = 3 \cdot \bar{U}_{1F} \cdot \bar{I}_{1F} \cdot \cos(\varphi_{\bar{U}_{1F}} - \varphi_{\bar{I}_{1F}}) \quad (4.9)$$

$$\eta = \frac{P_{M\acute{a}x}}{P_1} \cdot 100 \quad (4.10)$$

Los resultados obtenidos son:

Parámetros	cos φ = 1	cos φ = 0,95	cos φ = 0,9	cos φ = 0,85	cos φ = 0,8
$P_{2m\acute{a}x}$ (MW)	132,83	126,19	119,55	112,91	106,27
P_1 (MW)	136,88	130,40	123,77	117,11	110,46
η (%)	97,04	96,77	96,60	96,41	96,21
u (%)	3,75	6,92	8,06	8,84	9,45

Tabla 1: Potencias máximas, rendimientos y caídas de tensión para 132 kV.

4.2. CÁLCULOS PARA LA LÍNEA DE 220 kV.

El procedimiento de cálculo para la línea de 220 kV es exactamente igual que el realizado para la línea de 132 kV. La diferencia radica en que, para la de 220 kV se necesitan tener en cuenta una serie de detalles previos, los cuales son:

1. La distancia media geométrica (*DMG*) aumenta conforme se tienen líneas de tensión superior debido a que es necesario aumentar las distancias internas de seguridad en la estructura de los apoyos y, por tanto, es necesario escoger apoyos con armados de dimensiones mayores en cuanto a longitudes de brazos, distancia entre conductores, etc.

En cuanto al radio medio geométrico (RMG) cabe destacar que al ser la línea de un sólo circuito, éste coincide con el radio del conductor. No obstante, se aplica un factor de corrección de $e^{-1/4}$ para el cálculo de la inductancia kilométrica (RMG'), puesto que el cable está compuesto a base de pequeños hilos de aluminio y acero. No se aplica esta corrección para el cálculo de la capacitancia kilométrica ni para el cálculo del efecto corona puesto que al ser éstos fenómenos electrostáticos, hay que tener en cuenta el radio real.

No se realizó la comprobación para 132 kV teniendo en cuenta este detalle puesto que el autor del trabajo en cuestión usó para el cálculo fórmulas antiguas que no tenían en consideración esto y, por tanto, se creyó conveniente realizarlo de esta forma para una mejor comparación de los resultados.

2. Como consecuencia del punto anterior, es necesario calcular la nueva reactancia media por km y la nueva capacidad kilométrica, puesto que éstas dependen de la DMG y variarán con respecto a las del proyecto de partida. La resistencia kilométrica no depende de la DMG y por tanto se puede mantener la que se tiene como dato del trabajo inicial. Tampoco es objeto de cambio la intensidad máxima admisible que circula por el conductor, puesto que los cables conductores serán los mismos en el caso de ambas tensiones, como ya se menciona en el apartado anterior.

3. En la línea de 132 kV no se tiene efecto corona y, además, se consideran despreciables las pérdidas en los aisladores, lo que da una conductancia nula ($G = 0$ S/km). El caso de la línea de 220 kV es diferente puesto que, al ser una línea de categoría especial, puede aparecer efecto corona con mayor facilidad y no pueden despreciarse las pérdidas en los aisladores debido a su importancia en el cálculo de la conductancia.

4. El hecho de tener una nueva reactancia kilométrica, una nueva capacidad kilométrica y la aparición de un valor de conductancia no nulo, da lugar a tener unos valores de impedancia por kilómetro, y por tanto también de admitancia por kilómetro, distintos a los de la línea de 132 kV. Con estos nuevos valores, se calculan las nuevas constantes auxiliares de la ecuación de propagación y funcionamiento de la línea \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} y \bar{D} , para poder obtener los datos de caída de tensión, el rendimiento y el modelo en π de la línea. Cuando se obtienen dichas constantes, las fórmulas que se usan para esos últimos

cálculos son las mismas que para el caso de 132 kV, quedando desarrollados éstos en el apartado 1.2. Cálculos para 220 kV del anexo II complementario a la memoria.

En primer lugar, se realiza el cálculo de la nueva *DMG*. Para ello se parte de la serie TEJO del catálogo de apoyos MADE [6], el cual es el que usa el proyecto de partida para la elección de los apoyos correspondientes. Se escoge esta serie TEJO debido a que es la única disponible en este catálogo para líneas de tensión de 220 kV. Las otras series que se encuentran en el catálogo son para tensiones inferiores. Teniendo elegido esto, se pasa a observar cuál de los distintos armados de esta serie proporciona una *DMG* mayor y se toma ésta como dato para los cálculos necesarios, debido a que es la más restrictiva.

Para el cálculo de esta distancia se emplea la siguiente fórmula:

$$DMG = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}} \quad (4.11)$$

con:

Dab: Distancia directa entre fase a y fase b.

Dbc: Distancia directa entre fase b y fase c.

Dca: Distancia directa entre fase c y fase a.

Los datos correspondientes para el cálculo de las *DMGs*, sacados del catálogo en cuestión, son:

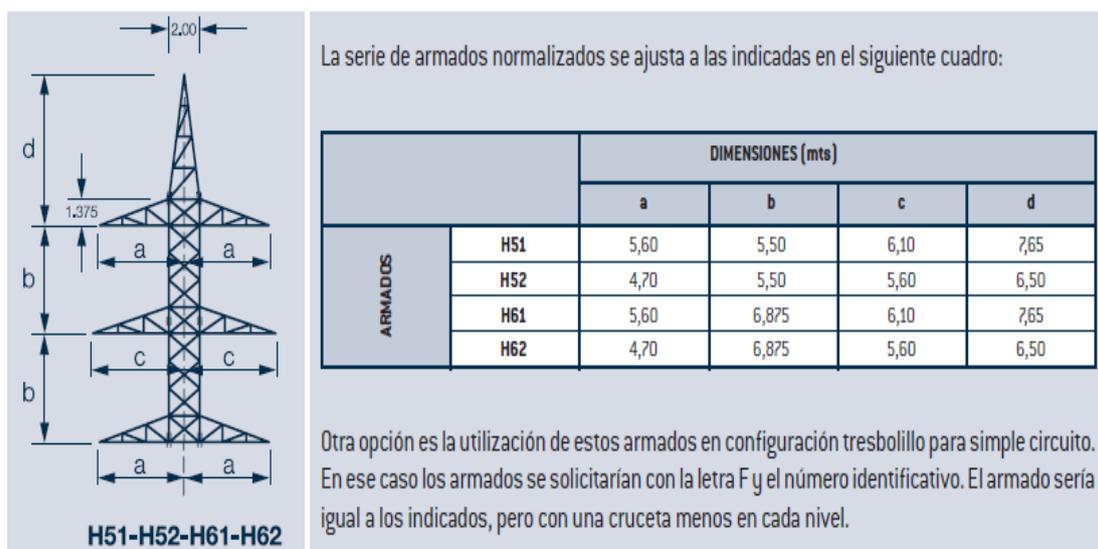


Fig.2 y Fig.3: Disposición de cables en los armados [6].

Se denomina fase a al conductor que se encuentra en la parte superior del armado, fase b al que se encuentra en el medio y fase c al que está en la parte inferior del mismo.

a) Armado F51.

$$D_{ab} = \sqrt{(5,60+6,10)^2 + 5,50^2} = 12,93 \text{ m}$$

$$D_{bc} = \sqrt{(5,60+6,10)^2 + 5,50^2} = 12,93 \text{ m}$$

$$D_{ca} = 5,50 \cdot 2 = 11,00 \text{ m}$$

$$DMG_{F51} = \sqrt[3]{12,93 \cdot 12,93 \cdot 11,00} = 12,25 \text{ m}$$

b) Armado F52.

$$D_{ab} = \sqrt{(4,70 + 5,60)^2 + 5,50^2} = 11,68 \text{ m}$$

$$D_{bc} = \sqrt{(4,70 + 5,60)^2 + 5,50^2} = 11,68 \text{ m}$$

$$D_{ca} = 5,50 \cdot 2 = 11,00 \text{ m}$$

$$DMG_{F52} = \sqrt[3]{11,68 \cdot 11,68 \cdot 11,00} = 11,45 \text{ m}$$

c) Armado F61.

$$D_{ab} = \sqrt{(5,60+6,10)^2 + 6,875^2} = 13,57 \text{ m}$$

$$D_{bc} = \sqrt{(5,60+6,10)^2 + 6,875^2} = 13,57 \text{ m}$$

$$D_{ca} = 6,875 \cdot 2 = 13,75 \text{ m}$$

$$DMG_{F61} = \sqrt[3]{13,57 \cdot 13,57 \cdot 13,75} = 13,63 \text{ m}$$

d) Armado F62.

$$D_{ab} = \sqrt{(4,70 + 5,60)^2 + 6,875^2} = 12,38 \text{ m}$$

$$D_{bc} = \sqrt{(4,70 + 5,60)^2 + 6,875^2} = 12,38 \text{ m}$$

$$D_{ca} = 6,875 \cdot 2 = 13,75 \text{ m}$$

$$DMG_{F62} = \sqrt[3]{12,38 \cdot 12,38 \cdot 13,75} = 12,82 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta estos datos anteriores, se concluye que la DMG que ha de usarse para los posteriores cálculos es 13,63 m, teniendo una relación de DMG entre las dos tensiones de:

$$DMG_{220 \text{ kV}} = 2,1913 \cdot DMG_{132 \text{ kV}}$$

Con este dato, se calcula la nueva X_k . Para ello es necesario calcular primero la inductancia de la línea:

$$L_a = L_b = L_c = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{DMG}{RMG'}\right) \quad (4.12)$$

donde:

μ : Permeabilidad magnética.

RMG' : Radio medio geométrico corregido.

$$RMG' = \sqrt[3]{R_a \cdot R_b \cdot R_c} \cdot e^{-1/4} = \sqrt[3]{R_a^3} \cdot e^{-1/4} = r_{\text{conductor}} \cdot e^{-1/4} \quad (4.13)$$

$$L_a = L_b = L_c = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{13,63}{10,9 \cdot 10^{-3} \cdot e^{1/4}}\right) = 1,48 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}} = 1,48 \cdot 10^{-3} \frac{\text{H}}{\text{km}}$$

Teniendo esta inductancia por kilómetro puede calcularse la reactancia media por kilómetro [3]:

$$X_k = L_k \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 1,48 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 0,465 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (4.14)$$

Una vez obtenido este valor, se procede al cálculo de los valores de la conductancia y de la susceptancia de la línea, mediante las fórmulas siguientes respectivamente:

$$C_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln\left(\frac{\text{DMG}}{\text{RMG}}\right)} \quad (4.15)$$

$$B_k = C_k \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad (4.16)$$

con ϵ_0 : Constante dieléctrica en vacío.

$$C_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{\ln\left(\frac{13,63}{10,9 \cdot 10^{-3}}\right)} = 7,80 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} = 7,80 \cdot 10^{-9} \frac{\text{F}}{\text{km}}$$

$$B_k = 7,80 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 2,45 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}}$$

Por último, antes de entrar en el cálculo de potencias máximas, longitudes, rendimientos y caídas de tensión como se hizo para 132 kV, se debe calcular el valor de la perditancia o conductancia. Ésta viene definida por las pérdidas ocasionadas por el efecto corona, en el caso de haberlo, y por las pérdidas que se producen en los aisladores.

$$G_k = G_{k_{\text{aisladores}}} + G_{k_{\text{efecto_corona}}} \quad (4.17)$$

En primer lugar, para el cálculo de la conductancia ha de hacerse un análisis de si existe efecto corona en la línea y por tanto hay pérdidas debido a este fenómeno. Para ello se han usado las siguientes fórmulas:

$$V_{Di} = \frac{n_{\text{circ.}}}{\beta} \cdot E_{ra} \cdot r \cdot \ln\left(\frac{DMG}{RMG}\right) \quad (4.18)$$

con:

$$\beta = \frac{1+(n-1) \cdot \frac{r}{R}}{n} \quad (4.19)$$

donde:

V_{Di} : Tensión disruptiva en condiciones ideales.

r : Radio del conductor.

E_{ra} : Rigidez dieléctrica del aire en condiciones normales.

R : Radio en torno al cual se distribuyen los conductores del haz.

$$V_{D_Peek} = m_c \cdot m_t \cdot \delta \cdot V_{Di} \quad (4.20)$$

Ésta última, es la fórmula de Peek, en la que:

m_c : Coeficiente superficial del material conductor empleado. Toma un valor de 1 para conductores nuevos, entre 0,93 y 0,98 para conductores viejos (con irregularidades en su superficie) y entre 0,83 y 0,87 para cables (formados por hilos).

m_t : Coeficiente medioambiental, siendo el aire más conductor cuando está más húmedo o más contaminado. Toma un valor de 1 cuando el aire es seco y un valor de 0,8 cuando el aire es húmedo (tormenta) o contaminado.

δ : Densidad relativa del aire, la cual depende de las condiciones ambientales y de la altura sobre el nivel del mar.

Aplicando estas fórmulas se obtienen los siguientes valores:

$$\beta = \frac{1+(1-1) \cdot \frac{10,9 \cdot 10^{-3}}{10,9 \cdot 10^{-3}}}{1} = 1$$

$$V_{Di} = \frac{1}{1} \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 10,9 \cdot 10^{-3} \cdot \ln\left(\frac{13,63}{10,9 \cdot 10^{-3}}\right) = 233190 \text{ V} = 233,19 \text{ kV}$$

Al aplicar la fórmula de Peek se toma el valor de δ igual al valor que se toma para la línea de 132 kV ($\delta=0,96$), debido a que la altitud sobre el nivel del mar no varía y la temperatura media del ambiente tampoco, al estar en el mismo emplazamiento. Cabe destacar también la elección de un valor de 0,93 para m_c ya que los conductores son viejos (se escoge el caso más restrictivo de los dos valores posibles).

Se realiza el cálculo de V_{D_Peek} tanto para el supuesto de tiempo seco ($m_t = 1$) como para el supuesto de tiempo húmedo ($m_t = 0,8$).

Para $m_t = 1$:

$$V_{D_Peek} = 1 \cdot 0,93 \cdot 0,96 \cdot 233,19 = 208190 \text{ V} = 208,19 \text{ kV}$$

Este es un valor de pico y de fase. Interesa tenerlo en términos de fase y valor eficaz para compararlo con el valor eficaz de la tensión máxima de fase de la línea y ver si produce efecto corona, así que:

$$V_{D_Peek_fase/v.ef} = \frac{208,19}{\sqrt{2}} = 147,21 \text{ kV}$$

$$147,21 > \frac{245}{\sqrt{3}} = 141,45 \text{ kV}$$

Como, en este caso, el valor de la fórmula de Peek es mayor que el valor de la tensión máxima de la línea, no se tiene efecto corona que nos produzca pérdidas cuando el tiempo está seco.

Para $m_t = 0,8$:

$$V_{D_Peek} = 0,8 \cdot 0,93 \cdot 0,96 \cdot 233,19 = 166550 \text{ V} = 166,55 \text{ kV}$$

$$V_{D_Peek_fase/v.ef} = \frac{166,55}{\sqrt{2}} = 117,77 \text{ kV}$$

$$117,77 < \frac{245}{\sqrt{3}} = 141,45 \text{ kV}$$

Al contrario de lo que sucedía para $m_t = 1$, en este caso sí habrá efecto corona, por tanto se han de calcular las pérdidas que éste provoca.

El cálculo de las pérdidas por efecto corona para tiempo húmedo se realiza de la siguiente manera:

$$P_c = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{RMG}} \cdot (V_D - V_m)^2 \cdot 10^{-5} \text{ [kW/km]} \quad (4.21)$$

con:

r y RMG en centímetros.

V_D : tensión disruptiva crítica eficaz fase-neutro en kV.

V_m : tensión más elevada fase-neutro en kV (valor eficaz).

$$P_c = \frac{241}{0,96} \cdot (50 + 25) \cdot \sqrt{\frac{1,09}{1,09}} \cdot (117,77 - 141,45)^2 \cdot 10^{-5} = 105,58 \text{ kW/km}$$

Por tanto la conductancia debida a las pérdidas causadas por el efecto corona en tiempo húmedo es:

$$G_{k_efecto_corona} = \frac{P_c}{U_f^2} = \frac{105,58 \cdot 10^3}{\left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}\right)^2} = 6,54 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}} \quad (4.22)$$

Para comprobar estos cálculos analíticos, se realizó un cálculo numérico mediante el método de los elementos finitos, del campo eléctrico existente alrededor del conductor más cercano a tierra para determinar si, efectivamente, dichos cálculos del efecto corona eran coherentes³. Este cálculo fue realizado mediante el programa informático FEMM 4.2.

³ Para mayor información de cuál ha sido el proceso de cálculo, consúltese el anexo 1.

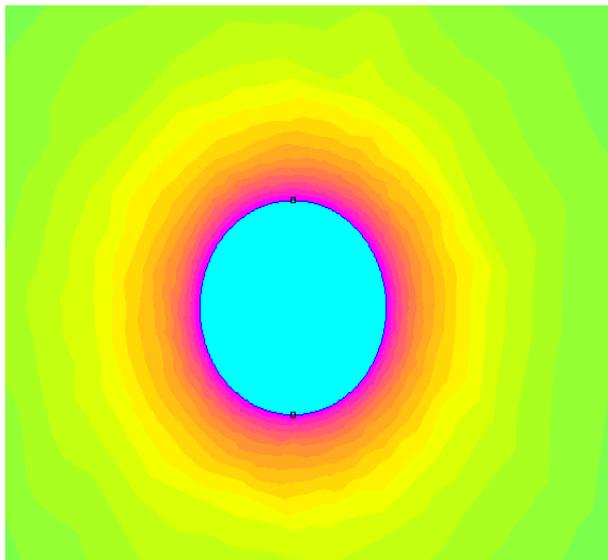


Fig.4: Campo eléctrico (E) alrededor del conductor.

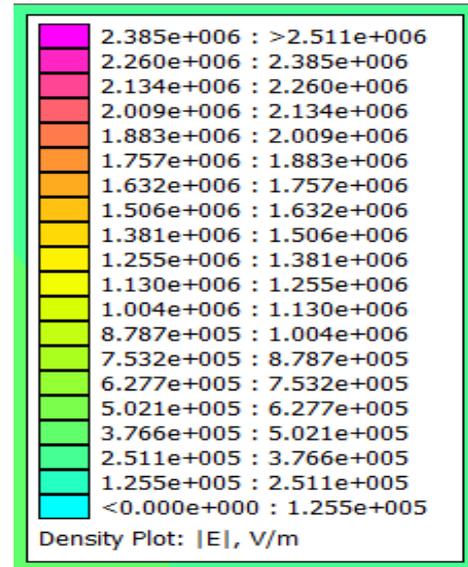


Fig.5: Valores de E.

Puede observarse que el mayor valor de campo eléctrico alrededor del conductor es de $2,511 \cdot 10^6$ V/m. Para que se produzca efecto corona, este valor ha de ser como mínimo de $2,6 \cdot 10^6$ V/m [7]. Pese a que en los cálculos se obtiene que sí se produce efecto corona y aquí, a priori, podría concluirse que no llega a producirse, cabe destacar que en el modelo del programa no se tienen cuenta diversos factores como son las condiciones climatológicas o la edad de los cables. Dicho esto puede concluirse finalmente que los resultados obtenidos del programa son coherentes con los cálculos realizados, puesto que, al considerar únicamente condiciones ideales de climatología y cables, el valor obtenido para el campo eléctrico se queda muy próximo al necesario para que se produzca efecto corona, con lo que al variar un poco estas condiciones, se producirá éste con toda seguridad.

Una vez realizado este análisis del efecto corona, se han de determinar las pérdidas y la conductancia debida a ellas en los aisladores. Ha de tenerse en cuenta para ello que las pérdidas para un aislador con tiempo seco varían entre 1 y 3 W, y para tiempo húmedo oscilan entre 5 y 20 W [8].

Se realiza en primer lugar un cálculo aproximado del número de aisladores que se tendrán, tanto para las cadenas de amarre, como para las cadenas de suspensión. Se parte del mismo tipo de aisladores que se tienen para la línea de 132 kV. Esto se debe a que, lo que interesa para hacer un primer cálculo de cuántos aisladores de cada tipo se

han de poner, es la línea de fuga de los mismos, y ésta no depende de la tensión, sino del nivel de contaminación de la zona en la que se encuentre situada dicha línea.

Nivel de contaminación	Ejemplos de entornos típicos	Línea de fuga específica nominal mínima mm/kV ¹⁾
I Ligero	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas sin industrias y con baja densidad de viviendas equipadas con calefacción. - Zonas con baja densidad de industrias o viviendas, pero sometidas a viento o lluvias frecuentes. - Zonas agrícolas ² - Zonas montañosas - Todas estas zonas están situadas al menos de 10 km a 20 km del mar y no están expuestas a vientos directos desde el mar ³ 	16,0
II Medio	<ul style="list-style-type: none"> - Zona con industrias que no producen humo especialmente contaminante y/o con densidad media de viviendas equipadas con calefacción. - Zonas con elevada densidad de viviendas y/o industrias pero sujetas a vientos frecuentes y/o lluvia. - Zonas expuestas a vientos desde el mar, pero no muy próximas a la costa (al menos distantes bastantes kilómetros)³. 	20,0
III Fuerte	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas con elevada densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con elevada densidad de calefacción generando contaminación. - Zonas cercanas al mar o en cualquier caso, expuestas a vientos relativamente fuertes provenientes del mar ³). 	25,0
IV Muy fuerte	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas, generalmente de extensión moderada, sometidas a polvos conductores y a humo industrial que produce depósitos conductores particularmente espesos. - Zonas, generalmente de extensión moderada, muy próximas a la costa y expuestas a pulverización salina o a vientos muy fuertes y contaminados desde el mar. - Zonas desérticas, caracterizadas por no tener lluvia durante largos periodos, expuestas a fuertes vientos que transportan arena y sal, y sometidas a condensación regular. 	31,0

¹ Línea de fuga mínima de aisladores entre fase y tierra relativas a la tensión más elevada de la red (fase-fase).
² Empleo de fertilizantes por aspiración o quemado de residuos, puede dar lugar a un mayor nivel de contaminación por dispersión en el viento.
³ Las distancias desde la costa marina dependen de la topografía costera y de las extremas condiciones del viento.

Fig.6: Tabla 14. Líneas de fuga recomendadas [3].

Esta instalación, tal y como menciona el título del proyecto de partida, está ubicada entre Alcañiz y Valderrobles, provincia de Teruel, por lo que nos encontramos en una zona I con un nivel de contaminación ligero, atendiendo a lo establecido en la tabla anterior.

Entonces, para saber el número de aisladores [8]:

$$n^{\circ} = \frac{\text{Línea de fuga específica nominal mínima} \left[\frac{\text{cm}}{\text{kV}} \right] \cdot U_{\text{más elevada de la red}} [\text{kV}]}{\text{Línea de fuga aislador} [\text{cm}]} \quad (4.23)$$

Así que:

Cadenas de amarre:

$$\text{número de aisladores} = \frac{1,6 \cdot 245}{31,5} = 12,44$$

Se cogen 13 aisladores.

Cadenas de suspensión:

$$\text{número de aisladores} = \frac{1,6 \cdot 245}{31,5} = 12,44$$

Se cogen 13 aisladores.

Se calculan con esto las pérdidas y la conductancia debidas a los aisladores, tanto para tiempo seco como para tiempo húmedo. Se realiza de igual forma para los dos tipos de cadenas:

$$P_{\text{perdida}} = n^{\circ}_{\text{aisladores}} \cdot n^{\circ}_{\text{apoyos_con_cadenas_tipo}} \cdot n^{\circ}_{\text{cadenas_tipo_por_apoyo}} \cdot P_{\text{perdida_por_aislador}} \quad (4.24)$$

Se tomará siempre el valor de potencia perdida por aislador que resulte más desfavorable; el mayor de los dos valores establecidos con anterioridad en la parte correspondiente del presente documento.

Tiempo seco ($m_t = 1$):

a) Cadenas de amarre:

$$P_{\text{perdida_a}} = 13 \cdot 45 \cdot 6 \cdot 3 = 10530 \text{ W} = 10,530 \text{ kW}.$$

b) Cadenas de suspensión:

$$P_{\text{perdida_s}} = 13 \cdot 92 \cdot 3 \cdot 3 = 10764 \text{ W} = 10,764 \text{ kW}.$$

$$P_{\text{perdida_total}} = P_{\text{perdida_a}} + P_{\text{perdida_s}} = 10,530 + 10,764 = 21,294 \text{ kW}$$

$$G_{\text{k_aisladores}} = \frac{P}{U_f^2} = \frac{21,294 \cdot 10^3}{\left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}\right)^2} = 3,71 \cdot 10^{-8} \frac{\text{S}}{\text{km}}$$

Tiempo húmedo ($m_t = 0,8$):

a) Cadenas de amarre:

$$P_{\text{perdida}_a} = 13 \cdot 45 \cdot 6 \cdot 20 = 70200 \text{ W} = 70,200 \text{ kW.}$$

b) Cadenas de suspensión:

$$P_{\text{perdida}_s} = 13 \cdot 92 \cdot 3 \cdot 20 = 71760 \text{ W} = 71,760 \text{ kW.}$$

$$P_{\text{perdida}_{\text{total}}} = P_{\text{perdida}_a} + P_{\text{perdida}_s} = 70,200 + 71,760 = 141,96 \text{ kW}$$

$$G_{k_{\text{aisladores}}} = \frac{P}{U_f^2} = \frac{141,96 \cdot 10^3}{\left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}\right)^2} = 24,76 \cdot 10^{-8} \frac{\text{S}}{\text{km}}$$

Con esto puede pasar a calcularse el valor de la conductancia total por fase tanto para tiempo seco como para tiempo húmedo:

Tiempo seco ($m_t = 1$):

$$G_k = 3,71 \cdot 10^{-8} + 0 = 3,71 \cdot 10^{-8} \frac{\text{S}}{\text{km}}$$

Tiempo húmedo ($m_t = 0,8$):

$$G_k = 24,76 \cdot 10^{-8} + 6,54 \cdot 10^{-6} = 6,79 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}}$$

Para los posteriores cálculos se toma el valor más desfavorable de entre estos dos:

$$G_k = 6,79 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}}$$

Correspondiente al supuesto de tiempo húmedo.

Una vez obtenidos estos valores, puede pasar a calcularse las nuevas constantes auxiliares de la ecuación de propagación y funcionamiento de la línea \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} y \bar{D} .

$$\bar{A} = \bar{D} = 0,9998 \angle 0,12^\circ$$

$$\bar{C} = 256,57 \cdot 10^{-6} \angle 19,90^\circ \text{ S}$$

$$\bar{B} = 17,06 \angle 75,65^\circ \Omega$$

Llegado este punto, se obtienen los nuevos valores de los parámetros que se obtuvieron para la línea de 132 kV y se representa las curvas de potencia para los distintos $\cos\phi$.

Parámetros	$\cos \phi = 1$	$\cos \phi = 0,95$	$\cos \phi = 0,9$	$\cos \phi = 0,85$	$\cos \phi = 0,8$
$P_{2\text{máx}}$ (MW)	221,39	210,32	199,25	188,18	177,11
P_1 (MW)	237,85	227,00	216,01	204,99	193,96
η (%)	93,08	92,65	92,24	91,80	91,31
u (%)	2,21	4,40	5,20	5,76	6,19

Tabla 2: Potencias máximas, rendimientos y caídas de tensión para 220 kV.

