

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE EDUCACIÓN A DISTANCIA



Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Electrónica y de Control

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES

“Transporte y distribución de energía eléctrica.”

Adenda

Curso 2012/2013

525318

Transporte y distribución de energía eléctrica.

GUÍA DE LA ASIGNATURA

1) INTRODUCCIÓN.

En esta asignatura se plantea como objetivo fundamental conocer los criterios de diseño y funcionamiento tanto de las líneas eléctricas utilizadas para el transporte de la energía eléctrica, como de las redes de distribución, y de otros elementos asociados como son las subestaciones y los centros de transformación.

El primer tema se dedica al estudio de los elementos necesarios para garantizar el transporte y la distribución de la energía eléctrica: la aparamenta eléctrica, la estructura de los centros de transformación y de las subestaciones, las protecciones eléctricas básicas y algunos ejemplos de instalaciones típicas con sus esquemas unifilares.

En el segundo tema, se estudiará el cálculo mecánico de las líneas eléctricas aéreas de alta tensión, tanto de conductores como de apoyos, partiendo para ello los requisitos reglamentarios que establecen tanto las cargas y sobrecargas a considerar en el cálculo como las distintas hipótesis de cálculo a tener en cuenta en función de la altitud, y del tipo de apoyo.

En el tema tercero se estudia el cálculo eléctrico de las líneas de alta tensión. Para ello en primer lugar se estudian los parámetros de las líneas de transmisión, su inductancia, su capacidad, su resistencia y conductancia, en función de la geometría de la línea y de su número de circuitos. Se estudia también la técnica de la transposición de líneas trifásicas, así como el efecto corona. En este tema se abordará también el cálculo de las secciones de los conductores teniendo en cuenta los criterios clásicos de calentamiento y caída de tensión máxima admisible, así como el del rendimiento energético.

El cuarto tema trata de los cables aislados, especialmente los utilizados en las redes de transporte y distribución de alta tensión. Se estudiarán los tipos de aislamiento más utilizados con sus ventajas e inconvenientes, así como las características constructivas más importantes de los distintos tipos de cables.

Se trata de una asignatura que tiene un carácter fundamentalmente tecnológico y es de tipo terminal ya que sus contenidos no sirven de base para asignaturas posteriores y sin embargo, requiere de conocimientos de asignaturas anteriores, fundamentalmente de "Teoría de Circuitos" y de "Líneas y redes eléctricas", aunque también se utilizan conceptos relacionados con la resistencia de materiales. Su objetivo principal es proporcionar al alumno una base científica y técnica que le permita conocer y entender

la naturaleza de los problemas relacionados con el transporte y la distribución de la energía eléctrica, así como los cálculos básicos para realizar el proyecto de una línea aérea de alta tensión, de una instalación de alta o baja tensión, o de un centro de transformación. También se pretende que el alumno se familiarice con los tipos de materiales utilizados en alta y baja tensión, así como la necesidad de su normalización, en especial los aisladores, los apoyos, los conductores desnudos y los cables.

2) CONTENIDOS.

El programa de la asignatura se ha dividido en cuatro temas.

TEMA 1. Sistemas de energía eléctrica. Se analizará la aparamenta eléctrica, la arquitectura de la red de transporte y distribución, las protecciones eléctricas básicas y ejemplos de configuraciones típicas en centros de transformación y subestaciones.

TEMA 2. Cálculo mecánico de las líneas eléctricas aéreas de alta tensión. Cargas y sobrecargas a considerar en el cálculo mecánico. Cálculo mecánico de conductores y de apoyos. Hipótesis de cálculo. Condiciones reglamentarias para proximidades, cruzamientos y paralelismos.

TEMA 3. Cálculo eléctrico de las líneas eléctricas aéreas de alta tensión. Parámetros de las líneas de transmisión. Inductancia y capacidad de las líneas trifásicas. Resistencia, conductancia de aislamiento y efecto corona. Valores típicos de los parámetros. Criterios para el diseño eléctrico y cálculo de secciones de los conductores: calentamiento máximo, caída de tensión admisible y rendimiento energético.

TEMA 4. Cables aislados. Estudio de los tipos de aislamiento utilizados según la tensión nominal de la línea, de sus ventajas e inconvenientes. Características constructivas más importantes de los distintos tipos de cables.

3) PROGRAMACIÓN:

No existen Unidades Didácticas editadas por la UNED en esta asignatura, por lo que es necesario utilizar varios libros.

Los libros seleccionados como texto base son los siguientes:

- FERMIN BARRERO GONZÁLEZ. Sistemas de energía eléctrica. THOMSON Editores Spain. Paraninfo S.A.

El alumno ya dispone de este libro puesto que es el texto base de la asignatura de cuarto curso de “Líneas y redes eléctricas”.

- JULIÁN MORENO CLEMENTE. Cálculo de líneas aéreas de alta tensión (con utilización de medios informáticos). Edita el propio autor. 5ª edición. Se puede comprar por ejemplo a través de la UNED, librería virtual. Nota: no confundir con el libro: “Cálculo de líneas aéreas de alta tensión. Complemento: programas para el diseño y calculo de líneas de media tensión (incluye dibujo de perfiles)”, que no es el propuesto para la asignatura.
- MANUEL LLORENTE ANTÓN. Manual de cables eléctricos aislados. Año 2002. Edita el propio autor. Se puede comprar por ejemplo a través de la UNED, librería virtual.
- Adenda de la asignatura de “Transporte y distribución de energía eléctrica”, preparada por el equipo docente del DIEEC de la UNED. Se descarga de la página web del departamento (DIEEC).

A continuación se detalla qué capítulos y apartados debe estudiar de cada libro de acuerdo al programa de la asignatura:

TEMA 1. Sistemas de energía eléctrica.

- 1.1. Introducción.
- 1.2. La energía eléctrica en el panorama energético global.
- 1.3. La producción y la demanda de energía eléctrica.
- 1.4. El sector eléctrico español. Datos fundamentales.
- 1.5. Descripción general de sistemas de energía eléctrica.
- 1.6. Aparatación eléctrica: seccionadores, interruptores, interruptores automáticos, relés, cortacircuitos fusibles, PIA's, diferenciales y dispositivos de protección contra sobretensiones.
- 1.7. Descripción de instalaciones típicas: subestaciones, centros de transformación e instalaciones receptoras de baja tensión.

El tema 1 se estudia mediante el capítulo 1 completo del libro de FERMÍN BARRERO.

TEMA 2. Cálculo mecánico de las líneas eléctricas aéreas de alta tensión.

- 2.1. Elementos fundamentales de las líneas eléctricas aéreas.
 - 2.1.1. Conductores.
 - 2.1.2. Apoyos,
 - 2.1.3. Aisladores.
 - 2.1.4. Entronque de una línea aérea en otra existente. Disposición de los elementos de protección y maniobra.

- 2.1.5. Paso de líneas por zonas especialmente protegidas.
- 2.2. Tensiones a lo largo del vano. Distribución de cargas verticales.
 - 2.2.1. Objeto del cálculo mecánico de conductores.
 - 2.2.2. Variación de las tensiones a lo largo del vano: diagrama de fuerzas.
- 2.3. Cálculo de tensiones, flechas y cargas verticales. Ecuaciones de la catenaria.
 - 2.3.1. Introducción
 - 2.3.2. Propiedad de la catenaria.
 - 2.3.3. Situación de los ejes de la curva.
 - 2.3.4. Cálculo de abcisas, ordenadas y tensiones totales correspondientes a los puntos extremos del vano.
 - 2.3.5. Planteamiento de la ecuación de cambio de condiciones utilizando las ecuaciones de la catenaria.
 - 2.3.6. Cálculo de flechas.
 - 2.3.7. Cálculo de las cargas verticales transmitidas por los conductores a los apoyos.
- 2.4. Calculo de tensiones, flechas y cargas verticales. Soluciones aproximadas: la parábola Truxá.
 - 2.4.1. Introducción.
 - 2.4.2. Propiedades de la parábola.
 - 2.4.3. Cálculo de tensiones en las diferentes condiciones de equilibrio. Ecuación de cambio de condiciones.
 - 2.4.4. Ecuación del cambio de condiciones. Método de Truxá.
 - 2.4.5. Cálculo de flechas.
 - 2.4.6. Relación entre la componente horizontal de la tensión y la tensión en el punto más alto de fijación del conductor.
 - 2.4.7. Determinación de los pesos de conductor que gravitan sobre los apoyos.
- 2.5. Estudio comparativo de resultados utilizando las ecuaciones de la catenaria, la parábola y Truxá.
 - 2.5.1. Consideraciones previas.
 - 2.5.2. Cálculo de tensiones y flechas.
 - 2.5.3. Relación entre la componente horizontal de la tensión y la tensión en el punto más alto de fijación del conductor.
- 2.6. Efectos del viento sobre las líneas aéreas.
 - 2.6.1. Introducción.
 - 2.6.2. Conductores desviados por el viento. Cálculo de distancias.
 - 2.6.3. Vibración de los conductores de una línea aérea.
 - 2.6.4. Desviaciones de las cadenas de suspensión por la acción del viento.
- 2.7. Condiciones reglamentarias fundamentales.
 - 2.7.1. Objeto.
 - 2.7.2. Clasificación de líneas.
 - 2.7.3. Proyecto.
 - 2.7.4. Conexión de los apoyos a tierra.
 - 2.7.5. Acciones a considerar en los cálculos mecánicos.

- 2.7.6. Distancias de seguridad.
- 2.7.7. Cálculo mecánico de conductores.
- 2.7.8. Hipótesis a considerar en el cálculo de apoyos.
- 2.7.9. Coeficientes de seguridad.

- 2.8. Trazado y replanteo de las líneas eléctricas aéreas.
 - 2.8.1. Elección del trazado de la línea eléctrica aérea.
 - 2.8.2. Determinación sobre el terreno del trazado de una línea.
 - 2.8.3. Distribución de apoyos a lo largo del perfil.
 - 2.8.4. Asignación de funciones a los apoyos.
 - 2.8.5. Curvas para el trazado del perfil de una línea.

- 2.9. Tablas de tensiones y flechas.
 - 2.9.1. Descripción y confección.
 - 2.9.2. Utilización de las tablas de tensiones y flechas en la confección de proyectos.
 - 2.9.3. Utilización de las tablas de tensiones y flechas en el tendido de líneas.

- 2.10. Cálculos mecánicos de una línea eléctrica aérea. Resumen.
 - 2.10.1. Objeto.
 - 2.10.2. Datos de partida.
 - 2.10.3. Elección de la sección del conductor.
 - 2.10.4. Aislamiento.
 - 2.10.5. Tipo de apoyos a utilizar.
 - 2.10.6. Dibujo del perfil de la línea.
 - 2.10.7. Asignación de las funciones a los apoyos.
 - 2.10.8. Determinación de las condiciones de cálculo.
 - 2.10.9. Componente horizontal máxima de la tensión a utilizar.
 - 2.10.10. Cálculo de tensiones y flechas.
 - 2.10.11. Cálculo de las constantes reales de las curvas.

- 2.11. Esfuerzos externos actuantes sobre los apoyos.
 - 2.11.1. Introducción.
 - 2.11.2. Cálculo de esfuerzos externos sobre apoyos.
 - 2.11.3. Elección de los apoyos a utilizar.

- 2.12. Apoyos metálicos de perfiles laminados.
 - 2.12.1. Introducción.
 - 2.12.2. Cálculo de esfuerzos sobre las barras.

- 2.13. Problemas de aplicación.
 - 2.13.1. Problema 1: Cálculo de los coeficientes de sobrecarga de un conductor.
 - 2.13.2. Problema 2: Aplicación de la ecuación de cambio de condiciones.
 - 2.13.3. Problema 3: Cálculo de un vano de gran longitud y muy desnivelado.
 - 2.13.4. Problema 4: Estudio de la desviación de una cadena de aisladores de suspensión.

Los puntos del temario desde 2.1 hasta 2.12 se estudian en el libro de MORENO CLEMENTE, siguiendo los capítulos I, hasta el capítulo XII del libro, ambos inclusive.

El alumno puede leer el apartado 3.8 de este libro dedicado al equilibrio del conductor sobre las poleas de tendido que es un aspecto específico relacionado con la construcción de la línea, pero este apartado no está incluido en el temario. Por el mismo motivo tampoco entra en el temario el equilibrio sobre poleas del apartado 5.4 del libro.

Aunque no es el objetivo de la asignatura el profundizar en el cálculo mecánico de los distintos tipos de apoyos, lo cual es mucho más propio de resistencia de materiales, el alumno debe conocer los tipos de condicionantes que influyen en su cálculo, por ello el capítulo XII del libro presenta el cálculo de los apoyos construidos con perfiles laminados. No se incluye dentro del temario el cálculo de crucetas del apartado 12.3 del libro.

El punto 2.13 del temario se basa en el estudio de cuatro problemas contenidos en la adenda de la asignatura.

El alumno debe conocer que en marzo de 2008 se publicó el nuevo reglamento de líneas eléctricas de alta tensión, RD 223/2008 que establece nuevos requisitos para el cálculo mecánico de las líneas de alta tensión en cuanto a las hipótesis de cálculo y a los valores de las sobrecargas a considerar en cada caso. Este Reglamento será de obligado cumplimiento para las líneas nuevas a partir de marzo de 2010, mientras que hasta tal fecha será aplicable el Reglamento antiguo RD 3151/1968.

El libro de MORENO CLEMENTE está basado en las hipótesis teóricas del Reglamento antiguo, aunque ello no es obstáculo en absoluto para abordar este tema desde un punto de vista teórico, teniendo en cuenta que ciertos valores numéricos y ciertas hipótesis de cálculo se deben modificar para los proyectos reales a partir marzo de 2010. Ciertamente para realizar un proyecto oficial se deberían utilizar obligatoriamente las constantes e hipótesis de cálculo de conductores y apoyos, del moderno RLAT (RD 223/2008) que se puede consultar en cualquiera de los textos indicados como bibliografía complementaria.

TEMA 3. Cálculo eléctrico de las líneas aéreas de alta tensión.

- 3.1. Introducción.
- 3.2. Enlaces de flujo e inductancia.
- 3.3. Inductancia de líneas trifásicas.
- 3.4. Diferencia de potencial y capacidad.
- 3.5. Capacidad de líneas trifásicas.
- 3.6. Resistencia de los conductores.
- 3.7. Conductancia de aislamiento y efecto corona.
- 3.8. Valores típicos de parámetros.
- 3.9. Cálculo de secciones de los conductores. Aspectos básicos.

Los puntos 3.1 a 3.8 de este tema se estudiarán siguiendo el capítulo 4 completo del libro de FERMIN BARRERO. El punto 3.9 de este tema se estudiará siguiendo el capítulo 5.8 de este mismo libro.

El punto 3.9 de este tema relativo al cálculo de la sección de los conductores se estudiará de nuevo con mayor detalle en el capítulo 4, para conductores aislados en instalaciones de baja tensión, y según las condiciones de instalación.

TEMA 4. Cables aislados.

