

TÉCNICAS DE LA ALTA TENSIÓN



WWW.AUTOAPRENDIZAJE.INFO

INDICE

TECNICA DE LA ALTA TENSION

Por los Ings. Jorge N. L. Sacchi – Alfredo Rifaldi

INTRODUCCION A LA TECNICA DE LA ALTA TENSION

CAPITULO 1 - INSTALACIONES DE CORRIENTE ALTERNA DE ALTA TENSION

Sistema eléctrico - Clasificación - Instalación eléctrica - Clasificación - Planta eléctrica - Clasificación de las instalaciones eléctricas por su función - Centrales de generación (hidráulicas, térmicas, turbogás) - Estaciones eléctricas - Definiciones - Ejemplo - Componentes de la estación eléctrica - Equipos principales - Interruptor - Seccionador - Seccionador de puesta a tierra - Transformadores de medición - Transformador de tensión - Transformador de corriente - Descargadores - Capacitor de acoplamiento - Bobina de bloqueo - Aisladores - Transformadores de potencia - Líneas de alta tensión - Transmisión - Distribución - Cables - Cabinas de transformación - Tableros de distribución - Centros de potencia - Compensación - Utilización - Accionamientos eléctricos - Hornos eléctricos de arco - Fundamento del uso de tensiones elevadas en la electrotecnia de potencia

CAPITULO 2 - INSTALACIONES DE ALTA TENSION EN CORRIENTE CONTINUA

Introducción: ¿por qué se utiliza la corriente continua? - Interconexiones asincrónicas sin línea de corriente continua - Interconexiones con cables aislados (submarinos) - Interconexiones con largas líneas aéreas - Largas líneas aéreas de corriente alterna - Comparación entre transmisión en corriente alterna y continua - Aplicaciones - transmisión en alta tensión para el ferrocarril - Filtros de armónicas

CAPITULO 3 - PROCESOS ELECTROMAGNÉTICOS OSCILATORIOS Y DE CHOQUE

Introducción - Sobretensiones y sistemas de puesta a tierra - Origen de las sobretensiones - Causas y efectos - Normas - Generalidades - La normalización en el campo electrotécnico - La unificación en el campo electrotécnico - Los órganos de Control - Las normas de Ley sobre las instalaciones eléctricas - La aislación y las

normas - Comparación de las sobretensiones - Características de las sobretensiones atmosféricas - Propagación de las sobretensiones atmosféricas - Deformación de las ondas por causa de bobinas y capacitores - Características de los aislamientos - Principios básicos de coordinación del aislamiento - Coordinación de la aislación (relación entre valores) - Fenómenos particulares - Fenómenos de resonancia - Fenómenos de ferresonancia

CAPITULO 4 - EL CAMPO ELÉCTRICO

Introducción - Campo entre dos esferas - Método de las imágenes - Campo de una esfera con paredes próximas, influencia de la tierra - Problemas de borde - Campo alrededor de un cilindro y de un haz de cilindros - Campo provocado por una línea eléctrica - Efecto Corona en líneas de transmisión - Aisladores de líneas

CAPITULO 5 - AISLANTES SÓLIDOS EN LA TÉCNICA DE LA ALTA TENSIÓN.

Intensidad de campo eléctrico y desplazamiento - Cálculo de la tensión a lo largo de las líneas de campo - Capacitores planos con varias capas aislantes - Capacitores cilíndricos con varias capas aislantes - Campo en cable de un solo conductor - Campo en cable tripolar - Las pérdidas dieléctricas - Terminales de cables - Aisladores para transformadores - Aisladores soportes - Aislación de arrollamientos de máquinas (descargas parciales, su efecto) - Refracción de las líneas de campo - Determinación del campo eléctrico

CAPITULO 6 - AISLANTES LÍQUIDOS Y GASEOSOS

Introducción - Lectura complementaria recomendada - Transformadores y capacitores con fluido dieléctrico a base de Bifenilos Policlorados - El SF₆ y sus productos de descomposición. - Grandes transformadores aislados con gas SF₆.