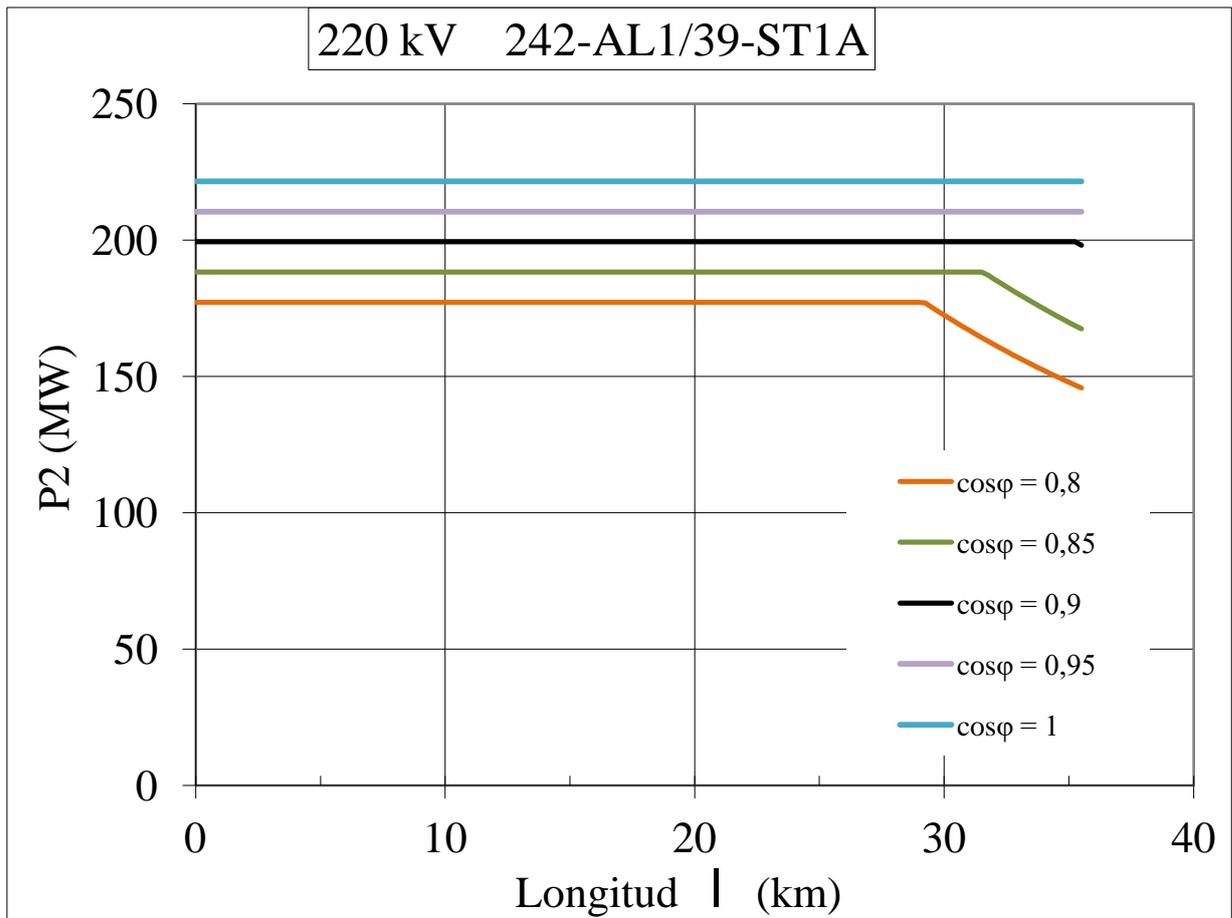


Fig.7: Curvas de potencia para 220 kV.

5. CÁLCULOS MECÁNICOS.

En este apartado se realiza el mismo proceso que se realizó en el apartado anterior con los cálculos eléctricos; primero se hace una comprobación de los cálculos para la línea de 132 kV y después se calcula la línea de 220 kV. Cabe destacar aquí que, al ser este proyecto un estudio y un análisis de cómo afecta a una línea en concreto la potenciación de la misma, y no el ejercicio de la potenciación en sí de la línea, se realizan los cálculos únicamente para un cantón. El cantón escogido es el más crítico que puede encontrarse a lo largo del trazado de la instalación puesto que, realizados los cálculos y analizando la situación del mismo, podrá extrapolarse con facilidad el procedimiento a cantones más sencillos. Si tratase este proyecto del ejercicio de la potenciación completa, se hubiese realizado el cálculo de todos los cantones de la línea mediante algún programa informático de cálculo.

El cantón que se escoge para ello es el cantón de la línea situado entre los apoyos 62 y 69. Esto es debido a que hay un cruzamiento, ubicado en el vano 68 y 69, con la carretera Nacional 420.

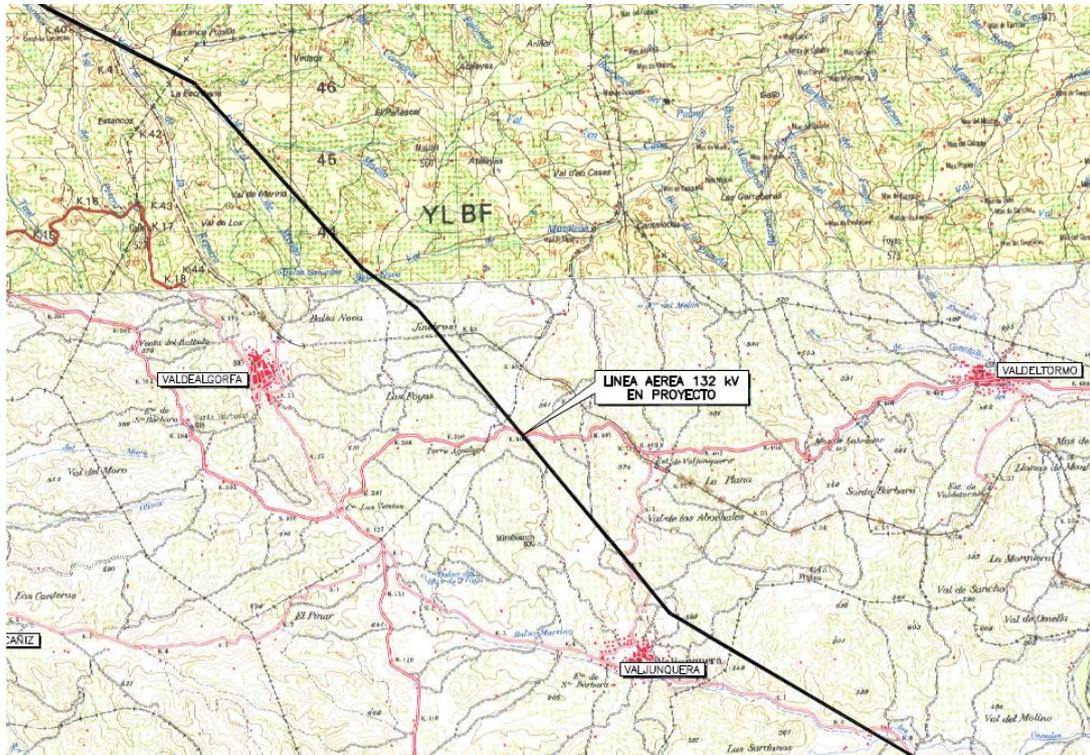


Fig. 8: Cruzamiento de la línea con carretera Nacional 420 [2].

Como, una vez obtenidos los cálculos de las tracciones de los cables según las distintas hipótesis de cálculo se han de elegir los apoyos, se necesitan conocer las tracciones que soportan los cables del cantón de la derecha y de la izquierda del apoyo 69 (apoyo de anclaje que cruza la carretera), por lo que también se calcula en cantón 69-77.

Estos dos cantones se encuentran en zona B, según la clasificación establecida por el reglamento, puesto que todos sus vanos se sitúan entre 500 y 1000 metros de altitud sobre el nivel del mar.

A estos efectos, el país se clasifica en tres zonas:

- Zona A: La situada a menos de 500 metros de altitud sobre el nivel del mar.
- Zona B: La situada a una altitud entre 500 y 1.000 metros sobre el nivel del mar.
- Zona C: La situada a una altitud superior a 1.000 sobre el nivel del mar.

Fig.9: Clasificación del país por zonas, según altitud [3].

Las hipótesis de cálculo, y las condiciones de las mismas, que se usan para la obtención de las tracciones que pueden soportar los cables vienen dadas por la Tabla 4 del apartado 3.2. Conductores, de la instrucción 07 del RLAT. Se establece como hipótesis de partida la hipótesis de hielo, la cual impone la ecuación de cambio de condiciones. Seguidamente, se comprueba que la tracción de la hipótesis de viento es menor que la impuesta en la ecuación de cambio de condiciones y si no, es la hipótesis de viento la que pasa a imponer la ecuación de cambio de condiciones habiéndose de comprobar posteriormente que cumple la de hielo. Después, si ha lugar, se hace lo propio con la hipótesis de hielo + viento, comprobándose las otras dos en caso de pasar a imponer ésta la ecuación de cambio de condiciones. Cuando se ha comprobado que todo cumple con los límites establecidos, se comprueba la hipótesis de tracción de cada día y la de vibraciones, siguiendo el proceso explicado. Una vez comprobado que todas las tracciones de las distintas hipótesis no sobrepasan un valor límite establecido, pueden calcularse las flechas máximas.

ZONAA			
Hipótesis	Temperatura (°C)	Sobrecarga Viento	Sobrecarga hielo
Tracción máxima viento	-5	Según el apartado 3.1.2 Mínimo 120 ó 140 km/h según la tensión de línea	No se aplica
ZONAB			
Hipótesis	Temperatura (°C)	Sobrecarga Viento	Sobrecarga hielo
Tracción máxima viento	-10	Según el apartado 3.1.2 Mínimo 120 ó 140 km/h según la tensión de línea	No se aplica
Tracción máxima de hielo	-15	No se aplica	Según el apartado 3.1.3
Tracción máxima hielo + viento (1)	-15	Según el apartado 3.1.2 Mínimo 60 km/h	Según el apartado 3.1.3.
ZONAC			
Hipótesis	Temperatura (°C)	Sobrecarga Viento	Sobrecarga hielo
Tracción máxima viento	-15	Según el apartado 3.1.2 Mínimo 120 ó 140 km/h según la tensión de línea	No se aplica
Tracción máxima de hielo	-20	No se aplica	Según el apartado 3.1.3
Tracción máxima hielo + viento (1)	-20	Según el apartado 3.1.2 Mínimo 60 km/h	Según el apartado 3.1.3.

(1)La hipótesis de tracción máxima de hielo + viento se aplica a las líneas de categoría especial y a todas aquellas líneas que la norma particular de la empresa eléctrica así lo establezca o cuando el proyectista considere que la línea pueda encontrarse sometida a la citada carga combinada.

Fig.10: Tabla 4. Condiciones de las hipótesis que limitan la tracción máxima admisible [3].

Las fórmulas usadas en este apartado para el desarrollo de las hipótesis pertinentes mencionadas son:

Vano ideal de regulación:

$$a_r = \left(\frac{\sum_{i=1}^n a_i^3}{\sum_{i=1}^n a_i} \right)^{1/2} \quad [\text{m}] \quad (5.1)$$

donde:

a_i : Vano entre dos apoyos consecutivos.

Tracción máxima de los cables:

$$T_{\text{máx}} = \frac{T_{\text{rotura}}}{3} \quad [\text{N}] \quad (5.2)$$

El RLAT establece en la ITC-LAT 07: Líneas aéreas con conductores desnudos; apartado 3.2. Conductores; 3.2.1. Tracción máxima admisible, que: "La tracción máxima de los conductores y cables de tierra no resultará superior a su carga de rotura, mínima dividida por 2,5, si se trata de conductores cableados, o dividida por 3, si se trata de conductores de un alambre, considerándoles sometidos a la hipótesis de sobrecarga de la tabla 4, en función de que la zona sea A, B o C" [3].

El coeficiente mínimo para este proyecto sería, según lo establecido en lo anterior, de 2,5, pero se escoge un coeficiente un poco más elevado para una mayor seguridad; 3.

Coeficientes de sobrecarga y fuerzas:

a) Hielo:

$$m_h = c \cdot \sqrt{d} \quad [\text{daN/m}] \quad (5.3)$$

donde:

c : Constante que depende de la zona de ubicación.

- Zona A: No se tendrá en cuenta sobrecarga alguna motivada por el hielo.
 - Zona B: Se considerarán sometidos los conductores y cables de tierra a la sobrecarga de un manguito de hielo de valor: $0,18 \times \sqrt{d}$ daN por metro lineal, siendo d el diámetro del conductor o cable de tierra en milímetros.
 - Zona C: Se considerarán sometidos los conductores y cables de tierra a la sobrecarga de un manguito de hielo de valor: $0,36 \times \sqrt{d}$ daN por metro lineal, siendo d el diámetro del conductor o cable de tierra en milímetros. Para altitudes superiores a 1500 metros, el proyectista deberá establecer las sobrecargas de hielo mediante estudios pertinentes, no pudiéndose considerar sobrecarga de hielo inferior a la indicada anteriormente.
- Los valores de las sobrecargas a considerar para cada zona podrán ser aumentados, si las especificaciones particulares de las empresas distribuidoras o de transporte responsables del servicio así lo estableciesen.

Fig.11: Sobrecarga debido al hielo, según la zona de ubicación [3].

con d en milímetros.

$$m = \frac{F_p + F_h}{F_p} = \frac{p \cdot g + m_h \cdot g}{p \cdot g} \quad (5.4)$$

donde:

F_p : Fuerza debida al peso del cable.

F_h : Fuerza debida al manguito de hielo.

b) Viento:

$$F_v = q \cdot d \left[\frac{\text{daN}}{\text{m}} \right] \quad (5.5)$$

con:

$$q = c_2 \cdot \left(\frac{V_v}{120} \right)^2 \left[\frac{\text{daN}}{\text{m}^2} \right] \quad (5.6)$$

donde:

q : Presión del viento.

c_2 : Constante que depende del diámetro del cable; 60 si $d \leq 16$ mm y 50 si $d > 16$ mm.

V_v : Velocidad del viento; mínimo 120 km/h si la línea es de primera, segunda o tercera categoría y mínimo 140 km/h si la línea es de categoría especial.

$$m = \frac{\sqrt{(p \cdot g)^2 + F_v^2}}{p \cdot g} \quad (5.7)$$

c) Hielo + Viento: Aplicable sólo a líneas de categoría especial, según el RLAT.

$$e = -\frac{d}{2} + \left(\frac{d^2}{4} + \frac{c_3 \cdot d^{1/2}}{\pi} \right)^{1/2} \quad [\text{m}] \quad (5.8)$$

$$d_{\text{incrementado}} = d + 2 \cdot e \quad [\text{m}] \quad (5.9)$$

donde:

c_3 : constante que depende de la zona de ubicación; 240 para zona B y 480 para zona C.

$$F_{v_total} = q \cdot d_{\text{incrementado}} \left[\frac{\text{daN}}{\text{m}} \right] \quad (5.10)$$

Aquí la q es exactamente lo mismo que para el caso de sólo viento, con la salvedad de que la velocidad del viento se toma siempre de 60 km/h como valor mínimo.

$$F_{h_total} = c \cdot \sqrt{d} \quad [\text{daN/m}] \quad (5.11)$$

con c igual que en el caso de hielo.

$$m = \frac{\sqrt{F_{v_total}^2 + (F_{h_total} + p \cdot g)^2}}{p \cdot g} \quad (5.12)$$

Constantes que establecen la ecuación de cambio de condiciones:

$$K = \frac{S \cdot E \cdot a_r^2 \cdot (p \cdot g)^2}{24} \quad [\text{N}^3] \quad (5.13)$$

donde:

g : Constante de gravitación universal en la Tierra.

$$A_{\sigma_2} = K \cdot \frac{m_1^2}{T_1^2} + \alpha \cdot (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot S \cdot E - T_1 \quad [\text{N}] \quad (5.14)$$

donde:

σ_2 : Temperatura en grados centígrados de la hipótesis de cálculo 2.

σ_1 : Temperatura en grados centígrados de la hipótesis de cálculo 1.

m_1 : Coeficiente m de sobrecarga de la hipótesis de cálculo 1.

T_1 : Tracción del cable impuesta en la hipótesis de cálculo 1.

$$B_{m_2} = K \cdot m_2^2 \quad [\text{N}^3] \quad (5.15)$$

donde:

m_2 : Coeficiente m de sobrecarga de la hipótesis de cálculo 2.

Fórmula para el cálculo de la tracción del cable:

$$T_2^2 \cdot (T_2 + A_{\sigma_2}) = B_{\sigma_2} \quad [\text{N}] \quad (5.16)$$

T_2 : Tracción del cable que resulta de la hipótesis de cálculo 2.

Fórmulas para el cálculo de flechas máximas:

Este cálculo se hace de acuerdo al apartado 3.2.3. Flechas máximas de los conductores y cables de tierra de la ITC-LAT 07.

3.2.3 Flechas máximas de los conductores y cables de tierra

De acuerdo con la clasificación de las zonas de sobrecarga definidas en el apartado 3.1.3, se determinará la flecha máxima de los conductores y cables de tierra en las hipótesis siguientes:

En zonas A, B y C:

- a) Hipótesis de viento.-Sometidos a la acción de su peso propio y a una sobrecarga de viento, según el apartado 3.1.2, para una velocidad de viento de 120 km/h a la temperatura de + 15°C.
- b) Hipótesis de temperatura.-Sometidos a la acción de su peso propio, a la temperatura máxima previsible, teniendo en cuenta las condiciones climatológicas y de servicio de la línea. Para las líneas de categoría especial, esta temperatura no será en ningún caso inferior a + 85°C para los conductores de fase ni inferior a + 50°C para los cables de tierra. Para el resto de líneas, tanto para los conductores de fase como para los cables de tierra, esta temperatura no será en ningún caso inferior a + 50°C.
- c) Hipótesis de hielo.-Sometidos a la acción de su peso propio y a la sobrecarga de hielo correspondiente a la zona, según el apartado 3.1.3, a la temperatura de 0°C.

En las líneas de categoría especial y de primera categoría, cuando por la naturaleza de los conductores y condiciones del tendido sea preciso prever un importante proceso de fluencia durante la vida de los conductores, será preciso tenerlo en cuenta en el cálculo de las flechas, justificando los datos que sirvan de base para el planteamiento de los cálculos correspondientes.

Fig.12: Consideraciones necesarias para hipótesis de Flechas Máximas [3].

Se realizan los cálculos para las tres hipótesis establecidas en la sección indicada y se escoge la mayor de las flechas obtenidas en cada una como flecha máxima que puede presentar el cable.

Cabe indicar que, tanto para la línea de primera categoría (132 kV) como para la de categoría especial (220 kV), la velocidad de viento que se considera en la hipótesis de flecha máxima debida al viento es de 120 km/h, tal y como se indica, aunque en la hipótesis complementaria de viento en categoría especial se use mínimo 140 km/h.

a) Parámetro de la catenaria:

$$h_2 = \frac{T_2}{m_2 \cdot p \cdot g} \text{ [m]} \quad (5.17)$$

b) Flecha:

$$f_{a_r} = \frac{a_r^2}{8 \cdot h_2} \text{ [m]} \quad (5.18)$$

b.1) Flecha proyectada (sólo para caso de viento):

$$\beta = \arctg\left(\frac{F_v}{p \cdot g}\right) \quad (5.19)$$

$$f_2' = f_2 \cdot \cos(\beta) \quad (5.20)$$

c) Fórmula para obtener flecha del vano de interés a partir del vano ideal de regulación:

$$f_{a_i} = f_{a_r} \cdot \left(\frac{a_i}{a_r}\right)^2 \quad [\text{m}] \quad (5.21)$$

5.1. COMPROBACIÓN DE CÁLCULOS DE LÍNEA DE 132 kV.

En este apartado es preciso subrayar que los cálculos se realizan para un vano ideal de regulación algo distinto al del proyecto de partida, por lo que los resultados tendrán un pequeño porcentaje de error entre los dos proyectos. Esto es debido a que en el trabajo inicial, el autor diseña una línea partiendo de que ésta no existe, para lo que establece un vano ideal de regulación de un cantón ficticio para sus cálculos y, una vez ha obtenido los valores para ese cantón en cuestión mediante un programa informático, el mismo programa determina dónde han de ir los distintos apoyos que componen la línea, quedando definidos los distintos cantones reales con sus vanos a las distancias más adecuada. El proceso realizado en este trabajo es distinto; aquí ya se conocen la posición de los apoyos y por tanto se sabe la longitud de los distintos vanos y de qué tipo es cada apoyo (alineación, anclaje, etc.), el tipo de apoyo elegido, etc. Con esto, se coge el cantón de interés, se calcula su vano ideal de regulación y se obtienen los resultados en consecuencia a ello.

La línea de 132 kV es una línea de primera categoría.

Los cálculos se realizan tanto para los cables conductores como para el cable de tierra y se encuentran desarrollados en el apartado 2.1 Cálculos para 132 kV, del anexo II complementario.

Cable conductor:

a) Cantón 62-69:

Hipótesis:	Hipótesis hielo	Hipótesis viento	Hipótesis TCD	Hipótesis CHS	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Tracciones (N):	28187	24045,75	15084,70	17852,41	20829,08	12536,24	26043,01

Tabla 3: Tracciones para el cable conductor en el cantón 62-69.

Hipótesis:	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Flechas (m):	2,74	4,56	4,09

Tabla 4: Flechas máximas para el cable conductor en el cantón 62-69.

b) Cantón 69-77:

Hipótesis:	Hipótesis hielo	Hipótesis viento	Hipótesis TCD	Hipótesis CHS	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Tracciones (N):	28187	24014,78	15400,57	17765,22	20879,64	12601,33	26093,80

Tabla 5: Tracciones para el cable conductor en el cantón 69-70.

Hipótesis:	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Flechas (m):	2,87	4,77	4,29

Tabla 6: Flechas máximas para el cable conductor en el cantón 69-70.

Cable de tierra:

a) Cantón 62-69:

Hipótesis:	Hipótesis hielo	Hipótesis viento	Hipótesis TCD	Hipótesis CHS	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Tracciones (N):	17987	16231,40	9393,49	11196,79	14336,73	7177,74	16806,90

Tabla 7: Tracciones para el cable de tierra en el cantón 62-69.

Hipótesis:	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Flechas (m):	1,74	3,74	3,78

Tabla 8: Flechas máximas para el cable de tierra en el cantón 62-69.

b) Cantón 69-77:

Hipótesis:	Hipótesis hielo	Hipótesis viento	Hipótesis TCD	Hipótesis CHS	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Tracciones (N):	17987	16229,94	9321,38	11070,36	14375,32	7174,27	16829,60

Tabla 9: Tracciones para el cable de tierra en el cantón 69-70.

Hipótesis:	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Flechas (m):	1,82	3,65	3,97

Tabla 10: Flechas máximas para el cable de tierra en el cantón 69-70.

5.1.1. ELECCIÓN DE APOYOS DE LA LÍNEA DE 132 kV.

En este apartado se comprueba que el apoyo 69 escogido en el proyecto del que parte este trabajo, se eligió de forma adecuada. Se comprueba este apoyo puesto que es el más restrictivo de los que conforman el vano que cruza la carretera nacional, al ser éste de alineación/anclaje y el otro (el apoyo 68) de alineación. Cabe destacar también que el hecho de que no se comprueben los dos apoyos es debido a que se han estudiado los cantones a la derecha y a la izquierda del apoyo 69 y no del 68, por estar aquel sometido a mayores solicitudes mecánicas. Además, simplemente se pretende dar en este apartado una mera confirmación de cómo eligió el autor del proyecto de partida los distintos apoyos, con lo que se ha considerado que es suficiente mostrar únicamente cómo se realiza en uno de los mismos, ya que para el resto se realiza de forma idéntica. Para ello, en primer lugar, se han de calcular tanto para los cables conductores como para el cable de tierra, los gravivanos de viento y de hielo y el eolovano. Una vez obtenido eso, pasa a calcularse los esfuerzos máximos que pueden soportar los cables en el apoyo en cuestión y se verifica que estos esfuerzos son inferiores a los indicados en el apoyo escogido del catálogo. El cálculo de dichos esfuerzos se hace de acuerdo a la tabla 8 del apartado 3.5.3. Hipótesis de cálculo de la instrucción 07 del RLAT.

El apoyo de catálogo que se escogió en el proyecto inicial para el apoyo 69 de la línea fue un ARCE 900 F42 16,20 CA del catálogo Made [6].

Se necesitan conocer también cuáles son los tipos de apoyos 68 y 70 (apoyos consecutivos a derecha e izquierda del 69, respectivamente) para poder obtener del catálogo las alturas necesarias para las distintos procesos de cálculo que se indicarán posteriormente.

Estos apoyos fueron escogidos del mismo catálogo y son:

Apoyo 68: OLMO 275 F51 4TA CS.

Apoyo 70: OLMO 150 F51 4T CS.

Fórmula para el cálculo del gravivano de viento:

$$a_{gv} = \frac{a_1 + a_2}{2} + \left(\pm \frac{T_{m\acute{a}x.}}{m \cdot p \cdot g} \cdot \frac{d_1}{a_1} \pm \frac{T_{m\acute{a}x.}}{m \cdot p \cdot g} \cdot \frac{d_2}{a_2} \right) \text{ [m]} \quad (5.23)$$

con:

m : Sobrecarga debida al viento, resultante de la hipótesis en cuestión.

Fórmula para el cálculo del eolovano:

$$a_{gh} = \frac{a_1 + a_2}{2} \text{ [m]} \quad (5.24)$$

El cálculo de los esfuerzos correspondientes se encuentra desarrollado en el apartado

2.1.2 Cálculo de esfuerzos en el apoyo 69, del anexo.

a) CÁLCULO DE GRAVIVANOS Y EOLOVANO EN CABLES CONDUCTORES.

$$\text{Tracción máxima de hielo: } \begin{cases} T_{\text{hielo}_{68-69}} = 28187 \text{ N} \\ T_{\text{hielo}_{69-70}} = 28187 \text{ N} \end{cases} ; T_{\text{m\acute{a}x_hielo}} = 28187 \text{ N}$$

$$\text{Tracción máxima de viento: } \begin{cases} T_{\text{viento}_{68-69}} = 24045,75 \text{ N} \\ T_{\text{viento}_{69-70}} = 24014,78 \text{ N} \end{cases} ; T_{\text{m\acute{a}x_viento}} = 24045,78 \text{ N}$$

Para el cálculo de las diferencias de alturas se tiene en cuenta la diferencia de cotas entre los apoyos (obtenidas de los anexos del proyecto de partida) y la altura útil del fuste de los mismos (sacadas del catálogo):

$$\underline{\text{Apoyo 68}} \begin{cases} \text{Cota: } 523,07 \text{ m} \\ \text{Altura útil: } 19,25 \text{ m} \end{cases}$$

$$\underline{\text{Apoyo 69}} \begin{cases} \text{Cota: } 534,93 \text{ m} \\ \text{Altura útil: } 16,20 \text{ m} \end{cases}$$

$$\text{Apoyo 70} \begin{cases} \text{Cota: 547,35 m} \\ \text{Altura útil: 17,25 m} \end{cases}$$

$$a_{gh} = \frac{218,51 + 223,97}{2} + \left(+ \frac{28187}{1,86 \cdot 0,978 \cdot 9,8} \cdot \frac{8,81}{218,51} - \frac{28187}{1,86 \cdot 0,978 \cdot 9,8} \cdot \frac{13,47}{223,97} \right)$$

$$a_{gh} = 189,90 \text{ m}$$

$$a_{gv} = \frac{218,51 + 223,97}{2} + \left(+ \frac{24045,78}{1,51 \cdot 0,978 \cdot 9,8} \cdot \frac{8,81}{218,51} - \frac{24045,78}{1,51 \cdot 0,978 \cdot 9,8} \cdot \frac{13,47}{223,97} \right)$$

$$a_{gv} = 188,30 \text{ m}$$

El primer término de dentro del paréntesis va con signo positivo debido a que el apoyo 68 está a menor altura que el 69 y el segundo término con signo negativo porque el apoyo 70 se encuentra a una altura mayor que éste.

$$a_e = \frac{218,51 + 223,97}{2} = 221,24 \text{ m}$$

b) CÁLCULO DE GRAVIVANOS Y EOLOVANO EN CABLE DE TIERRA.

$$\text{Tracción máxima de hielo: } \begin{cases} T_{\text{hielo}_{68-69}} = 17987 \text{ N} \\ T_{\text{hielo}_{69-70}} = 17987 \text{ N} \end{cases} ; T_{\text{máx_hielo}} = 17987 \text{ N}$$

$$\text{Tracción máxima de viento: } \begin{cases} T_{\text{viento}_{68-69}} = 16231,40 \text{ N} \\ T_{\text{viento}_{69-70}} = 16229,94 \text{ N} \end{cases} ; T_{\text{máx_viento}} = 16231,40 \text{ N}$$

$$a_{gh} = \frac{218,51 + 223,97}{2} + \left(+ \frac{17987}{2,55 \cdot 0,426 \cdot 9,8} \cdot \frac{8,81}{218,51} - \frac{17987}{2,55 \cdot 0,426 \cdot 9,8} \cdot \frac{13,47}{223,97} \right)$$

$$a_{gh} = 187,75 \text{ m}$$

$$a_{gv} = \frac{218,51 + 223,97}{2} + \left(+ \frac{16231,40}{2,17 \cdot 0,426 \cdot 9,8} \cdot \frac{8,81}{218,51} - \frac{16231,40}{2,17 \cdot 0,426 \cdot 9,8} \cdot \frac{13,47}{223,97} \right)$$

$$a_{gv} = 185,72 \text{ m}$$

$$a_e = \frac{218,5 + 223,97}{2} = 221,24 \text{ m}$$

c) ESFUERZOS EN APOYO 69.

Se ha de tener en cuenta para calcular los distintos esfuerzos según indique el RLAT, que el apoyo de estudio es de alineación/anclaje y que está situado en zona B, tal y como se ha mencionado con anterioridad en el presente documento.

Cable conductor (esfuerzos para un único conductor):

Hipótesis:	Viento	Hielo	Desequilibrio de tracciones	Rotura de conductores
F. verticales (N)	1804,74	1820,08	1820,08	1820,08
F. Transversales (N)	2411,52	No aplica.	No aplica.	No aplica.
F. Longitudinales (N)	No aplica.	No aplica.	14093,5	28187
Momento torsor (Nm)	No aplica.	No aplica.	40871,15	No aplica.

Tabla 11: Esfuerzos para un único conductor; 132 kV.

Cable de tierra:

Hipótesis:	Viento	Hielo	Desequilibrio de tracciones	Rotura de conductores
F. verticales (N)	775,34	783,82	783,82	783,82
F. Transversales (N)	1778,77	No aplica.	No aplica.	No aplica.
F. Longitudinales (N)	No aplica.	No aplica.	14093,5	28187
Momento torsor (Nm)	No aplica.	No aplica.	40871,15	No aplica.