4.1. Selección de un cable para una instalación eléctrica.

4.1.1. Generalidades.

4.1.2. Cables eléctricos aislados para el transporte de energía.

4.1.3. Parámetros térmicos de un cable de energía

4.2. La elección del cable.

4.2.1. Definición de la tensión nominal de un cable.

4.2.2. Elección de las canalizaciones según las influencias externas.

4.2.3. Identificación de las canalizaciones.

4.2.4. Locales con riesgo de incendio o explosión.

4.2.5. Protección de los circuitos de corrientes débiles.

4.2.6. Comportamiento de los cables frente al fuego.

4.2.7. Determinación de las secciones.

4.3. Características de los materiales de los cables.

4.3.1. Conductores.

4.3.2. Materiales aislantes utilizados en los cables de energía.

4.3.3. Materiales de protección.

4.3.4. Propiedades de los materiales empleados en los cables.

4.3.5. Resistencia de los materiales a los agentes atmosféricos y otros agentes químicos.

4.3.6. Comportamiento frente a radiaciones ionizantes.

4.3.7. Vida útil de los materiales de aislamiento y cubierta.

4.4. Manejo y tendido de los cables eléctricos.

4.4.1. Manejo de los cables eléctricos.

4.4.2. Tipos de instalación.

4.4.3. Tendido de los cables bajo tierra.

4.4.4. Tendido de los cables al aire libre en redes posadas.

4.4.5. Tendido de los cables al aire libre en redes tensadas.

4.4.6. Tendido de los cables bajo tubo.

4.5. Ejemplos de cálculo de líneas con cables aislados.

Todo el tema 4 se estudia utilizando el libro de MANUEL LLORENTE, utilizando los capítulos que se indican a continuación.

El punto 4.1. del temario se estudia siguiendo el capítulo II del libro, a excepción del apartado II.III. del libro dedicado a cables para corrientes débiles que no está incluido. El alumno debe considerar que el libro incluye algunas demostraciones de ciertas

fórmulas, como por ejemplo la relativa a la capacidad de carga de un cable en servicios intermitentes que carecen de interés práctico y que resultan además a veces difíciles de seguir ya que existen algunos errores tipográficos en el libro, tanto con los subíndices como en las letras griegas.

El punto 4.2. del temario se estudia siguiendo el capítulo III del libro, en su totalidad. El punto 4.3. del temario se estudia siguiendo el capítulo IV del libro, excepto el apartado IV.3. del libro dedicado a los materiales aislantes empleados en los cables de corrientes débiles que no está incluido en el temario.

El punto 4.4. del temario se estudia siguiendo el capítulo V del libro, excepto el apartado V.5.5. del libro dedicado al cálculo mecánico de líneas que no está incluido ya que se ha estudiado con mayor rigor y amplitud en el tema 2 anterior.

El alumno debe conocer que en marzo de 2008 se publicó el nuevo reglamento de líneas eléctricas de alta tensión, RD 223/2008 que incorpora una Instrucción Técnica Complementaria dedicada a la instalación de cables subterráneos de alta tensión. Este Reglamento será de obligado cumplimiento para las líneas nuevas a partir de marzo de 2010.

4) BIBLIOGRAFÍA BÁSICA.

- FERMIN BARRERO GONZÁLEZ. Sistemas de energía eléctrica. THOMSON Editores Spain. Paraninfo S.A.

Nota: El capítulo 1 de este libro se utilizará como base del tema 1 de la asignatura. El capítulo 4, y el apartado 5.8 de este libro serán la base del tema 3 de la asignatura.

- JULIÁN MORENO CLEMENTE. Cálculo de líneas aéreas de alta tensión. Edita el propio autor. 5ª edición.

Nota: este libro se utilizará como base para el tema 2 de la asignatura. No se debe confundir este libro con otro del mismo autor titulado: Cálculo de líneas aéreas de alta tensión. COMPLEMENTO. Este libro incluye programas para el diseño y cálculo de líneas de media tensión y no es necesario para el estudio de la asignatura.

- MANUEL LLORENTE ANTÓN. Manual de cables eléctricos aislados. Año 2002. Edita el propio autor.

Nota: los capítulos 2,3,4 y 5 de este libro se utilizarán como base para el tema 4 de la asignatura.

5) BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA.

- Reglamento de líneas eléctricas aéreas de alta tensión. Decreto 3151/68 de 28 de noviembre. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Servicio de Publicaciones del Ministerio, Paseo de la Castellana 160. 28071 Madrid.
- RD 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.
- Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación. Real Decreto 3275/1982. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Servicio de Publicaciones del Ministerio, Paseo de la Castellana 160. 28071 Madrid.

Nota: puesto que estos tres textos tienen carácter legal, es fácil descargarlos gratuitamente de Internet en su versión original publicada en el BOE, para ello el alumno puede utilizar cualquier buscador de Internet, y teclear como parámetro de búsqueda “Decreto 3151/1968”, RD 223/2008, y “RD 3275/1982” respectivamente.

- JORGE MORENO. FERNANDO GARNACHO. PASCUAL SIMÓN. JOSÉ RODRÍGUEZ. Reglamento de líneas de alta tensión y sus fundamentos técnicos. Editorial Paraninfo. ISBN 10: 84-283-3034-4, ISBN-13: 978-84-283-3034-3.

Nota: este libro está basado en el nuevo Reglamento de líneas de alta tensión (RD 223/2008).

6) PRUEBAS DE EVALUACIÓN A DISTANCIA. PRÁCTICAS DE LABORATORIO

En esta asignatura no hay que realizar Pruebas de Evaluación a Distancia. Tampoco hay Prácticas de Laboratorio.

7) PRUEBAS PRESENCIALES

Al ser una asignatura cuatrimestral del 2^o cuatrimestre, solamente hay Pruebas Personales finales en febrero y septiembre.

Las fórmulas principales aplicables al cálculo mecánico se han resumido en el formulario incluido en la adenda que se podrá utilizar en el desarrollo de los exámenes de la asignatura, dicho formulario se facilitará junto con examen, con lo cual no está permitido el uso de ningún tipo de material de consulta con excepción del entregado con el examen. Está permitido el uso de una calculadora programable que facilita especialmente la resolución de la ecuación del cambio de condiciones. Dispone de dos horas para realizar la prueba.

El examen será teórico práctico tipo test, combinado con desarrollo de problemas, incluyendo tanto cuestiones cortas de carácter teórico o teórico-práctico, como varios problemas para desarrollar.

8) HORARIO DE ATENCIÓN AL ALUMNO

Las consultas se puede realizar durante la guardia, por teléfono o personalmente, y por correo postal o electrónico.

Horario de guardia: lunes, de 16:00 a 20:00 horas.

Teléfono: 91 398 7623 (Prof. Pascual Simón)

Fax: 91 398 6028

Correo electrónico: psimon@ieec.uned.es

En Internet: <http://www.ieec.uned.es> y allí buscar la asignatura en el apartado "Docencia del DIEEC".

Dirección: Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control
E.T.S. de Ingenieros Industriales - UNED
C/Juan del Rosal, nº 12.
28040 MADRID.

Transporte y distribución de energía eléctrica.

ADENDA

INTRODUCCIÓN.

TEMA 2. Cálculo mecánico de las líneas eléctricas aéreas de alta tensión.

2.1. Elementos fundamentales de las líneas eléctricas aéreas.

Este punto describe los elementos utilizados en la construcción de las líneas eléctricas aéreas con conductores desnudos, así como sus características nominales mediante tablas extraídas de los fabricantes de estos elementos.

2.2. Tensiones a lo largo del vano. Distribución de cargas verticales.

Este punto tiene por objeto introducir cuales son los objetivos a satisfacer en el cálculo mecánico de los conductores, así como presentar las fuerzas que actúan sobre el conductor.

2.3. Cálculo de tensiones, flechas y cargas verticales. Ecuaciones de la catenaria.

Este punto tiene como objetivo fundamental presentar la ecuación de la catenaria que define la forma geométrica adoptada por el conductor, así como la ecuación de cambio de condiciones basada en las ecuaciones de la catenaria.

2.4. Calculo de tensiones, flechas y cargas verticales. Soluciones aproximadas: la parábola Truxá.

Aunque los medios informáticos actuales permiten realizar el cálculo mecánico de los conductores utilizando las ecuaciones de la catenaria, este punto presenta las aproximaciones basadas en la utilización de la parábola y el método de Truxá, que tienen un gran interés didáctico y que se utilizan incluso en programas comerciales de cálculo.

La ecuación de la parábola tiene el significado físico de que la fuerza externa (el peso del conductor por unidad de longitud) se supone distribuida uniformemente sobre la proyección del conductor según el eje de abscisas, y no sobre su verdadera longitud. La aproximación de la parábola es válida para el tendido de vanos (distancia entre los puntos extremos de sujeción del conductor) que no superen 300 m y siempre que el desnivel entre dichos puntos no supere el 10%.

Por otra parte el método de Truxá que utiliza la ecuación de cambio de condiciones en una forma muy parecida a la tradicional (la que utiliza el método de la parábola) arroja resultados que prácticamente coinciden con los obtenidos utilizando las ecuaciones de la catenaria, siendo su aplicación de carácter general, incluso en vanos de gran longitud y muy desnivelados.

2.5. Estudio comparativo de resultados utilizando las ecuaciones de la catenaria, la parábola y Truxá.

El objetivo de este punto es cuantificar las diferencias cuando se utilizan los tres métodos ya presentados. No entra en el temario el equilibrio sobre poleas.

2.6. Efectos del viento sobre las líneas aéreas.

En este punto se estudian los efectos del viento que son la desviación de los conductores con el consiguiente riesgo de acercamiento a otros conductores o edificios, así como la vibración de los conductores y la desviación de las cadenas con aisladores de suspensión.

2.7. Condiciones reglamentarias fundamentales.

Este punto resume las condiciones para el proyecto, cálculo y construcción que establece el Reglamento aplicable a las líneas eléctricas de alta tensión. La parte final del capítulo dedicada al cálculo de cimentaciones y a prescripciones especiales no está incluida en el temario.

2.8. Trazado y replanteo de las líneas eléctricas aéreas.

Este punto ilustra como se realiza el trazado del perfil de una línea con la ayuda de plantillas que representan la catenaria del conductor en condiciones de flecha máxima, en condiciones de flecha mínima, así como otra curva que tiene en cuenta las distancias de seguridad reglamentarias.

2.9. Tablas de tensiones y flechas.

Este punto está dedicado a la utilización de las tablas de tensiones y flechas que es una herramienta fundamental utilizada en el cálculo y construcción de las líneas eléctricas aéreas de alta tensión.

2.10. Cálculos mecánicos de una línea eléctrica aérea. Resumen.

Este punto resume los pasos a seguir y las fórmulas a utilizar en el cálculo mecánico de conductores.

2.11. Esfuerzos externos actuantes sobre los apoyos.

En este punto se establecen las bases aplicables para el cálculo mecánico de los apoyos.

2.12. Apoyos metálicos de perfiles laminados.

Aunque no es el objetivo de la asignatura profundizar en el cálculo mecánico de los distintos tipos de apoyos, lo cual es mucho más propio de resistencia de materiales, en este punto se presentan a modo de ejemplo las bases para el cálculo de los apoyos construidos con perfiles laminados. No se incluye dentro del temario el cálculo de crucetas.

2.13. Problemas de aplicación.

Para completar el texto aplicable a este tema 2, que no incluye problemas el equipo docente ha preparado los siguientes problemas tipo resueltos.

Problema 1: cálculo de los coeficientes de sobrecarga de un conductor.

Se llama coeficiente de sobrecarga de un cable, m , a la relación entre el peso aparente (debido al peso propio y al efecto del viento, del hielo o de ambos), y el peso propio. Las fórmulas para su cálculo son:

Caso de sobrecarga de viento que según el Reglamento se considera que actúa en sentido horizontal:

$$m = \frac{r}{p} = \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{p} \quad (1)$$

Caso de sobrecarga de hielo:

$$m = \frac{r}{p} = \frac{p + p_h}{p} \quad (2)$$

Caso de viento y hielo simultáneos:

$$m = \frac{r}{p} = \frac{\sqrt{(p + p_h)^2 + q^2}}{p} \quad (3)$$

Calcular el coeficiente de sobrecarga y el peso aparente en las hipótesis de zona A, B, o C del Reglamento para un conductor del tipo LA 180, cuyas características vienen descritas en la página 14 del libro de Moreno Clemente.

Diámetro, $d = 17,5$ mm

Peso, $p = 0,676$ kg/m

Hipótesis si la línea pasa por zona A.

Se debe considerar el peso propio y la acción del viento.

Peso propio del conductor:

$$p = 0,676 \text{ kg/m}$$

Sobrecarga del viento (50 kg/m²), al ser el conductor de un diámetro mayor de 16mm, por tanto si el diámetro del conductor se expresa en mm:

$$q = (0,05 \cdot d) \text{ kg/m} = 0,875 \text{ kg/m}$$

El peso aparente será $r = 1,106 \text{ kg/m}$

Por tanto el coeficiente de sobrecarga será según (1), $m = 1,64$.

Hipótesis si la línea pasa por zona B:

Se debe considerar el peso propio y la acción del hielo que define el Reglamento para la zona B.

Peso propio del conductor:

$$p = 0,676 \text{ kg/m}$$

Sobrecarga del hielo: $(0,18\sqrt{d}) \text{ kg/m}$, si el diámetro del conductor se expresa en mm:

$$p_h = (0,18\sqrt{d}) \text{ kg/m} = 0,753 \text{ kg/m}$$

El peso aparente será $r = 1,429 \text{ kg/m}$.

Por tanto el coeficiente de sobrecarga será según (2), $m = 2,11$.

Hipótesis si la línea pasa por zona C:

Se debe considerar el peso propio y la acción del hielo que define el Reglamento para la zona C.

Peso propio del conductor:

$$p = 0,676 \text{ kg/m}$$

Sobrecarga del hielo: $(0,36\sqrt{d}) \text{ kg/m}$, si el diámetro del conductor se expresa en mm:

$$p_h = (0,36\sqrt{d}) \text{ kg/m} = 1,506 \text{ kg/m}$$

El peso aparente será $r = 2,182 \text{ kg/m}$.

Por tanto el coeficiente de sobrecarga será según (2), $m = 3,23$.

Nota: dentro de las hipótesis normales el reglamento no considera el efecto combinado del viento y del hielo simultáneamente.

Problema 2: Aplicación de la ecuación de cambio de condiciones.

Se está proyectando el tendido de una línea con un conductor del tipo LA-250 de las siguientes características:

Composición:

Aluminio: 30 x 3,15 mm

Acero 7x 3,15 mm

Sección total: 288,6mm²

Diámetro del conductor: 22,05 mm

Módulo de elasticidad, E =8000 kg /mm²

Coefficiente de dilatación: $\delta = 17,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Carga de rotura: 10163 kg.

Peso, p =1,083 kg/m

La línea discurre por una zona más de 1000 metros de altitud (categoría C), y la longitud del vano teórico de regulación es de 300 metros, con vanos aproximadamente a nivel.

- a) Calcular las condiciones de carga y temperatura en las que se producirá la tracción máxima admisible en el conductor, teniendo en cuenta tanto la hipótesis reglamentaria de hielo a -20°C como la hipótesis adicional de viento a -15°C que en raras ocasiones hay que considerar, (artículo 27 del reglamento), estimando para esta zona según los datos meteorológicos disponibles una velocidad del viento de 150 km/h. Se utilizará un coeficiente de seguridad para el cálculo de los conductores de 3, en lugar del admitido por el Reglamento de 2,5.
- b) Calcular el valor de la tracción horizontal máxima admisible.
- c) Calcular la flecha máxima del conductor teniendo en cuenta las tres hipótesis reglamentarias, de viento, temperatura y de hielo.
- d) Calcular el valor de la tensión de cada día (EDS) y comprobar que dicho valor sea inferior al 18% con objeto de evitar fenómenos vibratorios.

a) Condiciones de tracción máxima admisible del conductor.