CAPITULO 7 - ANÁLISIS DE LAS EXIGENCIAS REALES A QUE SE HALLAN SOMETIDOS LOS DIELECTRICOS

Introducción - Las protecciones de sobretensión - Métodos de control de las sobretensiones - Descargadores - Explosores - Filtros y supresores de sobretensión - Estadística de los fenómenos, frecuencia

CAPITULO 8 - ESPECIFICACIONES DE ENSAYOS EN ALTA TENSIÓN

Consideraciones básicas - Clasificación de los ensayos - Ensayos de rutina - Ensayos de tipo - Ensayos especiales - Ensayos de mantenimiento - Ensayos de campo - Generalidades - Características referentes a la descarga disruptiva y tensión de ensayo - Características presuntas de una tensión de ensayo - Características estadísticas de las tensiones de descarga disruptiva - Probabilidad de descarga disruptiva de un objeto ensayado - Probabilidad de soportar una tensión de ensayo - Tensión 50% de descarga disruptiva de un objeto ensayado - Principios generales referentes a la modalidad de los ensayos - Disposiciones generales del objeto ensayado - Ensayos a seco - Ensayos de polución artificial - Condiciones atmosféricas - Factores de corrección atmosféricos - Ensayos con tensión de impulso - Definición de onda de impulso atmosférico - Tensión de ensayo - Definición de onda de impulso de maniobra - Tensión de ensayo - Coordinación de la aislación - Criterio de comportamiento - Procedimientos de coordinación del aislamiento - Método determinístico - Método estadístico - Particularidades de la tensión soportada a impulso de maniobra

CAPITULO 9 - INSTALACIONES DE PRUEBA PARA ALTA TENSIÓN

Introducción - Objetos de ensayo y procedimientos - Investigación - Elección de los métodos de ensayo y recursos de investigación - Finalidades - Ensayos de aislación a impulso - Circuito de prueba - Transductores - Transmisión de las señales - Registro de las señales - Conclusiones

APENDICE 1 - PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problemas de aplicación de los distintos capitulos.

APENDICE 2 - PREGUNTAS

Preguntas sin respuestas para evaluacion.

ILUSTRACIONES DE CLASE - ARCHIVOS PPS

Energia y fuentes de energia definicion, fuentes, combustibles fosiles, nuclear, hidraulica, eolica, solar, biomasa, mareomotriz, geotermica.

Centrales electricas 1- parte central hidroelectrica, tomas de agua, casa de maquinas, turbinas, represas, centrales de bombeo - Centrales eolicas, aerogeneradores, tipologia,

Centrales electricas 2- parte centrales termicas, esquema, descripcion, relacion con el medio ambiente, centrales nucleares, esquema, central solar, esquema.

INTRODUCCION A LA TECNICA DE LA ALTA TENSION

En la carrera de ingeniería el alumno cursa, estudia, es examinado, y aprueba distintas y variadas materias, avanzando, son obstáculos que debe ir venciendo.

A lo largo de estos años ha comenzado con materias formativas, físicas y matemáticas, que son el bagaje que lo acompañará durante su vida profesional.

Efectivamente, en el ejercicio de la profesión la física, la matemática, aprendidas y maduras en los años de facultad no cambiarán.

A medida que se acerca al fin de la carrera, materias más y más especializadas atraen el interés del estudiante, pero vistas con la perspectiva de los años simplemente muestran la técnica de hoy, sin considerar que quien es estudiante hoy, trabajará en el mañana (todavía incierto).

Estas últimas son materias informativas, deslumbrantes hoy, pero con la enorme velocidad que adquirió el avance tecnológico, obsoletas, superadas mañana.

Por citar un solo ejemplo, hace 30 años las turbinas de gas de 20 MW nos parecían enormes, y se usaban para atender cargas de punta pocas horas al día, hoy las de 200 MW son normales, y trabajan de base, las 24 horas, con rendimientos ayer increíbles, mañana se acabará el gas...

Esta materia "Técnica de la alta tensión" seguramente engolosinará al alumno, tiene un nombre altamente profesional, ¿qué espera el alumno recibir en ella? quizás sus ilusiones son enormes...

Está ubicada después de matemáticas, física, teoría de circuitos, electrónica general, mediciones, calidad total, economía.

Contemporánea con instrumentos y mediciones eléctricas, electrónica aplicada, tecnología de materiales eléctricos, máquinas eléctricas, sistemas de potencia.

Y será seguida por centrales eléctricas, construcción de máquinas y equipos eléctricos, instalaciones eléctricas, evaluación de proyectos industriales, organización de obras eléctricas.

La regla importante cuando se plantean los temas en la relación enseñanza aprendizaje es ir de lo simple a lo complejo y de lo concreto a lo abstracto, en ingeniería lo simple son los fundamentos (a veces difíciles - generalmente concretos)... lo complejo es resolver el problema (a veces es fácil - generalmente abstracto, y debe concretarse)...