Tabla 12: Esfuerzos para cable de tierra; 132 kV.

d) JUSTIFICACIÓN DEL APOYO ESCOGIDO.

En primer lugar, lo que ha de comprobarse es que se ha escogido bien el armado del apoyo. Se escogió para el proyecto inicial un apoyo ARCE del catálogo de MADE con un armado F42 [6]. Para ello, es necesario conocer cuál es la distancia mínima entre los conductores del apoyo en cuestión y la distancia entre conductor y parte a tierra.

Las distancias obtenidas en dicho proyecto son [2]:

1. Separación mínima entre conductores:

Vano 68-69:

Separación entre conductores mínima exigida: 2,74 m

Vano 69-70:

Separación entre conductores mínima exigida: 2,40 m

Se usa el dato de 2,74 m, por ser éste el más desfavorable.

2. Distancia de los conductores a los apoyos.

El apartado 5.4.2 de la instrucción 7 del reglamento establece que la separación mínima entre conductores y sus accesorios en tensión y los apoyos no será inferior a D_{el} con un mínimo de 0,2 m, donde D_{el} , según tabla 15 del apartado 5.2 de la misma instrucción, En este caso $D_{el} = 1,20$ m:

Tensión más elevada de la red U_s (kV)	D_{el} (m)	D_{pf} (m)
3,6	0,08	0,10
7,2	0,09	0,10
12	0,12	0,15
17,5	0,16	0,20
24	0,22	0,25
30	0,27	0,33
36	0,35	0,40
52	0,60	0,70
72,5	0,70	0,80
123	1,00	1,15
145	1,20	1,40
170	1,30	1,50
245	1,70	2,00
420	2,80	3,20

Fig.14: Tabla 15. Distancias de aislamiento eléctrico para evitar descargas [3].

Ha de comprobarse que esa distancia se cumple cuando se produzca el máximo viento posible que haga que las cadenas de aisladores de suspensión se acerquen al apoyo, debido a que ésta será la situación en la cual los conductores se encuentren más cerca de las partes puestas a tierra. En este apoyo no hay cadenas de suspensión, sin embargo, es interesante el estudio de este fenómeno con objeto de evitar cambiar el apoyo entero si se prevé que en un futuro dicho apoyo pudiera albergar cadenas de suspensión.

$$D_{\text{mín_apoyo}} = a - l_c \cdot \text{sen}(\beta) \geq D_{el} \quad (5.25)$$

siendo:

a : Longitud del brazo del apoyo.

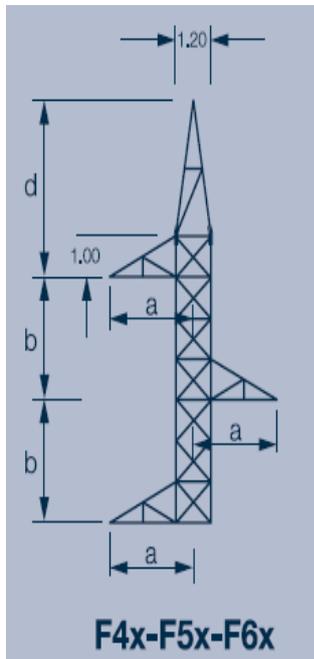
l_c : Longitud de cadena de aisladores, cuyo valor es 1,90 m [2].

β : Ángulo máximo de desviación de la cadena de aisladores debido a la fuerza del viento.

Se ha de verificar y escoger en consecuencia el armado que cumpla con esta condición.

Se selecciona el primero que lo cumpla.

En el catálogo de MADE, para esta serie ARCE, se tienen los siguientes armados para para una línea de simple circuito (armados F):



La denominación de apoyos sigue la siguiente pauta:

- Letra inicial: Designa la disposición: F para armados simple circuito, H para armados de doble circuito. E y G son iguales a F y H respectivamente sin cúpula de tierra.
- 1º número: Indica la distancia vertical entre fases.
- 2º número: Indica la combinación de crucetas y cúpula.

Tabla con dimensiones de armados estandarizados:

Altura FUSTE	Cotas (m)			
	a	b	c	d
F40	2,40	2,00	-	3,70
F42	2,90	2,00	-	4,30
F43	3,10	2,00	-	4,30
F50	2,40	2,50	-	3,70
F52	2,90	2,50	-	4,30
F53	3,10	2,50	-	4,30
F60	2,40	3,00	-	3,70
F62	2,90	3,00	-	4,30
F63	3,10	3,00	-	4,30
H20	2,40	2,00	2,40	3,70
H22	2,90	2,00	2,90	4,30
H23	3,10	2,00	3,10	4,30
H250	2,40	2,50	2,40	3,70
H252	2,90	2,50	2,90	4,30
H253	3,10	2,50	3,10	4,30
H30	2,40	3,00	2,90	3,70
H31	2,40	3,00	3,10	3,70
H32	2,90	3,00	3,10	4,30
H40	2,90	4,00	3,60	4,30
H41	3,10	4,00	3,60	4,30

Fig.15 y 16: Disposición armados para serie ARCE [6].

Comprobando en primer lugar el armado F40:

$$D_{\text{mín}_\text{apoyo}} = 2,40 - 1,90 \cdot \text{sen}(48,67) = 0,97 \text{ m} < 1,20 \text{ m}.$$

Con lo que éste no sirve.

Se comprueba ahora el siguiente armado; F42:

$$D_{\text{mín}_\text{apoyo}} = 2,90 - 1,90 \cdot \text{sen}(48,67) = 1,47 \text{ m} > 1,20 \text{ m}.$$

Este armado es el primero que puede usarse.

Tipo armado	$D_{\text{mín}_\text{apoyo}}$	$D_{\text{mín}_\text{requerida}} = D_{\text{el}}$	Cumple
F40	0,97 m	1,20 m	NO
F42	1,47 m	1,20 m	SÍ

Tabla 13: Representación del cumplimiento con las distancias mínimas de F40 y F42.

Ha de comprobarse ahora si este armado cumple con la distancia entre conductores establecida en el punto anterior. La distancia mínima entre conductores será la distancia en línea recta entre dos fases consecutivas, con lo cual:

$$D_{ab}=D_{bc}=\sqrt{(2,90+2,90)^2+2,00^2}=6,14 \text{ m}$$

$$D_{ca} = 4 \text{ m}$$

Ambas distancias son mayores a la distancia mínima reglamentaria que puede haber (2,74 m), con lo que se concluye que el armado F42 ha sido escogido correctamente.

Una vez verificado esto, se pasa a comprobar el tipo de apoyo. Para esto, hemos de ir a la tabla correspondiente del catálogo:

ARMADO	Esfuerzo	ARMADOS HAYA SIMPLE CIRCUITO								
		F40	F42	F43	F50	F52	F53	F60	F62	F63
ARCE 300	H1	3.120	3.090	3.045	2.895	2.865	2.835	2.670	2.640	2.610
	H2	3.570	3.540	3.495	3.480	3.450	3.420	3.390	3.360	3.330
	H4a	2.620	2.300	2.150	2.620	2.300	2.150	2.620	2.300	2.150
	H4b	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200
ARCE 630	H1	5.910	5.850	5.790	5.535	5.505	5.475	5.145	5.145	5.145
	H2	6.090	5.490	4.890	5.640	5.265	4.890	5.190	5.040	4.890
	H4a	2.620	2.300	2.150	2.620	2.300	2.150	2.620	2.300	2.150
	H4b	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200
ARCE 900	H1	9.000	9.000	9.000	8.550	8.550	8.550	8.100	8.100	8.100
	H2	9.690	9.690	9.690	9.000	9.000	890	8.250	8.250	8.250
	H4a	5.125	4.500	4.150	5.125	4.500	4.150	5.125	4.500	4.150
	H4b	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
ARCE 1400	H1	13.995	13.995	13.995	13.350	13.350	13.350	12.375	12.375	12.375
	H2	14.475	14.475	14.475	14.100	14.100	14.100	13.050	13.050	13.050
	H4a	5.125	4.500	4.150	5.125	4.500	4.150	5.125	4.500	4.150
	H4b	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
ARCE1800	H1	17.250	17.250	17.250	16.800	16.800	16.800	16.350	16.350	16.350
	H2	17.700	17.700	17.700	17.700	17.700	17.700	17.250	17.085	17.085
	H4a	5.125	4.500	4.150	5.125	4.500	4.150	5.125	4.500	4.150
	H4b	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000

Fig.17: Tipos de armados según esfuerzos horizontales [6].

Teniendo en cuenta la siguiente consideración , indicada en el mismo:

En el siguiente cuadro se indican los valores de resistencia característicos para cada apoyo y armado. Los valores indicados en el mismo hacen referencia a los siguientes esfuerzos:

1. **Esfuerzo H1:** Esfuerzo horizontal total (daN) aplicado al apoyo a la altura de la cruceta media del armado combinado con viento transversal de 120 km/h, con un coeficiente de seguridad de 1,5.
2. **Esfuerzo H2:** Esfuerzo horizontal total (daN) aplicado al apoyo a la altura de la cruceta media del armado sin viento, con un coeficiente de seguridad de 1,5.
3. **Esfuerzo H4a:** Esfuerzo longitudinal máximo (daN) de rotura de conductor aplicado en cualquier cruceta del armado, con un coeficiente de seguridad de 1,2.
4. **Esfuerzo H4b:** Esfuerzo longitudinal máximo (daN) de rotura de cable de tierra aplicado en cúpula, con un coeficiente de seguridad de 1,2.

Fig.18: Esfuerzos horizontales [6].

Se calcula los distintos esfuerzos (correspondientes con las hipótesis reglamentarias) necesarios para la elección del tipo de apoyo:

$$H1 = \sqrt{(F_{L\text{conductores}} + F_{L\text{cable_tierra}})^2 + (F_{t\text{conductores}} + F_{t\text{cable_tierra}})^2} \quad (5.26)$$

$$H1 = \sqrt{(0 + 0)^2 + (7234,55 + 1778,77)^2} = 9013,32 \text{ N} = 901,332 \text{ daN}$$

$$H2 = \sqrt{(F_{L\text{conductores}} + F_{L\text{cable_tierra}})^2 + (F_{t\text{conductores}} + F_{t\text{cable_tierra}})^2} \quad (5.27)$$

$$H2 = \sqrt{(0 + 0)^2 + (0 + 0)^2} = 0 \text{ N} = 0 \text{ daN}$$

$$H4a = \sqrt{F_{L1\text{conductor}}^2 + F_{t1\text{conductor}}^2} \quad (5.28)$$

$$H4a = \sqrt{\frac{42280,5^2}{3} + 0^2} = 14093,5 \text{ N} = 1409,35 \text{ daN}$$

$$H4b = \sqrt{F_{Lcable_tierra}^2 + F_{tcable_tierra}^2} \quad (5.29)$$

$$H4b = \sqrt{28187^2 + 0^2} = 28187 \text{ N} = 2818,7 \text{ daN}$$

Obtenidos estos valores, se verifica cada uno de los distintos tipos de apoyo para ver cuál es el primero que cumple con las indicaciones. Ha de comprobarse que todas las fuerzas horizontales del catálogo sea mayores o iguales que las calculadas. Se comienza por el apoyo tipo ARCE 300:

$$H1 = 901,332 \text{ daN} < 3090 \text{ daN}$$

$$H2 = 0 \text{ daN} < 3540 \text{ daN}$$

$$H4a = 1409,35 \text{ daN} < 2300 \text{ daN}$$

$$H4b = 2818,7 \text{ daN} > 2200 \text{ daN}$$

El apoyo ARCE 300, por tanto, no cumple.

Se observa ahora si lo hace el ARCE 630:

$$H1 = 901,332 \text{ daN} < 5850 \text{ daN}$$

$$H2 = 0 \text{ daN} < 5490 \text{ daN}$$

$$H4a = 1409,35 \text{ daN} < 2300 \text{ daN}$$

$$H4b = 2818,7 \text{ daN} > 2200 \text{ daN}$$

Éste tampoco es un apoyo válido.

Se comprueba el ARCE 900:

$$H1 = 901,332 \text{ daN} < 9000 \text{ daN}$$

$$H2 = 0 \text{ daN} < 9690 \text{ daN}$$

$$H4a = 1409,35 \text{ daN} < 4500 \text{ daN}$$

$$H4b = 2818,7 \text{ daN} < 3000 \text{ daN}$$

Este tipo de apoyo sí cumple con las especificaciones requeridas hasta el momento. Ahora ha de comprobarse si también lo hace con los valores de las fuerzas de las hipótesis individualmente.

Se calcula en primer lugar, para cada hipótesis, la relación existente entre los esfuerzos horizontales del cable de tierra y los cable conductores, y después, teniendo en cuenta los esfuerzos verticales, se comprueba que este tipo de apoyo cumple con los valores requeridos en las tablas:

				ARCE 900 F40				ARCE 900 F42				ARCE 900 F43						
	Verticales	R	L/T en % de H	F=ξH	Lc	Tc	Lt	Tt	F=ξH	Lc	Tc	Lt	Tt	F=ξH	Lc	Tc	Lt	Tt
Hipótesis 1ª 120 km/h viento transversal	Vc=650 Vt=500	R=0	L=0/T=100	F=9.000	0	3000	0	0	F=9.000	0	3000	0	0	F=9.000	0	3000	0	0
			L=10/T=90	F=9.000	300	2.700	0	0	F=9.000	300	2.700	0	0	F=9.000	300	2.700	0	0
			L=25/T=75	F=9.000	750	2.250	0	0	F=9.000	750	2.250	0	0	F=9.000	750	2.250	0	0
			L=50/T=50	F=8.940	1490	1490	0	0	F=8.940	1490	1490	0	0	F=8.940	1490	1490	0	0
			L=75/T=25	F=8.880	2220	740	0	0	F=8.790	2200	730	0	0	F=8.790	2200	730	0	0
			L=90/T=10	F=8.430	2.530	280	0	0	F=7.845	2.355	260	0	0	F=7.590	2.275	255	0	0
		L=100/T=0	F=8.430	2810	0	0	0	F=7.845	2615	0	0	0	F=7.575	2525	0	0	0	
		R=0,7	L=0/T=100	F=8.140	0	2.200	0	1.540	F=7.880	0	2.130	0	1.490	F=7.880	0	2.130	0	1.490
			L=10/T=90	F=8.140	220	1.980	155	1.385	F=7.880	215	1.915	150	1.340	F=7.880	215	1.915	150	1.340
			L=25/T=75	F=7.990	540	1.620	375	1.135	F=7.770	525	1.575	365	1.105	F=7.770	525	1.575	365	1.105
			L=50/T=50	F=7.840	1.060	1.060	740	740	F=7.590	1.025	1.025	720	720	F=7.590	1.025	1.025	720	720
			L=75/T=25	F=7.695	1.560	520	1.090	365	F=7.470	1.515	505	1.060	350	F=7.470	1.515	505	1.060	350
			L=90/T=10	F=7.530	1.830	205	1.280	145	F=7.325	1.780	200	1.245	140	F=7.270	1.770	195	1.240	135
		L=100/T=0	F=7.530	2.035	0	1.425	0	F=7.310	1.975	0	1.385	0	F=7.270	1.965	0	1.375	0	
		R=1	L=0/T=100	F=7.800	0	1.950	0	1.950	F=7.520	0	1.880	0	1.880	F=7.520	0	1.880	0	1.880
			L=10/T=90	F=7.800	195	1.755	195	1.755	F=7.520	190	1.690	190	1.690	F=7.520	190	1.690	190	1.690
			L=25/T=75	F=7.600	475	1.425	475	1.425	F=7.360	460	1.380	460	1.380	F=7.360	460	1.380	460	1.380
			L=50/T=50	F=7.480	935	935	935	935	F=7.240	905	905	905	905	F=7.240	905	905	905	905
	L=75/T=25		F=7.360	1.380	460	1.380	460	F=7.120	1.335	445	1.335	445	F=7.120	1.335	445	1.335	445	
	L=90/T=10		F=7.240	1.630	180	1.630	180	F=7.000	1.575	175	1.575	175	F=6.960	1.565	175	1.565	175	
	L=100/T=0	F=7.240	1.810	0	1.810	0	F=7.000	1.750	0	1.750	0	F=6.960	1.740	0	1.740	0		

Fig.19: Hipótesis 1ª para 132 k V [6].

				ARCE 900 F40				ARCE 900 F42				ARCE 900 F43						
	Verticales	R	L/T en % de H	F=ΣH	Lc	Tc	Lt	Tt	F=ΣH	Lc	Tc	Lt	Tt	F=ΣH	Lc	Tc	Lt	Tt
Hipótesis 2ª hielo	Vc=650 Vt=500	R=0	L=0/T=100	F=9.750	0	3250	0	0	F=9.900	0	3300	0	0	F=9.900	0	3300	0	0
			L=10/T=90	F=9.750	325	2.925	0	0	F=9.900	330	2.970	0	0	F=9.900	330	2.970	0	0
			L=25/T=75	F=9.720	810	2.430	0	0	F=9.750	810	2.440	0	0	F=9.750	810	2.440	0	0
			L=50/T=50	F=9.660	1610	1.610	0	0	F=9.600	1600	1.600	0	0	F=9.600	1600	1.600	0	0
			L=75/T=25	F=9.480	2370	790	0	0	F=9.360	2340	780	0	0	F=9.360	2340	780	0	0
			L=90/T=10	F=9.480	2.845	315	0	0	F=8.715	2.615	290	0	0	F=8.415	2.525	280	0	0
			L=100/T=0	F=8.610	2870	0	0	0	F=7.845	2.615	0	0	0	F=7.575	2.525	0	0	0
		R=0,7	L=0/T=100	F=8.585	0	2.320	0	1.625	F=8.380	0	2.265	0	1.585	F=8.380	0	2.265	0	1.585
			L=10/T=90	F=8.585	230	2.090	160	1.465	F=8.385	225	2.040	160	1.430	F=8.385	225	2.040	160	1.430
			L=25/T=75	F=8.440	570	1.710	400	1.200	F=8.250	560	1.670	390	1.170	F=8.250	560	1.670	390	1.170
			L=50/T=50	F=8.290	1.120	1.120	785	785	F=8.070	1.090	1.090	765	765	F=8.070	1.090	1.090	765	765
			L=75/T=25	F=8.140	1.650	550	1.155	385	F=7.920	1.605	535	1.125	375	F=7.920	1.605	535	1.125	375
			L=90/T=10	F=8.140	1.980	220	1.385	155	F=7.920	1.925	215	1.350	150	F=7.920	1.925	215	1.350	150
			L=100/T=0	F=7.990	2.160	0	1.510	0	F=7.770	2.100	0	1.470	0	F=7.735	2.090	0	1.465	0
		R=1	L=0/T=100	F=8.160	0	2.040	0	2.040	F=7.920	0	1.980	0	1.980	F=7.920	0	1.980	0	1.980
			L=10/T=90	F=8.160	205	1.835	205	1.835	F=7.920	200	1.780	200	1.780	F=7.920	200	1.780	200	1.780
			L=25/T=75	F=8.040	500	1.510	500	1.510	F=7.840	490	1.470	490	1.470	F=7.840	490	1.470	490	1.470
			L=50/T=50	F=7.920	990	990	990	990	F=7.680	960	960	960	960	F=7.680	960	960	960	960
			L=75/T=25	F=7.800	1.465	485	1.465	485	F=7.560	1.415	475	1.415	475	F=7.560	1.415	475	1.415	475
			L=90/T=10	F=7.800	1.755	195	1.755	195	F=7.560	1.700	190	1.700	190	F=7.560	1.700	190	1.700	190
			L=100/T=0	F=7.680	1.920	0	1.920	0	F=7.440	1.860	0	1.860	0	F=7.400	1.850	0	1.850	0

Fig.20: Hipótesis 2ª para 132 kV [6].

Hipótesis 3ª desequilibrio de tracciones	Vc=650 Vt=500	R=0	L=0/T=100	F=12.195	0	4.065	0	0	F=12.375	0	4.125	0	0	F=12.375	0	4.125	0	0
			L=10/T=90	F=12.180	405	3.655	0	0	F=12.390	415	3.715	0	0	F=12.390	415	3.715	0	0
			L=25/T=75	F=12.165	1.015	3.040	0	0	F=12.195	1.015	3.050	0	0	F=12.195	1.015	3.050	0	0
			L=50/T=50	F=12.090	2.015	2.015	0	0	F=12.000	2.000	2.000	0	0	F=12.000	2.000	2.000	0	0
			L=75/T=25	F=11.865	2.965	990	0	0	F=11.700	2.925	975	0	0	F=11.700	2.925	975	0	0
			L=90/T=10	F=11.850	3.555	395	0	0	F=10.905	3.270	365	0	0	F=10.515	3.155	350	0	0
			L=100/T=0	F=10.770	3.590	0	0	0	F=9.810	3.270	0	0	0	F=9.465	3.155	0	0	0
		R=0,7	L=0/T=100	F=10730	0	2.900	0	2.030	F=10.470	0	2.830	0	1.980	F=10.470	0	2.830	0	1.980
			L=10/T=90	F=10745	290	2.615	200	1.830	F=10.480	280	2.550	200	1.790	F=10.480	280	2.550	200	1.790
			L=25/T=75	F=10565	715	2.140	500	1.500	F=10.325	700	2.090	490	1.465	F=10.325	700	2.090	490	1.465
			L=50/T=50	F=10360	1.400	1.400	980	980	F=10.100	1.365	1.365	955	955	F=10.100	1.365	1.365	955	955
			L=75/T=25	F=10190	2.065	690	1.445	480	F=9.900	2.005	670	1.405	470	F=9.900	2.005	670	1.405	470
			L=90/T=10	F=10175	2.475	275	1.730	195	F=9.905	2.405	270	1.690	190	F=9.905	2.405	270	1.690	190
			L=100/T=0	F=9990	2.700	0	1.890	0	F=9.715	2.625	0	1.840	0	F=9.675	2.615	0	1.830	0
		R=1	L=0/T=100	F=10.200	0	2.550	0	2.550	F=9.900	0	2.475	0	2.475	F=9.900	0	2.475	0	2.475
			L=10/T=90	F=10.200	255	2.295	255	2.295	F=9.900	250	2.225	250	2.225	F=9.900	250	2.225	250	2.225
			L=25/T=75	F=10.060	625	1.890	625	1.890	F=9.820	615	1.840	615	1.840	F=9.820	615	1.840	615	1.840
			L=50/T=50	F=9.920	1.240	1.240	1.240	1.240	F=9.600	1.200	1.200	1.200	1.200	F=9.600	1.200	1.200	1.200	1.200
			L=75/T=25	F=9.740	1.830	605	1.830	605	F=9.460	1.770	595	1.770	595	F=9.460	1.770	595	1.770	595
			L=90/T=10	F=9.760	2.195	245	2.195	245	F=9.460	2.125	240	2.125	240	F=9.460	2.125	240	2.125	240
			L=100/T=0	F=9.600	2.400	0	2.400	0	F=9.300	2.325	0	2.325	0	F=9.260	2.315	0	2.315	0

Fig.21: Hipótesis 3ª para 132 kV [6].

Cabe destacar que se escogen las tablas correspondientes con un valor máximo de esfuerzo vertical del cable conductor $V_c = 650$ daN y un valor máximo de esfuerzo vertical del cable de tierra $V_t = 500$ daN, puesto que los valores resultantes de las hipótesis para estos parámetros son inferiores a éstos y, por tanto, ya cumplen con los requerimientos.

Estas tablas consideran las distintas fuerzas de un sólo conductor.

1) Hipótesis 1ª: 120 km/h, viento transversal [6].

$$R = \frac{H_{\text{tierra}}}{H_{\text{1conductor}}} \quad (5.30)$$

$$H = \sqrt{F_{\text{Longitudinales}}^2 + F_{\text{transversales}}^2} \quad (5.31)$$

$$H_{\text{tierra}} = \sqrt{0^2 + 1778,77^2} = 1778,77 \text{ N} = 177,877 \text{ daN}$$

$$H_{\text{1conductor}} = \sqrt{0^2 + \left(\frac{7234,55}{3}\right)^2} = 2411,52 \text{ N} = 241,152 \text{ daN}$$

$$R = \frac{177,877}{241,152} \approx 0,7$$

Se observa que la relación entre los esfuerzos longitudinales totales (el correspondiente al cable de tierra sumado al del cable conductor) y los esfuerzos transversales totales (el correspondiente al cable de tierra sumado al del cable conductor) es:

$$L = 0\%$$

$$T = 100\%$$

Con lo que, con estos porcentajes y el valor obtenido de R , puede entrarse a la parte de la tabla que corresponda y comprobar que los esfuerzos del catálogo superan a los calculados en el apartado c) CÁLCULO DE ESFUERZOS EN APOYO 69 del presente documento.

$$V_c = 650 \text{ daN} > 180,474 \text{ daN}$$

$$V_t = 500 \text{ daN} > 77,534 \text{ daN}$$

$$F_{\text{conductor}} = 0 \text{ daN}$$

$$F_{\text{tierra}} = 0 \text{ daN}$$

$$F_{\text{tconductor}} = 2130 \text{ daN} > 241,152 \text{ daN}$$

$$F_{\text{ttierra}} = 1490 \text{ daN} > 177,877 \text{ daN}$$

Se repite el proceso indicado para las demás hipótesis:

2) Hipótesis 2ª: hielo [6].

$$H_{\text{tierra}} = \sqrt{0^2 + 0^2} = 0 \text{ N}$$

$$H_{\text{lconductor}} = \sqrt{0^2 + 0^2} = 0 \text{ N}$$

$$R = \frac{0}{0} = 0$$

$$L = 0\%$$

$$T = 0\%$$

Se observa que esta hipótesis cumplirá debido a que cualquier valor de los indicados en la tabla es mayor a 0 daN.

3) Hipótesis 3ª: desequilibrio de tracciones [6].

$$H_{\text{tierra}} = \sqrt{14093,5^2 + 0^2} = 14093,5 \text{ N} = 1409,35 \text{ daN}$$

$$H_{\text{lconductor}} = \sqrt{\left(\frac{42280,5}{3}\right)^2 + 0^2} = 14093,5 \text{ N} = 1409,35 \text{ daN}$$

$$R = \frac{1409,35}{1409,35} = 1$$

$$L = 100\%$$

$$T = 0\%$$

$$V_c = 650 \text{ daN} > 182,008 \text{ daN}$$

$$V_t = 500 \text{ daN} > 78,382 \text{ daN}$$

$$F_{\text{conductor}} = 2325 \text{ daN} > 1409,35 \text{ daN}$$

$$F_{\text{tierra}} = 2325 \text{ daN} > 1409,35 \text{ daN}$$

$$F_{\text{conductor}} = 0 \text{ daN}$$

$$F_{\text{tierra}} = 0 \text{ daN}$$

Una vez se han obtenido los valores de los esfuerzos, lo último que queda de verificar es si la altura escogida para el apoyo cumple con las especificaciones mínimas. Para ello, se tiene en consideración la flecha máxima calculada para el cable conductor y el apartado 5.7.1 Cruzamientos, dentro de la sección 5.7 Distancias a carreteras, de la instrucción 07 del RLAT.

Este apartado establece que, la distancia mínima a carreteras ha de ser:

$$D_{\text{mín}} = D_{\text{add}} + D_{\text{el}} \quad (5.32)$$

con:

$$D_{\text{add}} = 7,5 \text{ para líneas de categoría especial.}$$

$$D_{\text{add}} = 6,3 \text{ para líneas del resto de categorías.}$$

$$\text{Con lo cual: } D_{\text{mín}} = 6,30 + 1,20 = 7,50 \text{ m}$$

Si a esta distancia se le suma la flecha máxima que puede presentar el conductor (el valor mayor de las dos flechas máximas obtenidas para los dos cantones), se obtiene la altura mínima que ha de presentar el apoyo en cuestión:

$$h_{\text{mínima}} = 6,26 + 7,50 = 13,76 \text{ m}$$

El autor eligió un apoyo de una altura útil de 16,20 m [2]:

$$h_{\text{catálogo}} = 16,20 \text{ m} > 13,76 \text{ m}$$

Así pues y tal como se ha visto en los desarrollos anteriores, este apoyo cumple con todas las especificaciones y, por ello, puede afirmarse que el autor del proyecto de la línea de 132 kV, lo escogió de una forma correcta.

5.2. CÁLCULOS PARA LA LÍNEA DE 220 kV.

El proceso realizado en esta sección será el mismo que en la línea de 132 kV, con la salvedad de que aquí se impone en la hipótesis de tracción de cada día que, la tensión mecánica resultante de dicha hipótesis, ha de ser mayor que el 15% de la tracción de rotura, con el fin de evitar la instalación de amortiguadores. El desarrollo de los cálculos se encuentra en el apartado 2.2. Cálculo para la línea de 220 kV del anexo II de cálculos.

Cable conductor:

a) Cantón 62-69:

Hip.	hielo	viento	hielo+ viento	TCD	CHS	F.M.: Viento.	F.M.: Tempe- ratura	F.M.: Hielo.
T	23899,49	23174,80	24822,56	12684	14196,30	17796,10	9527,90	22360,44
(N):								

Tabla 14: Tracciones para cable conductor; cantón 62-69; 220 kV.