La tracción máxima admisible en los conductores no se debe sobrepasar en las condiciones reglamentarias de mayor sobrecarga. Habrá que determinar si es la hipótesis de hielo, o la adicional de viento la que produce mayor sobrecarga.

La hipótesis de hielo provoca el siguiente peso aparente sobre el conductor:

$$r = p + p_h = p + 0,36\sqrt{d} = 1,083 \text{ kg/m} + 1,690 \text{ kg/m} = 2,773 \text{ kg/m}$$

Para calcular la carga debida al viento se utiliza la siguiente expresión empírica que relaciona la velocidad del viento (v) en km/h, con la fuerza del viento (P_v) en kg sobre una superficie plana o cilíndrica S, medida en m²:

$$P_{v(S,\text{plana})} = 0,007 v^2 S = 157,5 S$$

$$P_{v(S,\text{cilíndrica})} = 0,5 P_{v(S,\text{plana})}$$

Por lo tanto la carga debida al viento será, para un conductor de diámetro, d, en mm:

$$q = 0,5 \cdot 0,007 (150)^2 (d / 1000) = 1,736 \text{ kg/m}$$

El efecto combinado del viento y el peso propio del conductor provoca el siguiente peso aparente:

Por lo tanto la carga mayor se da para condiciones de hielo, y la tracción máxima admisible se calculará

$$r = \sqrt{p^2 + q^2} = \sqrt{(1,083)^2 + (1,736)^2} = 2,046 \text{ kg / m}$$

para las condiciones de hielo con el objeto de poder aplicar a la ecuación de cambio de condiciones para otras hipótesis cualquiera con o sin sobrecarga.

Como curiosidad el alumno puede calcular la velocidad del viento para la cual las sobrecargas de hielo y viento serían equivalentes ($v = 182 \text{ km/h}$).

b) Valor de la tracción horizontal máxima admisible en el conductor.

El coeficiente de seguridad del conductor debe cumplirse en aquel punto en el que la tracción a la que pueda estar sometido el conductor es la máxima, T_A , y corresponderá al punto más alto de fijación en el apoyo que corresponda.

$$T_A = \frac{\text{Carga de rotura}}{3} = \frac{10163}{3} = 3388 \text{ kg}$$

Conocida la tensión total en el punto mas alto del conductor se puede calcular la componente horizontal, T , según la fórmula del capítulo 4.6:

$$T = \frac{T_A - r \frac{h}{2} + \sqrt{\left(T_A - r \frac{h}{2}\right)^2 - \frac{r^2 b^2}{2}}}{2 \frac{b}{a}}$$

Teniendo en cuenta que se trata de un vano a nivel, $a = b$, y además $h = 0$. Por lo tanto la expresión anterior se transforma en la siguiente simplificada:

$$T = \frac{T_A + \sqrt{(T_A)^2 - \frac{r^2 a^2}{2}}}{2}$$

Sustituyendo:

$$T_A = 3388 \text{ kg}$$

$$a = 300 \text{ m}$$

$$r = 2,773 \text{ kg/m (peso aparente debido al peso propio más hielo)}$$

$$\text{Se obtiene: } T = 3362,2 \text{ kg}$$

Como punto de partida posterior para la aplicación de la ecuación de cambio de condiciones, llamaremos T_0 , p_0 , t_0 a las condiciones de tensión horizontal, peso aparente del conductor y temperatura en las condiciones de hielo en zona C. Por tanto:

$$T_0 = 3362,2 \text{ kg}$$

$$p_0 = 2,773 \text{ kg/m}$$

$$t_0 = -20^\circ\text{C}$$

Recuérdese que siempre que los vanos no superen una longitud de 300m y que el desnivel sea inferior al 10% se considera que la aproximación de la parábola resulta perfectamente aplicable para la ecuación de cambio de condiciones y para el cálculo de las flechas.

c) Cálculo de la flecha máxima.

Se define como flecha la distancia vertical máxima existente entre un punto de la curva o catenaria del conductor y el punto correspondiente de la recta de unión de los puntos de fijación del conductor. En caso de viento como el conductor ocupa un plano que forma un cierto ángulo con la vertical cabe calcular una flecha horizontal y otra vertical. Las flechas máximas a calcular según el Reglamento corresponden a las siguientes condiciones:

Hipótesis de viento: 15°C + viento
 Hipótesis de temperatura: 50°C sin sobrecarga
 Hipótesis de hielo: 0°C + hielo (sólo en zonas B y C).

Se calculan los valores de la flecha para cada una de las tres hipótesis anteriores.

Hipótesis de viento a 15°C.

Se parte de las condiciones de tracción máxima admisible y se aplica la ecuación de cambio de condiciones utilizando la aproximación de la parábola:

Ecuación de cambio de condiciones:

$$T^2(T+A)=B$$

$$A = \delta(t - t_0)SE - T_0 + \frac{a^2 p_0^2}{24 T_0^2} SE$$

$$B = \frac{a^2 p^2}{24} SE$$

La longitud del vano es a = 300m. Se conocen también las características del conductor:

$\delta = 17,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 $S = 288,6 \text{ mm}^2$
 $E = 8000 \text{ kg /mm}^2$

Se conocen igualmente las condiciones iniciales y finales buscadas y se debe calcular el valor de T:

$T_0 = 3362,2 \text{ kg}$	T se debe calcular
$p_0 = 2,773 \text{ kg/m}$	$p = 1,545 \text{ kg/m}$ (peso aparente con viento)
$t_0 = -20^\circ\text{C}$	$t = 15^\circ\text{C}$

La ecuación de cambio de condiciones se puede resolver fácilmente mediante un proceso iterativo. Para ello se asigna un valor inicial a la tensión buscada, $T=T'$ que se estime pueda ser próximo a la solución buscada. Con este valor de T, se calcula:

$$T'^2(T'+A) = B'$$

Si $B' > B$, el valor de T' estimado es grande y por tanto se prueba con otro valor más pequeño: $T''=T'-\Delta T$.

Si $B' < B$, el valor de T' estimado es pequeño y por tanto se prueba con otro valor mayor: $T''=T'+\Delta T$.

Repitiendo el proceso varias veces se llega a una situación en la que $B'=B$

Por ejemplo en nuestro caso particular $B = 2,07 \cdot 10^{10} \text{ kg}^3$. Si partimos de $T'=2000 \text{ kg}$, se obtiene $B' = 2,38 \cdot 10^{10} \text{ kg}^3$. Como $B' > B$, el valor de la tensión debe ser más pequeño y se debe iniciar el proceso de aproximaciones sucesivas, que es muy fácilmente programable mediante una calculadora o una simple hoja de excel.

Después de varias iteraciones se obtiene $T=1882 \text{ kg}$. Conocida la tensión ya se puede calcular la flecha, tanto en horizontal como en vertical.

Para el cálculo de la flecha se emplea también la aproximación de la parábola:

$$f = \frac{a^2 p}{8T}$$

Sustituyendo, $a = 300\text{m}$, $p = 1,545\text{ kg/m}$ (peso aparente con viento), $T = 1882\text{ kg}$, se obtiene: $f = 9,24\text{ m}$.

En este caso el viento inclina el plano de la catenaria del cable un ángulo ϕ , tal que:

$$\text{tag } \phi = q / p.$$

La carga reglamentaria debida al viento, si el diámetro d se expresa en milímetros, es:
 $q = 0,05 d = 1,1025\text{ kg/m}$

En este caso: $\text{tag } \phi = q / p = 1,1025/1,083 = 1,018 \Rightarrow \phi = 45^\circ 31'$

Por lo tanto las proyecciones vertical y horizontal de la flecha serán las siguientes:

$$f_{\text{proyección vertical}} = f \cos \phi = 6,48\text{ m}$$

$$f_{\text{proyección horizontal}} = f \text{ sen } \phi = 6,59\text{ m}$$

Hipótesis de temperatura a 50°C, sin sobrecarga.

Como antes se debe aplicar la ecuación de cambio de condiciones para determinar la tensión horizontal de tensado en las nuevas condiciones:

$T_0 = 3362,2\text{ kg}$	T se debe calcular
$p_0 = 2,773\text{ kg/m}$	$p = 1,083\text{ kg/m}$ (peso del conductor)
$t_0 = -20^\circ\text{C}$	$t = 50^\circ\text{C}$

Aplicando el proceso de aproximaciones sucesivas descrito se obtiene:

$$T = 1238\text{ kg.}$$

A continuación se determina la flecha:

$$f = \frac{a^2 p}{8T} = \frac{(300)^2 1,083}{8 \cdot (1238)} = 9,84\text{m}$$

Hipótesis de hielo a 0°C.

Se aplica la ecuación de cambio de condiciones para determinar la tensión horizontal de tensado:

$T_0 = 3362,2\text{ kg}$	T se debe calcular
$p_0 = 2,773\text{ kg/m}$	$p = 2,773\text{ kg/m}$ (peso conductor más manguito de hielo)
$t_0 = -20^\circ\text{C}$	$t = 0^\circ\text{C}$

Aplicando el proceso de aproximaciones sucesivas descrito se obtiene:

$$T = 3192\text{ kg.}$$

A continuación se determina la flecha:

$$f = \frac{a^2 p}{8T} = \frac{(300)^2 2,773}{8 \cdot (3192)} = 9,77\text{m}$$

Cuadro comparativo de las flechas máximas obtenidas:

Hipótesis reglamentaria	Temperatura	Valor de la flecha	Condiciones de la flecha
Viento: peso propio con sobrecarga de viento.	15°C	9,24 m	Inclinada, tiene componente horizontal y vertical
Temperatura: peso propio del conductor sin sobrecarga.	50°C	9,84 m	Vertical y máxima
Hielo: peso propio del conductor con manguito de hielo	0°C	9,77 m	Vertical

d) Cálculo de la tensión de cada día (EDS).

La tensión de cada día se calcula sin sobrecargas y a la temperatura de 15°C. Se aplica de nuevo la ecuación de cambio de condiciones:

$$\begin{array}{ll}
 T_0 = 3362,2 \text{ kg} & T \text{ se debe calcular} \\
 p_0 = 2,773 \text{ kg/m} & p = 1,083 \text{ kg/m (peso conductor)} \\
 t_0 = -20^\circ\text{C} & t = 15^\circ\text{C}
 \end{array}$$

Aplicando el proceso de aproximaciones sucesivas descrito se obtiene:

$$T = 1380 \text{ kg .}$$

El coeficiente EDS se calcula como:

$$EDS = \frac{\text{Tensión de cada día}}{\text{Carga de rotura}} = \frac{1380}{10163} = 13,6\%$$

Es decir, que la tensión de cada día es el 13,6% de la carga de rotura del conductor, valor menor del 18% que se considera admisible para una línea que no tenga una protección específica contra vibraciones.

Problema 3. Cálculo de un vano de gran longitud y muy desnivelado.

Un vano de una línea eléctrica aérea, situado en zona A entre dos apoyos de anclaje, esta definido por una separación horizontal entre apoyos de $a = 800$ m, y un desnivel h de 300 metros, con mayor altura en el apoyo de la derecha.

Para realizar el tendido se emplea un conductor de aluminio-acero que tiene las características siguientes:

Composición:

Aluminio: $54 \times 3,376$ mm

Acero $7 \times 3,376$ mm

Sección total: $546,06 \text{ mm}^2$

Diámetro del conductor: 30,38 mm

Módulo de elasticidad, $E = 7000 \text{ kg /mm}^2$

Coefficiente de dilatación: $\delta = 19,3 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Carga de rotura: 15536 kg.

Peso, $p = 1,826 \text{ kg/m}$

Se desea que en las condiciones más desfavorables a efectos de esfuerzos de tracción (sobrecarga de viento a -5°C , al tratarse de zona A), la máxima fuerza de tracción a que pueda estar sometido el conductor no supere la de rotura dividida por el coeficiente reglamentario de 2,5.

- a) Determinar la componente de la fuerza de tracción horizontal en las condiciones más desfavorables citadas.
- b) Aplicar la ecuación de cambio de condiciones para determinar la componente horizontal de la fuerza de tracción el día del tendido supuesta una temperatura de 20°C y sin sobrecarga.
- c) Determinar la flecha el día del tendido.

a) Valor de la tracción horizontal máxima admisible en el conductor.

En las condiciones más desfavorables a efectos de tracción el conductor estará sometido a su propio peso y a la sobrecarga del viento:

$$p = 1,826 \text{ kg/m}$$

$$q = (0,05 \cdot d) \text{ kg/m} = 1,519 \text{ kg/m}$$

Con lo cual la carga resultante tendrá un valor:

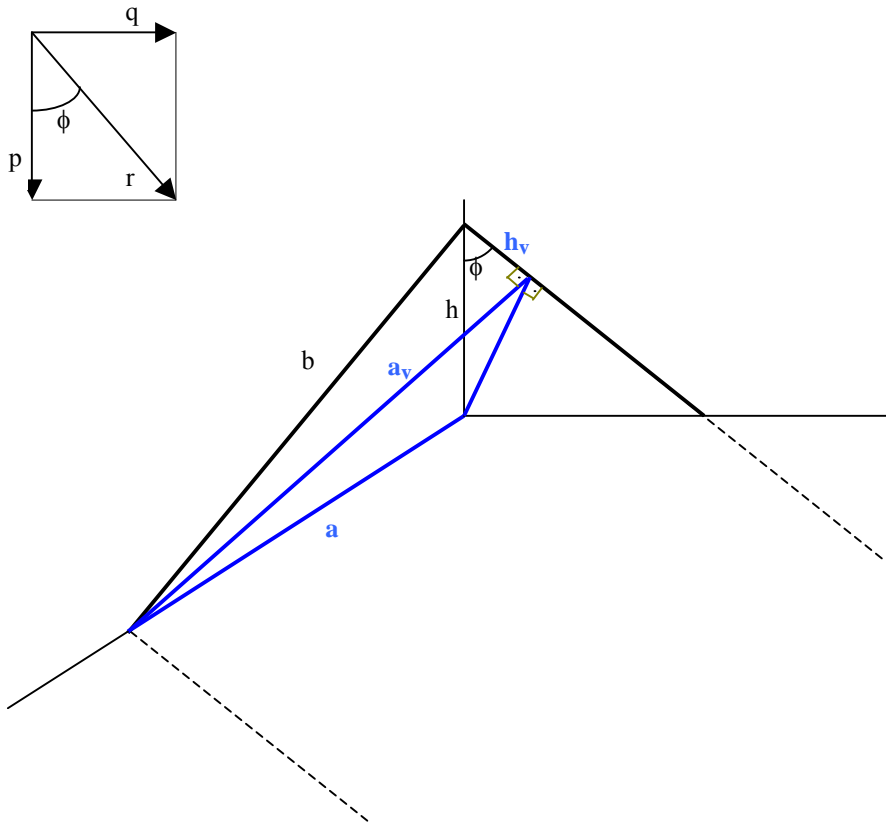
$$r = \sqrt{p^2 + q^2} = 2,375 \text{ kg / m}$$