En el futuro veremos en distintas materias informativas (que informan como se hace) los mismos conceptos, bajo distintos aspectos, los conceptos serán los mismos, pero el ángulo de enfoque tan distinto puede hacernos creer que no hay relación entre esos temas vistos en cada materia de distinta forma.

En esta materia hemos reunido temas muy próximos a la física y la electrotecnia, el enfoque es más próximo a las aplicaciones reales y debe lograr una relación que madurando en las últimas materias de la carrera muestre la estrecha relación que hay entre todas ellas y establezca el nexo que creemos necesario.

Hoy todavía equivocadamente, la tendencia es especializarse, y al hacerlo nos dispersamos y alejamos, quedándonos solos...

Los problemas son únicos, el enfoque para resolverlos bien tiene que ser muy amplio, la especialización es muy peligrosa, aunque muy atractiva.

Hay que saber en profundidad, hay que estudiar a fondo, pero es indispensable la capacidad de adaptarse y readaptarse que muchas veces en el futuro se nos hará necesaria, cada vez más indispensable en la vida.

Esta materia con su enfoque intenta marcarnos ese rumbo, los temas son: fenómenos electromagnéticos, campos eléctricos, fenómenos en aislantes, exigencias sobre la aislación, ensayos de comprobación...

Como estos temas queremos aplicarlos a objetos reales, es necesario comenzar a observar el mundo que nos rodea con ojos que buscan lo que es eléctrico, muchas veces escondido e intangible...

Hoy la electricidad es tan importante que unos minutos sin ella se hacen intolerables, si falta por días la vida es imposible...

Trataremos de encontrar explicación, en esta materia, del por que ciertas cosas se hacen en cierta forma, y otras no deben hacerse... comencemos a trabajar!

CAPITULO 1

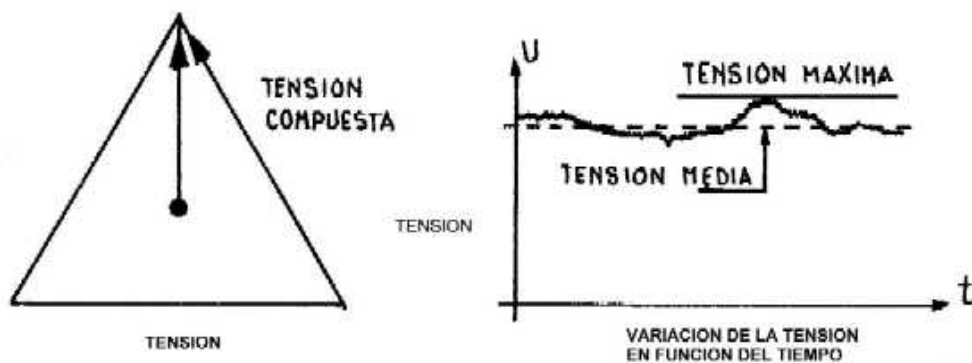
INSTALACIONES DE CORRIENTE ALTERNA DE ALTA TENSION

Sistema eléctrico

- Sistema eléctrico: es el conjunto de máquinas, de aparatos, de barras y de líneas que constituyen un circuito que tiene determinada tensión nominal.

- Tensión nominal de un sistema: es el valor de la tensión con la cual el sistema es denominado, y al cual se refieren sus características, de acuerdo con lo que indican las normas sobre tensiones nominales.

En los sistemas trifásicos se considera como tensión nominal la compuesta o de línea ([figura 1.1](#)).



Figuras 1.1 – 1.2

- Tensión máxima de un sistema: es la tensión mas elevada (expresada en valor eficaz para los sistemas en corriente alterna) que puede presentarse en cualquier momento y en cualquier punto del sistema en condiciones regulares de servicio ([figura 1.2](#)).

No se tienen en cuenta las variaciones temporáneas de la tensión (Sobretensiones, subtensiones) debidas a fallas, o a desconexiones bruscas de la carga, etc.

Ejemplo: Para los sistemas de 132 kV corresponde una tensión máxima de 145 kV.