Hipótesis:	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Flechas (m):	3,20	6,00	4,76

Tabla 15: Flechas máximas para cable conductor; cantón 62-69; 220 kV.

b) Cantón 69-77:

Hip.	hielo	viento	hielo+ viento	TCD	CHS	F.M.: Viento.	F.M.: Tempe- ratura	F.M.: Hielo.
T	23890,45	23179,51	24823,58	12684	14141,90	17834,39	9602,97	22394,15
(N):								

Tabla 16: Tracciones para cable conductor; cantón 69-70; 220 kV.

Hipótesis:	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Flechas (m):	3,36	6,26	4,99

Tabla 17: Flechas máximas para cable conductor; cantón 69-70; 220 kV

Cable de tierra:

a) Cantón 62-69:

Hip.	hielo	viento	hielo+ viento	TCD	CHS	F.M.: Viento.	F.M.: Tempe- ratura	F.M.: Hielo.
T	16556,28	17085,31	17713,61	8094	9522,23	13169,71	6385,02	15522,61
(N):								

Tabla 18: Tracciones para cable de tierra; cantón 62-69; 220 kV.

Hipótesis:	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Flechas (m):	2,53	3,90	4,09

Tabla 19: Flechas máximas para cable de tierra; cantón 62-69; 220 kV.

b) Cantón 69-77:

Hip.	hielo	viento	hielo+ viento	TCD	CHS	F.M.: Viento.	F.M.: Tempe- ratura	F.M.: Hielo.
T (N):	16620,37	17168,65	17796,34	8094	9486,54	13260,95	6421,26	15602,05

Tabla 20: Tracciones para cable de tierra; cantón 69-70; 220 kV.

Hipótesis:	Flecha máxima: Viento.	Flecha máxima: Temperatura	Flecha máxima: Hielo.
Flechas (m):	1,97	4,07	4,27

Tabla 21: Flechas máximas para cable de tierra; cantón 69-79; 220 kV.

5.2.1. ELECCIÓN DE LOS APOYOS DE LA LÍNEA.

a) CÁLCULO DE GRAVIVANOS Y EOLOVANO EN CABLES CONDUCTORES.

Se usa como aproximación las diferencias de alturas usadas para la línea de 132 kV, puesto que aquí no se conocen la altura de los fustes, ya que es una de las cuestiones que se quiere conocer a posteriori.

$$\text{Tracción máxima de hielo: } \begin{cases} T_{\text{hielo}_{68-69}} = 23899,49 \text{ N} \\ T_{\text{hielo}_{69-70}} = 23890,45 \text{ N} \end{cases} ; T_{\text{máx_hielo}} = 23899,49 \text{ N}$$

$$\text{Tracción máxima de viento: } \begin{cases} T_{\text{viento}_{68-69}} = 23174,80 \text{ N} \\ T_{\text{viento}_{69-70}} = 23179,51 \text{ N} \end{cases} ; T_{\text{máx_viento}} = 23179,51 \text{ N}$$

$$\text{T. máxima de hielo + viento: } \begin{cases} T_{\text{h+v}_{68-69}} = 24822,56 \text{ N} \\ T_{\text{h+v}_{69-70}} = 24823,58 \text{ N} \end{cases} ; T_{\text{h+v}} = 24823,58 \text{ N}$$

$$a_{\text{gh}} = \frac{218,51 + 223,97}{2} + \left(+ \frac{23899,49}{1,86 \cdot 0,978 \cdot 9,8} \cdot \frac{8,81}{218,51} - \frac{23899,49}{1,86 \cdot 0,978 \cdot 9,8} \cdot \frac{13,47}{223,97} \right)$$

$$a_{\text{gh}} = 194,66 \text{ m}$$

$$a_{gv} = \frac{218,51 + 223,97}{2} + \left(+ \frac{23179,51}{1,84 \cdot 0,978 \cdot 9,8} \cdot \frac{8,81}{218,51} - \frac{23179,51}{1,84 \cdot 0,978 \cdot 9,8} \cdot \frac{13,47}{223,97} \right)$$

$$a_{gv} = 195,18 \text{ m}$$

$$a_{gh+v} = \frac{218,51 + 223,97}{2} + \left(+ \frac{24823,58}{1,96 \cdot 0,978 \cdot 9,8} \cdot \frac{8,81}{218,51} - \frac{24823,58}{1,96 \cdot 0,978 \cdot 9,8} \cdot \frac{13,47}{223,97} \right)$$

$$a_{gh+v} = 195,04 \text{ m}$$

$$a_e = 221,24 \text{ m}$$

b) CÁLCULO DE GRAVIVANOS Y EOLOVANO EN CABLE DE TIERRA.

$$\text{Tracción máxima de hielo: } \begin{cases} T_{\text{hielo}_{68-69}} = 16556,28 \text{ N} \\ T_{\text{hielo}_{69-70}} = 16620,37 \text{ N} \end{cases} ; T_{\text{máx_hielo}} = 16620,37 \text{ N}$$

$$\text{Tracción máxima de viento: } \begin{cases} T_{\text{viento}_{68-69}} = 17085,31 \text{ N} \\ T_{\text{viento}_{69-70}} = 17168,65 \text{ N} \end{cases} ; T_{\text{máx_viento}} = 17168,65 \text{ N}$$

$$\text{T. máxima de hielo + viento: } \begin{cases} T_{h+v_{68-69}} = 17713,61 \text{ N} \\ T_{h+v_{69-70}} = 17796,34 \text{ N} \end{cases} ; T_{h+v} = 17796,34 \text{ N}$$

$$a_{gh} = \frac{218,51 + 223,97}{2} + \left(+ \frac{16620,37}{2,55 \cdot 0,426 \cdot 9,8} \cdot \frac{8,81}{218,51} - \frac{16620,37}{2,55 \cdot 0,426 \cdot 9,8} \cdot \frac{13,47}{223,97} \right)$$

$$a_{gh} = 190,29 \text{ m}$$

$$a_{gv} = \frac{218,51 + 223,97}{2} + \left(+ \frac{17168,65}{2,80 \cdot 0,426 \cdot 9,8} \cdot \frac{8,81}{218,51} - \frac{17168,65}{2,80 \cdot 0,426 \cdot 9,8} \cdot \frac{13,47}{223,97} \right)$$

$$a_{gv} = 192,12 \text{ m}$$

$$a_{gh+v} = \frac{218,51 + 223,97}{2} + \left(+ \frac{17796,34}{2,88 \cdot 0,426 \cdot 9,8} \cdot \frac{8,81}{218,51} - \frac{17796,34}{2,88 \cdot 0,426 \cdot 9,8} \cdot \frac{13,47}{223,97} \right)$$

$$a_{gh+v} = 191,90 \text{ m}$$

$$a_e = 221,24 \text{ m}$$

c) ESFUERZOS EN APOYO 69.

Cable conductor (esfuerzos para un único conductor):

Hipótesis:	Viento	Hielo	Hielo + viento	Desequilibrio de tracciones	Rotura de conductores
F. verticales (N)	1870,68	1865,70	1869,34	1869,34	1869,34
F. Transversales (N)	3283,20	No aplica.	1205,76	No aplica.	No aplica.
F. Longitudinales (N)	No aplica.	No aplica.	No aplica.	12411,79	24823,58
Momento torsor (Nm)	No aplica.	No aplica.	No aplica.	Se calcula cuando se elige el apoyo.	No aplica.

Tabla 22: Esfuerzos para un único conductor; 220 kV.

Cable de tierra:

Hipótesis:	Viento	Hielo	Hielo + viento	Desequilibrio de tracciones	Rotura de conductores
F. verticales (N)	802,06	794,42	801,14	801,14	801,14
F. Transversales (N)	2420,37	No aplica.	1194,70	No aplica.	No aplica.
F. Longitudinales (N)	No aplica.	No aplica.	No aplica.	8898,17	17796,34
Momento torsor (Nm)	No aplica.	No aplica.	No aplica.	Se calcula cuando se elige el apoyo.	No aplica.

Tabla 23: Esfuerzos para cable de tierra; 220 kV.

d) JUSTIFICACIÓN DEL APOYO ESCOGIDO.

En primer lugar se calculan las distancias necesarias, de acuerdo con lo establecido en el apartado 5. DISTANCIAS MÍNIMAS DE SEGURIDAD. CRUZAMIENTOS Y PARALELISMOS, de la instrucción 07 del reglamento.

1. Distancia entre conductores [3].

$$D = K \cdot \sqrt{F \cdot L} + K' \cdot D_{pp} \quad (5.33)$$

donde:

D: Separación entre conductores de fase.

K: coeficiente que depende de la oscilación del viento. En este caso se tiene un ángulo de 57,14° para los cables conductores.

Angulo de oscilación	Valores de K	
	Líneas de tensión nominal superior a 30 kV	Líneas de tensión nominal igual o inferior a 30 kV
Superior a 65°	0,7	0,65
Comprendido entre 40° y 65°	0,65	0,6
Inferior a 40°	0,6	0,55

Fig.22: Tabla 16. Coeficiente K en función del ángulo de oscilación [3].

F: Flecha máxima resultado de las hipótesis de cálculo.

L: Longitud en metros de la cadena de suspensión. En este caso es 0, puesto que el apoyo no tiene cadenas de suspensión.

D_{pp}: Distancia mínima especificada para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase durante sobretensiones de frente lento o rápido (**Fig.14**).

K': Constante que depende de la categoría; 0,85 para categoría especial y 0,75 para el resto.

$$D = 0,65 \cdot \sqrt{6,26 \cdot 0} + 0,85 \cdot 2 = 1,7 \text{ m} \quad (5.34)$$

2. Distancia entre conductores y partes puestas a tierra [3].

Con respecto a esto, el reglamento establece que: "La separación mínima entre los conductores y sus accesorios en tensión y los apoyos no será inferior a D_{el} , con un mínimo de 0,2 m", viniendo establecida esa D_{el} en la tabla 15 del apartado 5.2, en función de la tensión más elevada de la línea (**Fig.1**).

$$D_{el} = 1,70 \text{ m.}$$

3. Distancia al terreno [3].

Se tiene que el vano cruza con la nacional 420 y con diversos árboles.

Según el apartado 5.7 Distancias a carreteras, se tiene:

$$H = D_{add} + D_{el} \tag{5.35}$$

Siendo D_{add} 7,5 m para líneas de categoría especial y 6,3 para el resto.

$$H = 7,5 + 1,70 = 9,2 \text{ m.}$$

Según el apartado 5.12 Paso por zonas; 5.12.1 Bosques, árboles y masas de arbolado, se tiene:

$$H = D_{add} + D_{el} = 1,50 + 1,70 = 2,30 \text{ m}$$

Por lo que la distancia que se ha de considerar es la de 9,2 m, por ser ésta la más restrictiva.

Una vez obtenidas las distancias, se pasa a la elección del apoyo. Se elige un apoyo tipo Tejo del catálogo MADE, puesto que son los únicos disponibles para 220 kV.

Se comienza con la elección del armado:

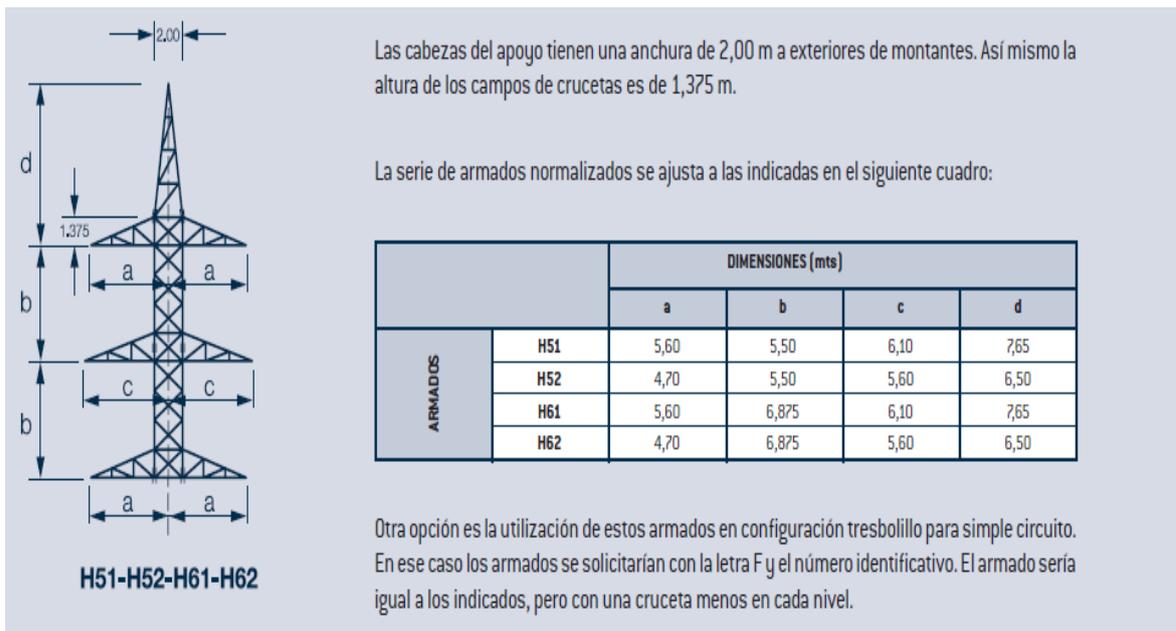


Fig.23: Disposición y distancias en armados serie TEJO [6].

Puede observarse que el armado H51 ya cumple con las características requeridas, puesto que:

$$\text{Distancia entre conductores: } D = \sqrt{(5,60 + 6,10)^2 + 5,50^2} = 12,93 \text{ m}$$

$$12,93 \text{ m} > 1,70 \text{ m}$$

$$\text{Distancia entre conductor y el apoyo: } a = 5,60 \text{ m}$$

$$5,60 \text{ m} > 1,70 \text{ m}$$

Una vez escogido el armado, se ha de elegir el tipo de apoyo. Para ello se seguirá el mismo proceso que para el caso de 132 kV.

En el siguiente cuadro se indican los valores de resistencia característicos para cada apoyo y armado. Los valores indicados en el mismo hacen referencia a los siguientes esfuerzos:

1. **Esfuerzo H1:** Esfuerzo horizontal total (daN) aplicado al apoyo a la altura de la cruceta media del armado combinado con viento transversal de 120 km/h, con un coeficiente de seguridad de 1,5.
2. **Esfuerzo H2:** Esfuerzo horizontal total (daN) aplicado al apoyo a la altura de la cruceta media del armado sin viento, con un coeficiente de seguridad de 1,5.
3. **Esfuerzo H4a:** Esfuerzo longitudinal máximo (daN) de rotura de conductor aplicado en cualquier cruceta del armado, con un coeficiente de seguridad de 1,2.
4. **Esfuerzo H4b:** Esfuerzo longitudinal máximo (daN) de rotura de cable de tierra aplicado en cúpula, con un coeficiente de seguridad de 1,2.

APOYO	Esfuerzo	ARMADOS			
		H52	H52	H61	H62
TEJO 4000	H1	39.300	39.300	36.600	36.600
	H2	40.800	40.800	38.400	38.400
	H4a	6.000	6.400	6.000	6.400
	H4b	3.750	3.750	3.750	3.750
TEJO 6000	H1	60.000	60.000	55.800	55.800
	H2	61.800	61.800	57.600	57.600
	H4a	12.000	12.500	12.000	12.500
	H4b	7.000	8.000	7.000	8.000

Fig.24: Esfuerzos y tipos de apoyo para la serie TEJO [6].

$$H1 = \sqrt{(F_{L\text{conductores}} + F_{L\text{cable_tierra}})^2 + (F_{t\text{conductores}} + F_{t\text{cable_tierra}})^2}$$

$$H1 = \sqrt{(0 + 0)^2 + (3283,20 \cdot 3 + 2420,37)^2} = 12269,97 \text{ N} = 1226,997 \text{ daN}$$

En el catálogo se establece que ha de calcularse para una velocidad de viento de 120 km/h . El cálculo realizado aquí es para una velocidad de 140 km/h tal y como se hizo en la hipótesis correspondiente. No obstante, si cumple para éste, lo hará para aquel ya que es menos restrictivo

$$H2 = \sqrt{(F_{L\text{conductores}} + F_{L\text{cable_tierra}})^2 + (F_{t\text{conductores}} + F_{t\text{cable_tierra}})^2}$$

$$H2 = \sqrt{(0 + 0)^2 + (0 + 0)^2} = 0 \text{ N} = 0 \text{ daN}$$

$$H4a = \sqrt{F_{L1_{conductor}}^2 + F_{t1_{conductor}}^2}$$

$$H4a = \sqrt{\left(\frac{37235,37}{3}\right)^2 + 0^2} = 12411,79 \text{ N} = 1241,179 \text{ daN}$$

$$H4b = \sqrt{F_{Lcable_tierra}^2 + F_{tcable_tierra}^2}$$

$$H4b = \sqrt{17796,34^2 + 0^2} = 17796,34 \text{ N} = 1779,634 \text{ daN}$$

Se observa como todas estos esfuerzos son inferiores a los establecidos en la tabla anterior para el primero de los casos; TEJO 4000.

Ahora, hay que comprobar que este tipo de apoyo cumple con cada una de las fuerzas individualmente, según:

			TEJO 4000 H51			TEJO 4000 H52			TEJO 4000 H61			TEJO 4000 H62		
	Verticales	R	F=∑H	Hc	Ht									
Hipótesis 1ª viento 120km/h	Vc=2000	Sin cúp.	F=39.300	6.550	0	F=39.300	6.550	0	F=36.600	6.100	0	F=36.600	6.100	0
		Con cúp.	F=37.800	5.850	2.700	F=38.000	5.850	2.900	F=34.900	5.400	2.500	F=35.100	5.400	2.700
	Vc=3000	Sin cúp.	F=37.800	6.300	0	F=37.800	6.300	0	F=35.100	5.850	0	F=30.000	5.000	0
		Con cúp.	F=36.300	5.600	2.700	F=36.500	5.600	2.900	F=33.400	5.150	2.500	F=29.400	4.450	2.700
Hipótesis 1ª viento 140 km/h	Vc=2000	Sin cúp.	F=37.800	6.300	0	F=37.800	6.300	0	F=35.700	5.950	0	F=35.700	5.950	0
		Con cúp.	F=37.100	5.750	2.600	F=37.300	5.750	2.800	F=34.200	5.300	2.400	F=34.400	5.300	2.600
	Vc=3000	Sin cúp.	F=36.000	6.000	0	F=36.000	6.000	0	F=33.900	5.650	0	F=33.900	5.650	0
		Con cúp.	F=35.300	5.450	2.600	F=35.500	5.450	2.800	F=32.400	5.000	2.400	F=32.600	5.000	2.600
Hipótesis 2ª hielo	Vc=2000	Sin cúp.	F=40.800	6.800	0	F=40.800	6.800	0	F=38.400	6.400	0	F=38.400	6.400	0
		Con cúp.	F=38.800	6.000	2.800	F=39.000	6.000	3.000	F=35.600	5.500	2.600	F=35.800	5.500	2.800
	Vc=3000	Sin cúp.	F=38.400	6.400	0	F=38.400	6.400	0	F=36.000	6.000	0	F=36.000	6.000	0
		Con cúp.	F=36.400	5.600	2.800	F=36.600	5.600	3.000	F=33.200	5.100	2.600	F=33.400	5.100	2.800
Hipótesis 2ª hielo + viento 60 km/h	Vc=2000	Sin cúp.	F=40.200	6.700	0	F=40.200	6.700	0	F=37.800	6.300	0	F=37.800	6.300	0
		Con cúp.	F=38.400	5.950	2.700	F=38.600	5.950	2.900	F=35.200	5.450	2.500	F=35.400	5.450	2.700
	Vc=3000	Sin cúp.	F=37.800	6.300	0	F=37.800	6.300	0	F=35.400	5.900	0	F=35.400	5.900	0
		Con cúp.	F=36.000	5.550	2.700	F=36.200	5.550	2.900	F=32.800	5.050	2.500	F=33.000	5.050	2.700
Hipótesis 3ª desequilibrio de tracciones	Vc=2000	Sin cúp.	F=51.000	8.500	0	F=51.000	8.500	0	F=48.000	8.000	0	F=48.000	8.000	0
		Con cúp.	F=48.500	7.500	3.500	F=48.750	7.500	3.750	F=44.500	6.875	3.250	F=44.750	6.875	3.500
	Vc=3000	Sin cúp.	F=48.000	8.000	0	F=48.000	8.000	0	F=45.000	7.500	0	F=45.000	7.500	0
		Con cúp.	F=45.500	7.000	3.500	F=45.750	7.000	3.750	F=41.500	6.375	3.250	F=41.750	6.375	3.500

Fig.25: Hipótesis 1ª, 2ª y 3ª para serie TEJO [6].

			TEJO 4000 H51			TEJO 4000 H52			TEJO 4000 H61			TEJO 4000 H62		
	Verticales	R	Lc	Tc	Tt									
Hipótesis 4ª de rotura de conductor	Vc=2000	Sin cúpula	6.000	3.200	0	6.400	3.300	0	6.000	3.200	0	6.400	3.300	0
			5.000	4.100	0	5.000	4.400	0	5.000	4.100	0	5.000	4.400	0
			4.000	4.800	0	4.000	5.200	0	4.000	4.800	0	4.000	5.200	0
		Con cúpula	6.000	2.600	2.600	6.400	2.700	2.700	6.000	2.600	2.600	6.400	2.700	2.700
			5.000	3.300	3.000	5.000	3.700	3.000	5.000	3.300	3.000	5.000	3.700	3.000
			4.000	4.000	3.000	4.000	4.500	3.000	4.000	4.000	3.000	4.000	4.500	3.000

			TEJO 4000 H51			TEJO 4000 H52			TEJO 4000 H61			TEJO 4000 H62		
	Verticales	Htmax	Ht=Lt+Tt	Tc										
Hipótesis 4ª de rotura de cable de tierra	Vc=3000	3.750	3.750	7.500	3.750	3.750	7.550	3.750	3.750	6.600	3.750	3.750	6.650	
		3.000	3.000	7.700		3.000	7.750		3.000	7.000		4.000	7.050	
		2.500	2.500	7.800		2.500	7.850		2.500	7.100		3.000	7.150	

Fig.26: Hipótesis 4ª para serie TEJO [6].

Para la comprobación habrá de tenerse en cuenta que el apoyo escogido sí constará de cúpula.

1) Hipótesis 1º: viento a 140 km/h.

$$H_c = \sqrt{(0)^2 + (3283,20)^2} = 3283,20 \text{ N} = 328,320 \text{ daN} < 5750 \text{ daN}$$

$$H_t = \sqrt{(0)^2 + (2420,37)^2} = 2420,37 \text{ N} = 242,037 \text{ daN} < 2600 \text{ daN}$$

2.a) Hipótesis 2ª a: hielo.

$$H_c = \sqrt{(0)^2 + (0)^2} = 0 \text{ N} = 0 \text{ daN}$$

$$H_t = \sqrt{(0)^2 + (0)^2} = 0 \text{ N} = 0 \text{ daN}$$

2.b) Hipótesis 2ª b: hielo + viento.

$$H_c = \sqrt{(0)^2 + (1205,76)^2} = 1205,76 \text{ N} = 120,576 \text{ daN} < 5950 \text{ daN}$$

$$H_t = \sqrt{(0)^2 + (1194,70)^2} = 1194,70 \text{ N} = 119,470 \text{ daN} < 2700 \text{ daN}$$

3) Hipótesis 3ª: desequilibrio de tracciones.

$$H_c = \sqrt{(12411,79)^2 + (0)^2} = 12411,79 \text{ N} = 1241,179 \text{ daN} < 7500 \text{ daN}$$

$$H_t = \sqrt{(8898,17)^2 + (0)^2} = 8898,17 \text{ N} = 889,817 \text{ daN} < 3500 \text{ daN}$$

4) Hipótesis 4ª: rotura de conductor/rotura de cable de tierra.

$$H_c = \sqrt{(24823,58)^2 + (0)^2} = 24823,58 \text{ N} = 2482,358 \text{ daN}$$

$$H_t = \sqrt{(17796,34)^2 + (0)^2} = 17796,34 \text{ N} = 1779,634 \text{ daN}$$

Observando que para cada hipótesis, el valor de los esfuerzos verticales es menor de 2000 daN (ver **Tabla 23**), puede apreciarse que los valores de los esfuerzos longitudinales y transversales calculados para ese valor de esfuerzo vertical, son inferiores a los establecidos en las tablas y, por tanto, puede concluirse que el apoyo TEJO 4000 se ha escogido de forma correcta.

Únicamente queda elegir la altura del fuste.

Como éste ha de ser mayor a $9,2 + 6,26 = 15,46$ m (distancia mínima más flecha máxima), se escoge el de 20 m.

Elección del apoyo: TEJO 4000 H51; 20 m

6. CONCLUSIONES.

Observando los resultados obtenidos en los apartados correspondientes a los cálculos puede concluirse que:

1. Al elevar la tensión de la línea, se aumenta la capacidad de transporte de la misma (aumento en $P_{2m\acute{a}x}$) lo que provoca que se pueda transportar más energía por límite térmico, reduciéndose a su vez la caída de tensión en la línea y las pérdidas asociadas a ésta.
2. El rendimiento de la línea se verá disminuido debido a la aparición del efecto corona y a las pérdidas en los aisladores, anteriormente despreciables.

Estos dos puntos, pueden apreciarse en la siguiente tabla:

Parámetros	cos $\varphi = 1$		cos $\varphi = 0,95$		cos $\varphi = 0,9$		cos $\varphi = 0,85$		cos $\varphi = 0,8$	
U_n (kV)	132	220	132	220	132	220	132	220	132	220
$P_{2m\acute{a}x}$ (MW)	132,83	221,39	126,19	210,32	119,55	199,25	112,91	188,18	106,27	177,11
u (%)	3,75	2,19	6,92	4,30	8,06	5,07	8,84	5,61	9,45	6,02
η (%)	97,04	93,09	96,77	92,66	96,60	92,25	94,41	91,82	96,21	91,69

Tabla 24: Resumen y comparación de potencias máximas, caídas de tensión y rendimientos.

3. Se harán de cambiar todos los apoyos de la línea debido a que los apoyos instalados inicialmente, no están diseñados para 220 kV; lo cual encarecerá el proceso. Además, habrá de aumentarse el número de aisladores por cadena en un total de 3 más.
4. A pesar de que no se cambian los cables, se pasa de una línea de primera categoría a otra de categoría especial, por lo que las tracciones que soportan los cables sí se ven modificadas, teniéndose que destensar dichos cables para la línea de 220 kV, lo que da lugar a la obtención de una flecha mínima mayor, con la posterior elección de un apoyo de mayor altura.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1]. Larruskain, D.M., Zamora, I., Abarategui, O., Iraolagoitia, A., Gutiérrez, M. D., Logroño, E., de la Bodega, F., "Power transmission capacity upgrade of overhead lines", RE&PQJ, Vol. 1, No.4, abril 2006.
- [2]. Cordero, R., "LÍNEA AÉREA ALTA TENSIÓN 132 kV "ALCAÑIZ"- "VALDERROBLES"", Proyecto Fin de Carrera, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Área de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Zaragoza, E.U. de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, 2010 [último acceso: 18/02/2020], <https://zaguan.unizar.es/record/5143?ln=es#>.
- [3]. Real Decreto 223/2008. Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09. Boletín Oficial del Estado, España. 15 de febrero de 2015.
- [4]. Moreno, J., Garnacho, F., Simón, P., Rodríguez, J., "Reglamento de líneas de alta tensión y sus fundamentos técnicos", PARANINFO, 1ª Edición, 2008.
- [5]. Simón, P., Garnacho, F., Moreno, J., González, A., "Cálculo y diseño de líneas eléctricas de alta tensión. Aplicación al Reglamento de Líneas de Alta Tensión (RLAT)", IBERGACETA PUBLICACIONES, S.L., 1ª Edición, 2011.
- [6]. "Apoyos normalizados para líneas eléctricas", Catálogo de Apoyos Made, 1ª Edición.
- [7]. Cooray, V., "The Lightning Flash". (ed) V. Cooray Institutions of Electrical, 2003.
- [8]. Checa, L. M., "Líneas de transporte de energía", S.A. MARCOMBO, 3ª Edición, 1988.

ANEXO I:

EXPLICACIÓN DEL CÁLCULO NUMÉRICO DEL CAMPO ELÉCTRICO E.

La realización del cálculo numérico del valor de campo eléctrico en la línea, se realizó mediante el uso de la herramienta informática FEMM 4.2. Para ello hubo que diseñar, en primer lugar, un modelo aproximado de un apoyo de la línea. Con objeto de tener unos resultados fiables, lógicos y que se ajustaran a lo que pudiera suceder en un apoyo real de la línea, lo más importante era establecer correctamente de acuerdo a los cálculos previamente realizados para el caso de los 220 kV, las distancias entre conductores, las distancias entre conductores y el terreno y las distancias entre los conductores y el apoyo.

Se consideró el caso de que los cables se encontrasen tensados de forma que presentasen la máxima flecha admisible. Esto se debe a que esta distancia, sumada a la de la cadena de aisladores, establecen la distancia menor entre los conductores y el terreno; situación en la que la descarga eléctrica será mayor (caso más desfavorable para el estudio del efecto corona).