El peso aparente resultante estará inclinada respecto de la vertical un ángulo ϕ , tal que

$$\text{tag } \phi = q / p \Rightarrow \phi = 39^\circ 45'$$

Por el efecto del viento también el plano de la catenaria se inclinará este mismo ángulo, de modo que aunque la longitud real del vano (b) es fija ya que está determinada por la posición de los apoyos, variará la longitud del vano proyectado, así como el desnivel de dicho vano medidos ambos en el plano inclinado de la catenaria. Las expresiones aplicables que se deducen de la figura 1 son las siguientes:

Figura 1



Longitud real del vano, b :

$$b = \sqrt{a^2 + h^2} = \sqrt{800^2 + 300^2} = 854,4 \text{ m}$$

Desnivel del vano por efecto del viento, h_v :

$$h_v = h \cos \phi = 300 \cdot 0,7688 = 230,6 \text{ m}$$

Longitud del vano proyectado con viento, a_v :

$$a_v = \sqrt{b^2 - h_v^2} = \sqrt{854,4^2 - 230,6^2} = 822,7 \text{ m}$$

El coeficiente de seguridad del conductor debe cumplirse en aquel punto en el que la tracción a la que pueda estar sometido sea la máxima, T_A , y corresponderá al punto de fijación en el apoyo más alto del vano:

$$T_A = \frac{\text{Carga de rotura}}{3} = \frac{15536}{2,5} = 6214,4 \text{ kg}$$

Conocida la tensión total en el punto mas alto del conductor se puede calcular la componente horizontal, T , según la fórmula del capítulo 4.6, pero teniendo en cuenta que se deben utilizar el desnivel (h_v) y la

longitud proyectada del vano (a_v) existentes en el plano inclinado de la catenaria por efecto del viento, así como el valor de carga total sobre el conductor, r .

$$T = \frac{T_A - r \frac{h_v}{2} + \sqrt{\left(T_A - r \frac{h_v}{2}\right)^2 - \frac{r^2 b^2}{2}}}{2 \frac{b}{a_v}}$$

Sustituyendo todos los valores conocidos se obtiene para la tensión horizontal del conductor un valor, **T= 5635,3 kg.**

Nota: el lector puede calcular como la tensión horizontal si se considerara un vano a nivel, de igual longitud, $a = 800$ m, sería de $T = 6140,9$ kg, valor mucho mayor y por tanto con un error ciertamente inadmisibles.

b) Determinación de la componente horizontal de la tracción el día del tendido.

Como el vano es de gran longitud y está desnivelado se deberían aplicar directamente las ecuaciones de la catenaria, aunque por su sencillez se utilizará la ecuación de cambio de condiciones basada en el método de Truxá. No se puede aplicar en este caso la simplificación de la parábola.

El método de Truxá se basa en la utilización de las tensiones en el punto medio de los vanos (T_m) en lugar de las componentes horizontales (T). Por otra parte habrá que tener en cuenta que la longitud proyectada del vano, a , varía cuando se considera el efecto del viento, lo cual habrá que considerar también en la ecuación de cambio de condiciones, distinguiéndose por ello entre la longitud proyectada inicial, a_0 , y la final, a . Las ecuaciones que definen este método para el caso de un único vano son las siguientes:

$$T_m^2(T_m + A) = B$$

$$A = \delta(t - t_0)SE - T_{m,0} + \frac{a_0^2}{24} \frac{r_0^2}{T_{m,0}^2} SE$$

$$B = \frac{a^2 r^2}{24} SE$$

$$T_{m,0} = T_0 \frac{b}{a_0}$$

$$T_m = T \frac{b}{a}$$

Por lo tanto se trata de pasar de unas condiciones de temperatura, carga sobre el conductor y tensión a otras nuevas condiciones, siendo la longitud del vano $b=854,4$ m.

Condiciones iniciales:

$T_0 = 5635,3$ kg (tensión horizontal en todo el vano)

$a_0 = a_v = 822,7$ m

$T_{m,0} = 5852,5$ kg (tensión en el punto medio del vano)

$r_0 = 2,375$ kg/m (peso del conductor y sobrecarga de viento)

$t_0 = -5^\circ\text{C}$

Utilizando la ecuación de cambio de condiciones se deben calcular: T_m

Conocida T_m , se calculará el valor de la tensión horizontal, T .

$a = 800$ m

$r = 1,826$ kg/m (peso conductor sin sobrecarga)

$$t = 20^{\circ}\text{C}$$

Las constantes de la ecuación de cambio de condiciones se calculan como:

$$A = 13747,7 \text{ kg}; B = 3,39892 \cdot 10^{11} \text{ kg}^3$$

Resolviendo por aproximaciones sucesivas la ecuación de cambio de condiciones se obtiene para el valor de la tensión en el punto medio del vano

$$T_m = 4335,4 \text{ kg}$$

A continuación se calcula el valor de la componente horizontal de la tensión

$$T = T_m \frac{a}{b} = 4059,4 \text{ kg}$$

c) Determinar la flecha el día del tendido.

Utilizando el método de Truxá, la flecha se calcula como:

$$f = \frac{rab}{8T} \left(1 + \frac{a^3 r^2}{48T^2} \right)$$

Sustituyendo los siguientes valores:

$$r = 1,826 \text{ kg/m (peso conductor sin sobrecarga)}$$

$$a = 800 \text{ m}$$

$$b = 854,4 \text{ m}$$

$$T = 4059,4 \text{ kg}$$

Se obtiene una flecha, $f = 38,54 \text{ m}$.

Problema 4. Estudio de la desviación de una cadena de aisladores de suspensión.

Se está proyectando una línea aérea de 132 kV de tensión nominal en zona B, y se quiere comprobar si la desviación por efecto del viento de una cadena de aisladores de suspensión, permite satisfacer la distancia de seguridad reglamentaria entre conductores y sus accesorios en tensión y los apoyos.

La parte de interés de la armadura del apoyo se describe en la figura 2, donde la grapa de suspensión tiene una dimensión de $e = 0,4$ m, la longitud de la cadena $l_c = 1,7$ m, y la separación al poste es de $s = 2,5$ m.

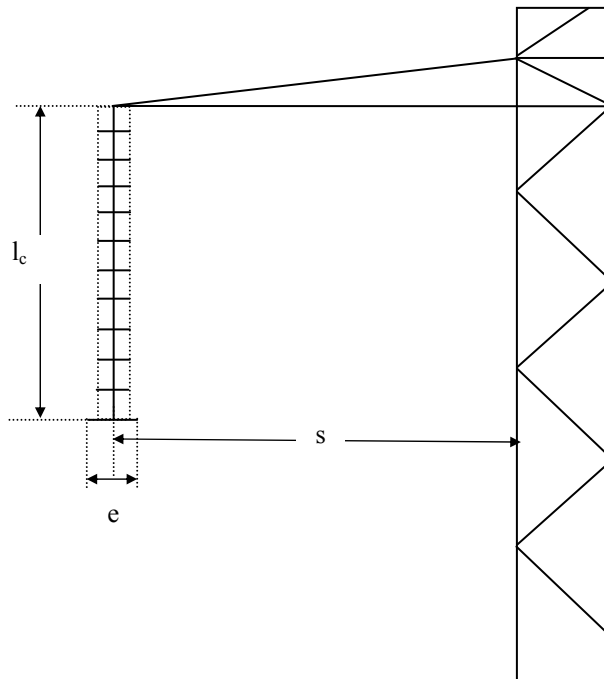


Figura 2.

Se emplea un conductor dúplex formado por dos cables de aluminio-acero, separados 40 cm tipo LA 110, cuyo diámetro es de 14 mm, y peso por unidad de longitud, $p = 0,433$ kg/m. La tensión horizontal correspondiente a unas condiciones de -5° C, con la mitad del viento reglamentario, es según la tabla de tendido de 802 kg.

El apoyo dispone por fase de una cadena con 10 aisladores. Cada unidad tiene 25,4 cm de diámetro y pesa 4,35 kg. Los herrajes tienen un peso de 50 kg que se supondrá concentrado en el extremo de la cadena donde se encuentra en conductor. Según el reglamento la presión del viento sobre la cadena será el valor mitad correspondiente a una presión de 70 kg/m² considerando el aislador como una superficie cilíndrica.

- a) Calcular en primer lugar la distancia de seguridad reglamentaria entre los conductores y otras partes en tensión (grapa de suspensión) y el apoyo, así como el ángulo de inclinación de la cadena límite a partir del cual será necesario el uso de un contrapeso.
- b) Calcular la distancia a la que se aproximará el conductor al apoyo, y determinar si es necesario instalar un lastre o contrapeso y en caso afirmativo su peso, considerando que la cadena de aisladores de suspensión está situada ente dos vanos contiguos nivelados de 300 m de longitud
- c) Repetir el cálculo anterior con la misma longitud de los vanos contiguos de 300 m, cuando el apoyo con la cadena de suspensión considerada se encuentra más bajo que los apoyos situados a izquierda y derecha, formando ángulos n_1 y n_2 de -10° en ambos casos.

a) Distancia de seguridad reglamentaria.

$$D_s = 0,1 + \frac{U}{150} = 0,1 + \frac{132}{150} = 0,98 \text{ m}$$

Por trigonometría básica a partir de la figura 2, se puede deducir que el ángulo de inclinación de la cadena γ límite a partir del cual se deja de cumplir la distancia de seguridad al apoyo responde a la siguiente expresión,

$$\gamma_{\text{limite}} = \text{Aseno} \frac{s - \frac{e}{2} - D_s}{l_c} = 50,94^\circ$$

Nota: el lector puede comprobar como para este ángulo límite se satisface una distancia de seguridad a la cruzeta horizontal también mayor de 0,98 m.

b) Cálculo del contrapeso necesario en el caso de apoyos nivel.

La ecuación aplicable para el cálculo del ángulo de desviación de las cadenas de aisladores teniendo en cuenta que el diámetro del conductor es menor de 16 mm, es la siguiente:

$$\text{tg } \gamma = \frac{0,030 \text{ n d } \frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{E_c}{2}}{\text{n p } \frac{a_1 + a_2}{2} + \text{n.T}(\text{tg } n_1 + \text{tg } n_2) + \frac{P_c}{2} + P_h + G}$$

En primer lugar se calcula el ángulo suponiendo que no existe contrapeso ($G = 0$), ya que solamente será necesario su uso en caso del ángulo resulte superior al valor de ángulo límite.

En la ecuación se sustituyen los valores siguientes que son datos del enunciado:

$n = 2$ (2 conductores por haz)

$d = 14 \text{ mm}$

$a_1 = a_2 = 300 \text{ m}$

$p = 0,433 \text{ kg/m}$

$T = \text{tensión horizontal} = 802 \text{ kg}$

$n_1 = n_2 = 0^\circ$, al tratarse de vanos a nivel.

$P_c = 4,35 \cdot 10 = 43,5 \text{ kg}$ (peso de la cadena que se suponen aplicado en el punto medio de la cadena)

$P_h = 50 \text{ kg}$ (peso de los herrajes que se suponen aplicado en el extremo de la cadena y por eso no va dividido por 2).

$E_c = \text{presión del viento sobre la cadena de aisladores.}$

Se calcula suponiendo una presión del viento sobre la cadena de aisladores, que se asimila a una superficie cilíndrica.

La presión de viento reglamentaria que se debe considerar sobre una superficie cilíndrica es de $70 \text{ kg} / \text{m}^2$.

Sin embargo para calcular la desviación de la cadena se debe considerar según el reglamento una presión del viento mitad a la considerada con carácter general. Por tanto:

$$E_c = (70 / 2) \cdot 1,7 \cdot 0,254 = 15,113 \text{ kg}$$

Finalmente se calcula el valor del ángulo de desviación de la cadena:

$$tg \gamma = \frac{0,030 \cdot n \cdot d \frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{E_c}{2}}{n \cdot p \frac{a_1 + a_2}{2} + T(tg n_1 + tg n_2) + \frac{P_c}{2} + P_h} = \frac{0,030 \cdot 2,14 \frac{300 + 300}{2} + \frac{15,11}{2}}{2,0,433 \frac{300 + 300}{2} + 0 + \frac{43,5}{2} + 50} = 0,7829$$

Por tanto $\gamma = 38^\circ$, inferior al ángulo límite, de forma que se cumplen las condiciones reglamentarias sin necesidad de contrapesos.

c) Cálculo del contrapeso necesario en el caso de apoyos desnivelados.

Se calcula el ángulo de desviación de la cadena con la fórmula anterior, pero teniendo en cuenta que: $n_1 = n_2 = -10^\circ$

$$tg \gamma = \frac{0,03 \cdot 2,14 \frac{300 + 300}{2} + \frac{15,11}{2}}{2,0,433 \frac{300 + 300}{2} + 2,802(-0,176 - 0,176) + \frac{43,5}{2} + 50} = \frac{259,56}{-234,11} = -1,1087 \Rightarrow \gamma = 132,05^\circ$$

El ángulo de desviación obtenido es superior al ángulo límite y por lo tanto será necesario utilizar contrapesos con objeto de disminuir dicho ángulo hasta el valor límite.

Concretamente el denominador es negativo, lo cual quiere decir que el esfuerzo correspondiente al peso de los conductores combinado con el peso de las cadenas de aisladores es negativo, o dicho de otra manera que la cadena sufre un tiro ascendente provocándose el volteo de dicha cadena. El volteo de la cadena de aisladores en apoyos con cadenas de suspensión (también denominado gráficamente como “cadena ahorcada”) es una situación totalmente inadmisibles, ya que provocaría una reducción de distancias a las crucetas que soportan los conductores de otras fases, además de oscilaciones de los conductores de la línea durante el volteo. Para evitar este fenómeno es necesario instalar contrapesos de forma que el ángulo sea inferior al ángulo crítico y que el denominador de la expresión anterior sea negativo.

Para calcular el valor del contrapeso G(kg), se parte de la ecuación siguiente, utilizando el ángulo límite, $\gamma_{límite} = 50,94^\circ$, calculado anteriormente, y considerando que N y D representan respectivamente el numerador y denominador de la ecuación anterior que nos condujo a calcular ángulo de $\gamma = 132,05^\circ$.

$$tg \gamma_{límite} = \frac{N}{D + G} \Rightarrow G = \frac{N - D \cdot tg \gamma_{límite}}{tg \gamma_{límite}} = \frac{259,56 + 234,11 \cdot 1,232}{1,232} = 445 \text{ kg}$$

Por lo tanto habría que instalar un contrapeso de 445 kg colgando junto a la cadena de suspensión.

En general siempre que el punto de fijación del conductor en el apoyo intermedio esté más bajo que en los apoyos extremos (situados a izquierda y derecha), es cuando habrá que tener cuidado con el ángulo de desviación de la cadena. Si dicho valor resultase excesivo, o el contrapeso calculado de un peso muy alto se adoptan una de las dos soluciones siguientes:

- Disponer el apoyo intermedio como de anclaje, sustituyendo cada cadena de suspensión por una de amarre a cada lado del apoyo.
- Elevar la altura del apoyo intermedio, de forma que cambien las inclinaciones respecto de los vanos contiguos y por tanto el valor de $T(tg n_1 + tg n_2)$ pase a un valor próximo a cero, o incluso a un valor positivo.