Clasificación

Los sistemas eléctricos pueden clasificarse por su nivel de tensión y en la jerga se utiliza la siguiente división ([figura 1.3](#)):

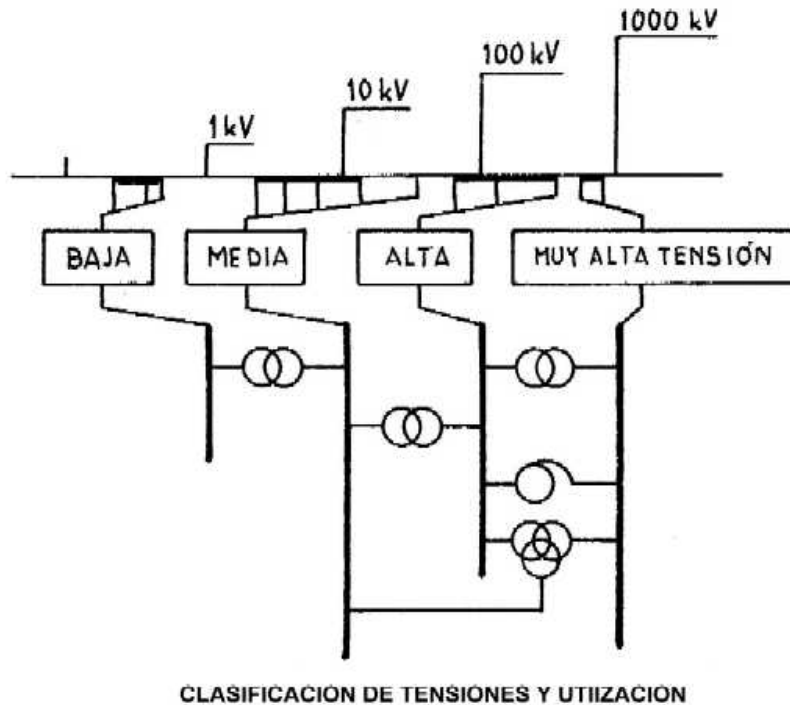


Figura 1.3

- Baja tensión, sistemas de hasta 1.000 V.
- Media tensión, sistemas hasta 36 kV, algunos consideran valores más altos (72,5 kV) el límite está en la diferente tecnología entre esta clase y la superior.
- Alta tensión, sistemas hasta 245 300 kV.
- Muy alta tensión, por encima de los 300 362 kV.

Los límites de la clasificación no son estrictos, dependen de criterios y de normas.

Instalación eléctrica

- Instalación eléctrica: es un conjunto orgánico de construcciones y de instalaciones destinadas a alguna de las siguientes funciones: producción,

conversión, transformación, regulación, repartición, transporte, distribución, utilización de la energía eléctrica.

Clasificación

Una instalación eléctrica puede ser considerada interior o exterior.

Una instalación eléctrica, o una parte, se dice que es interior si está contenida en locales que la reparan de los agentes atmosféricos.

En los restantes casos se considera exterior.

Planta eléctrica

- Planta eléctrica: es el conjunto de locales y/o áreas encerradas en un único cerco, se trata de instalaciones eléctricas destinadas a producción, conversión, transformación, regulación, repartición de la energía eléctrica, etc.

Cuando una planta está incorporada a obras civiles, se entiende por planta eléctrica solo los locales que incluyen instalaciones eléctricas.

Clasificación de las instalaciones eléctricas por su función

La energía eléctrica se genera en centrales eléctricas y se consume en los centros de utilización (industrias, viviendas, servicios) que están relativamente alejados. Estos puntos están unidos por la red eléctrica cuya función es hacer que llegue a destino la energía.

Las distancias se cubren con líneas eléctricas que interconectan centros llamados estaciones eléctricas. Las funciones de líneas y estaciones eléctricas pasan por distintos niveles de importancia: transmisión, distribución.

- Centrales eléctricas destinadas a producir energía eléctrica.

- Estaciones eléctricas conectadas a sistemas en los cuales al menos uno debe considerarse de alta tensión.
- Cámaras, conectadas a sistemas de media tensión.
- Consumo, es una instalación eléctrica que incluye aparatos utilizadores con conexión fija, los correspondientes circuitos de alimentación, y también los circuitos fijos destinados a alimentar tomas.

Centrales de generación (hidráulicas, térmicas, turbogás)

Se entiende por instalación hidroeléctrica el conjunto de obras civiles, hidráulicas y eléctricas que permiten transformar en energía eléctrica la energía de gravedad del agua contenida en lagos o ríos dependiendo de un cierto desnivel o salto existente entre estos y la central de producción. La [figura 1.4](#) muestra un corte de una turbina hidráulica.