Es destacable mencionar también que el estudio del campo eléctrico que se daba alrededor de un conductor se realizó para el cable conductor más cercano al terreno, por el mismo motivo mencionado en el párrafo anterior, puesto que la descarga (en caso de haberla) será mayor en éste que en los conductores más alejados.

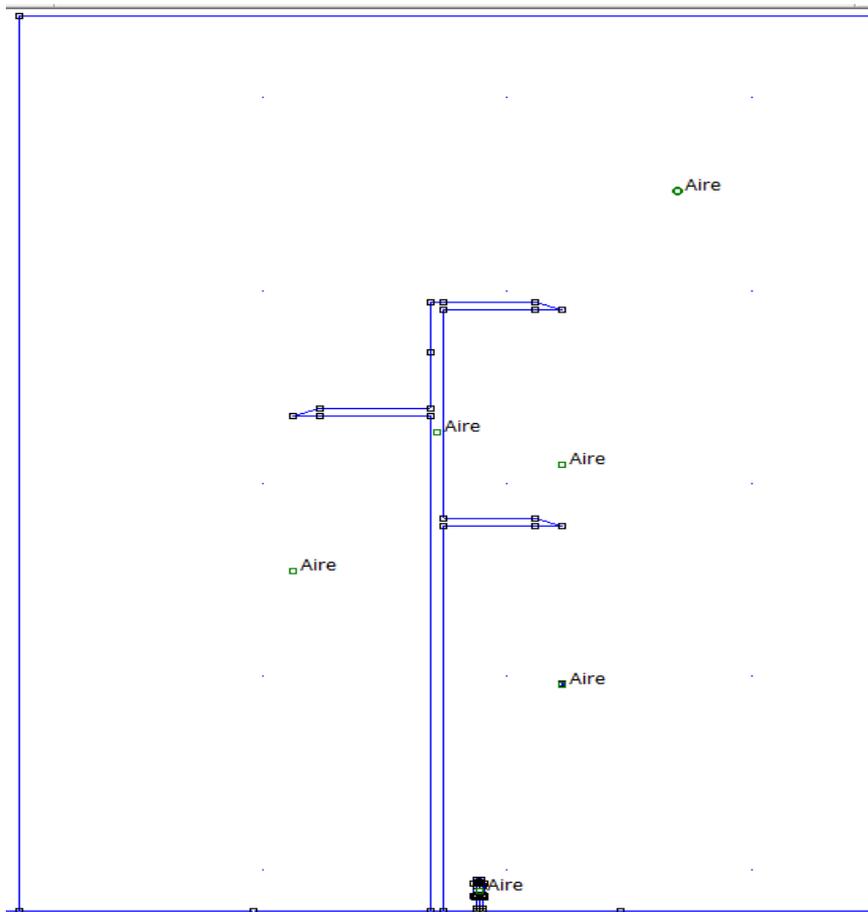


Fig.27: Modelo en FEMM de un apoyo de la línea de 220 kV.

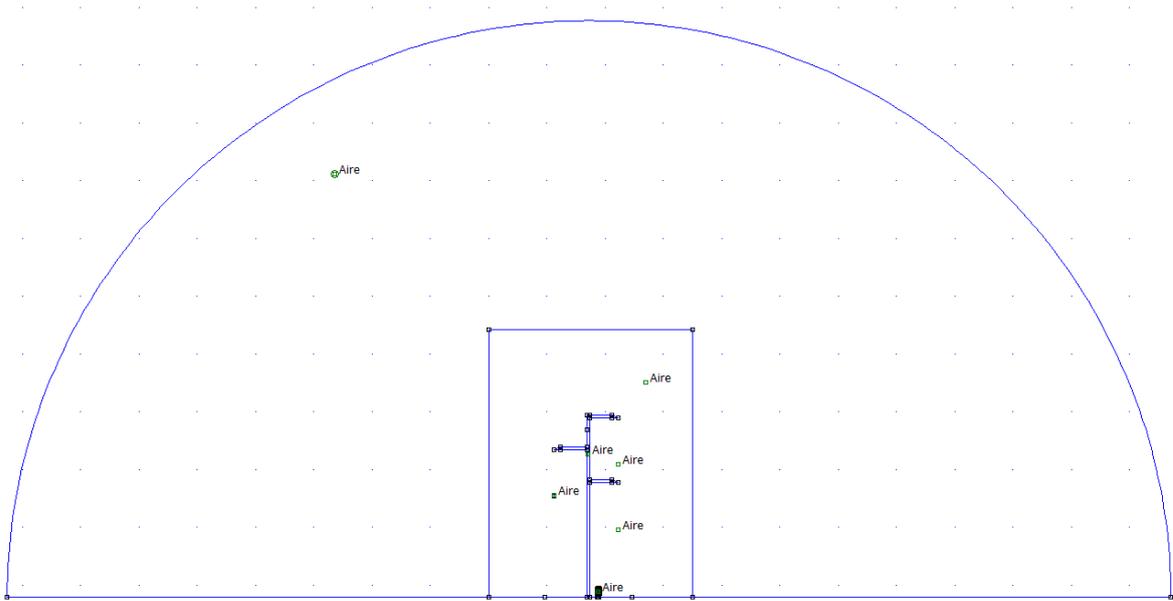


Fig.2: Modelo en FEMM situación general de un apoyo para 220 kV.

El problema a resolver se definió en la herramienta en cuestión como un problema planar, con las unidades en milímetros y con una precisión de cálculo de 10^{-8} .

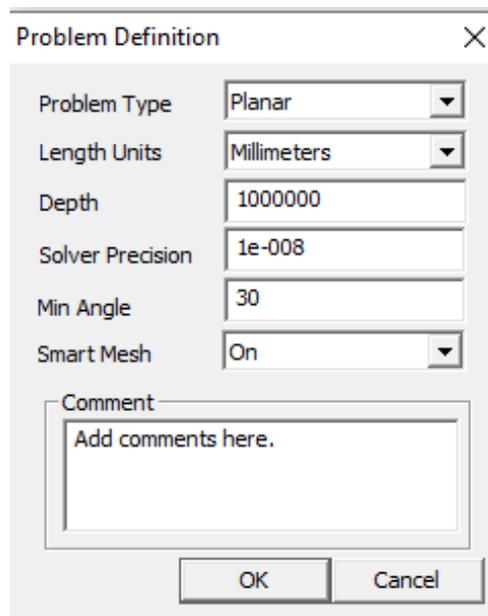


Fig.28: Definición del problema a resolver.

Se establecieron unas condiciones de contorno tangenciales para el semicircunferencia que rodea el modelo del apoyo y normales para la línea que define el terreno. También se establecieron los distintos grupos correspondientes a los materiales a considerar en el modelo; en este caso sólo se tenía aire.

Las condiciones de potencial impuestas a los conductores fueron: -100 kV para fase a y para fase b y 200 kV para la fase c (la más cercana al terreno) puesto que son los potenciales máximos instantáneos fase-tierra que pueden darse en la instalación.

Quedando definido lo anterior, se procedió al cálculo del mallado y a su análisis.

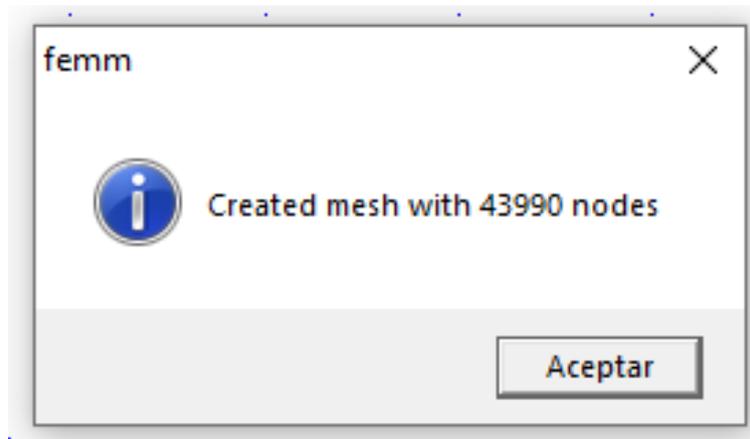


Fig.29: Número de nodos creados para el mallado.

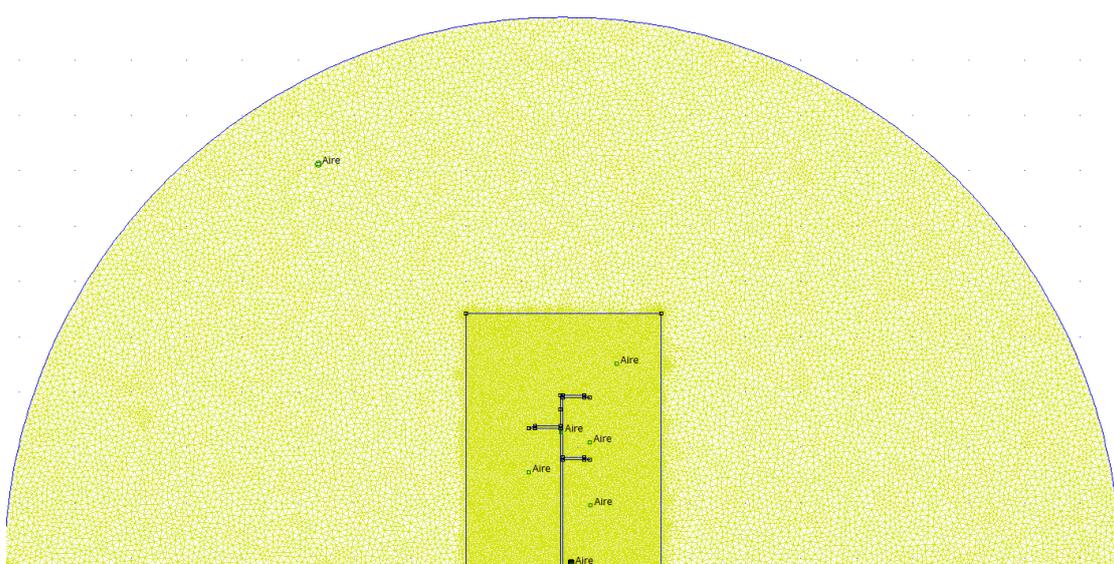


Fig.30: Representación del mallado.

Realizado esto sólo quedaba analizar los resultados, pulsando la casilla correspondiente, y posteriormente visualizar lo que era de interés para este caso: el valor de campo eléctrico E.

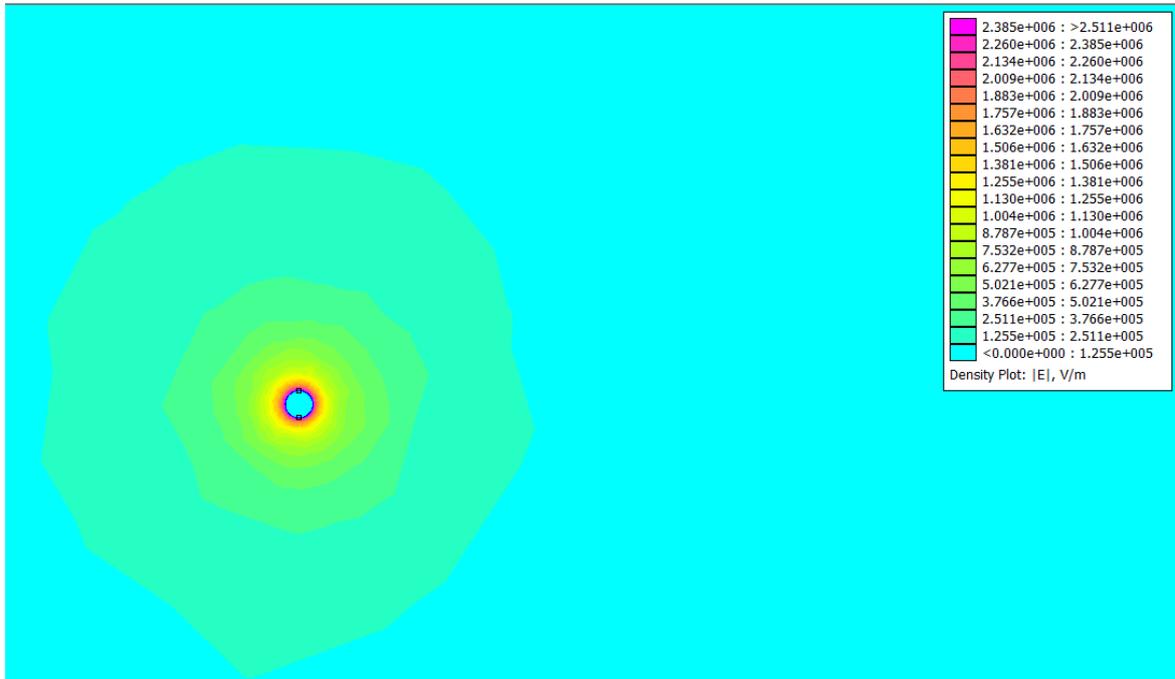


Fig.31: Valores de campo eléctrico alrededor del conductor más cercano al terreno.

Los resultados de este análisis se encuentran analizados y comentados en el apartado 4.2. CÁLCULOS PARA LA LÍNEA DE 220 kV de la memoria.

ANEXO II:

CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS.

ÍNDICE

1. DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS ELÉCTRICOS.	74
1.1. CÁLCULOS PARA 132 kV.....	74
1.1.1. POTENCIAS MÁXIMAS, LONGITUDES TÉRMICAS Y POTENCIAS ENTREGADAS AL FINAL DE LA LÍNEA.	74
1.1.2. CAÍDAS DE TENSIÓN Y RENDIMIENTOS.....	77
1.2. CÁLCULOS PARA 220 kV.....	81
1.2.1. CÁLCULO DE LAS CONSTANTES DE LA ECUACIÓN DE PROPAGACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA LÍNEA.....	81
1.2.2. POTENCIAS MÁXIMAS, LONGITUDES TÉRMICAS Y POTENCIAS ENTREGADAS AL FINAL DE LA LÍNEA.	82
1.2.3. CAÍDAS DE TENSIÓN Y RENDIMIENTOS.....	85
2. DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS MECÁNICOS.	89
2.1. CÁLCULOS PARA 132 kV.....	89
2.1.1. CÁLCULO DE TRACCIONES.	89
2.1.2. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN EL APOYO 69.	122
2.2. CÁLCULOS PARA 220 kV.....	125
2.2.1. CÁLCULO DE TRACCIONES.	125
2.2.2. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN EL APOYO 69.	185

1. DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS ELÉCTRICOS.

1.1. CÁLCULOS PARA 132 kV.

1.1.1. POTENCIAS MÁXIMAS, LONGITUDES TÉRMICAS Y POTENCIAS ENTREGADAS AL FINAL DE LA LÍNEA.

a) cosφ = 1

$$P_{\text{Máx.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 132 \cdot 10^3 \cdot 581 \cdot 1}{1000000} = 132,83 \text{ MW}$$

$$M_e = \frac{0,05 \cdot (132 \cdot 10^3)^2}{0,119 + 0,414 \cdot \tan(\arccos(1))} = 7321,01 \cdot 10^6 \text{ W/km} = 7321,01 \text{ MW/km}$$

$$l_{\text{térmica}} = \frac{7321,01}{132,83} = 55,12 \text{ km}$$

Se observa que $l_{\text{térmica}} > l_{\text{línea}}$, lo que significa que no existen pérdidas por caída de tensión y por tanto es posible transportar toda la potencia mediante criterio térmico. Es decir: se puede transportar la potencia máxima hasta final de la línea. Esto ocurrirá siempre que se dé esta condición.

b) cosφ = 0,95

$$P_{\text{Máx.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 132 \cdot 10^3 \cdot 581 \cdot 0,95}{1000000} = 126,19 \text{ MW}$$

$$M_e = \frac{0,05 \cdot (132 \cdot 10^3)^2}{0,119 + 0,414 \cdot \tan(\arccos(0,95))} = 3415,46 \cdot 10^6 \text{ W/km} = 3415,46 \text{ MW/km}$$

$$l_{\text{t\u00e9rmica}} = \frac{3415,46}{126,19} = 27,07 \text{ km}$$

Potencia que puede entregarse al final de la l\u00ednea:

$$P = \frac{3415,46}{35,54} = 96,10 \text{ MW}$$

c) **cos\phi = 0,9**

$$P_{\text{M\u00e1x.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 132 \cdot 10^3 \cdot 581 \cdot 0,9}{1000000} = 119,55 \text{ MW}$$

$$M_e = \frac{0,05 \cdot (132 \cdot 10^3)^2}{0,119 + 0,414 \cdot \tan(\arccos(0,9))} = 2726,68 \cdot 10^6 \text{ W/km} = 2726,68 \text{ MW/km}$$

$$l_{\text{t\u00e9rmica}} = \frac{2726,68}{119,55} = 22,8 \text{ km}$$

Potencia que puede entregarse al final de la l\u00ednea:

$$P = \frac{2726,68}{35,54} = 76,72 \text{ MW}$$

d) **cos\phi = 0,85**

$$P_{\text{M\u00e1x.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 132 \cdot 10^3 \cdot 581 \cdot 0,85}{1000000} = 112,91 \text{ MW}$$

$$Me = \frac{0,05 \cdot (132 \cdot 10^3)^2}{0,119 + 0,414 \cdot \tan(\arccos(0,85))} = 2319,65 \cdot 10^6 \text{ W/km} = 2319,65 \text{ MW/km}$$

$$l_{\text{t\u00e9rmica}} = \frac{2319,65}{112,91} = 20,54 \text{ km}$$

Potencia que puede entregarse al final de la l\u00ednea:

$$P = \frac{2319,65}{35,54} = 62,27 \text{ MW}$$

e) **cos\phi = 0,8**

$$P_{\text{M\u00e1x.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 132 \cdot 10^3 \cdot 581 \cdot 0,8}{1000000} = 106,27 \text{ MW}$$

$$Me = \frac{0,05 \cdot (132 \cdot 10^3)^2}{0,119 + 0,414 \cdot \tan(\arccos(0,8))} = 2028,41 \cdot 10^6 \text{ W/km} = 2028,41 \text{ MW/km}$$

$$l_{\text{t\u00e9rmica}} = \frac{2028,41}{106,27} = 19,09 \text{ km}$$

Potencia que puede entregarse al final de la l\u00ednea:

$$P = \frac{2028,41}{35,54} = 57,07 \text{ MW}$$

1.1.2. CAÍDAS DE TENSIÓN Y RENDIMIENTOS.

a) cosφ = 1

$$I_{2F} = \frac{132.83 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 1} = 580,98 \text{ A}; \quad \arccos(1) = 0^\circ; \quad \bar{I}_{2F} = 580,98 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1F} &= (0,999 \angle 0.011^\circ) \cdot \left(\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (15,323 \angle 73.92^\circ) \cdot (580,98 \angle 0^\circ) = \\ &= 79,07 \cdot 10^3 \angle 6,22^\circ \text{ V} = 79,07 \angle 6,22^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{1F} &= (9,76 \cdot 10^{-5} \angle 90^\circ) \cdot \left(\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (0,999 \angle 0.011^\circ) \cdot (580,98 \angle 0^\circ) = \\ &= 580,45 \angle 0,75^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$u = \frac{79,07 \cdot 10^3 \cdot \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = 3,75\%$$

$$P_1 = 3 \cdot 79,07 \cdot 10^3 \cdot 580,45 \cdot \cos(6,22 - 0) = 136,88 \cdot 10^6 \text{ W} = 136,88 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{132,83 \cdot 10^6}{136,88 \cdot 10^6} \cdot 100 = 97,04 \%$$

b) cosφ = 0,95

$$I_{2F} = \frac{126,19 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 0,95} = 580,99 \text{ A}; \quad \arccos(0,95) = 18,19^\circ; \quad \bar{I}_{2F} = 580,99 \angle -18,19^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1F} &= (0,999 \angle 0,011^\circ) \cdot \left(\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (15,323 \angle 73,92^\circ) \cdot (580,99 \angle -18,19^\circ) = \\ &= 81,48 \cdot 10^3 \angle 5,19^\circ \text{ V} = 81,48 \angle 5,19^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{1F} &= (9,76 \cdot 10^{-5} \angle 90^\circ) \cdot \left(\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (0,999 \angle 0,011^\circ) \cdot (580,99 \angle -18,19^\circ) = \\ &= 578,13 \angle -17,48^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$u = \frac{81,48 \cdot 10^3 \cdot \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = 6,92 \%$$

$$P_1 = 3 \cdot 81,48 \cdot 10^3 \cdot 578,13 \cdot \cos(5,19 - (-17,48)) = 130,40 \cdot 10^6 \text{ W} = 130,40 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{126,19 \cdot 10^6}{130,40 \cdot 10^6} \cdot 100 = 96,77 \%$$

c) cosφ = 0,9

$$I_{2F} = \frac{119,55 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 0,9} = 581,00 \text{ A}; \quad \arccos(0,9) = 25,84^\circ; \quad \bar{I}_{2F} = 581,00 \angle -25,84^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_{1F} &= (0,999 \angle 0,011^\circ) \cdot \left(\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (15,323 \angle 73,92^\circ) \cdot (581,00 \angle -25,84^\circ) = \\ &= 82,35 \cdot 10^3 \angle 4,62^\circ \text{ V} = 82,35 \angle 4,62^\circ \text{ kV}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{1F} &= (9,76 \cdot 10^{-5} \angle 90^\circ) \cdot \left(\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (0,999 \angle 0,011^\circ) \cdot (581,00 \angle -25,84^\circ) = \\ &= 577,22 \angle -25,16^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

$$u = \frac{82,35 \cdot 10^3 - \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = 8,06 \%$$

$$P_1 = 3 \cdot 82,35 \cdot 10^3 \cdot 577,22 \cdot \cos(4,62 - (-25,16)) = 123,77 \cdot 10^6 \text{ W} = 123,77 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{119,55 \cdot 10^6}{123,77 \cdot 10^6} \cdot 100 = 96,60 \%$$

d) cosφ=0,85

$$I_{2F} = \frac{112,91 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 0,85} = 581,01 \text{ A}; \quad \arccos(0,85) = 31,79^\circ; \quad \bar{I}_{2F} = 581,01 \angle -31,79^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_{1F} &= (0,999 \angle 0,011^\circ) \cdot \left(\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (15,323 \angle 73,92^\circ) \cdot (581,01 \angle -31,79^\circ) = \\ &= 82,95 \cdot 10^3 \angle 4,14^\circ \text{ V} = 82,95 \angle 4,14^\circ \text{ kV}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{1F} &= (9,76 \cdot 10^{-5} \angle 90^\circ) \cdot \left(\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (0,999 \angle 0.011^\circ) \cdot (581,01 \angle -31,79^\circ) = \\ &= 576,55 \angle -31,15^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

$$u = \frac{82,95 \cdot 10^3 \cdot \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = 8,84 \%$$

$$P_1 = 3 \cdot 82,95 \cdot 10^3 \cdot 576,55 \cdot \cos(4,14 - (-31,15)) = 117,11 \cdot 10^6 \text{ W} = 117,11 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{112,91 \cdot 10^6}{117,11 \cdot 10^6} \cdot 100 = 96,41 \%$$

e) **cosφ=0,8**

$$I_{2F} = \frac{106,27 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 0,8} = 581,02 \text{ A}; \quad \arccos(0,8) = 36,87^\circ; \quad \bar{I}_{2F} = 581,02 \angle -36,87^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_{1F} &= (0,999 \angle 0.011^\circ) \cdot \left(\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (15,323 \angle 73.92^\circ) \cdot (581,02 \angle -36,87^\circ) = \\ &= 83,41 \cdot 10^3 \angle 3,70^\circ \text{ V} = 83,41 \angle 3,70^\circ \text{ kV}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{1F} &= (9,76 \cdot 10^{-5} \angle 90^\circ) \cdot \left(\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (0,999 \angle 0.011^\circ) \cdot (581,02 \angle -36,87^\circ) = \\ &= 576,01 \angle -36,27^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

$$u = \frac{83,41 \cdot 10^3 - \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{\frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = 9,45 \%$$

$$P_1 = 3 \cdot 83,41 \cdot 10^3 \cdot 576,01 \cdot \cos(3,70 - (-36,27)) = 110,46 \cdot 10^6 \text{ W} = 110,46 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{106,27 \cdot 10^6}{110,46 \cdot 10^6} \cdot 100 = 96,21 \%$$

1.2. CÁLCULOS PARA 220 kV.

1.2.1. CÁLCULO DE LAS CONSTANTES DE LA ECUACIÓN DE PROPAGACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA LÍNEA.

$$\bar{Z} = l_{\text{línea}} \cdot (R_k + X_k \cdot j)$$

$$\bar{Y} = l_{\text{línea}} \cdot (G_k + B_k \cdot j)$$

$$\bar{Z} = 35,54 \cdot (0,119 + 0,465 \cdot j) = 17,06 \angle 75,65^\circ \Omega$$

$$\bar{Y} = 35,54 \cdot (6,79 \cdot 10^{-6} + 2,45 \cdot 10^{-6} \cdot j) = 256,60 \cdot 10^{-6} \angle 19,84^\circ \text{ S}$$

$$\bar{A} = \bar{D} = 1 + \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}{2} = 1 + \frac{17,06 \angle 75,65^\circ \cdot 256,60 \cdot 10^{-6} \angle 19,84^\circ}{2} = 0,9998 \angle 0,12^\circ$$

$$\bar{B} = \bar{Z} = 17,06 \angle 75,65^\circ \Omega$$

$$\bar{C} = \bar{Y} + \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Y}^2}{4} = 256,60 \cdot 10^{-6} \angle 19,84^\circ + \frac{17,06 \angle 75,65^\circ \cdot (256,60 \cdot 10^{-6} \angle 19,84^\circ)^2}{4} =$$

$$= 256,57 \cdot 10^{-6} \angle 19,90^\circ \text{ S}$$

1.2.2. POTENCIAS MÁXIMAS, LONGITUDES TÉRMICAS Y POTENCIAS ENTREGADAS AL FINAL DE LA LÍNEA.

a) **cosφ = 1**

$$P_{\text{Máx.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 581 \cdot 1}{1000000} = 221,39 \text{ MW}$$

$$M_e = \frac{0,05 \cdot (220 \cdot 10^3)^2}{0,119 + 0,465 \cdot \tan(\arccos(1))} = 20336,13 \cdot 10^6 \text{ W/km} = 20336,13 \text{ MW/km}$$

$$l_{\text{térmica}} = \frac{20336,13}{221,39} = 91,86 \text{ km}$$

Se observa que $l_{\text{térmica}} > l_{\text{línea}}$, lo que significa que no existen pérdidas por caída de tensión y por tanto es posible transportar toda la potencia mediante criterio térmico. Se explica en el primer caso de la línea de 132 kV.

b) **cosφ = 0,95**

$$P_{\text{Máx.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 581 \cdot 0,95}{1000000} = 210,32 \text{ MW}$$

$$M_e = \frac{0,05 \cdot (220 \cdot 10^3)^2}{0,119 + 0,465 \cdot \tan(\arccos(0,95))} = 8902,36 \cdot 10^6 \text{ W/km} = 8902,36 \text{ MW/km}$$

$$l_{\text{térmica}} = \frac{8902,36}{210,32} = 42,33 \text{ km}$$

$$l_{\text{térmica}} > l_{\text{línea}}$$

c) **cosφ = 0,9**

$$P_{\text{Máx.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 581 \cdot 0,9}{1000000} = 199,25 \text{ MW}$$

$$M_e = \frac{0,05 \cdot (220 \cdot 10^3)^2}{0,119 + 0,465 \cdot \tan(\arccos(0,9))} = 7030,60 \cdot 10^6 \text{ W/km} = 7030,60 \text{ MW/km}$$

$$l_{\text{térmica}} = \frac{7030,60}{199,25} = 35,29 \text{ km}$$

Potencia que puede entregarse al final de la línea:

$$P = \frac{7030,60}{35,54} = 197,82 \text{ MW}$$

d) **cosφ = 0,85**

$$P_{\text{Máx.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 581 \cdot 0,85}{1000000} = 188,18 \text{ MW}$$

$$M_e = \frac{0,05 \cdot (220 \cdot 10^3)^2}{0,119 + 0,465 \cdot \tan(\arccos(0,85))} = 5943,30 \cdot 10^6 \text{ W/km} = 5943,30 \text{ MW/km}$$

$$l_{\text{térmica}} = \frac{5943,30}{188,18} = 31,58 \text{ km}$$

Potencia que puede entregarse al final de la línea:

$$P = \frac{5943,30}{35,54} = 167,23 \text{ MW}$$

e) **cosφ = 0,8**

$$P_{\text{Máx.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 581 \cdot 0,8}{1000000} = 177,11 \text{ MW}$$

$$M_e = \frac{0,05 \cdot (220 \cdot 10^3)^2}{0,119 + 0,465 \cdot \tan(\arccos(0,8))} = 5173,70 \cdot 10^6 \text{ W/km} = 5173,70 \text{ MW/km}$$

$$l_{\text{térnica}} = \frac{5173,70}{177,11} = 29,21 \text{ km}$$

Potencia que puede entregarse al final de la línea:

$$P = \frac{5173,70}{35,54} = 145,57 \text{ MW}$$

Es destacable aquí el uso del valor de caída de tensión del 5% para el cálculo del momento eléctrico al igual que se hacía para 132 kV, aunque el porcentaje de caída de tensión permitido, sea:

$$u = \frac{245 \cdot 10^3 - 220 \cdot 10^3}{220 \cdot 10^3} \cdot 100 = 11,36 \%$$