2.14. Formulario de cálculo mecánico.

1. Utilizando las ecuaciones de la catenaria.

$$y = c \operatorname{Ch} \frac{x}{c} \quad ; c = \frac{T}{p}; T' = py; T' - T = pd$$

$$Cx = c \operatorname{Sh} \frac{x}{c}$$

X = abcisa del punto medio de un vano

$$X = c \ln \left(z + \sqrt{z^2 + 1} \right) \quad ; z = \frac{h}{2c \operatorname{Sh} \frac{a}{2c}} \quad ; h = y_2 - y_1; x_1 = X - \frac{a}{2} \quad ; x_2 = X + \frac{a}{2}$$

$$L = c \left(\operatorname{Sh} \frac{x_2}{c} - \operatorname{Sh} \frac{x_1}{c} \right)$$

Cambio de condiciones con un vano único: $L - L_0 = \delta(t - t_0)L_0 + \frac{T - T_0}{SE} L_0 \frac{b}{a}$

Con varios vanos entre apoyos anclaje: $\delta(t - t_0)L_0 + \frac{T - T_0}{SE} L_0 \frac{b}{a} + L_0 - L = \Delta L \quad ; \sum \Delta L = 0$

Flecha: $f = y_2 - \frac{h}{a}(x_2 - x_f) - y_f; x_f = c \ln \left(\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 + 1} \right); y_f = c \operatorname{Ch} \frac{x_f}{c}$

2. Ecuaciones basadas en el método Truxá.

Vano único:

$$T_m^2 (T_m + A) = B \quad A = \delta(t - t_0)SE - T_{m,0} + \frac{a_0^2}{24} \frac{r_0^2}{T_{m,0}^2} SE; \quad B = \frac{a^2 r^2}{24} SE; \quad T_{m,0} = T_0 \frac{b}{a_0}; \quad T_m = T \frac{b}{a}$$

Nota, con hipótesis de viento:

$$h_v = h \cos \phi \quad b_v = b \quad a_v = \sqrt{b^2 - h_v^2} \quad \operatorname{tag} \phi = \frac{q}{p}$$

Método Truxá, con varios vanos entre apoyos de anclaje:

$$\tau^2 (\tau + A) = B \quad A = \delta(t - t_0)SE - \tau_0 + \frac{I_0^2}{24} \frac{r_0^2}{\tau_0^2} SE; \quad B = \frac{I^2 r^2}{24} SE;$$

$$I_0 = \frac{\sum \frac{b^3}{a_0^2}}{\sum \frac{b^2}{a_0}} \cdot \sqrt{\frac{\sum a_0^3}{\sum \frac{b^2}{a_0}}}; \quad \tau_0 = T_0 \frac{\sum \frac{b^3}{a_0^2}}{\sum \frac{b^2}{a_0}}; \quad I = \frac{\sum \frac{b^3}{a^2}}{\sum \frac{b^2}{a}} \cdot \sqrt{\frac{\sum a^3}{\sum \frac{b^2}{a}}}; \quad \tau = T \frac{\sum \frac{b^3}{a^2}}{\sum \frac{b^2}{a}}$$

3. Ecuaciones basadas en el método de la parábola:

$$y = \frac{x^2}{2c}; \quad f = \frac{a^2 r}{8T}; \quad L = a + \frac{a^3 r^2}{24T^2}$$

Cambio de condiciones, vano único:

$$T^2(T + A) = B \quad A = \delta(t - t_0)SE - T_0 + \frac{a_0^2 r_0^2}{24 T_0^2} SE; \quad B = \frac{a^2 r^2}{24} SE;$$

Con vano regulador, se sustituirá a por: $a_r = \sqrt{\frac{\sum a^3}{\sum a}}$

4. Relación entre T y la tensión en el punto más alto de fijación del conductor T_A :

$$T = \frac{T_A - r \frac{h}{2} + \sqrt{\left(T_A - r \frac{h}{2}\right)^2 - \frac{r^2 b^2}{2}}}{2 \frac{b}{a}} \quad \text{En vanos a nivel, } T = \frac{T_A + \sqrt{(T_A)^2 - \frac{r^2 a^2}{2}}}{2}$$

5. Desviación de las cadenas de aisladores, (hipótesis, $-5^\circ\text{C} + \frac{1}{2}$ Viento).

$$\text{tg } \gamma = \frac{0,03 n d \frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{E_c}{2}}{n p \frac{a_1 + a_2}{2} + n T (\text{tg } n_1 + \text{tg } n_2) + \frac{Pc}{2} + P_h + G}; \quad D_s (m) = 0,1 + \frac{U}{150}$$

Nota: sustituir 0,03 por 0,025 si el diámetro del conductor es mayor de 16 mm².

6. Otros datos:

$$\begin{aligned} \rho(\text{Cu, a } 20^\circ\text{C}) &= 17,6 (\Omega \cdot \text{mm}^2)/\text{km} & \alpha_{20}(\text{Cu}) &= 0,0039 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \\ \rho(\text{Al, a } 20^\circ\text{C}) &= 28,6 (\Omega \cdot \text{mm}^2)/\text{km} & \alpha_{20}(\text{Al}) &= 0,0040 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \quad \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Capacidad cable unipolar aislado, $C = 2 \pi \epsilon / \ln (R/r)$

Factor de sobrecarga para servicios intermitentes: $N = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t2}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t1}{\tau}}}}$

TEMA 4. Cables aislados.

4.1. Selección de un cable para una instalación eléctrica.

En este punto se describen las características técnicas principales de un cable, desde el punto de vista de su selección. Se estudian tanto los parámetros eléctricos (tensión nominal, resistencia, inductancia, capacidad, y pérdidas de energía de los cables), como los parámetros térmicos. Uno de los objetivos más importantes es el cálculo de la intensidad máxima admisible en régimen permanente por un cable, utilizando para ello tanto las resistencias eléctricas como las resistencias térmicas.

En este punto del temario se incide también en el cálculo de la sección del conductor atendiendo a los posibles criterios (intensidad máxima admisible en régimen permanente, intensidad máxima admisible en cortocircuito, caída de tensión y sección económica).

4.2. La elección del cable.

En este punto se aborda el mismo problema de cálculo de la intensidad máxima admisible por un cable en régimen permanente, que se abordó en el punto anterior, pero utilizando tablas de carga en función de las condiciones de instalación del cable, así como ciertos coeficientes de corrección cuando las condiciones reales de instalación no coinciden con las condiciones de referencia establecidas en las tablas. Esta forma de cálculo es la más utilizada tanto en los reglamentos, como en la confección de proyectos ya que su aplicación es mucho más simple que el método más riguroso basado en el estudio de la transferencia de calor y de las resistencias térmicas ya descrito en 4.1.

4.3. Características de los materiales de los cables.

En este punto se describen los distintos tipos de materiales utilizados para la fabricación de las distintas partes de un cable, indicando ventajas e inconvenientes de cada material, en función de las condiciones de instalación y utilización de los cables.

4.4. Manejo y tendido de los cables eléctricos.

El contenido de este punto describe de forma eminentemente práctica las operaciones necesarias para el correcto manejo y tendido de los cables eléctricos durante la ejecución de una instalación de alta o baja tensión.

4.5. Problemas de cálculo de líneas con cables aislados.

Para completar el texto aplicable a este tema 4, el equipo docente ha preparado los siguientes problemas tipo resueltos.

Problema 1. Cálculo de una línea con cable aislado instalada en el interior de una galería.

Se desea transportar una potencia de 4 MVA desde una subestación de 45/20 kV, hasta un centro de transformación de 20 kV/400/230 V, situado a una distancia de la subestación de 7 km. El neutro del transformador de la subestación en el lado de 20 kV está puesto rígidamente a tierra. El cable irá tendido por el interior del túnel del metropolitano apoyado sobre una bandeja ciega. La temperatura ambiente se considera 40 °C, pero habrá que tener en cuenta que la presencia de los cables implica un sobrecalentamiento de la galería respecto de la temperatura de un máximo de 15°C. Se utilizará un cable tripolar de aluminio, situado lo más próximo posible a la pared del túnel. La potencia de cortocircuito de la red de 20 kV es de 450 MVA, con un tiempo de disparo de las protecciones para un defecto trifásico de 0,5 s. Considerar un factor de potencia igual a la unidad. Se debe seleccionar el cable más adecuado y determinar sus características utilizando criterios técnicos. Para evitar incendios se desea que el cable sea no propagador del incendio con baja emisión de humos y gases tóxicos y corrosivos. Se utilizará la información de las tablas 1 y 2 siguientes.

Tabla 1. Cables aislados con XLPE
Intensidad máxima admisible, en A, en servicio permanente y con corriente alterna

Sección nominal de los conductores (mm ²)	Cobre				Aluminio			
	Tensión asignada , U ₀ /U, en kV				Tensión asignada , U ₀ /U, en kV			
	1,8/3 a 18/30		26/45*	36/66*	1,8/3 a 18/30		26/45*	36/66*
	3 cables unipol. ○ ○○	1 cable tripolar	3 cables unipol. ○ ○○		3 cables unipol. ○ ○○	1 cable tripolar	3 cables unipol. ○ ○○	
35	170	160	-	-	135	125	-	-
50	205	190	-	-	160	150	-	-
70	260	235	275	-	200	185	215	-
95	315	285	335	-	245	225	260	-
120	365	325	385	385	285	255	300	300
150	415	370	430	435	320	290	335	340
185	475	425	495	495	370	330	385	385
240	555	495	580	580	435	385	455	455
300	645	570	665	665	500	445	520	520
400	745	650	765	760	580	505	600	600
500	845	-	880	875	660	-	700	700
630	975	-	1015	1005	760	-	810	815

Temperatura máxima en el conductor: 90°C
 Instalación al aire según condiciones tipo: un cable tripolar instalado al aire o un terno de cables unipolares agrupados en contacto con una colocación tal que permita una eficaz renovación de aire, siendo la temperatura del medio ambiente de 40°C. Por ejemplo, con el cable colocado sobre bandejas o fijado a una pared, etc.
 (*) Para estas tensiones, al no existir normativa oficial, el diseño del cable puede influir notablemente en las correspondientes intensidades máximas admisibles.

Tabla 2.

Cables tripolares o ternos de cables unipolares tendidos sobre bandejas continuas, (la circulación del aire es restringida), con separación entre cables igual a un diámetro, d

Factor de corrección					
Número de Bandejas	Número de cables tripolares o ternos unipolares				
	1	2	3	6	9
1	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84
2	0,90	0,85	0,83	0,81	0,80
3	0,88	0,83	0,81	0,79	0,78
6	0,86	0,81	0,79	0,77	0,76

Solución:

1) Tipo de cable a emplear

Si no hay problemas de humedad ni de terrenos accidentados, elegimos un aislamiento de XLPE (Polietileno Reticulado)

2) Elección de la tensión nominal (U_0/U)

Tensión de la red: 20 kV

Puesta a tierra de neutro en la subestación (20 kV): neutro rígido a tierra. Por lo tanto en caso de defecto a tierra la intensidad de cortocircuito será elevada y dispararán las protecciones de forma muy rápida. Corresponde con una Red de Categoría A, o de 1ª categoría, por lo que según la tabla de selección del nivel de aislamiento de los cables, se debe de emplear un cable de tensión nominal:

$$U_0/U = 12/20 \text{ kV}$$

3) Elección de la sección del cable

La sección de la red de distribución de media tensión se elegirá de forma que se cumpla con los criterios técnicos de intensidad admisible en régimen permanente, en cortocircuito y el de la caída de tensión:

3.1) Máxima intensidad admisible por el conductor

La intensidad que circulará por la línea para dar servicio a la potencia prevista será:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}xU} = \frac{4x10^6}{\sqrt{3}x20x10^3} = 115,47 \text{ A}$$

Los factores de corrección a aplicar, dependiendo del tipo de instalación del cable serán:

- a) Factor de corrección para cables instalados al aire en canales o galerías

La temperatura a considerar será de $40\text{ }^{\circ}\text{C} + 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, es decir de $55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para cables instalados al aire en ambientes de temperatura distinta de $\theta_N = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, en nuestro caso de $\theta_x = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, se debe de considerar un factor de corrección correspondiente a un cable de XLPE (polietileno reticulado), cuya temperatura de servicio en régimen permanente es de $\theta_c = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (al ser un aislamiento termoestable).

El factor de corrección se calcula consultando la tabla o aplicando la siguiente fórmula que tiene en cuenta la reducción del salto térmico respecto del salto térmico nominal, por efecto del incremento de la temperatura ambiente:

$$K_1 = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_x}{\theta_c - \theta_N}} = 0,84$$

- b) Factor de corrección por colocación de los conductores.

Según la tabla 2, para cables instalados al aire dispuestos sobre una bandeja ciega se consideran un factor de corrección, en el caso de un solo cable tripolar, de 0,95.

$$K_2 = 0,95$$

Por tanto la intensidad que debe de admitir el cable en las condiciones normales de instalación será:

$$I_{adm.} \geq \frac{I}{K_1 K_2} = \frac{115,47}{0,84 \cdot 0,95} = 144,7\text{ A}$$

Según podemos observar de la tabla 1, la sección de cable tripolar de aluminio, de tensión nominal 12/20 kV, que admite una intensidad de 144,7 A, es de 50 mm^2 .

Por lo tanto el cable a utilizar según el criterio de intensidad máxima admisible será: RHZ1 12/20 3x50 Al.

R: aislamiento XLPE

H: campo radial.

Z1: cubierta de poliolefina, que le confiere propiedades especiales frente al fuego.

3.2) Capacidad de soportar térmicamente la corriente de cortocircuito

Para cortocircuitos de duración no superior a 5 segundos, el tiempo "t" en que una intensidad de cortocircuito eleva la temperatura del conductor desde su temperatura máxima admisible, en servicio normal θ_i , hasta la temperatura límite admisible de corta duración, θ_f , puede calcularse, por la fórmula siguiente:

$$\sqrt{t_{cc}} = \frac{K \cdot S}{I_{cc}} \times \sqrt{\text{Ln} \left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta} \right)}$$

A esta fórmula se la denomina "curva térmica de los conductores" y podrá representarse en un gráfico con ejes de coordenadas logarítmico, siendo :

t_{cc} = duración del cortocircuito máximo admisible, en segundos.

K = Constante que depende de la naturaleza del conductor y de su aislamiento.

S = sección del conductor en mm^2 .

I_{cc} = valor de la intensidad de cortocircuito.

θ_i y θ_f las temperaturas inicial y final de cortocircuito en $^{\circ}\text{C}$.

$\beta = 1/\alpha_0$, siendo α_0 , el coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura a 0°C

El valor de estos parámetros se recuerda a continuación:

Para el cobre:

$$K = 226 \text{ A.s}^{1/2}/\text{mm}^2$$

$$\beta = 234,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para el aluminio:

$$K = 148 \text{ A.s}^{1/2}/\text{mm}^2$$

$$\beta = 228 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Es muy importante resaltar que la fórmula anterior se refiere al caso de que el cortocircuito en el conductor se produzca en el instante de máxima carga por el mismo, es decir cuando aquel alcanza la temperatura de $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para XLPE y EPR, y $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para PVC, y finalice a la temperatura de $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para XLPE y EPR, y $160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para PVC.

Se comprobará si la sección obtenida de 50 mm^2 por el primer criterio de máxima intensidad admisible, es válida para soportar térmicamente la corriente de cortocircuito.

Cálculo previo de la corriente térmica de cortocircuito.