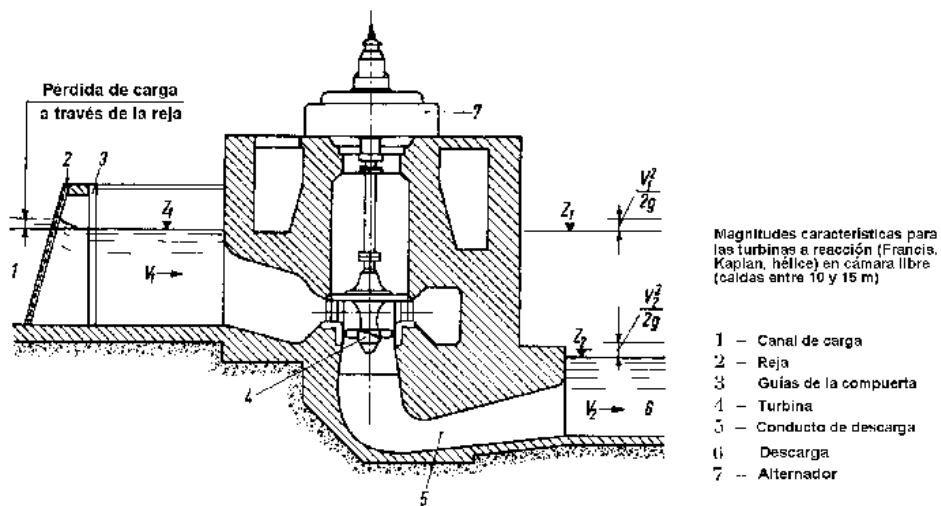


Figura 1.4

En las instalaciones termoeléctricas se efectúa la transformación de energía disponible en forma de calor en energía mecánica. La fuente de calor está

constituida generalmente por combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. La [figura 1.5](#) muestra una vista de una central térmica.

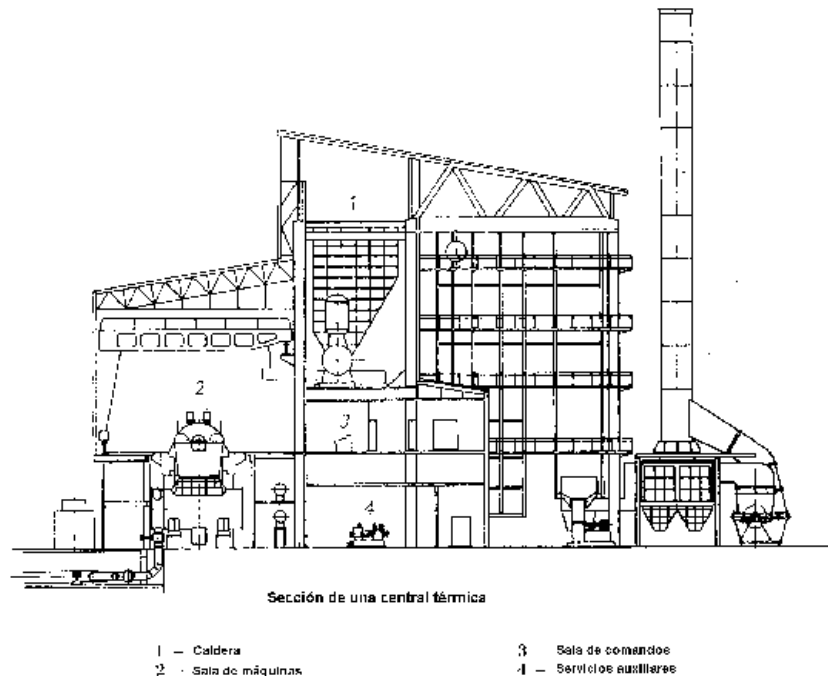


Figura 1.5

Las centrales turbogás se utilizan en los casos en que se requiere una rápida intervención para la producción de energía de punta, o cuando el combustible (gas - recurso no renovable) tiene asignado un muy bajo valor, el rendimiento puede mejorarse recuperando parte del calor que tienen los gases de descarga como elemento comburente de calderas a vapor (ciclos combinados). La [figura 1.6](#) muestra el principio de una turbina de gas.