1.2.3. CAÍDAS DE TENSION Y RENDIMIENTOS.

a) cosφ = 1

$$I_{2F} = \frac{221,39 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 1} = 581 \text{ A}; \quad \arcsin(1) = 0^\circ; \quad \bar{I}_{2F} = 581 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1F} &= (0,9998 \angle 0,12^\circ) \cdot \left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (17,06 \angle 75,65^\circ) \cdot (581 \angle 0^\circ) = \\ &= 129,82 \cdot 10^3 \angle 4,36^\circ \text{ V} = 129,82 \angle 4,36^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{1F} &= (256,57 \cdot 10^{-6} \angle 19,90^\circ) \cdot \left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (0,9998 \angle 0,12^\circ) \cdot (581 \angle 0^\circ) = \\ &= 611,65 \angle 1,15^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$u = \frac{129,82 \cdot 10^3 \cdot \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = 2,21 \%$$

$$P_1 = 3 \cdot 129,82 \cdot 10^3 \cdot 611,65 \cdot \cos(4,36 - 1,15) = 237,85 \cdot 10^6 \text{ W} = 237,85 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{221,39 \cdot 10^6}{237,85 \cdot 10^6} \cdot 100 = 93,08 \%$$

b) $\cos\phi = 0,95$

$$I_{2F} = \frac{210,32 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 1} = 581 \text{ A}; \quad \arcsin(0,95) = 18,19^\circ; \quad \bar{I}_{2F} = 581 \angle -18,19^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1F} &= (0,9998 \angle 0,12^\circ) \cdot \left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (17,06 \angle 75,65^\circ) \cdot (581 \angle -18,19^\circ) = \\ &= 132,60 \cdot 10^3 \angle 3,73^\circ \text{ V} = 132,60 \angle 3,73^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{1F} &= (256,57 \cdot 10^{-6} \angle 19,90^\circ) \cdot \left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (0,9998 \angle 0,12^\circ) \cdot (581 \angle -18,19^\circ) = \\ &= 606,90 \angle -16,18^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$u = \frac{132,60 \cdot 10^3 \cdot \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = 4,40 \%$$

$$P_1 = 3 \cdot 132,60 \cdot 10^3 \cdot 606,90 \cdot \cos(3,73^\circ - (-16,18^\circ)) = 227 \cdot 10^6 \text{ W} = 227 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{210,32 \cdot 10^6}{227 \cdot 10^6} \cdot 100 = 92,65 \%$$

c) $\cos\phi = 0,9$

$$I_{2F} = \frac{199,25 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 1} = 581 \text{ A}; \quad \arcsin(0,9) = 25,84^\circ; \quad \bar{I}_{2F} = 581 \angle -25,84^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_{1F} &= (0,9998 \angle 0,12^\circ) \cdot \left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (17,06 \angle 75,65^\circ) \cdot (581 \angle -25,84^\circ) = \\ &= 133,62 \cdot 10^3 \angle 3,36^\circ \text{ V} = 133,62 \angle 3,36^\circ \text{ kV}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{1F} &= (256,57 \cdot 10^{-6} \angle 19,90^\circ) \cdot \left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (0,9998 \angle 0,12^\circ) \cdot (581 \angle -25,84^\circ) = \\ &= 604,12 \angle -23,51^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

$$u = \frac{133,62 \cdot 10^3 - \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = 5,20 \%$$

$$P_1 = 3 \cdot 133,62 \cdot 10^3 \cdot 604,12 \cdot \cos(3,36 - (-23,51)) = 216,01 \cdot 10^6 \text{ W} = 216,01 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{199,25 \cdot 10^6}{216,01 \cdot 10^6} \cdot 100 = 92,24 \%$$

d) cosφ=0,85

$$I_{2F} = \frac{188,18 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 0,85} = 581 \text{ A}; \quad \arccos(0,85) = 31,79^\circ; \quad \bar{I}_{2F} = 581 \angle -31,79^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_{1F} &= (0,9998 \angle 0,12^\circ) \cdot \left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) + (17,06 \angle 75,65^\circ) \cdot (581 \angle -31,79^\circ) = \\ &= 134,33 \cdot 10^3 \angle 3,04^\circ \text{ V} = 134,33 \angle 3,04^\circ \text{ kV}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{1F} &= (256,57 \cdot 10^{-6} \angle 19,90^\circ) \cdot \left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ\right) + (0,9998 \angle 0,12^\circ) \cdot (581 \angle -31,79^\circ) = \\ &= 601,68 \angle -29,24^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

$$u = \frac{134,33 \cdot 10^3 \cdot \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = 5,76 \%$$

$$P_1 = 3 \cdot 134,33 \cdot 10^3 \cdot 601,68 \cdot \cos(3,04 - (-29,24)) = 204,99 \cdot 10^6 \text{ W} = 204,99 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{188,18 \cdot 10^6}{204,99 \cdot 10^6} \cdot 100 = 91,80 \%$$

e) **cosφ = 0,8**

$$I_{2F} = \frac{177,11 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 1} = 581 \text{ A}; \quad \arccos(0,8) = 36,87^\circ; \quad \bar{I}_{2F} = 581 \angle -36,87^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_{1F} &= (0,9998 \angle 0,12^\circ) \cdot \left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ\right) + (17,06 \angle 75,65^\circ) \cdot (581 \angle -36,87^\circ) = \\ &= 134,87 \cdot 10^3 \angle 2,75^\circ \text{ V} = 134,87 \angle 2,75^\circ \text{ kV}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{1F} &= (256,57 \cdot 10^{-6} \angle 19,90^\circ) \cdot \left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ\right) + (0,9998 \angle 0,12^\circ) \cdot (581 \angle -36,87^\circ) = \\ &= 599,41 \angle -34,15^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

$$u = \frac{134,87 \cdot 10^3 - \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = 6,19 \%$$

$$P_1 = 3 \cdot 134,87 \cdot 10^3 \cdot 599,1 \cdot \cos(2,75 - (-34,15)) = 193,96 \cdot 10^6 \text{ W} = 193,96 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{177,11 \cdot 10^6}{193,96 \cdot 10^6} \cdot 100 = 91,31 \%$$

2. DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS MECÁNICOS.

2.1. CÁLCULOS PARA 132 kV.

2.1.1. CÁLCULO DE TRACCIONES.

CANTÓN COMPRENDIDO ENTRE APOYOS 62-69.

a) CABLE CONDUCTOR:

$$a_r = \left(\frac{119,40^3 + 165,00^3 + 271,38^3 + 271,14^3 + 173,88^3 + 334,84^3 + 218,51^3}{119,40 + 165,00 + 271,38 + 271,14 + 173,88 + 334,84 + 218,51} \right)^{1/2}$$

$$a_r = 252,83 \text{ m.}$$

$$T_{\text{máx}} = \frac{84560}{3} = 28187 \text{ N}$$

1) **Hipótesis reglamentaria de máxima tracción: hipótesis de hielo.**

Peso propio, hielo: m_1 .

$$\sigma_1 = -15 \text{ °C.}$$

$$T_1 = T_{\text{máx.}} = 28187 \text{ N}$$

$$K = \frac{281,1 \cdot 10^{-6} \cdot 75,54 \cdot 10^9 \cdot 252,83^2 \cdot (0,978 \cdot 9,8)^2}{24} = 5,1953 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$m_h = (0,18 \cdot \sqrt{21,80}) \cdot 10 = 8,40 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_1 = \frac{0,978 \cdot 9,8 + 0,840 \cdot 9,8}{0,978 \cdot 9,8} = 1,86$$

$$A_{\sigma_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot \frac{1,86^2}{28187^2} + 18,9 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - (-15)) \cdot 281,1 \cdot 10^{-6} \cdot 75,54 \cdot 10^9 - 28187$$

$$A_{\sigma_2} = -5564,5932 + 401,3282 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot m_2^2$$

2) **Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de viento.**

Peso propio, viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -10 \text{ °C.}$$

T_2 : A obtener.

$$q = 50 \cdot \left(\frac{120}{120} \right)^2 = 50 \text{ daN/m}^2$$

$$F_v = 50 \cdot 10 \cdot 21,8 \cdot 10^{-3} = 10,9 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(0,978 \cdot 9,8)^2 + 10,9^2}}{(0,978 \cdot 9,8)} = 1,51$$

$$A_{\sigma_2} = -5564,5932 + 401,3282 \cdot (10+15) = -3557,9522 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,51^2 = 1,1846 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 3557,9522) = 1,1846 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

- 1) $T_2 = 24045,75 \text{ N}$
- 2) $T_2 = 22195,59 \angle 117,49^\circ \text{ N}$
- 3) $T_2 = 22195,59 \angle -117,49^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 24045,75 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 24045,75 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

3) Hipótesis de tracción de cada día TCD.

El apartado 3.2.2. Comprobación de fenómenos vibratorios, de la instrucción 07 del reglamento, establece que: "En general, se recomienda que la tracción a la temperatura de 15°C no supere el 22% de la carga de rotura, si se realiza el estudio de

amortiguamiento y se instalan dichos dispositivos, o que bien no supere el 15% de la carga de rotura si no se instalan".

En el proyecto inicial de la línea a 132 kV, se calcula la tracción de cada día y se comprueba que se encuentre entre esos dos valores, con lo que en el presente documento y para esta parte del estudio, no se impone ninguna condición a cerca del porcentaje de dicha tracción, simplemente se calcula y se observa que se encuentre dentro de dicho rango.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -5564,5932 + 401,3282 \cdot (15+15) = 6475,2528 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,1953 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 6475,2528) = 5,1953 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 15408,08 \text{ N}$

2) $T_2 = 18362,47 \angle 126,57^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 18362,47 \angle -126,57^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 15408,08 \text{ N}$$

El porcentaje que representa esta T_2 sobre la T de rotura del cable es:

$$\frac{15408,08}{84560} \cdot 100 = 18,22 \%$$

En el proyecto del que parte este trabajo se obtiene una $T_2 = 15084,70 \text{ N}$, con lo que el porcentaje es:

$$\frac{15084,70}{84560} \cdot 100 = 17,84 \%$$

Puede observarse que el error entre los cálculos de ambos proyectos es de:

$$18,22 \% - 17,84 \% = 0,38 \%$$

Lo cual indica que debido a esta comprobación de la línea a 132 kV, se puede concluir que los cálculos se realizaron de una forma correcta.

También es destacable que, al salir un valor de tracción máxima de cada día (TCD), superior al 15 %, habría que instalar amortiguadores previa realización del estudio de amortiguamiento, tal como indica el reglamento en el apartado anteriormente mencionado.

4) Hipótesis de vibraciones CHS:

Se impone que la tensión salida de esta hipótesis ha de ser menor a $T_{\text{CHS}} = 0,225 \cdot T_{\text{rotura}}$.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -5564,5932 + 401,3282 \cdot (-5+15) = -1551,3112 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,1953 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 1551,3112) = 5,1953 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 17852,41 \text{ N}$

2) $T_2 = 17059,13 \angle 118,54^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 17059,13 \angle -118,54^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17852,41 \text{ N}$$

$$T_2 = 17852,41 \text{ N} < 0,225 \cdot 84560 = 19026 \text{ N. Cumple con esta hipótesis.}$$

5) Flechas máximas reglamentarias:

5.1) Hipótesis de viento:

Peso propio, viento: $m_2 = 1,51$.

$$\sigma_2 = 15^\circ \text{C.}$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -5564,5932 + 401,3282 \cdot (15+15) = 6475,2528 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,51^2 = 1,1846 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 6475,2528) = 1,1846 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 20829,08 \text{ N}$

2) $T_2 = 23847,94 \angle 124,92^\circ \text{ N}$

$$3) T_2 = 23847,94 \angle -124,92^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 20829,08 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{20829,08}{1,51 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 1439,22 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 1439,22} = 5,55 \text{ m}$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{10,9}{0,978 \cdot 9,8}\right) = 48,67^\circ$$

$$f_2' = 5,55 \cdot \cos(48,67) = 3,67 \text{ m}$$

Se requiere saber la flecha en el vano que se encuentra entre los apoyos 68 y 69, puesto que es el vano que cruza con la carretera nacional.

$$f_{68-69} = 3,67 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83}\right)^2 = 2,74 \text{ m}$$

5.2) Hipótesis de temperatura:

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 50^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -5564,5932 + 401,3282 \cdot (50+15) = 20521,74 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,1953 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 20521,74) = 5,1953 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 12536,24 \text{ N}$

2) $T_2 = 20357,37 \angle 144,29^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 20357,37 \angle -144,29^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 12536,24 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{12536,24}{1 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 1307,98 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 1307,98} = 6,11 \text{ m}$$

$$f_{68-69} = 6,11 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83}\right)^2 = 4,56 \text{ m}$$

5.3) Hipótesis de hielo:

Peso propio, hielo: $m_2 = 1,86$.

$\sigma_2 = 0^\circ \text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -5564,5932 + 401,3282 \cdot (0+15) = 455,33 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,86^2 = 1,7974 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 455,33) = 1,7974 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 26043,01 \text{ N}$

2) $T_2 = 26271,00 \angle 120,29^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 26271,00 \angle -120,29^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 26043,01 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{26043,01}{1,86 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 1460,88 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 1460,88} = 5,47 \text{ m}$$

$$f_{68-69} = 5,47 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83}\right)^2 = 4,09 \text{ m}$$

Con lo que, la flecha máxima que puede presentar el conductor en ese vano concreto es:

$$f_{68-69} = \max\{2,74 ; 4,56 ; 4,09\}$$

$$f_{68-69} = 4,56 \text{ m}$$

Correspondiente a la hipótesis de temperatura.

b) **CABLE DE TIERRA.**

1) **Hipótesis reglamentaria de máxima tracción: hipótesis de hielo.**

Peso propio, hielo: m_1 .

$$\sigma_1 = -15 \text{ °C.}$$

$$T_{\text{máx}} = T_1 = \frac{53960}{3} = 17987 \text{ N}$$

$$K = \frac{78,9 \cdot 10^{-6} \cdot 116,50 \cdot 10^9 \cdot 252,83^2 \cdot (0,426 \cdot 9,8)^2}{24} = 4,2670 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$m_h = (0,18 \cdot \sqrt{13,40}) \cdot 10 = 6,59 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_1 = \frac{0,426 \cdot 9,8 + 0,659 \cdot 9,8}{0,426 \cdot 9,8} = 2,55$$

$$A_{\sigma_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot \frac{2,55^2}{17987^2} + 17,6 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - (-15)) \cdot 78,9 \cdot 10^{-6} \cdot 116,50 \cdot 10^9 - 17987$$

$$A_{\sigma_2} = -9410,9850 + 161,7766 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot m_2^2$$

2) **Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de viento.**

Peso propio, viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -10 \text{ °C.}$$

T_2 : A obtener.

$$q = 60 \cdot \left(\frac{120}{120} \right)^2 = 60 \text{ daN/m}^2$$

$$F_v = 60 \cdot 10 \cdot 13,4 \cdot 10^{-3} = 8,04 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(0,426 \cdot 9,8)^2 + 8,04^2}}{(0,426 \cdot 9,8)} = 2,17$$

$$A_{\sigma_2} = -9410,9850 + 161,7766 \cdot (10 + 15) = -8602,1020 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,17^2 = 2,010 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 8602,1020) = 2,010 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 16231,40 \text{ N}$

2) $T_2 = 11128,08 \angle 110,05^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 11128,08 \angle -110,05^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 16231,40 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 16231,40 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

3) Hipótesis de tracción de cada día TCD.

Se realiza el mismo procedimiento y con las mismas consideraciones que para el cable conductor.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -9410,9850 + 161,7766 \cdot (15 + 15) = -4557,6870 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,2670 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 4557,6870) = 4,2670 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 9393,49 \text{ N}$

2) $T_2 = 6739,81 \angle 111,02$ ° N

3) $T_2 = 6739,81 \angle -111,02$ ° N

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 9393,49 \text{ N}$$

El porcentaje que representa esta T_2 sobre la T de rotura del cable es:

$$\frac{9393,49}{53960} \cdot 100 = 17,41 \%$$

En el proyecto del que parte este trabajo se obtiene una $T_2 = 7571,97 \text{ N}$ (772,65 kgf), con lo que el porcentaje es:

$$\frac{7571,97}{53960} \cdot 100 = 14,03 \%$$

Puede observarse que el error entre los cálculos de ambos proyectos es de:

$$17,41 \% - 14,03\% = 3,38 \%$$

Lo cual indica que debido a esta comprobación de los cálculo de la línea a 132 kV, se puede concluir que los cálculos se realizaron de una forma correcta ya que el error, aun siendo mayor que en el caso de los conductores, no representa un valor demasiado alto.

Es pertinente aquí también el estudio de amortiguamiento.

4) Hipótesis de vibraciones CHS:

Se impone que la tensión salida de esta hipótesis ha de ser menor a $T_{CHS} = 0,225 \cdot T_{rotura}$.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$$\sigma_2 = -5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -9410,9850 + 161,7766 \cdot (-5 + 15) = -7793,2190 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,2670 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 7793,2190) = 4,2670 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 11196,79 \text{ N}$

2) $T_2 = 6173,26 \angle 106,00 \text{ }^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 6173,26 \angle -106,00 \text{ }^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 11196,79 \text{ N}$$

$T_2 = 11196,79 \text{ N} < 0,225 \cdot 53960 = 12141 \text{ N}$. Cumple con esta hipótesis.

5) Flechas máximas reglamentarias:

5.1) Hipótesis de viento:

Peso propio, viento: $m_2 = 2,17$.

$\sigma_2 = 15 \text{ °C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -9410,9850 + 161,7766 \cdot (15 + 15) = -4557,6870 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,17^2 = 2,010 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 4557,6870) = 2,010 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 14336,73 \text{ N}$

2) $T_2 = 11840,58 \angle 114,39 \text{ ° N}$

3) $T_2 = 11840,58 \angle -114,39 \text{ ° N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 14336,73 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{14336,73}{2,17 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1582,54 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 1582,54} = 5,05 \text{ m}$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{8,04}{0,426 \cdot 9,8}\right) = 62,56^\circ$$

$$f_2' = 5,05 \cdot \cos(62,56) = 2,33 \text{ m}$$

Se requiere saber la flecha en el vano que se encuentra entre los apoyos 68 y 69, puesto que es el vano que cruza con la carretera nacional.

$$f_{68-69} = 2,33 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83}\right)^2 = 1,74 \text{ m}$$

5.2) Hipótesis de temperatura:

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 50^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -9410,9850 + 161,7766 \cdot (50 + 15) = 1104,4940 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,2670 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 1104,4940) = 4,2670 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 7177,74 \text{ N}$

$$2) T_2 = 7710,23 \angle 122,49^\circ \text{ N}$$

$$3) T_2 = 7710,23 \angle -122,49^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 7177,74 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{7177,74}{1 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1719,30 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 1719,30} = 4,65 \text{ m}$$

$$f_{68-69} = 4,65 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83}\right)^2 = 3,47 \text{ m}$$

5.3) Hipótesis de hielo:

Peso propio, hielo: $m_2 = 2,55$.

$\sigma_2 = 0^\circ \text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -9410,9850 + 161,7766 \cdot (0 + 15) = -6984,3360 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,55^2 = 2,7746 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 6984,3360) = 2,7746 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 16806,90 \text{ N}$

2) $T_2 = 12848,62 \angle 112,47^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 12848,62 \angle -112,47^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$T_2 = 16806,90 \text{ N}$

$$h_2 = \frac{16806,90}{2,55 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1578,74 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 1578,74} = 5,06 \text{ m}$$

$$f_{68-69} = 5,06 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83} \right)^2 = 3,78 \text{ m}$$

Con lo que, la flecha máxima que puede presentar el conductor en ese vano concreto es:

$$f_{68-69} = \text{máx}\{1,74; 3,47; 3,78\}$$

$$f_{68-69} = 3,78 \text{ m}$$

Correspondiente a la hipótesis de hielo.

CANTÓN COMPRENDIDO ENTRE APOYOS 69-77.

a) CABLE CONDUCTOR:

$$a_r = \left(\frac{223,97^3 + 165,61^3 + 171,40^3 + 185,88^3 + 291,63^3 + 256,00^3 + 243,86^3 + 347,87^3}{223,97 + 165,61 + 171,40 + 185,88 + 291,63 + 256,00 + 243,86 + 347,87} \right)^{1/2}$$

$$a_r = 257,86 \text{ m.}$$

$$T_{\text{máx}} = \frac{84560}{3} = 28187 \text{ N}$$

1) Hipótesis reglamentaria de máxima tracción: hipótesis de hielo.

Peso propio, hielo: m_1 .

$$\sigma_1 = -15 \text{ °C.}$$

$$T_1 = T_{\text{máx.}} = 28187 \text{ N}$$

$$K = \frac{281,1 \cdot 10^{-6} \cdot 75,54 \cdot 10^9 \cdot 257,86^2 \cdot (0,978 \cdot 9,8)^2}{24} = 5,4041 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$m_h = (0,18 \cdot \sqrt{21,80}) \cdot 10 = 8,40 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_1 = \frac{0,978 \cdot 9,8 + 0,840 \cdot 9,8}{0,978 \cdot 9,8} = 1,86$$

$$A_{\sigma_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot \frac{1,86^2}{28187^2} + 18,9 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - (-15)) \cdot 281,1 \cdot 10^{-6} \cdot 75,54 \cdot 10^9 - 28187$$

$$A_{\sigma_2} = -4655,3948 + 401,3282 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot m_2^2$$

2) Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de viento.

Peso propio, viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -10 \text{ }^\circ\text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$q = 50 \cdot \left(\frac{120}{120} \right)^2 = 50 \text{ daN/m}^2$$

$$F_v = 50 \cdot 10 \cdot 21,8 \cdot 10^{-3} = 10,9 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(0,978 \cdot 9,8)^2 + 10,9^2}}{(0,978 \cdot 9,8)} = 1,51$$

$$A_{\sigma_2} = -4655,3948 + 401,3282 \cdot (-10 + 15) = -2648,7538 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,51^2 = 1,2322 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 2648,7538) = 1,2322 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 24014,78 \text{ N}$

2) $T_2 = 22651,72 \angle 118,14^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 22651,72 \angle -118,14^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 24014,78 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 24014,78 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

3) Hipótesis de tracción de cada día TCD.

Se tienen en cuenta las mismas consideraciones que para el otro cantón.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$$\sigma_2 = 15 \text{ °C.}$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -4655,3948 + 401,3282 \cdot (15 + 15) = 7384,4512 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,4041 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 7384,4512) = 5,4041 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 15400,57 \text{ N}$

2) $T_2 = 18732,39 \angle 127,46 \text{ ° N}$

3) $T_2 = 18732,39 \angle -127,46 \text{ ° N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 15400,57 \text{ N}$$

El porcentaje que representa esta T_2 sobre la T de rotura del cable es:

$$\frac{15400,57}{84560} \cdot 100 = 18,21 \%$$

En el proyecto del que parte este trabajo se obtiene una $T_2 = 15084,70$ N, con lo que el porcentaje es:

$$\frac{15084,70}{84560} \cdot 100 = 17,84 \%$$

Puede observarse que el error entre los cálculos de ambos proyectos es de:

$$18,21\% - 17,84 \% = 0,37 \%$$

Lo cual indica que debido a esta comprobación de los cálculos de la línea a 132 kV, se puede concluir que los cálculos se realizaron de una forma correcta.

También es destacable que, al salir un valor de tracción máxima de cada día (TCD), superior al 15 %, habría que instalar amortiguadores previa realización del estudio de amortiguamiento, tal como indica el reglamento en el apartado anteriormente mencionado.

4) Hipótesis de vibraciones CHS:

Se impone que la tensión salida de esta hipótesis ha de ser menor a $T_{CHS} = 0,225 \cdot T_{rotura}$.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = -5$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -4655,3948 + 401,3282 \cdot (0 + 15) = -642,1128 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,4041 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 642,1128) = 5,4041 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 17765,22 \text{ N}$

2) $T_2 = 17441,20 \angle 119,40^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 17441,20 \angle -119,40^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17765,22 \text{ N}$$

$$T_2 = 17765,22 \text{ N} < 0,225 \cdot 84560 = 19026 \text{ N. Cumple con esta hipótesis.}$$

5) Flechas máximas reglamentarias:

5.1) Hipótesis de viento:

Peso propio, viento: $m_2 = 1,51$.

$$\sigma_2 = 15^\circ \text{C.}$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -4655,3948 + 401,3282 \cdot (15 + 15) = 7384,4512 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,51^2 = 1,2322 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 7384,4512) = 1,2322 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

$$1) T_2 = 20879,64 \text{ N}$$

$$2) T_2 = 24292,88 \angle 125,57^\circ \text{ N}$$

$$3) T_2 = 24292,88 \angle -125,57^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 20879,64 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{20879,64}{1,51 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 1442,72 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1442,72} = 5,76 \text{ m}$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{10,9}{0,978 \cdot 9,8}\right) = 48,67^\circ$$

$$f_2' = 5,76 \cdot \cos(48,67) = 3,80 \text{ m}$$

Se requiere saber la flecha en el vano que se encuentra entre los apoyos 69 y 70.

$$f_{69-70} = 3,80 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86}\right)^2 = 2,87 \text{ m}$$

5.2) Hipótesis de temperatura:

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 50^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -4655,3948 + 401,3282 \cdot (50 + 15) = 21430,9382 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,4041 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 21430,9382) = 5,4041 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 12601,33 \text{ N}$

2) $T_2 = 20708,73 \angle 145,25^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 20708,73 \angle -145,25^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 12601,33 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{12601,33}{1 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 1314,78 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1314,78} = 6,32 \text{ m}$$

$$f_{69-70} = 6,32 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86} \right)^2 = 4,77 \text{ m}$$

5.3) Hipótesis de hielo:

Peso propio, hielo: $m_2 = 1,86$.

$\sigma_2 = 0$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -4655,3948 + 401,3282 \cdot (0 + 15) = 1364,5282 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,86^2 = 1,8696 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 1364,5282) = 1,8696 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 26093,80 \text{ N}$

2) $T_2 = 26767,37 \angle 120,86^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 26767,37 \angle -120,86^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 26093,80 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{26093,80}{1,86 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 1463,72 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1463,72} = 5,68 \text{ m}$$

$$f_{69-70} = 5,68 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86} \right)^2 = 4,29 \text{ m}$$

Con lo que, la flecha máxima que puede presentar el conductor en ese vano concreto es:

$$f_{69-70} = \max\{2,87; 4,77; 4,29\}$$

$$f_{69-70} = 4,77 \text{ m}$$

Correspondiente a la hipótesis de temperatura.

b) CABLE DE TIERRA.

1) Hipótesis reglamentaria de máxima tracción: hipótesis de hielo.

Peso propio, hielo: m_1 .

$$\sigma_1 = -15 \text{ °C.}$$

$$T_{\max} = T_1 = \frac{53960}{3} = 17987 \text{ N}$$

$$K = \frac{78,9 \cdot 10^{-6} \cdot 116,50 \cdot 10^9 \cdot 257,86^2 \cdot (0,426 \cdot 9,8)^2}{24} = 4,4384 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$m_h = (0,18 \cdot \sqrt{13,40}) \cdot 10 = 6,59 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_1 = \frac{0,426 \cdot 9,8 + 0,659 \cdot 9,8}{0,426 \cdot 9,8} = 2,55$$

$$A_{\sigma_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot \frac{2,55^2}{17987^2} + 17,6 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - (-15)) \cdot 78,9 \cdot 10^{-6} \cdot 116,50 \cdot 10^9 - 17987$$

$$A_{\sigma_2} = -9066,4973 + 161,7766 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot m_2^2$$

2) Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de viento.

Peso propio, viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -10 \text{ °C.}$$

T_2 : A obtener.

$$q = 60 \cdot \left(\frac{120}{120} \right)^2 = 60 \text{ daN/m}^2$$

$$F_v = 60 \cdot 10 \cdot 13,4 \cdot 10^{-3} = 8,04 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(0,426 \cdot 9,8)^2 + 8,04^2}}{(0,426 \cdot 9,8)} = 2,17$$

$$A_{\sigma_2} = -9066,4973 + 161,7766 \cdot (-10 + 15) = -8257,6143 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,17^2 = 2,1000 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 8257,6143) = 2,1000 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 16229,94 \text{ N}$

2) $T_2 = 11374,99 \angle 110,51^\circ \text{ N}$

$$3) T_2 = 11374,99 \angle -110,51^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 16229,94 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 16229,94 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

3) Hipótesis de tracción de cada día TCD.