El valor eficaz de la corriente de cortocircuito viene dado por la expresión siguiente, siendo, S_{cc} la potencia de cortocircuito de la red en kVA y U la tensión nominal de la red en kV.

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \times U} = 12990 \text{ A}$$

Por tanto,

$$\sqrt{t_{cc}} = \frac{K \cdot S}{I_{cc}} \sqrt{\ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)} = \frac{148 \cdot 50}{12990} \sqrt{\ln\left(\frac{250 + 228}{90 + 228}\right)} = 0,3637 s^{\frac{1}{2}} \Rightarrow t_{cc} = 0,132 s$$

En este caso el cable no sería capaz de soportar la duración del cortocircuito prevista hasta la actuación de las protecciones que es de 0,5 segundos. Habría que utilizar una sección superior, que se puede despejar de la ecuación anterior:

$$S \geq \frac{I_{cc} \sqrt{t_{cc}}}{K} = \frac{12990 \sqrt{0,5}}{148} = 97,2 mm^2$$

La sección normalizada superior a la calculada será de 120 mm².

Para un cálculo más preciso se debe considerar que los conductores no están en el instante inicial de cortocircuito a la máxima temperatura admisible por el aislamiento. Se puede estimar la temperatura inicial de cortocircuito como la temperatura real que adquiera el conductor para el caso del 100% de la carga prevista.

La determinación de esta temperatura se realiza suponiendo que el incremento de temperatura es proporcional al cuadrado la intensidad admisible por el conductor, lo cual si bien no es totalmente riguroso desde el punto de vista de la aplicación de las ecuaciones de transferencia de calor, en la práctica resulta bastante aproximado.

$$\theta_{m\acute{a}x.adm.} - \theta_{ambiente\ referencia} = k(I_{m\acute{a}x.adm.})^2$$

$$\theta_{real.} - \theta_{ambiente\ en\ condiciones\ de\ instalaci\acute{o}n} = k(I_{real.})^2$$

despejando obtenemos:

$$\theta_{real} = \left[(\theta_{m\acute{a}x.adm.} - \theta_{ambiente\ referencia}) \times \frac{(I_{real.})^2}{(I_{m\acute{a}x.adm.})^2} \right] + \theta_{ambiente\ en\ condiciones\ de\ instalaci\acute{o}n}$$

Si hubiésemos utilizado la temperatura inicial real del conductor cabe preguntarnos si la sección inmediatamente inferior a 120 mm² sería suficiente. Para ello en primer lugar calculemos la temperatura real del conductor para el caso de carga dado y para la sección inmediatamente inferior de 120 mm², es decir, de 95 mm²,

$$\theta_{real} = \left[(90 - 40) \cdot \frac{(I_{real.})^2}{(I_{m\acute{a}x.adm.})^2} \right] + 55 = \left[(90 - 40) \cdot \frac{(144,7)^2}{(225)^2} \right] + 40 + 15 = 75,7^\circ C$$

El valor de la sección mínima admisible según el criterio de cortocircuito será:

$$S \geq \frac{I_{cc} \sqrt{t_{cc}}}{K} = \frac{12990 \sqrt{0,5}}{148} = 92,1 \text{ mm}^2$$

$$\sqrt{\text{Ln}\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)} = \sqrt{\text{Ln}\left(\frac{250 + 228}{75,7 + 228}\right)}$$

Por lo que el cable RHZ1 12/20 kV 3 x 95 mm² es válido para soportar térmicamente la corriente de cortocircuito.

3.3) Máxima caída de tensión admisible por el conductor

La expresión de la caída de tensión viene dada por:

$$\Delta U = \sqrt{3} I L (R \cos \varphi + X \text{ sen} \varphi)$$

Del catálogo de fabricantes de cable, se obtiene para un cable tripolar de XLPE de 95 mm²:

$$R_{ca} (90 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,41 \text{ } \Omega/\text{km}.$$

$$X_{ca} (50 \text{ Hz}) = 0,107 \text{ } \Omega/\text{km}.$$

Note el alumno que se toma el valor de la resistencia a la temperatura máxima admisible del conductor con objeto de calcular la máxima caída de tensión en el caso más desfavorable, aunque según los cálculos anteriores es muy poco probable que la temperatura supere los 69,4°C, valor éste que se podría haber tomado como referencia.

Por lo que, la caída de tensión queda:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 115,47 \cdot 7 \cdot (0,41 \cdot 1 + 0,107 \cdot 0) = 574 \text{ V}$$

que supone una caída de tensión del 2,87 %, inferior al 5 % máximo normalmente admitido, en este tipo de instalaciones.

Problema 2. Cálculo de una línea subterránea de media tensión.

Se proyecta una línea de M.T. subterránea con distribución en el neutro aislado, para conectar un centro de transformación de la compañía suministradora, de 630 kVA, a una línea aérea de 15 kV situada a 300 m. Los cables serán unipolares de aluminio en contacto mutuo y alojados bajo un tubo protector de diámetro 160 mm. La línea irá en una zanja de 0,6 x 1,2 m, disponiendo de un lecho de arena lavada de 20 cm, en donde se instalarán los cables, con una cinta de señalización a 50 cm de la base de la zanja. Al ser una instalación en un lugar muy caluroso se considerará la temperatura del terreno de 35 °C, la resistividad térmica del suelo al tratarse de un terreno rocoso de piedra caliza será de 2,5 K. m/W. La intensidad de cortocircuito es de 16 kA y el tiempo de disparo de las protecciones 0,3 s. El factor de potencia es de 0,95, y la potencia activa de 630 kW. Utilizar como información lo indicado en las tablas 1 y 2.

Tabla 1.
Cables aislados con XLPE
Intensidad máxima admisible (A) en servicio permanente y con corriente alterna

Sección nominal (mm ²)	Cobre				Aluminio			
	Tensión asignada , U _o /U, en kV				Tensión asignada , U _o /U, en kV			
	1,8/3 a 18/30		26/45*	36/66*	1,8/3 a 18/30		26/45*	36/66*
	3 cables unipol. ○ ○○	1 cable tripolar	3 cables unipol. ○ ○○	3 cables unipol.	3 cables unipol. ○ ○○	1 cable tripolar	3 cables unipol. ○ ○○	3 cables unipol.
35	185	175	-	-	145	135	-	-
50	220	205	-	-	170	160	-	-
70	270	250	250	-	210	195	195	-
95	320	295	295	-	250	230	230	-
120	360	340	335	340	280	265	260	265
150	405	385	380	380	315	300	300	295
185	455	420	425	430	355	325	335	335
240	530	490	495	500	415	385	385	390
300	595	560	555	560	465	435	435	440
400	680	630	630	635	530	490	500	500
500	760	-	715	715	590	-	570	575
630	850	-	805	805	660	-	650	655

Temperatura máxima en el conductor: 90°C.

Instalación enterrada con un cable tripolar o un terno de cables unipolares agrupados en triángulo directamente enterrado en toda su longitud a 1 m de profundidad, en un terreno de resistividad térmica media de 1 K.m/W y temperatura ambiente del terreno a dicha profundidad de 25°C.

(*) Para estas tensiones, al no existir normativa oficial, el diseño del cable puede influir notablemente en las correspondientes intensidades máximas admisibles.

Tabla 2. Coeficiente de corrección para resistividad térmica del terreno distinta de 1 K.m/W

Tipo de Cable	Resistividad térmica del terreno, K.m/W										
	0,80	0,85	0,90	1	1,10	1,20	1,40	1,65	2,00	2,50	2,80
Seco unip.	1,09	1,06	1,04	1	0,96	0,93	0,87	0,81	0,75	0,68	0,66
Seco trip.	1,07	1,05	1,03	1	0,97	0,94	0,89	0,84	0,78	0,71	0,69

Solución:

1) Tipo de cable a emplear

Si no hay problemas de humedad ni de terrenos accidentados, elegimos un aislamiento de XLPE (Polietileno Reticulado)

2) Elección de la tensión nominal (U_0/U)

Tensión de la red: 15 kV

El neutro de la subestación se encuentra aislado de tierra. Por lo tanto en caso de defecto a tierra la intensidad de cortocircuito será pequeña y existirá un mayor riesgo de sobretensiones. Se trata de una Red de Categoría B, o de 2ª categoría, por lo que según la tabla de selección del nivel de aislamiento de los cables, se debe de emplear un cable de tensión nominal:

$$U_0/U = 12/20 \text{ kV}$$

3) Otras características del cable.

Como se trata de un cable enterrado deberá disponer de una protección mediante una armadura de flejes de acero que evite los riesgos derivados de corrimientos de tierra o de posteriores trabajos por la zona en la que discurre el cable y de una cubierta polimérica (por ejemplo de PVC) que le permita soportar el apisonado del terreno y el contacto con cuerpos duros. Por lo tanto el cable a utilizar será: RHFV 12/20.

R: aislamiento XLPE

H: campo radial.

F: protección mecánica con flejes de hierro.

V: cubierta de PVC.

4) Elección de la sección del cable

La sección de la red de distribución de media tensión se elegirá de forma que se cumpla con los criterios técnicos de intensidad admisible en régimen permanente, en cortocircuito y el de la caída de tensión:

4.1) *Máxima intensidad admisible por el conductor*

La intensidad que circulará por la línea para dar servicio a la potencia prevista será:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{630 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 25,52 A$$

Los factores de corrección a aplicar, dependiendo del tipo de instalación del cable serán:

a) Factor de corrección para cables enterrados directamente en terrenos, cuya temperatura sea distinta de 25 °C.

Para cables enterrados cuando la temperatura del terreno es distinta de $\theta_N = 25$ °C, (en nuestro caso de $\theta_x = 35$ °C), se debe de considerar un factor de corrección correspondiente a un cable de XLPE (polietileno reticulado), cuya temperatura de servicio en régimen permanente es de $\theta_c = 90$ °C (al ser un aislamiento termoestable).

El factor de corrección se calcula consultando la tabla o aplicando la siguiente fórmula que tiene en cuenta la reducción del salto térmico respecto del salto térmico nominal, por efecto del incremento de la temperatura del terreno:

$$K_1 = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_x}{\theta_c - \theta_N}} = 0,92$$

b) Factor de corrección para cables enterrados directamente en terrenos de resistividad térmica distinta de 1 K.m/W. Según la tabla correspondiente, para cables enterrados directamente en terrenos de resistividad térmica distinta de 1 K.m/W, se debe de considerar un factor de corrección, en el caso de cables secos unipolares, de 0,68.

$$K_2 = 0,68$$

c) Factor de corrección por agrupación de los conductores bajo tierra. Como se trata de una única terna de cables unipolares no es necesario aplicar ningún factor de corrección.

$$K_3 = 1$$

d) Factor de corrección para cables enterrados en zanja en el interior de tubos.

Para cables directamente enterrados en zanja en el interior de tubos, se debe de considerar un factor de corrección, en el caso de tres cables unipolares, dentro del mismo tubo de 0,80.

$$K_4 = 0,80$$

Por tanto la intensidad que debe de admitir el cable en las condiciones normales de instalación será:

$$I_{adm.} \geq \frac{I}{F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4} = \frac{25,52}{0,92 \times 0,68 \times 1 \times 0,80} = 51,0A$$

Según podemos observar de la tabla 1, la sección para tres cables unipolares agrupados de aluminio, de tensión nominal 12/20 que admite una intensidad de 51,0 A, es de 35 mm².

Por lo tanto el cable a utilizar según el criterio de intensidad máxima admisible será:

RHFV 12/20 1x35 AL.

4.2) Capacidad de soportar térmicamente la corriente de cortocircuito.

Para cortocircuitos de duración no superior a 5 segundos, el tiempo "t" en que una intensidad de cortocircuito eleva la temperatura del conductor desde su temperatura máxima admisible, en servicio normal θ_i , hasta la temperatura límite admisible de corta duración, θ_f , puede calcularse, por la fórmula siguiente:

$$\sqrt{t_{cc}} = \frac{K \cdot S}{I_{cc}} \times \sqrt{\ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)}$$

A esta fórmula se la denomina "curva térmica de los conductores" y podrá representarse en un gráfico con ejes de coordenadas logarítmico, siendo:

t_{cc} = duración del cortocircuito máximo admisible, en segundos.

K = Constante que depende de la naturaleza del conductor y de su aislamiento.

S = sección del conductor en mm².

I_{cc} = valor de la intensidad de cortocircuito.

θ_i y θ_f las temperaturas inicial y final de cortocircuito en °C.

$\beta = 1/\alpha_0$, siendo α_0 , el coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura a 0°C

Para el aluminio:

$$K = 148 \text{ A.s}^{1/2}/\text{mm}^2$$

$$\beta = 228 \text{ °C}$$

Es muy importante resaltar que la fórmula anterior se refiere al caso de que el cortocircuito en el conductor se produzca en el instante de máxima carga por el mismo, es decir cuando aquel alcanza la temperatura de 90 °C para XLPE y EPR, y 70 °C para PVC, y finalice a la temperatura de 250 °C para XLPE y EPR, y 160 °C para PVC.

Se comprobará si la sección obtenida de 35 mm² por el criterio de máxima intensidad admisible, es válida para soportar térmicamente la corriente de cortocircuito especificada en el enunciado

de 16 kA, durante el tiempo especificado hasta la actuación de las protecciones de 0,3 segundos.

$$\sqrt{t_{cc}} = \frac{K \cdot S}{I_{cc}} \sqrt{\ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)} = \frac{148 \cdot 35}{16000} \sqrt{\ln\left(\frac{250 + 228}{90 + 228}\right)} = 0,2067 s^{\frac{1}{2}} \Rightarrow t_{cc} = 0,0427 s$$

Por lo tanto será necesaria una mayor sección Habría que utilizar una sección superior que se puede despejar de la ecuación anterior:

$$S \geq \frac{I_{cc} \sqrt{t_{cc}}}{K} = \frac{16000 \sqrt{0,3}}{148} \sqrt{\ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)} = 92,7 mm^2$$

La sección normalizada superior a la calculada en la anterior expresión será de 95 mm².

Para un cálculo más preciso se debe considerar que los conductores no están en el instante inicial de cortocircuito a la máxima temperatura admisible por el aislamiento. Se puede estimar la temperatura inicial de cortocircuito como la temperatura real que adquiera el conductor para el caso del 100% de la carga prevista.

La determinación de esta temperatura se realiza suponiendo que el incremento de temperatura es proporcional al cuadrado la intensidad admisible por el conductor.

$$\theta_{m\acute{a}x.adm.} - \theta_{ambiente \text{ referencia}} = k(I_{m\acute{a}x.adm.})^2$$

$$\theta_{real.} - \theta_{ambiente \text{ en condiciones de instalación}} = k(I_{real.})^2$$

despejando obtenemos:

$$\theta_{real.} = \left[(\theta_{m\acute{a}x.adm.} - \theta_{ambiente \text{ referencia}}) \times \frac{(I_{real.})^2}{(I_{m\acute{a}x.adm.})^2} \right] + \theta_{ambiente \text{ en condiciones de instalación}}$$

Si hubiésemos utilizado la temperatura inicial real del conductor cabe preguntarnos si la sección inmediatamente inferior a 95 mm² sería suficiente. Para ello en primer lugar calculemos la temperatura real del conductor para el caso de carga dado y para la sección inmediatamente inferior de 95 mm², es decir, de 70 mm²,

$$\theta_{real} = \left[(90 - 25) \cdot \frac{(I_{real})^2}{(I_{m\acute{a}x.adm})^2} \right] + 35 = \left[(90 - 25) \cdot \frac{(51,0)^2}{(210)^2} \right] + 35 = 38,3^\circ C$$

El valor de la sección mínima admisible según el criterio de cortocircuito será:

$$S \geq \frac{\frac{I_{cc} \sqrt{t_{cc}}}{K}}{\sqrt{\ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)}} = \frac{\frac{16000 \cdot \sqrt{0,3}}{148}}{\sqrt{\ln\left(\frac{250 + 228}{38,3 + 228}\right)}} = 77,4 \text{ mm}^2$$

Por lo que la sección de 70 mm² no es válida para soportar térmicamente la corriente de cortocircuito, y habrá que mantener la sección de 95 mm².

4.3) Máxima caída de tensión admisible por el conductor

La expresión de la caída de tensión viene dada por:

$$\Delta U = \sqrt{3} I L (R \cos \varphi + X \operatorname{sen} \varphi)$$

Del catálogo de fabricantes de cable, se obtiene para cables unipolares, 12/20 kV, de XLPE, de aluminio, de 95 mm²:

Rca (90 °C) = 0,403 Ω/km.

Xca (50 Hz) = 0,115 Ω/km.

Por lo que para nuestro ejemplo, la caída de tensión queda:

$$\Delta U = \sqrt{3} 25,5 \cdot 0,3 (0,403 \cdot 0,95 + 0,115 \cdot 0,31) = 5,55 \text{ V}$$

que supone una caída de tensión del 0,037 %, muy inferior al 5 % máximo permitido, normalmente, en este tipo de instalaciones.

Problema 3. Red de media tensión de parque eólico constituido por un conjunto de aerogeneradores

Sea un parque eólico formado por una única hilera de treinta aerogeneradores de 660 kW cada uno con las siguientes distancias entre ellos tal y como se representa en la figura 1.

$d_{1-2} = 145$ m, $d_{2-3} = 112$ m, $d_{3-4} = 114$ m, $d_{4-5} = 120$ m, $d_{5-6} = 125$ m, $d_{6-7} = 114$ m, $d_{7-8} = 120$ m, $d_{8-9} = 122$ m, $d_{9-10} = 146$ m, $d_{10-11} = 107$ m, $d_{11-12} = 122$ m, $d_{12-13} = 125$ m, $d_{13-14} = 110$ m, $d_{14-15} = 104$ m, $d_{15-16} = 126$ m, $d_{16-17} = 112$ m, $d_{17-18} = 135$ m, $d_{18-19} = 115$ m, $d_{20-21} = 121$ m, $d_{21-22} = 163$ m, $d_{22-23} = 118$ m, $d_{23-24} = 113$ m, $d_{24-25} = 110$ m, $d_{25-26} = 100$ m, $d_{26-27} = 103$ m, $d_{27-28} = 109$ m, $d_{28-29} = 112$ m, $d_{29-30} = 127$ m.

Calcular la línea subterránea de media tensión de este parque para una tensión nominal de 20 kV y una intensidad de cortocircuito máxima de 6 kA, suponiendo que la canalización está directamente enterrada a 1 metro de profundidad, en un terreno a 25 °C de temperatura máxima y con una resistividad térmica de 1 K.m/W. Se considerará la red de categoría A (primera categoría), y el tiempo de actuación de las protecciones en caso de cortocircuito de 0,3 s. La subestación se sitúa cercana al punto medio de la línea de aerogeneradores "entre" los aerogeneradores 15 y 16 a una distancia de 450 m y 420 m de cada uno de ellos respectivamente.

Se considerará un factor de potencia de la carga de 0,85.

Los cables se elegirán de aluminio con secciones de 95, 150 o 240 mm², ya que son estos tipos de cable los disponibles comercialmente para este proyecto.

Como parte del problema se calcularán también los parámetros eléctricos de la línea, tanto su resistencia en corriente alterna a la temperatura de servicio prevista a plena carga, como su inductancia. Para ello se considerarán los coeficientes de piel y proximidad, y se utilizará la información indicada en la tabla 1.

Para facilitar futuras ampliaciones los cables se calcularán de forma que en régimen permanente circule como máximo al 80% de la intensidad máxima admisible por el cable.

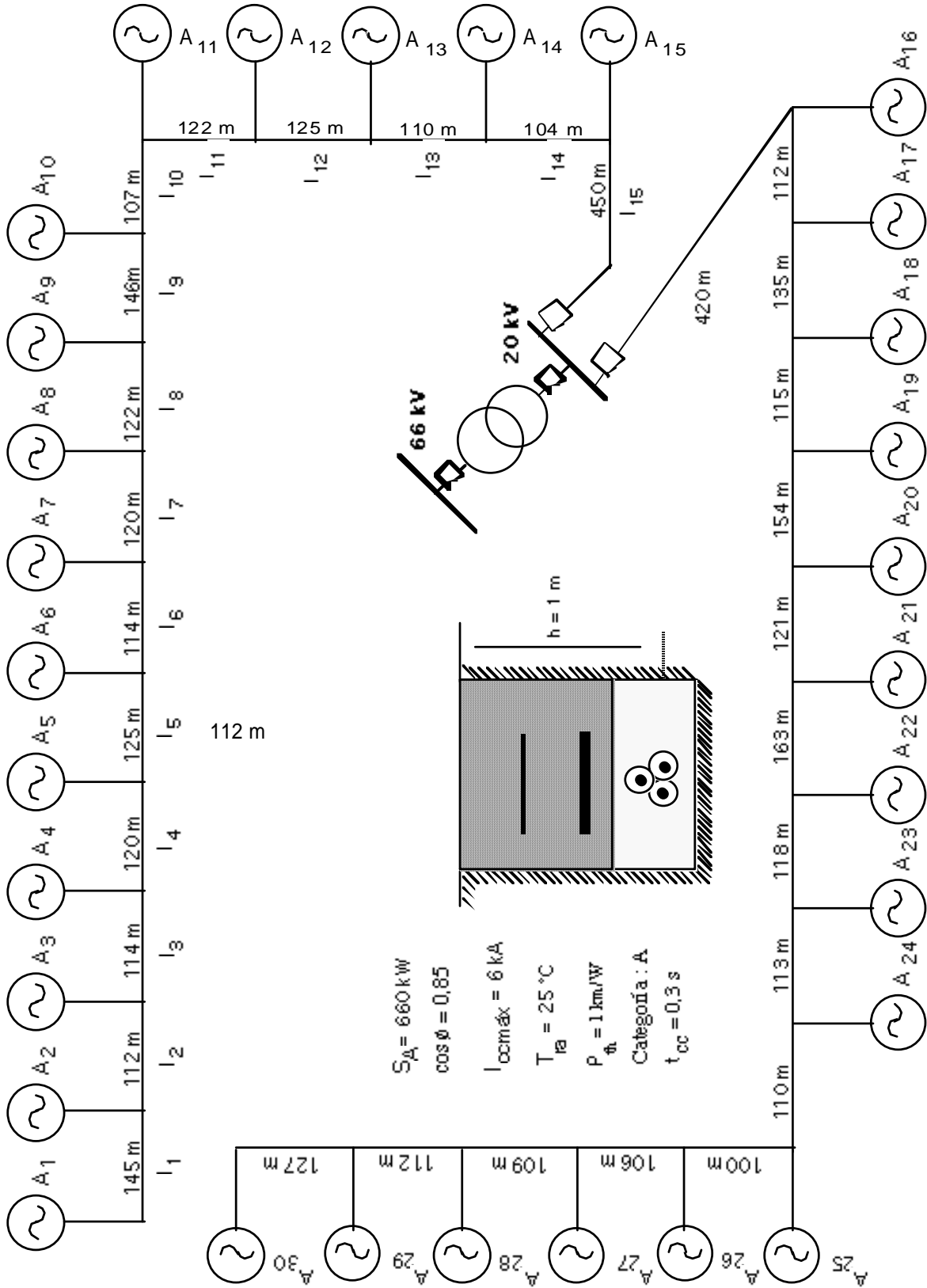


Tabla 1. Datos de los cables obtenidos de catálogos de los fabricantes:

Tipo de cable	Diámetro exterior (incluyendo aislamiento y cubierta), en mm	Diámetro interior (sólo del conductor), en mm	Intensidad máxima admisible en instalación tipo enterrada, (A)
RHFV 12/20 kV 1x 95 mm ² Al	29,5	11,2	250
RHFV 12/20 kV 1x 150 mm ² Al	32,5	14	315
RHFV 12/20 kV 1x 240 mm ² Al	37,1	17,9	415

Nota: la instalación tipo enterrada se refiere a una terna de cables unipolares en triángulo en contacto mutuo, para una temperatura del terreno de 25°C, con una resistividad térmica del terreno de 1 K.m / W, a una profundidad de 1 metro.

Solución:

1) Tipo de cable a emplear

XLPE (Siempre que no existan terrenos acuosos).

RHFV, unipolares de aluminio.

2) Tensión nominal del cable

$$U_{\text{red}} = 20 \text{ kV}$$

Categoría de la red: A (primera categoría).

$$U_0/U = 12/20 \text{ kV} .$$

3) Elección de la sección del cable

3.1.) Capacidad de soportar térmicamente la corriente de cortocircuito.

Antes de decidir las secciones a emplear en cada tramo, considerando la intensidad máxima que puede circular por ellos y por tanto el número máximo de aerogeneradores que pueden conectarse con cada sección, conviene determinar cual es la sección mínima a emplear que puede soportar térmicamente la corriente de cortocircuito.

Para comprobar que en ningún caso el criterio de la intensidad de cortocircuito va a

resultar restrictivo se calcula el tiempo máximo durante el cual el cable puede soportar la máxima intensidad de cortocircuito prevista para la menor sección comercial disponible (95 mm²), y suponiendo que antes del inicio del cortocircuito la temperatura del cable es la máxima posible en servicio permanente (caso más desfavorable), es decir de 90°C, por tratarse de un aislamiento de XLPE.

$$\sqrt{t_{cc}} = \frac{K \cdot S}{I_{cc}} \sqrt{\text{Ln} \left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta} \right)} = \frac{148 \cdot 95}{6000} \sqrt{\text{Ln} \left(\frac{250 + 228}{90 + 228} \right)} = 1,506 s^{\frac{1}{2}} \Rightarrow t_{cc} = 2,26 s$$

Este tiempo es mayor de los 0,3 segundos de actuación de las protecciones y por tanto el criterio de intensidad de cortocircuito no es restrictivo, ni siquiera cuando el conductor de menor sección posible (95 mm²) está a su máxima temperatura en servicio permanente (90°C) antes del inicio del cortocircuito.

3.2.) Criterio de máxima intensidad admisible para la salida de la subestación.

Para facilitar futuras ampliaciones, tal y como indica el enunciado, en el cálculo de la sección del conductor por el criterio de intensidad máxima admisible, se tendrá en cuenta que el cable se puede someter como máximo al 80 % de su capacidad máxima de carga.

$$I_{\text{máx carga}} = 80 \% (I_{\text{máx admisible}}).$$

En este tipo de instalaciones, a diferencia de las habituales redes de distribución en media tensión donde la sección es única casi para toda la red, las secciones serán diferentes para cada tramo, seleccionándolas teniendo en cuenta:

- Prioridad de las secciones de cables normalizadas disponibles en stock, y utilizadas normalmente por las compañías suministradoras.
- Longitud de la línea y su relación con las longitudes de fabricación de las bobinas.
- Coste económico de los cables y sus accesorios.

Línea entre A₁₅ y la subestación:

Se supone que la longitud de conductor correspondiente a las entradas y salidas de las celdas de media tensión de los centros de transformación de los aerogeneradores están incluidas en las distancias del esquema. La intensidad máxima que circulará por este tramo se calcula teniendo en cuenta que se conectan 15 aerogeneradores,

$$I = \frac{\sum P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{15 \cdot (660)}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 0,85} = 336,22 A$$

Las condiciones de instalación coinciden con la instalación tipo, ya que:

$$K_1 = 1 \quad (h = 1 \text{ m. de profundidad})$$

$$K_2 = 1 \quad (\theta_{\text{terreno}} = 25 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$K_3 = 1 \quad (\rho_{\text{th}} = 1 \text{ K.m/W})$$

$$K_4 = 1 \quad (\text{un solo terno directamente enterrado})$$

Según la tabla 1 se elige la sección de 240 mm^2 , ya que:

$$I_{\text{adm.}} = 415 \text{ A};$$

$$80 \% I_{\text{adm.}} = 332 \text{ A}$$

Teóricamente deberíamos elegir la sección superior, no obstante seleccionamos la de 240 mm^2 ya que no existe una sección disponible comercialmente superior y por otro lado la regla del 80% hay que entender que se puede cumplir de forma aproximada.

3.3.) Cálculo de las secciones por tramos según el criterio de la intensidad máxima admisible.

A continuación se calcula la sección de cada tramo de cable atendiendo al criterio de máxima intensidad admisible por cada tramo.

Tramo $A_1 - A_8$ ----- $3 (1 \times 95 \text{ mm}^2)$

Justificación:

$$(1 \times 95 \text{ mm}^2) \text{ ----- } I_{\text{máx. adm.}} = 250 \text{ A}$$

Cada aerogenerador aporta una intensidad:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{(660)}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 0,85} = 22,4 A$$

El número máximo de aerogeneradores, n, que pueden conectarse al cable de $(1 \times 95 \text{ mm}^2)$ cuya intensidad máxima admisible es de 250 A, será de:

$$n = \frac{80\%(250)}{22,4} = 8,9$$

Por tanto se podrán conectar como máximo 8 aerogeneradores.

Tramo $A_8 - A_{11}$ ----- 3 (1 x 150 mm²)

Justificación:

$$(1 \times 95 \text{ mm}^2) \text{ ----- } I_{\text{máx. adm.}} = 315 \text{ A}$$

Como cada aerogenerador aporta 22,4 A, el número máximo de aerogeneradores que pueden conectarse al cable de (1 x 150 mm²) será 11, ya que:

$$n = \frac{80\%(315)}{22,4} = 11,25$$

Tramo $A_{11} - \text{Subestación}$ ----- 3 (1 x 240 mm²)

Entre el aerogenerador A_{11} y la subestación será obligatorio utilizar la sección de 240 mm², que ya se comprobó que es capaz de soportar la conexión de 15 aerogeneradores.

3.4. Cálculo de los parámetros eléctricos de las líneas.

La caída de tensión que se produce en la línea depende de la impedancia que presenta la misma, es decir de la resistencia y la reactancia. La resistencia de un conductor aumenta con la temperatura, por lo que es necesario, antes de realizar el cálculo de la caída de tensión, calcular la temperatura de cada tramo de línea en las condiciones de carga máxima en las que trabajará.

Tramo $A_1 - A_8$ ----- 3 (1 x 95 mm²)

La intensidad máxima que circulará por este tramo será:

$$I = \frac{n \cdot P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{8 \cdot (660)}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 0,85} = 179,3 \text{ A}$$

Cálculo de la temperatura máxima de trabajo:

$$\theta_{\text{real}} = \left[(\theta_{\text{máx.adm.}} - \theta_{\text{del terreno en cond. normales}}) \cdot \frac{(I_{\text{real}})^2}{(I_{\text{máx.adm.}})^2} \right] + \theta_{\text{del terreno en cond. normales}}$$

$$\theta_{\text{real}} = \left[(90 - 25) \cdot \frac{(179,3)^2}{(250)^2} \right] + 25 = 58,4^\circ \text{ C} \approx 58^\circ \text{ C}$$

La intensidad máxima no circula por toda la longitud del tramo, y por tanto los tramos

más descargados estarán a una menor temperatura, aunque a efectos de los cálculos posteriores se considerará el caso más desfavorable, es decir, que todo el tramo se encuentra a la temperatura máxima.