Se realiza el mismo procedimiento y con las mismas consideraciones que para el otro cantón.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$$\sigma_2 = 15^\circ \text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -9066,4973 + 161,7766 \cdot (15 + 15) = -4213,1993 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,4384 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 4213,1993) = 4,4384 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

$$1) T_2 = 9321,38 \text{ N}$$

$$2) T_2 = 6900,38 \angle 111,72^\circ \text{ N}$$

$$3) T_2 = 6900,38 \angle -111,72^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 9321,38 \text{ N}$$

El porcentaje que representa esta T_2 sobre la T de rotura del cable es:

$$\frac{9321,38}{53960} \cdot 100 = 17,27 \%$$

En el proyecto del que parte este trabajo se obtiene una $T_2 = 7571,97 \text{ N}$ (772,65 kgf), con lo que el porcentaje es:

$$\frac{7571,97}{53960} \cdot 100 = 14,03 \%$$

Puede observarse que el error entre los cálculos de ambos proyectos es de:

$$17,27 \% - 14,03\% = 3,24 \%$$

Lo cual indica que debido a esta comprobación de los cálculos de la línea a 132 kV, se puede concluir que los cálculos se realizaron de una forma correcta ya que el error, aun siendo mayor que en el caso de los conductores, no representa un valor demasiado alto.

Es pertinente aquí también el estudio de amortiguamiento.

4) Hipótesis de vibraciones CHS:

Se impone que la tensión salida de esta hipótesis ha de ser menor a $T_{\text{CHS}} = 0,225 \cdot T_{\text{rotura}}$.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$$\sigma_2 = -5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -9066,4973 + 161,7766 \cdot (0 + 15) = -7448,7313 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,4384 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 7448,7313) = 4,4384 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 11070,36 \text{ N}$

2) $T_2 = 6331,88 \angle 106,62^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 6331,88 \angle -106,62^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 11070,36 \text{ N}$$

$$T_2 = 11070,36 \text{ N} < 0,225 \cdot 53960 = 12141 \text{ N. Cumple con esta hipótesis.}$$

5) Flechas máximas reglamentarias:

5.1) Hipótesis de viento:

Peso propio, viento: $m_2 = 2,17$.

$$\sigma_2 = 15^\circ \text{C.}$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -9066,4973 + 161,7766 \cdot (15 + 15) = -4213,1993 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,17^2 = 2,1000 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 4213,1993) = 2,1000 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 14375,32 \text{ N}$

2) $T_2 = 12086,51 \angle 114,86^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 12086,51 \angle -114,86^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 14375,32 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{14375,32}{2,17 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1586,80 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1586,80} = 5,24 \text{ m}$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{8,04}{0,426 \cdot 9,8}\right) = 62,56^\circ$$

$$f_2' = 5,24 \cdot \cos(62,56) = 2,41 \text{ m}$$

Se requiere saber la flecha en el vano que se encuentra entre los apoyos 69 y 70, puesto que es el vano que cruza con la carretera nacional.

$$f_{69-70}' = 2,41 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86}\right)^2 = 1,82 \text{ m}$$

5.2) Hipótesis de temperatura:

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 50^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -9066,4973 + 161,7766 \cdot (50 + 15) = 1448,9817 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,4384 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 1448,9817) = 4,4384 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 7174,27 \text{ N}$

2) $T_2 = 7865,46 \angle 123,24^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 7865,46 \angle -123,24^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 7174,27 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{7174,27}{1 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1718,47 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1718,47} = 4,84 \text{ m}$$

$$f_{69-70} = 4,84 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86}\right)^2 = 3,65 \text{ m}$$

5.3) Hipótesis de hielo:

Peso propio, hielo: $m_2 = 2,55$.

$\sigma_2 = 0$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -9066,4973 + 161,7766 \cdot (0 + 15) = -6639,8483 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,55^2 = 2,8861 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 6639,8483) = 2,8861 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 16829,60 \text{ N}$

2) $T_2 = 13095,40 \angle 112,90^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 13095,40 \angle -112,90^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 16829,60 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{16829,60}{2,55 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1580,88 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1580,88} = 5,26 \text{ m}$$

$$f_{69-70} = 5,26 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86}\right)^2 = 3,97 \text{ m}$$

Con lo que, la flecha máxima que puede presentar el conductor en ese vano concreto es:

$$f_{69-70} = \max\{1,82; 3,65; 3,97\}$$

$$f_{69-70} = 3,97 \text{ m}$$

Correspondiente a la hipótesis de hielo.

2.1.2. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN EL APOYO 69.

HIPÓTESIS I: Viento

1) Fuerzas verticales:

$$F_{v\text{conductores}} = 3 \cdot g \cdot p \cdot a_{gv} = 3 \cdot 9,8 \cdot 0,978 \cdot 188,33 = 5414,23 \text{ N}$$

$$F_{v1\text{conductor}} = \frac{5414,23}{3} = 1804,74 \text{ N}$$

$$F_{v\text{cable_tierra}} = g \cdot p \cdot a_{gv} = 9,8 \cdot 0,426 \cdot 185,72 = 775,34 \text{ N}$$

2) Fuerzas transversales:

$$F_{t\text{conductores}} = 3 \cdot F_v \cdot a_e = 3 \cdot 10,9 \cdot 221,24 = 7234,55 \text{ N}$$

$$F_{v1\text{conductor}} = \frac{7234,55}{3} = 2411,52 \text{ N}$$

$$F_{t\text{cable_tierra}} = F_v \cdot a_e = 8,04 \cdot 221,24 = 1778,77 \text{ N}$$

3) Fuerzas longitudinales:

No aplica para esta hipótesis.

HIPÓTESIS II:

a) Hielo:

1) Fuerzas verticales:

$$F_{v\text{conductores}} = 3 \cdot g \cdot p \cdot a_{gh} = 3 \cdot 9,8 \cdot 0,978 \cdot 189,90 = 5460,23 \text{ N}$$

$$F_{v1\text{conductor}} = \frac{5460,23}{3} = 1820,08 \text{ N}$$

$$F_{v\text{cable_tierra}} = g \cdot p \cdot a_{gh} = 9,8 \cdot 0,426 \cdot 187,75 = 783,82 \text{ N}$$

2) Fuerzas transversales:

No aplica para esta hipótesis.

3) Fuerzas longitudinales:

No aplica para esta hipótesis.

b) Hielo + viento:

No aplica para la línea de 132 kV puesto que esta hipótesis sólo se aplica a líneas de categoría especial.

HIPÓTESIS III: Desequilibrio de tracciones.

1) Fuerzas verticales: Mismas fuerzas que en hipótesis de hielo.

$$F_{v\text{conductores}} = 3 \cdot g \cdot p \cdot a_{gh} = 3 \cdot 9,8 \cdot 0,978 \cdot 189,90 = 5460,23 \text{ N}$$

$$F_{v1\text{conductor}} = \frac{5460,23}{3} = 1820,08 \text{ N}$$

$$F_{\text{v cable_tierra}} = g \cdot p \cdot a_{\text{gh}} = 9,8 \cdot 0,426 \cdot 187,75 = 783,82 \text{ N}$$

2) **Fuerzas transversales:**

No aplica para esta hipótesis.

3) **Fuerzas longitudinales:**

De acuerdo al apartado 3.1.4.3 Desequilibrio en apoyos de anclaje, al cual remite la tabla 8, se ha de considerar un esfuerzo equivalente al 50% de las tracciones unilaterales, tanto para los cables conductores como para el cable de tierra. Además, ha de considerarse la torsión que puedan dar lugar estos esfuerzos.

Es decir: se realizan los cálculos como si la tracción a uno de los dos lados del apoyo fuera un 50% superior al valor real de la misma. Se utiliza la tracción máxima resultante de las hipótesis de los cantones estudiados; en este caso la de hielo en cualquiera de los dos cantones, tanto para los conductores como para el cable de tierra, puesto que es la misma.

$$F_L = 3 \cdot T_{\text{máx.}} \cdot 1,50 - 3 \cdot T_{\text{máx.}} = 3 \cdot T_{\text{máx.}} \cdot (1,50 - 1) = 3 \cdot T_{\text{máx.}} \cdot 0,50$$

$$F_{L\text{conductores}} = 3 \cdot 0,50 \cdot 28187 = 42280,50 \text{ N}$$

$$F_{L\text{cable_tierra}} = 0,50 \cdot 28187 = 14093,5 \text{ N}$$

Para calcular el momento torsor:

$$M = 0,50 \cdot T_{\text{máx.}} \cdot m_{T\text{máx.}} = 0,50 \cdot 28187 \cdot 2,90 = 40871,15 \text{ N}$$

HIPÓTESIS IV: Rotura de conductores.

1) **Fuerzas verticales:**

$$F_{\text{v conductores}} = 3 \cdot g \cdot p \cdot a_{\text{gh}} = 3 \cdot 9,8 \cdot 0,978 \cdot 189,90 = 5460,23 \text{ N}$$

$$F_{v1conductor} = \frac{5460,23}{3} = 1820,08 \text{ N}$$

$$F_{vcable_tierra} = g \cdot p \cdot a_{gh} = 9,8 \cdot 0,426 \cdot 187,75 = 783,82 \text{ N}$$

2) **Fuerzas transversales:**

No aplica para esta hipótesis.

3) **Fuerzas longitudinales:**

Atendiendo al apartado 3.1.5.3 Rotura de conductores en apoyos de anclaje, al cual remite la tabla 8 del reglamento, se observa que para un único conductor por fase ha de considerarse el esfuerzo debido a la rotura de un cable, sin tener en cuenta reducción alguna de su tensión mecánica. Esto es tanto para los cables conductores como para el cable de tierra.

Con lo cual:

$$F_L = T_{\text{máx.}}$$

$$F_{v1conductor} = 28187 \text{ N}$$

$$F_{vcable_tierra} = 28187 \text{ N}$$

2.2. CÁLCULOS PARA 220 kV.

2.2.1. CÁLCULO DE TRACCIONES.

CANTÓN COMPRENDIDO ENTRE APOYOS 62-69.

a) **CABLE CONDUCTOR:**

$$a_r = 252,83 \text{ m.}$$

$$T_{\text{máx}} = \frac{84560}{3} = 28187 \text{ N}$$

1) Hipótesis reglamentaria de máxima tracción: hipótesis de hielo.

Peso propio, hielo: m_1 .

$$\sigma_1 = -15 \text{ °C.}$$

$$T_1 = T_{\text{máx.}} = 28187 \text{ N}$$

$$K = 5,1953 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$m_h = 8,40 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_1 = 1,86$$

$$A_{\sigma_2} = -5564,5932 + 401,3282 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot m_2^2$$

Estos valores son iguales que para el caso del cantón 62-69 de 132 kV, debido a que el cable empleado es el mismo y además, al ser el mismo cantón, el vano ideal de regulación no varía.

2) **Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de viento.**

Peso propio, viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -10 \text{ }^\circ\text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$q = 50 \cdot \left(\frac{140}{120} \right)^2$$

$$F_v = 50 \cdot \left(\frac{140}{120} \right)^2 \cdot 10 \cdot 21,8 \cdot 10^{-3} = 14,84 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(0,978 \cdot 9,8)^2 + 14,84^2}}{(0,978 \cdot 9,8)} = 1,84$$

$$A_{\sigma_2} = -5564,5932 + 401,3282 \cdot (10+15) = -3557,9522 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,84^2 = 1,7589 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 3557,9522) = 1,7589 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 27248,12 \text{ N}$

2) $T_2 = 25406,94 \angle 117,79 \text{ }^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 25406,94 \angle -117,79 \text{ }^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 27248,12 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 27248,12 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

3) Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de hielo + viento.

Peso hielo + viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$e = -\frac{21,8 \cdot 10^{-3}}{2} + \left(\frac{21,8 \cdot 10^{-3}{}^2}{4} + \frac{240 \cdot 21,8 \cdot 10^{-3}{}^{1/2}}{\pi} \right)^{1/2} = 10,91 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$d_{\text{incrementado}} = 21,8 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10,91 \cdot 10^{-3} = 43,62 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_v = 50 \cdot \left(\frac{60}{120} \right)^2 \cdot 10 \cdot 43,62 \cdot 10^{-3} = 5,45 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_h = 8,40 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(5,45)^2 + (0,978 \cdot 9,8 + 8,40)^2}}{(0,978 \cdot 9,8)} = 1,96$$

$$A_{\sigma_2} = -5564,5932 + 401,3282 \cdot (-15 + 15) = -5564,5932 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,96^2 = 1,9958 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 5564,5932) = 1,9958 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 29112,62 \text{ N}$

2) $T_2 = 26182,91 \angle 116,72^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 26182,91 \angle -116,72^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 29112,62 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 29112,62 \text{ N} > T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que no cumple con la hipótesis de hielo + viento, con lo que esta hipótesis pasa a imponer la ecuación de cambio de condiciones:

$$m_1 = 1,96$$

$$\sigma_1 = -15^\circ \text{C}$$

$$T_1 = 28187 \text{ N}$$

La K y la B_{m_2} no varía, puesto que sólo dependen de las condiciones del cable y del vano ideal de regulación:

$$K = 5,1953 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot m_2^2$$

La A_{σ_2} sí varía:

$$A_{\sigma_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot \frac{1,96^2}{28187^2} + 18,9 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - (-15)) \cdot 281,1 \cdot 10^{-6} \cdot 75,54 \cdot 10^9 - 28187$$

$$A_{\sigma_2} = -3066,6861 + 401,3282 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

3.1) Comprobación hipótesis de máxima tracción: hielo.

Peso propio, hielo: $m_2 = 1,86$.

$\sigma_2 = -15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -3066,6861 + 401,3282 \cdot (-15 + 15) = -3066,6861 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,86^2 = 1,7974 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 3066,6861) = 1,7974 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 27257,95 \text{ N}$

2) $T_2 = 25678,86 \angle 118,10^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 25678,86 \angle -118,10^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 27257,95 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 27257,95 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo.

3.2) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: viento.

Peso propio, hielo: $m_2 = 1,84$.

$\sigma_2 = -10$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -3066,6861 + 401,3282 \cdot (-10 + 15) = -1060,0451 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,84^2 = 1,7589 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 1060,0451) = 1,7589 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 26364,60 \text{ N}$

2) $T_2 = 25829,14 \angle 119,33^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 25829,14 \angle -119,33^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 26364,60 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 26364,60 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

4) Hipótesis de tracción de cada día TCD.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 15^\circ \text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -3066,6861 + 401,3282 \cdot (15 + 15) = 8973,1599 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,1953 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 8973,1599) = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 14787,01 \text{ N}$

2) $T_2 = 18744,12 \angle 129,33^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 18744,12 \angle -129,33^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 14787,01 \text{ N}$$

Se ha de comprobar que esta tracción no supere el 15% de la tracción de rotura del cable:

$$T_2 = 14787,01 \text{ N} > 0,15 \cdot T_{\text{rotura}} = 0,15 \cdot 84560 = 12684 \text{ N}$$

Con lo que se observa que no cumple con la hipótesis de tracción de cada día. Debido a esto, esta hipótesis pasa a imponer la ecuación de cambio de condiciones:

$$m_1 = 1$$

$$\sigma_1 = 15^\circ \text{C}$$

$$T_1 = 12684 \text{ N}$$

La K y la B_{m_2} no varía, puesto que sólo dependen de las condiciones del cable y del vano ideal de regulación:

$$K = 5,1953 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot m_2^2$$

La A_{σ_2} sí varía:

$$A_{\sigma_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot \frac{1^2}{12684^2} + 18,9 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - 15) \cdot 281,1 \cdot 10^{-6} \cdot 75,54 \cdot 10^9 - 12684$$

$$A_{\sigma_2} = 19608,2394 + 401,3282 \cdot (\sigma_2 - 15)$$

4.1) Comprobación hipótesis de máxima tracción: hielo.

Peso propio, hielo: $m_2 = 1,86$.

$\sigma_2 = -15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 19608,2394 + 401,3282 \cdot (-15 - 15) = 7568,3934 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,86^2 = 1,7974 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 7568,3934) = 1,7974 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 23899,49 \text{ N}$

2) $T_2 = 27423,83 \angle 125,01$ ° N

3) $T_2 = 27423,83 \angle -125,01$ ° N

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 23899,49 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 23899,49 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo.

4.2) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: viento.

Peso propio, viento: $m_2 = 1,84$.

$\sigma_2 = -10$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 19608,2394 + 401,3282 \cdot (-10 - 15) = 9575,0344 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,84^2 = 1,7589 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 9575,0344) = 1,7589 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 23174,80 \text{ N}$

2) $T_2 = 27549,43 \angle 126,47^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 27549,43 \angle -126,47^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 23174,80 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 23174,80 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

4.3) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: hielo + viento.

Peso propio, hielo + viento: $m_2 = 1,96$.

$$\sigma_2 = -15^\circ \text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 19608,2394 + 401,3282 \cdot (-15 - 15) = 7568,3934 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,96^2 = 1,9958 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 7568,3934) = 1,9958 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 24822,56 \text{ N}$

2) $T_2 = 28355,36 \angle 124,83^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 28355,36 \angle -124,83^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 24822,56 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 24822,56 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo + viento.

5) Hipótesis de vibraciones CHS:

Se impone que la tensión salida de esta hipótesis ha de ser menor a $T_{\text{CHS}} = 0,225 \cdot T_{\text{rotura}}$.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$$\sigma_2 = -5^\circ \text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 19608,2394 + 401,3282 \cdot (-5 - 15) = 11581,6754 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,1953 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 11581,6754) = 5,1953 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 14196,45 \text{ N}$

2) $T_2 = 19130,02 \angle 132,36^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 19130,02 \angle -132,26^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 14196,30 \text{ N}$$

$$T_2 = 14196,30 \text{ N} < 0,225 \cdot 84560 = 19026 \text{ N. Cumple con esta hipótesis.}$$

6) Flechas máximas reglamentarias:

6.1) Hipótesis de viento:

Peso propio, viento: $m_2 = 1,51$.

$$\sigma_2 = 15^\circ \text{C.}$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 19608,2394 + 401,3282 \cdot (15 - 15) = 19608,2394 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,51^2 = 1,1846 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 19608,2394) = 1,1846 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 17796,10 \text{ N}$

2) $T_2 = 25800,22 \angle 136,46^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 25800,22 \angle -136,46^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17796,10 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{17796,10}{1,51 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 1229,65 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 1229,65} = 6,50 \text{ m}$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{10,9}{0,978 \cdot 9,8}\right) = 48,67^\circ$$

$$f_2' = 6,50 \cdot \cos(48,67) = 4,29 \text{ m}$$

Se requiere saber la flecha en el vano que se encuentra entre los apoyos 68 y 69, puesto que es el vano que cruza con la carretera nacional.

$$f_{68-69} = 4,29 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83}\right)^2 = 3,20 \text{ m}$$

6.2) Hipótesis de temperatura:

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 85 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 19608,2394 + 401,3282 \cdot (85 - 15) = 47701,2134 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,1953 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 47701,2134) = 5,1953 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 9527,90 \text{ N}$

2) $T_2 = 12076,12 \angle 180^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 45153,00 \angle 180^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 9527,90 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{9527,90}{1 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 994,11 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 994,11} = 8,04 \text{ m}$$

$$f_{68-69} = 8,04 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83}\right)^2 = 6,00 \text{ m}$$

6.3) Hipótesis de hielo:

Peso propio, hielo: $m_2 = 1,86$.

$\sigma_2 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 19608,2394 + 401,3282 \cdot (0 - 15) = 13588,3164 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,1953 \cdot 10^{12} \cdot 1,86^2 = 1,7974 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 13588,3164) = 1,7974 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 22360,40 \text{ N}$

2) $T_2 = 28351,90 \angle 129,34^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 28351,90 \angle -129,34^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 22360,44 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{22360,44}{1,86 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 1254,30 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 1254,30} = 6,37 \text{ m}$$

$$f_{68-69} = 6,37 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83} \right)^2 = 4,76 \text{ m}$$

Con lo que, la flecha máxima que puede presentar el conductor en ese vano concreto es:

$$f_{68-69} = \text{máx}\{3,20; 6,00; 4,76\}$$

$$f_{68-69} = 6,00 \text{ m}$$

Correspondiente a la hipótesis de temperatura.

b) CABLE DE TIERRA.

1) Hipótesis reglamentaria de máxima tracción: hipótesis de hielo.

Peso propio, hielo: m_1 .

$$\sigma_1 = -15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$T_1 = T_{\text{máx.}} = 17987 \text{ N}$$

$$K = 4,2670 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$m_1 = 2,55$$

$$A_{\sigma_2} = -9410,9850 + 161,7766 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot m_2^2$$

Estos valores son iguales que para el caso del cantón 62-69 de 132 kV, debido a que el cable empleado es el mismo y además, al ser el mismo cantón, el vano ideal de regulación no varía.

2) Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de viento.

Peso propio, viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -10 \text{ }^\circ\text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$q = 60 \cdot \left(\frac{140}{120} \right)^2$$

$$F_v = 60 \cdot \left(\frac{140}{120} \right)^2 \cdot 10 \cdot 13,4 \cdot 10^{-3} = 10,94 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(0,426 \cdot 9,8)^2 + 10,94^2}}{(0,426 \cdot 9,8)} = 2,80$$

$$A_{\sigma_2} = -9410,9850 + 161,7766 \cdot (10 + 15) = -8602,1020 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,80^2 = 3,3453 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 8602,1020) = 3,3453 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 18440,12 \text{ N}$

2) $T_2 = 13469,01 \angle 111,42^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 13469,01 \angle -111,42^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 18440,12 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 18440,12 \text{ N} > T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que no cumple con la hipótesis de viento, con lo que esta hipótesis pasa a imponer la ecuación de cambio de condiciones:

$$m_1 = 2,80$$

$$\sigma_1 = -10^\circ \text{C}$$

$$T_1 = 17987 \text{ N}$$

La K y la B_{m_2} no varía, puesto que sólo dependen de las condiciones del cable y del vano ideal de regulación:

$$K = 4,2670 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot m_2^2$$

La A_{σ_2} sí varía:

$$A_{\sigma_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot \frac{2,80^2}{17987^2} + 17,6 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - (-10)) \cdot 78,9 \cdot 10^{-6} \cdot 116,65 \cdot 10^9 - 17987$$

$$A_{\sigma_2} = -7646,9833 + 161,7766 \cdot (\sigma_2 + 10)$$

2.1) Comprobación hipótesis de máxima tracción: hielo.

Peso propio, hielo: $m_2 = 2,55$.

$$\sigma_2 = -15 \text{ °C.}$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -7646,9833 + 161,7766 \cdot (-15 + 10) = -8455,8663 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,55^2 = 2,7746 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 8455,8663) = 2,7746 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

$$1) T_2 = 17507,76 \text{ N}$$

$$2) T_2 = 12588,82 \angle 111,07^\circ \text{ N}$$

$$3) T_2 = 12588,82 \angle -111,07^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17507,76 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 17507,76 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo.

3) **Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de hielo + viento.**

Peso hielo + viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -15^\circ \text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$e = -\frac{13,4 \cdot 10^{-3}}{2} + \left(\frac{13,4 \cdot 10^{-3}{}^2}{4} + \frac{240 \cdot 13,4 \cdot 10^{-3}{}^{1/2}}{\pi} \right)^{1/2} = 11,31 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$d_{\text{incrementado}} = 13,4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 11,31 \cdot 10^{-3} = 36,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_v = 60 \cdot \left(\frac{60}{120} \right)^2 \cdot 10 \cdot 36,02 \cdot 10^{-3} = 5,40 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_h = 6,59 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(5,40)^2 + (0,426 \cdot 9,8 + 6,59)^2}}{(0,426 \cdot 9,8)} = 2,88$$

$$A_{\sigma_2} = -7646,9833 + 161,7766 \cdot (-15 + 10) = -8455,8663 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,88^2 = 3,5392 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 8455,8663) = 3,5392 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 18641,00 \text{ N}$

2) $T_2 = 13779,01 \angle 111,69^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 13779,01 \angle -111,69^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 18641,00 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 18641,00 \text{ N} > T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que no cumple con la hipótesis de hielo + viento, con lo que esta hipótesis pasa a imponer la ecuación de cambio de condiciones:

$$m_1 = 2,88$$

$$\sigma_1 = -15^\circ \text{C}$$

$$T_1 = 17987 \text{ N}$$

La K y la B_{m_2} no varía, puesto que sólo dependen de las condiciones del cable y del vano ideal de regulación:

$$K = 4,2670 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot m_2^2$$

La A_{σ_2} sí varía:

$$A_{\sigma_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot \frac{2,88^2}{17987^2} + 17,6 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - (-15)) \cdot 78,9 \cdot 10^{-6} \cdot 116,65 \cdot 10^9 - 17987$$

$$A_{\sigma_2} = -7047,6845 + 161,7766 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

3.1) Comprobación hipótesis de máxima tracción: hielo.

Peso propio, hielo: $m_2 = 2,55$.

$\sigma_2 = -15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -7047,6845 + 161,7766 \cdot (-15 + 15) = -7047,6845 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,55^2 = 2,7746 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 7047,6845) = 2,7746 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 16836,15 \text{ N}$

2) $T_2 = 12837,45 \angle 112,41^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 12837,45 \angle -112,41^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 16836,15 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 16836,15 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo.

3.2) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: viento.

Peso propio, viento: $m_2 = 2,80$.

$\sigma_2 = -10$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -7047,6845 + 161,7766 \cdot (-10 + 15) = -6238,8015 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,80^2 = 3,3453 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 6238,8015) = 3,3453 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 17350,84 \text{ N}$

2) $T_2 = 13885,36 \angle 113,59^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 13885,36 \angle -113,59^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17350,84 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 17350,84 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

4) Hipótesis de tracción de cada día TCD.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -7047,6845 + 161,7766 \cdot (15 + 15) = -2194,3865 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,2670 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 2194,3865) = 4,2670 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 8335,57 \text{ N}$

2) $T_2 = 7154,74 \angle 115,41^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 7154,74 \angle -115,41^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 8335,57 \text{ N}$$

Se ha de comprobar que esta tracción no supere el 15% de la tracción de rotura del cable:

$$T_2 = 8335,57 \text{ N} > 0,15 \cdot T_{\text{rotura}} = 0,15 \cdot 53960 = 8094 \text{ N}$$

Con lo que se observa que no cumple con la hipótesis de tracción de cada día. Debido a esto, esta hipótesis pasa a imponer la ecuación de cambio de condiciones:

$$m_1 = 1$$

$$\sigma_1 = 15^\circ \text{C}$$

$$T_1 = 8094 \text{ N}$$

La K y la B_{m_2} no varía, puesto que sólo dependen de las condiciones del cable y del vano ideal de regulación:

$$K = 4,2670 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot m_2^2$$

La A_{σ_2} sí varía:

$$A_{\sigma_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot \frac{1^2}{8094^2} + 17,6 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - 15) \cdot 78,9 \cdot 10^{-6} \cdot 116,50 \cdot 10^9 - 8094$$

$$A_{\sigma_2} = -1580,7726 + 161,7766 \cdot (\sigma_2 - 15)$$

4.1) Comprobación hipótesis de máxima tracción: hielo.

Peso propio, hielo: $m_2 = 2,55$.

$\sigma_2 = -15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1580,7726 + 161,7766 \cdot (-15 - 15) = -6434,0706 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,55^2 = 2,7746 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 6434,0706) = 2,7746 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 16556,28 \text{ N}$

2) $T_2 = 12945,50 \angle 113,01^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 12945,50 \angle -113,01^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 16556,28 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 16556,28 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo.

4.2) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: viento.

Peso propio, viento: $m_2 = 2,80$.

$\sigma_2 = -10 \text{ °C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1580,7726 + 161,7766 \cdot (-10 - 15) = -5625,1876 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,80^2 = 3,3453 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 5625,1876) = 3,3453 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 17085,31 \text{ N}$

2) $T_2 = 13992,85 \angle 114,17 \text{ ° N}$

3) $T_2 = 13992,85 \angle -114,17 \text{ ° N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17085,31 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 17085,31 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

4.3) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: hielo + viento.

Peso propio, hielo + viento: $m_2 = 2,88$.

$\sigma_2 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1580,7726 + 161,7766 \cdot (-15 - 15) = -6434,0706 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,88^2 = 3,5392 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 6434,0706) = 3,5392 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 17713,61 \text{ N}$

2) $T_2 = 14135,11 \angle 113,52 \text{ }^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 14135,11 \angle -113,52 \text{ }^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17713,61 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 17713,61 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo + viento.

5) Hipótesis de vibraciones CHS:

Se impone que la tensión salida de esta hipótesis ha de ser menor a $T_{CHS} = 0,225 \cdot T_{rotura}$.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1580,7726 + 161,7766 \cdot (-5 - 15) = -4816,3046 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,2670 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 4816,3046) = 4,2670 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 9522,23 \text{ N}$

2) $T_2 = 6694,10 \angle 110,58 \text{ }^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 6694,10 \angle -110,58 \text{ }^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 9522,23 \text{ N}$$

$$T_2 = 9522,23 \text{ N} < 0,225 \cdot 53960 = 12141 \text{ N. Cumple con esta hipótesis.}$$

6) Flechas máximas reglamentarias:

6.1) Hipótesis de viento:

Peso propio, viento: $m_2 = 2,17$.

$\sigma_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1580,7726 + 161,7766 \cdot (15 - 15) = -1580,7726 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,17^2 = 2,010 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 1580,7726) = 2,010 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 13169,71 \text{ N}$

2) $T_2 = 12354,07 \angle 117,97 \text{ }^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 12354,07 \angle -117,97 \text{ }^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 13169,71 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{13169,71}{2,17 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1453,72 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 1453,72} = 5,50 \text{ m}$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{8,04}{0,426 \cdot 9,8}\right) = 62,56^\circ$$

$$f_2' = 5,50 \cdot \cos(62,56) = 2,53 \text{ m}$$

Se requiere saber la flecha en el vano que se encuentra entre los apoyos 68 y 69, puesto que es el vano que cruza con la carretera nacional.

$$f_{68-69} = 2,53 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83}\right)^2 = 1,89 \text{ m}$$

6.2) Hipótesis de temperatura:

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 50^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1580,7726 + 161,7766 \cdot (50 - 15) = 4081,4084 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,2670 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 4081,4084) = 4,2670 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 6385,02 \text{ N}$

2) $T_2 = 8174,86 \angle 129,80^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 8174,86 \angle -129,80^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 6385,02 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{6385,02}{1 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1529,42 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 1529,42} = 5,22 \text{ m}$$

$$f_{68-69} = 5,22 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83} \right)^2 = 3,90 \text{ m}$$

6.3) Hipótesis de hielo:

Peso propio, hielo: $m_2 = 2,55$.

$\sigma_2 = 0 \text{ °C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1580,7726 + 161,7766 \cdot (0 - 15) = -4007,4216 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,2670 \cdot 10^{11} \cdot 2,55^2 = 2,7746 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 4007,4216) = 2,7746 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 15522,61 \text{ N}$

$$2) T_2 = 13369,58 \angle 115,51^\circ \text{ N}$$

$$3) T_2 = 13369,58 \angle -115,51^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 15522,61 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{15522,61}{2,55 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1458,11 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{252,83^2}{8 \cdot 1458,11} = 5,48 \text{ m}$$

$$f_{68-69} = 5,48 \cdot \left(\frac{218,51}{252,83}\right)^2 = 4,09 \text{ m}$$

Con lo que, la flecha máxima que puede presentar el conductor en ese vano concreto es:

$$f_{68-69} = \max\{1,89; 3,09; 4,09\}$$

$$f_{68-69} = 4,09 \text{ m}$$

Correspondiente a la hipótesis de hielo.

CANTÓN COMPRENDIDO ENTRE APOYOS 69-77.

a) CABLE CONDUCTOR:

$$a_r = 257,86 \text{ m.}$$

$$T_{\max} = \frac{84560}{3} = 28187 \text{ N}$$

1) **Hipótesis reglamentaria de máxima tracción: hipótesis de hielo.**

Peso propio, hielo: m_1 .

$$\sigma_1 = -15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$T_1 = T_{\text{máx.}} = 28187 \text{ N}$$

$$K = 5,4041 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$m_1 = 1,86$$

$$A_{\sigma_2} = -4655,3948 + 401,3282 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot m_2^2$$

Estos valores son iguales que para el caso del cantón 69-77 de 132 kV, debido a que el cable empleado es el mismo y además, al ser el mismo cantón, el vano ideal de regulación no varía.

2) **Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de viento.**

Peso propio, viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -10 \text{ }^\circ\text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$q = 50 \cdot \left(\frac{140}{120} \right)^2$$

$$F_v = 50 \cdot \left(\frac{140}{120} \right)^2 \cdot 10 \cdot 21,8 \cdot 10^{-3} = 14,84 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(0,978 \cdot 9,8)^2 + 14,84^2}}{(0,978 \cdot 9,8)} = 1,84$$

$$A_{\sigma_2} = -4655,3948 + 401,3282 \cdot (-10 + 15) = -2648,7538 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,84^2 = 1,8296 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 2648,7538) = 1,8296 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 27263,45 \text{ N}$

2) $T_2 = 25905,24 \angle 118,37^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 25905,24 \angle -118,37^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 27263,45 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 27263,45 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

3) **Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de hielo + viento.**

Peso hielo + viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$m_2 = 1,96$$

Mismo valor que para el cantón anterior.

$$A_{\sigma_2} = -4655,3948 + 401,3282 \cdot (-15 + 15) = -4655,3948 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,96^2 = 2,0760 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 4655,3948) = 2,0760 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 29126,44 \text{ N}$

2) $T_2 = 26697,46 \angle 117,28 \text{ }^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 26697,46 \angle -117,28 \text{ }^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 29126,44 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 29126,44 \text{ N} > T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que no cumple con la hipótesis de hielo + viento, con lo que esta hipótesis pasa a imponer la ecuación de cambio de condiciones:

$$m_1 = 1,96$$

$$\sigma_1 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 28187 \text{ N}$$

La K y la B_{m_2} no varía, puesto que sólo dependen de las condiciones del cable y del vano ideal de regulación:

$$K = 5,4041 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot m_2^2$$

La A_{σ_2} sí varía:

$$A_{\sigma_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot \frac{1,96^2}{28187^2} + 18,9 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - (-15)) \cdot 281,1 \cdot 10^{-6} \cdot 75,54 \cdot 10^9 - 28187$$

$$A_{\sigma_2} = -2057,0963 + 401,3282 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

3.1) Comprobación hipótesis de máxima tracción: hielo.

Peso propio, hielo: $m_2 = 1,86$.

$\sigma_2 = -15 \text{ °C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -2057,0963 + 401,3282 \cdot (-15 + 15) = -2057,0963 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,86^2 = 1,8696 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 2057,0963) = 1,8696 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 27244,65 \text{ N}$

$$2) T_2 = 26195,92 \angle 118,73^\circ \text{ N}$$

$$3) T_2 = 26195,92 \angle -118,73^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 27244,65 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 27244,65 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo.

3.2) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: viento.

Peso propio, viento: $m_2 = 1,84$.

$$\sigma_2 = -10^\circ \text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -2057,0963 + 401,3282 \cdot (-10 + 15) = -50,4553 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,84^2 = 1,8296 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 50,4553) = 1,8296 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

$$1) T_2 = 26367,11 \text{ N}$$

$$2) T_2 = 26341,88 \angle 119,97^\circ \text{ N}$$

$$3) T_2 = 26341,88 \angle -119,97^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 26367,11 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 26367,11 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

4) Hipótesis de tracción de cada día TCD.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$$\sigma_2 = 15 \text{ °C.}$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -2057,0963 + 401,3282 \cdot (15 + 15) = 9982,7497 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,4041 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 9982,7497) = 5,4041 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 14774,44 \text{ N}$

2) $T_2 = 19125,21 \angle 130,33 \text{ ° N}$

3) $T_2 = 19125,21 \angle -130,33 \text{ ° N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 14774,44 \text{ N}$$

Se ha de comprobar que esta tracción no supere el 15% de la tracción de rotura del cable:

$$T_2 = 14774,44 \text{ N} > 0,15 \cdot T_{\text{rotura}} = 0,15 \cdot 84560 = 12684 \text{ N}$$

Con lo que se observa que no cumple con la hipótesis de tracción de cada día. Debido a esto, esta hipótesis pasa a imponer la ecuación de cambio de condiciones:

$$m_1 = 1$$

$$\sigma_1 = 15 \text{ °C}$$

$$T_1 = 12684 \text{ N}$$

La K y la B_{m_2} no varía, puesto que sólo dependen de las condiciones del cable y del vano ideal de regulación:

$$K = 5,4041 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot m_2^2$$

La A_{σ_2} sí varía:

$$A_{\sigma_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot \frac{1^2}{12684^2} + 18,9 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - 15) \cdot 281,1 \cdot 10^{-6} \cdot 75,54 \cdot 10^9 - 12684$$

$$A_{\sigma_2} = 20906,0701 + 401,3282 \cdot (\sigma_2 - 15)$$

4.1) Comprobación hipótesis de máxima tracción: hielo.

Peso propio, hielo: $m_2 = 1,86$.

$\sigma_2 = -15 \text{ °C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 20906,0701 + 401,3282 \cdot (-15 - 15) = 8866,2241 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,86^2 = 1,8696 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 8866,2241) = 1,8696 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 23890,45 \text{ N}$

2) $T_2 = 27947,44 \angle 125,84^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 27974,44 \angle -125,84^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 23890,45 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 23890,45 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo.

4.2) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: viento.

Peso propio, viento: $m_2 = 1,84$.

$$\sigma_2 = -10^\circ \text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 20906,0701 + 401,3282 \cdot (-10 - 15) = 10872,8651 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,84^2 = 1,8296 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 10872,8651) = 1,8296 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 23179,51 \text{ N}$

2) $T_2 = 28094,80 \angle 127,30^\circ \text{ N}$

$$3) T_2 = 28094,80 \angle -127,30^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 23179,51 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 23179,51 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

4.3) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: hielo + viento.

Peso propio, hielo + viento: $m_2 = 1,96$.

$$\sigma_2 = -15^\circ \text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 20906,0701 + 401,3282 \cdot (-15 - 15) = 8866,2241 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,96^2 = 2,0760 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 8866,2241) = 2,0760 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

$$1) T_2 = 24823,58 \text{ N}$$

$$2) T_2 = 28918,88 \angle 125,63^\circ \text{ N}$$

$$3) T_2 = 28918,88 \angle -125,63^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 24823,58 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 24823,58 \text{ N} < T_1 = 28187 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo + viento.

5) Hipótesis de vibraciones CHS:

Se impone que la tensión salida de esta hipótesis ha de ser menor a $T_{CHS} = 0,225 \cdot T_{rotura}$.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 20906,0701 + 401,3282 \cdot (-5 - 15) = 12879,5061 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,4041 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 12879,5061) = 5,4041 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 14141,90 \text{ N}$

2) $T_2 = 19548,25 \angle 133,72^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 19548,25 \angle -133,72^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 14141,90 \text{ N}$$

$T_2 = 14141,90 \text{ N} < 0,225 \cdot 84560 = 19026 \text{ N}$. Cumple con esta hipótesis.

6) Flechas máximas reglamentarias:

6.1) Hipótesis de viento:

Peso propio, viento: $m_2 = 1,51$.

$\sigma_2 = 15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 20906,0701 + 401,3282 \cdot (15 - 15) = 20906,0701 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,51^2 = 1,2322 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 20906,0701) = 1,2322 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 17834,39 \text{ N}$

2) $T_2 = 26285,21 \angle 137,47^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 26285,21 \angle -137,47^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17834,39 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{17834,39}{1,51 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 1232,30 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1232,30} = 6,74 \text{ m}$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{10,9}{0,978 \cdot 9,8}\right) = 48,67^\circ$$

$$f_2' = 6,74 \cdot \cos(48,67) = 4,45 \text{ m}$$

Se requiere saber la flecha en el vano que se encuentra entre los apoyos 69 y 70, puesto que es el vano que cruza con la carretera nacional.

$$f_{69-70} = 4,45 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86}\right)^2 = 3,36 \text{ m}$$

6.2) Hipótesis de temperatura:

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 85^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 20906,0701 + 401,3282 \cdot (85 - 15) = 48999,0441 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1^2 = 5,4041 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 48999,0441) = 5,4041 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 9602,97 \text{ N}$

2) $T_2 = 12102,29 \angle 180^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 46499,72 \angle 180^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 9602,97 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{9602,97}{1 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 1001,94 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1001,94} = 8,30 \text{ m}$$

$$f_{69-70} = 8,30 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86} \right)^2 = 6,26 \text{ m}$$

6.3) Hipótesis de hielo:

Peso propio, hielo: $m_2 = 1,86$.

$\sigma_2 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = 20906,0701 + 401,3282 \cdot (0 - 15) = 14886,1471 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 5,4041 \cdot 10^{12} \cdot 1,86^2 = 1,8696 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 + 14886,1471) = 1,8696 \cdot 10^{13}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 22394,15 \text{ N}$

$$2) T_2 = 28893,96 \angle 130,17^\circ \text{ N}$$

$$3) T_2 = 28893,96 \angle -130,17^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 22394,15 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{22394,15}{1,86 \cdot 0,978 \cdot 9,8} = 1256,19 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1256,19} = 6,62 \text{ m}$$

$$f_{69-70} = 6,62 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86}\right)^2 = 4,99 \text{ m}$$

Con lo que, la flecha máxima que puede presentar el conductor en ese vano concreto es:

$$f_{69-70} = \max\{3,36; 6,26; 4,99\}$$

$$f_{69-70} = 6,26 \text{ m}$$

Correspondiente a la hipótesis de temperatura.

b) CABLE DE TIERRA.

1) Hipótesis reglamentaria de máxima tracción: hipótesis de hielo.

Peso propio, hielo: m_1 .

$$\sigma_1 = -15^\circ \text{C.}$$

$$T_1 = T_{\text{máx.}} = 17987 \text{ N}$$

$$K = 4,4384 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$m_1 = 2,55$$

$$A_{\sigma_2} = -9066,4973 + 161,7766 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot m_2^2$$

Estos valores son iguales que para el caso del cantón 69-77 de 132 kV, debido a que el cable empleado es el mismo y además, al ser el mismo cantón, el vano ideal de regulación no varía.

2) **Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de viento.**

Peso propio, viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -10 \text{ °C.}$$

T_2 : A obtener.

$$m_2 = 2,80$$

Mismo valor que en cantón anterior.

$$A_{\sigma_2} = -9066,4973 + 161,7766 \cdot (-10 + 15) = -8257,6143 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,80^2 = 3,4798 \cdot 10^{12}$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 8257,6143) = 3,4798 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 18464,34 \text{ N}$

$$2) T_2 = 13728,09 \angle 111,82^\circ \text{ N}$$

$$3) T_2 = 13728,09 \angle -111,82^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 18464,34 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 18464,34 \text{ N} > T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que no cumple con la hipótesis de viento, con lo que esta hipótesis pasa a imponer la ecuación de cambio de condiciones:

$$m_1 = 2,80$$

$$\sigma_1 = -10^\circ \text{C}$$

$$T_1 = 17987 \text{ N}$$

La K y la B_{m_2} no varía, puesto que sólo dependen de las condiciones del cable y del vano ideal de regulación:

$$K = 4,4384 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot m_2^2$$

La A_{σ_2} sí varía:

$$A_{\sigma_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot \frac{2,80^2}{17987^2} + 17,6 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - (-10)) \cdot 78,9 \cdot 10^{-6} \cdot 116,65 \cdot 10^9 - 17987$$

$$A_{\sigma_2} = -7231,6380 + 161,7766 \cdot (\sigma_2 + 10)$$

2.1) Comprobación hipótesis de máxima tracción: hielo.

Peso propio, hielo: $m_2 = 2,55$.

$$\sigma_2 = -15^\circ \text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -7231,6380 + 161,7766 \cdot (-15 + 10) = -8040,5210 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,55^2 = 2,8861 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 8040,5210) = 2,8861 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 17482,93 \text{ N}$

2) $T_2 = 12848,39 \angle 111,56^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 12848,39 \angle -111,56^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17482,93 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 17482,93 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo.

3) Hipótesis complementaria de máxima tracción: hipótesis de hielo + viento.

Peso hielo + viento: m_2 .

$$\sigma_2 = -15^\circ \text{C}.$$

T_2 : A obtener.

$$m_2 = 2,88$$

Esta constante se obtiene exactamente igual que en el caso del cantón anterior.

$$A_{\sigma_2} = -7231,6380 + 161,7766 \cdot (-15 + 10) = -8040,5210 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,88^2 = 3,6814 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 8040,5210) = 3,6814 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 18638,14 \text{ N}$

2) $T_2 = 14054,17 \angle 112,15^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 14054,17 \angle -112,15^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 18638,14 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 18638,14 \text{ N} > T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que no cumple con la hipótesis de hielo + viento, con lo que esta hipótesis pasa a imponer la ecuación de cambio de condiciones:

$$m_1 = 2,88$$

$$\sigma_1 = -15^\circ \text{C}$$

$$T_1 = 17987 \text{ N}$$

La K y la B_{m_2} no varía, puesto que sólo dependen de las condiciones del cable y del vano ideal de regulación:

$$K = 4,4384 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot m_2^2$$

La A_{σ_2} sí varía:

$$A_{\sigma_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot \frac{2,88^2}{17987^2} + 17,6 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - (-15)) \cdot 78,9 \cdot 10^{-6} \cdot 116,65 \cdot 10^9 - 17987$$

$$A_{\sigma_2} = -6608,2660 + 161,7766 \cdot (\sigma_2 + 15)$$

3.1) Comprobación hipótesis de máxima tracción: hielo.

Peso propio, hielo: $m_2 = 2,55$.

$\sigma_2 = -15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -6608,2660 + 161,7766 \cdot (-15 + 15) = -6608,2660 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,55^2 = 2,8861 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 6608,2660) = 2,8861 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 16815,33 \text{ N}$

2) $T_2 = 13100,96 \angle 112,93^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 13100,96 \angle -112,93^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 16815,33 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 16815,33 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo.

3.2) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: viento.

Peso propio, viento: $m_2 = 2,80$.

$\sigma_2 = -10$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -6608,2660 + 161,7766 \cdot (-10 + 15) = -5799,3830 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,80^2 = 3,4797 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 5799,3830) = 3,4797 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 17353,85 \text{ N}$

2) $T_2 = 14160,32 \angle 114,08^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 14160,32 \angle -114,08^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17353,85 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 17353,85 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

4) Hipótesis de tracción de cada día TCD.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -6608,2660 + 161,7766 \cdot (-15 + 15) = -1754,9680 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,4384 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 1754,9680) = 4,4384 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

$$1) T_2 = 8260,10 \text{ N}$$

$$2) T_2 = 7330,28 \angle 116,34^\circ \text{ N}$$

$$3) T_2 = 7330,28 \angle -116,34^\circ \text{ N}$$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 8260,10 \text{ N}$$

Se ha de comprobar que esta tracción no supere el 15% de la tracción de rotura del cable:

$$T_2 = 8260,10 \text{ N} > 0,15 \cdot T_{\text{rotura}} = 0,15 \cdot 53960 = 8094 \text{ N}$$

Con lo que se observa que no cumple con la hipótesis de tracción de cada día. Debido a esto, esta hipótesis pasa a imponer la ecuación de cambio de condiciones:

$$m_1 = 1$$

$$\sigma_1 = 15^\circ \text{C}$$

$$T_1 = 8094 \text{ N}$$

La K y la B_{m_2} no varía, puesto que sólo dependen de las condiciones del cable y del vano ideal de regulación:

$$K = 4,4384 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot m_2^2$$

La A_{σ_2} sí varía:

$$A_{\sigma_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot \frac{1^2}{8094^2} + 17,6 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_2 - 15) \cdot 78,9 \cdot 10^{-6} \cdot 116,50 \cdot 10^9 - 8094$$

$$A_{\sigma_2} = -1319,1445 + 161,7766 \cdot (\sigma_2 - 15)$$

4.1) Comprobación hipótesis de máxima tracción: hielo.

Peso propio, hielo: $m_2 = 2,55$.

$\sigma_2 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1319,1445 + 161,7766 \cdot (-15 + 15) = -6172,4425 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,55^2 = 2,8861 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 6172,4425) = 2,8861 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 16620,37 \text{ N}$

2) $T_2 = 13177,57 \angle 113,36^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 13177,57 \angle -113,36^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 16620,37 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 16620,37 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo.

4.2) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: viento.

Peso propio, viento: $m_2 = 2,80$.

$$\sigma_2 = -10 \text{ °C.}$$

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1319,1445 + 161,7766 \cdot (-10 + 15) = -5363,5595 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,80^2 = 3,4797 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 5363,5595) = 3,4797 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 17168,65 \text{ N}$

2) $T_2 = 14236,49 \angle 114,49^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 14236,49 \angle -114,49^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17168,65 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 17168,65 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de viento.

4.3) Comprobación hipótesis complementaria de máxima tracción: hielo + viento.

Peso propio, hielo + viento: $m_2 = 2,88$.

$\sigma_2 = -15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1319,1445 + 161,7766 \cdot (-15 + 15) = -6172,4425 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,88^2 = 3,6814 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 6172,4425) = 3,6814 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 17796,34 \text{ N}$

2) $T_2 = 14382,72 \angle 113,83^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 14382,72 \angle -113,83^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 17796,34 \text{ N}$$

Por tanto, como $T_2 = 17796,34 \text{ N} < T_1 = 17987 \text{ N}$, se afirma que cumple con la hipótesis de hielo + viento.

5) Hipótesis de vibraciones CHS:

Se impone que la tensión salida de esta hipótesis ha de ser menor a $T_{CHS} = 0,225 \cdot T_{rotura}$.

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1319,1445 + 161,7766 \cdot (-5 + 15) = -4554,6765 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,4384 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 4554,6765) = 4,4384 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 9486,54 \text{ N}$

2) $T_2 = 6840,05 \angle 111,13^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 6840,05 \angle -111,13^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 9486,54 \text{ N}$$

$$T_2 = 9486,54 \text{ N} < 0,225 \cdot 53960 = 12141 \text{ N. Cumple con esta hipótesis.}$$

6) Flechas máximas reglamentarias:

6.1) Hipótesis de viento:

Peso propio, viento: $m_2 = 2,17$.

$\sigma_2 = 15$ °C.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1319,1445 + 161,7766 \cdot (15 + 15) = -1319,1445 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,17^2 = 2,1000 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 1319,1445) = 2,1000 \cdot 10^{12}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 13260,95 \text{ N}$

2) $T_2 = 12584,10 \angle 118,33$ ° N

3) $T_2 = 12584,10 \angle -118,33$ ° N

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 13260,95 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{13260,95}{2,17 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1463,79 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1463,79} = 5,68 \text{ m}$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{8,04}{0,426 \cdot 9,8}\right) = 62,56^\circ$$

$$f_2' = 5,68 \cdot \cos(62,56) = 2,62 \text{ m}$$

Se requiere saber la flecha en el vano que se encuentra entre los apoyos 69 y 70, puesto que es el vano que cruza con la carretera nacional.

$$f_{69-70} = 2,62 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86}\right)^2 = 1,97 \text{ m}$$

6.2) Hipótesis de temperatura:

Peso propio: $m_2 = 1$.

$\sigma_2 = 50^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1319,1445 + 161,7766 \cdot (50 + 15) = -4343,0365 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 1^2 = 4,4384 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 4343,0365) = 4,4384 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 6421,26 \text{ N}$

2) $T_2 = 8313,87 \angle 130,34^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 8313,87 \angle -130,34^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 6421,26 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{6421,26}{1 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1538,10 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1538,10} = 5,40 \text{ m}$$

$$f_{69-70} = 5,40 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86} \right)^2 = 4,07 \text{ m}$$

6.3) Hipótesis de hielo:

Peso propio, hielo: $m_2 = 2,55$.

$\sigma_2 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_2 : A obtener.

$$A_{\sigma_2} = -1319,1445 + 161,7766 \cdot (0 + 15) = -3745,7935 \text{ N}$$

$$B_{m_2} = 4,4384 \cdot 10^{11} \cdot 2,55^2 = 2,8861 \cdot 10^{11} \text{ N}^3$$

$$T_2^2 \cdot (T_2 - 3745,7935) = 2,8861 \cdot 10^{11}$$

Resolviendo esta ecuación de tercer grado, se obtiene:

1) $T_2 = 15602,05 \text{ N}$

2) $T_2 = 13600,81 \angle 115,84^\circ \text{ N}$

3) $T_2 = 13600,81 \angle -115,84^\circ \text{ N}$

Con lo que el valor de la tracción que soporta el cable según esta hipótesis es:

$$T_2 = 15602,05 \text{ N}$$

$$h_2 = \frac{15602,05}{2,55 \cdot 0,426 \cdot 9,8} = 1465,57 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{257,86^2}{8 \cdot 1465,57} = 5,67 \text{ m}$$

$$f_{69-70} = 5,67 \cdot \left(\frac{223,97}{257,86}\right)^2 = 4,27 \text{ m}$$

Con lo que, la flecha máxima que puede presentar el conductor en ese vano concreto es:

$$f_{69-70} = \max\{1,97; 4,07; 4,27\}$$

$$f_{69-70} = 4,27 \text{ m}$$

Correspondiente a la hipótesis de hielo.

2.2.2. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN EL APOYO 69.

HIPÓTESIS I: Viento

1) **Fuerzas verticales:**

$$F_{v\text{conductores}} = 3 \cdot g \cdot p \cdot a_{gv} = 3 \cdot 9,8 \cdot 0,978 \cdot 195,18 = 5612,05 \text{ N}$$

$$F_{v1\text{conductor}} = \frac{5612,05}{3} = 1870,68 \text{ N}$$

$$F_{v\text{cable_tierra}} = g \cdot p \cdot a_{gv} = 9,8 \cdot 0,426 \cdot 192,12 = 802,06 \text{ N}$$

2) **Fuerzas transversales:**

$$F_{t\text{conductores}} = 3 \cdot F_v \cdot a_e = 3 \cdot 14,84 \cdot 221,24 = 9849,60 \text{ N}$$

$$F_{v1\text{conductor}} = \frac{9849,60}{3} = 3283,20 \text{ N}$$

$$F_{t\text{cable_tierra}} = F_v \cdot a_e = 10,94 \cdot 221,24 = 2420,37 \text{ N}$$

3) **Fuerzas longitudinales:**

No aplica para esta hipótesis.

HIPÓTESIS II:

a) **Hielo:**

1) **Fuerzas verticales:**

$$F_{v\text{conductores}} = 3 \cdot g \cdot p \cdot a_{gh} = 3 \cdot 9,8 \cdot 0,978 \cdot 194,66 = 5597,10 \text{ N}$$

$$F_{v1\text{conductor}} = \frac{5597,10}{3} = 1865,70 \text{ N}$$

$$F_{\text{v cable_tierra}} = g \cdot p \cdot a_{\text{gh}} = 9,8 \cdot 0,426 \cdot 190,29 = 794,42 \text{ N}$$

2) **Fuerzas transversales:**

No aplica para esta hipótesis.

3) **Fuerzas longitudinales:**

No aplica para esta hipótesis.

b) **Hielo + viento:**

1) **Fuerzas verticales:**

$$F_{\text{v conductores}} = 3 \cdot g \cdot p \cdot a_{\text{gh}} = 3 \cdot 9,8 \cdot 0,978 \cdot 195,04 = 5608,02 \text{ N}$$

$$F_{\text{v1 conductor}} = \frac{5608,02}{3} = 1869,34 \text{ N}$$

$$F_{\text{v cable_tierra}} = g \cdot p \cdot a_{\text{gh}} = 9,8 \cdot 0,426 \cdot 191,90 = 801,14 \text{ N}$$

2) **Fuerzas transversales:**

$$F_{\text{t conductores}} = 3 \cdot F_v \cdot a_e = 3 \cdot 5,45 \cdot 221,24 = 3617,27 \text{ N}$$

$$F_{\text{v1 conductor}} = \frac{3617,27}{3} = 1205,76 \text{ N}$$

$$F_{\text{t cable_tierra}} = F_v \cdot a_e = 5,40 \cdot 221,24 = 1194,70 \text{ N}$$

3) **Fuerzas longitudinales:**

No aplica para esta hipótesis.

HIPÓTESIS III: Desequilibrio de tracciones.

1) **Fuerzas verticales:** Mismas fuerzas que en hipótesis de hielo + viento.

$$F_{v\text{conductores}} = 3 \cdot g \cdot p \cdot a_{gh} = 3 \cdot 9,8 \cdot 0,978 \cdot 195,04 = 5608,02 \text{ N}$$

$$F_{v1\text{conductor}} = \frac{5608,02}{3} = 1869,34 \text{ N}$$

$$F_{v\text{cable_tierra}} = g \cdot p \cdot a_{gh} = 9,8 \cdot 0,426 \cdot 191,90 = 801,14 \text{ N}$$

2) **Fuerzas transversales:**

No aplica para esta hipótesis.

3) **Fuerzas longitudinales:**

$$F_L = 3 \cdot T_{\text{máx.}} \cdot 1,50 - 3 \cdot T_{\text{máx.}} = 3 \cdot T_{\text{máx.}} \cdot (1,50 - 1) = 3 \cdot T_{\text{máx.}} \cdot 0,50$$

$$F_{L\text{conductores}} = 3 \cdot 0,50 \cdot 24823,58 = 37235,37 \text{ N}$$

$$F_{L\text{cable_tierra}} = 0,50 \cdot 17796,34 = 8898,17 \text{ N}$$

HIPÓTESIS IV: Rotura de conductores.

1) **Fuerzas verticales:** Mismas fuerzas que en hipótesis de hielo + viento.

$$F_{v\text{conductores}} = 3 \cdot g \cdot p \cdot a_{gh} = 3 \cdot 9,8 \cdot 0,978 \cdot 195,04 = 5608,02 \text{ N}$$

$$F_{v1\text{conductor}} = \frac{5608,02}{3} = 1869,34 \text{ N}$$

$$F_{v\text{cable_tierra}} = g \cdot p \cdot a_{gh} = 9,8 \cdot 0,426 \cdot 191,90 = 801,14 \text{ N}$$

2) **Fuerzas transversales:**

No aplica para esta hipótesis.

3) **Fuerzas longitudinales:**

$$F_L = T_{\text{máx.}}$$

$$F_{v1\text{conductor}} = 24823,58 \text{ N}$$

$$F_{\text{v cable_tierra}} = 17796,34 \text{ N}$$