Tramo $A_8 - A_{11}$ ----- 3 (1 x 150 mm²)

La intensidad máxima que circulará por este tramo será:

$$I = \frac{n.P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{11.(660)}{\sqrt{3}.20.0,85} = 246,6A$$

Cálculo de la temperatura máxima de trabajo:

$$\theta_{real} = \left[(90 - 25) \cdot \frac{(246,6)^2}{(315)^2} \right] + 25 = 64,8^\circ C \approx 65^\circ C$$

Tramo A_{11} - Subestación ----- 3 (1 x 240 mm²)

La intensidad máxima que circulará por este tramo será:

$$I = \frac{n.P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{15.(660)}{\sqrt{3}.20.0,85} = 336,22A$$

Cálculo de la temperatura máxima de trabajo:

$$\theta_{real} = \left[(90 - 25) \cdot \frac{(336,2)^2}{(415)^2} \right] + 25 = 67,6^\circ C \approx 68^\circ C$$

Cálculo de la resistencia y reactancia de los cables para las diferentes temperaturas obtenidas:

Resistencia en corriente continua a la máxima temperatura de trabajo, θ , en Ω/m :

$$R_{cc,\theta} = R_{cc,20^\circ C} [1 + \alpha_{20^\circ C} (\theta - 20)]$$

$$R_{cc,20^\circ C} = \rho_{20^\circ C} \frac{l}{S}$$

En la tabla se muestran los valores obtenidos de la resistencia en continua para cada sección.

Material	ρ (20°C) ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	α (°C-1)	Sección (mm ²)	$R_{cc,20^\circ C}$ (Ω/m)	θ (°C)	$R_{cc,\theta}$ (Ω/m)
Al	0,028264	0,00403	95	0,000298	58,4	0,000344
Al	0,028264	0,00403	150	0,000188	64,8	0,000222
Al	0,028264	0,00403	240	0,000118	67,6	0,000140

Valor de la resistencia en corriente alterna:

$$R_{ca,\theta} = R_{cc,\theta} [1 + Y_s + Y_p]$$

Los valores del coeficiente pelicular, Y_s , y del coeficiente de proximidad, Y_p , válidos para una configuración de tres conductores secos en triángulo, se calculan utilizando las siguientes expresiones extraídas de la norma UNE 21144-1-1.

$$Y_s = \frac{x^4}{192 + 0,8x^4}; \quad \text{donde: } x^2 = \frac{8\pi f}{R_{cc,\theta}} 10^{-7}$$

$$Y_p = Y_s \left(\frac{d_c}{s} \right) \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{(0,27 + Y_s)} \right]$$

Siendo, s , es la separación entre dos conductores, y d_c , es el diámetro del alma conductora de aluminio.

En la tabla se muestran los valores obtenidos de la resistencia en alterna para cada sección, que difieren muy poco de los obtenidos para corriente continua.

Sección (mm ²)	d _c (mm)	s (mm)	x ²	Y _s	Y _p	R _{ca,θ} (Ω/m)
95	11	29,5	0,3657726	0,0006964	0,0011433	0,000344
150	14	32,5	0,5649179	0,0016599	0,0031473	0,000224
240	17,9	37,1	0,895311	0,004161	0,0087866	0,000142

El cálculo de la inductancia de los cables (en Ω/m) sigue la siguiente expresión:

$$X_L = 2\pi f \left[\ln \frac{DMG}{RMG} \right] \cdot 2 \cdot 10^{-7}$$

Donde la distancia media geométrica entre conductores (DMG) coincide con su separación, s , que a su vez coincide con el diámetro externo del cable, al ser una disposición de tres cables en triángulo en contacto mutuo, y donde el RMG se obtiene como:

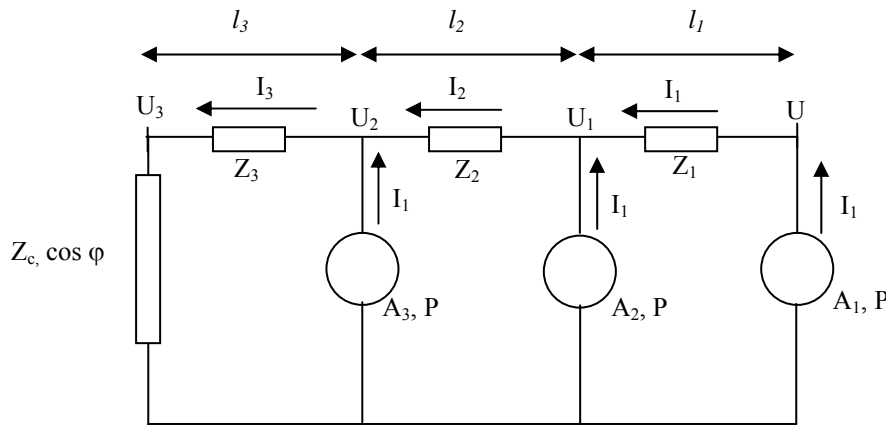
$$RMG = (d_c/2) \cdot e^{-1/4} = (d_c/2) 0,7788$$

En la tabla se muestran los valores obtenidos para la reactancia según la sección del cable:

Sección (mm ²)	RMG (mm)	X _L (Ω /m)
95	4,283	0,000121
150	5,452	0,000112
240	6,970	0,000105

3.4.) Cálculo de la caída de tensión

En primer lugar se deduce cual es la expresión a utilizar partiendo de un caso de 3 generadores (A_1, A_2, A_3) conectados por un cable de sección constante. La expresión obtenida se generalizará para un mayor número de generadores, siendo P , la potencia suministrada por cada generador.



$$U_3 - U = Z_1 I_1 + Z_2 I_2 + Z_3 I_3$$

$$|U_3 - U| = |Z_1 I_1| + |Z_2 I_2| + |Z_3 I_3|$$

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}; \quad I_2 = \frac{2P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}; \quad I_3 = \frac{3P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

Para calcular la caída de tensión se tendrá en cuenta que los valores de las impedancias de cada tramo de la línea (Z_1, Z_2, Z_3) son varios órdenes de magnitud menores que la impedancia de la carga Z_c , lo que permite admitir que las intensidades I_1, I_2, I_3 están muy aproximadamente en fase con lo cual la caída de tensión entre U_3 , y U se puede calcular mediante la expresión siguiente, lo que supone considerar que el ángulo entre U_3 , y las intensidades I_1, I_2, I_3 es siempre igual a φ .

$$U_3 - U = \Delta U = \sqrt{3} (R \cos \varphi + X \operatorname{sen} \varphi) [I_1 l_1 + I_2 l_2 + I_3 l_3]$$

Donde las unidades empleadas para las distintas magnitudes son: I (A), l (km), R (Ω /km), X (Ω /km). La caída de tensión en tanto por ciento se calcula como:

$$\Delta U (\%) = \sqrt{3} (R \cos \varphi + X \operatorname{sen} \varphi) [I_1 l_1 + I_2 l_2 + I_3 l_3] \frac{100}{U}$$

Sustituyendo las expresiones de las intensidades I_1, I_2, I_3 calculadas anteriormente se tendría que:

$$\Delta U(\%) = (R \cos \varphi + X \operatorname{sen} \varphi) \frac{P \cdot 100}{U^2 \cos \varphi} [l_1 + 2l_2 + 3l_3] = 100 \frac{P}{U^2} [l_1 + 2l_2 + 3l_3] (R + X \operatorname{tg} \varphi)$$

$$\Delta U(\%) = 100 \frac{M}{U^2} (R + X \operatorname{tg} \varphi) \quad ; \text{ donde } M = P [l_1 + 2l_2 + 3l_3]$$

La tensión U, se expresa en voltios, la potencia activa, P, en W, y M que se denomina momento eléctrico se expresa en W. km.

Generalizando para nuestro caso de 15 aerogeneradores y tres tramos de línea de diferentes impedancias queda:

$$\Delta U(\%) = \frac{100 \cdot P}{U^2} [(R_1 + X_1 \operatorname{tg} \varphi)(l_1 + 2l_2 + \dots + 7l_7) + (R_2 + X_2 \operatorname{tg} \varphi)(8l_8 + \dots + 11l_{11}) + (R_3 + X_3 \operatorname{tg} \varphi)(12l_{12} + \dots + 15l_{15})]$$

Sustituyendo todos los valores se obtiene un valor del 0,735%, lo cual resulta admisible al ser inferior al 5%, y por lo tanto se dan por definitivos los valores de las secciones calculadas.

Problema 4. Cálculo de la intensidad máxima admisible en un conductor en función de las resistencias térmicas y el modo de la instalación.

Se procede al tendido de una terna de cables unipolares de alta tensión directamente enterrados en el terreno para una tensión de servicio de 15 kV y 50 Hz, con las siguientes características:

- Cables unipolares no armados.
- S= 240 mm² en Aluminio.
- Disposición de conductores: en triángulo y en contacto.
- Diámetro exterior del aislamiento 30,3 mm.
- Diámetro del conductor 17,9 mm.
- Aislamiento: XLPE.
- Temperatura máxima admisible por el cable en servicio permanente =90°C.
- Tangente de delta (XLPE)= 0,004
- ϵ_r (XLPE) = 2,5
- temperatura del suelo: 25°C
- Factor de efecto pelicular, $Y_s = 0,0036$.
- Factor de efecto proximidad, $Y_p = 0,0037$
- Puesta a tierra de las pantallas de los cables en ambos extremos.
- Pérdidas por corrientes de circulación , $\lambda_1' = 0,1037$.

Calcular las pérdidas dieléctricas por fase, y la intensidad máxima admisible por el cable en servicio permanente, si las resistencias térmicas que intervienen se han calculado y son:

- Resistencia térmica del aislamiento: 0,314 K.m/W.
- Resistencia térmica de la cubierta: 0,127 K.m/W.
- Resistencia térmica del suelo: 2,914 K.m/W.

Finalmente obtener las pérdidas por corrientes de circulación por fase, para la intensidad máxima admisible que resulte.

Solución:

La capacidad de un cable unipolar aislado es:

$$C = 2 \pi \epsilon / \ln (R/r) = 2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r / \ln (R/r)$$

$$C = \frac{2\pi 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,5}{\ln \frac{30,3}{\frac{17,9}{2}}} = 2,64 \cdot 10^{-10} F / m$$

Conocida la capacidad se pueden calcular las pérdidas dieléctricas por fase como:

$$W_D = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta = 2\pi f \cdot C \cdot \left(\frac{15000}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot (0,004) = 0,02488 \text{ W / m}$$

Para calcular la intensidad máxima admisible en servicio permanente del conductor en primer lugar se deben tener en cuenta todas las pérdidas de potencia activa, a saber:

Pérdidas por efecto Joule, W_c ,

Pérdidas dieléctricas, W_d ,

Pérdidas por corrientes de circulación, W_p .

Las pérdidas por corrientes de circulación (W_s), que se definen como una fracción, λ_1' , de las pérdidas por efecto Joule, siendo según el enunciado: $\lambda_1' = 0,1037$.

Es decir,

$$W_s = \lambda_1' \cdot W_c$$

Por otra parte,

$$W_c = R' I^2$$

Siendo, R' , la resistencia en corriente alterna y por unidad de longitud que se calcula como:

$$R' = R'_{cc} (1 + Y_s + Y_p)$$

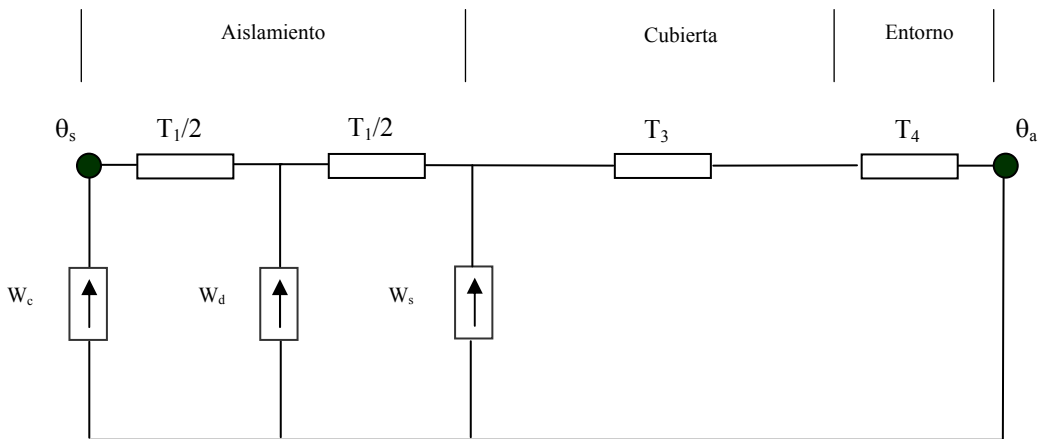
Siendo a su vez, R'_{cc} , la resistencia en continua y por unidad de longitud, correspondiente a la temperatura máxima admisible en servicio permanente:

$$R'_{cc} = \{ \rho_{20} [1 + \alpha (90 - 20)] \} / S = \{ 0,0283 \cdot [1 + 0,004 (90 - 20)] \} / 240 = 0,00015093 \text{ } \Omega/\text{m}$$

Teniendo en cuenta los valores de Y_s , Y_p del enunciado:

$$R' = 0,00015203 \text{ } \Omega/\text{m}$$

Si se tiene en cuenta el símil eléctrico de la ecuación de transferencia de calor se tiene el siguiente circuito, donde las resistencias térmicas se asimilan a resistencias eléctricas, las pérdidas de potencia activa a fuentes de intensidad y las diferencias de temperatura a diferencias de tensión.



Según los datos del enunciado:

$$T_1 = 0,314 \text{ K.m /W}$$

$$T_3 = 0,127 \text{ K.m /W}$$

$$T_4 = 2,914 \text{ K.m /W}$$

Aplicando el símil eléctrico para resolver la ecuación de transferencia de calor se tiene que:

$$\theta_s - \theta_a = \Delta\theta = W_c(T_1 + T_3 + T_4) + W_d(T_1/2 + T_3 + T_4) + W_s(T_3 + T_4)$$

Sustituyendo términos en la expresión anterior se puede despejar fácilmente el valor de la intensidad:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d\left(\frac{T_1}{2} + T_3 + T_4\right)}{R'(T_1) + R'(1 + \lambda'_1)(T_3 + T_4)}}$$

Como todos los valores son ya conocidos se calcula el valor de la intensidad máxima admisible:

$$I = \sqrt{65 \frac{\Delta\theta - 0,02488(3,198)}{(0,0001520).0,314 + (0,0001520).(1,1037)(3,041)}} = 341,1\text{A}$$

Finalmente se calculan las pérdidas por corrientes de circulación por fase como:

$$W_s = \lambda'_1 \cdot W_c = \lambda'_1 \cdot R' \cdot I^2 = 0,1037 \cdot (0,000152035) \cdot (341,1)^2 = 1,834 \text{ W/m}$$