Principio de una turbina de gas de ciclo simple

- A - Compresor del aire tomado del ambiente
- B - Cámara de combustión
- C - Turbina de gas
- M - Generador eléctrico

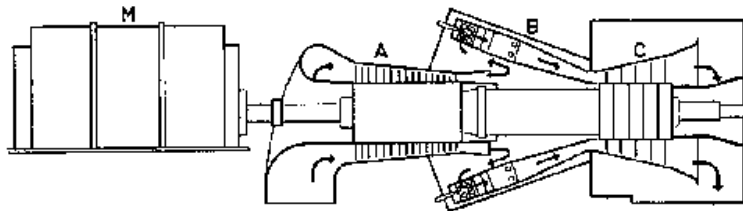


Figura 1.6

En las centrales eléctricas los servicios auxiliares para el funcionamiento de cada grupo se pueden alimentar directamente de un transformador conectado a los bornes del generador, o también desde un transformador conectado a la red externa ([figura 1.7](#)).

Alimentación de los circuitos de una central termoeléctrica con transformador en derivación en bornes del alternador

- 1 ... Barras de estación
- 2 ... Barras de los servicios auxiliares generales
- 3 - Barras de los servicios auxiliares de la unidad
- 4 - Transformador principal
- 5 - Transformador de arranque
- 6 - Transformador con barras auxiliares de la unidad

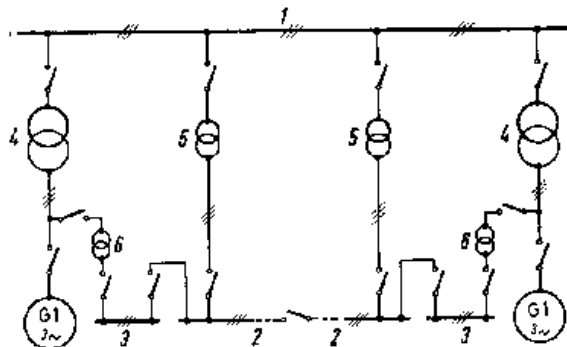


Figura 1.7

Estaciones eléctricas

Las estaciones eléctricas pueden tener las funciones de conversión, transformación, regulación, repartición de energía eléctrica.

Hay estaciones que tienen transformación, en tal caso se tienen dos o más sistemas de tensiones distintas.

Hay estaciones que tienen un solo sistema, de una sola tensión nominal, y su función es interconexión.

En rigor encontramos generalmente ambas funciones en una estación eléctrica [\(figura 1.8\)](#).

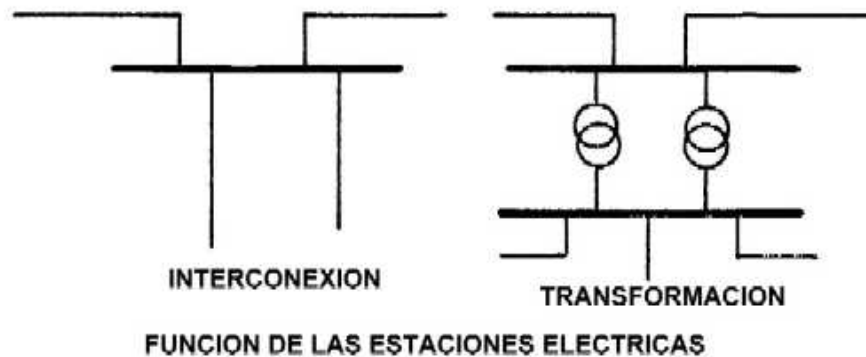


Figura 1.8

El examen de una estación eléctrica muestra distintas partes, áreas y sectores.

Definiciones

- Sección de instalación, es una parte que incluye equipos o aparatos orgánicamente agrupados y conectados, caracterizados por una determinada tensión nominal, incluyendo sus estructuras portantes.

En el caso particular de las Estaciones Eléctricas la sección se denomina campo o vano (en inglés bay, algunos la llaman bahía).

- Tablero de control y comando, es el conjunto orgánico de dispositivos y aparatos (incluidas sus estructuras portantes) alimentados por sistemas de baja tensión destinados a medición, comando, señalización, control, y protección de las máquinas, aparatos, y circuitos de una planta eléctrica, estación eléctrica o de un consumo.

Ejemplo

Al observar una estación eléctrica encontramos los distintos campos: de línea, transformador, acoplamiento, medición, etc.

Los diferentes equipos de los campos o vanos se comandan desde el tablero [\(figura 1.9\)](#).

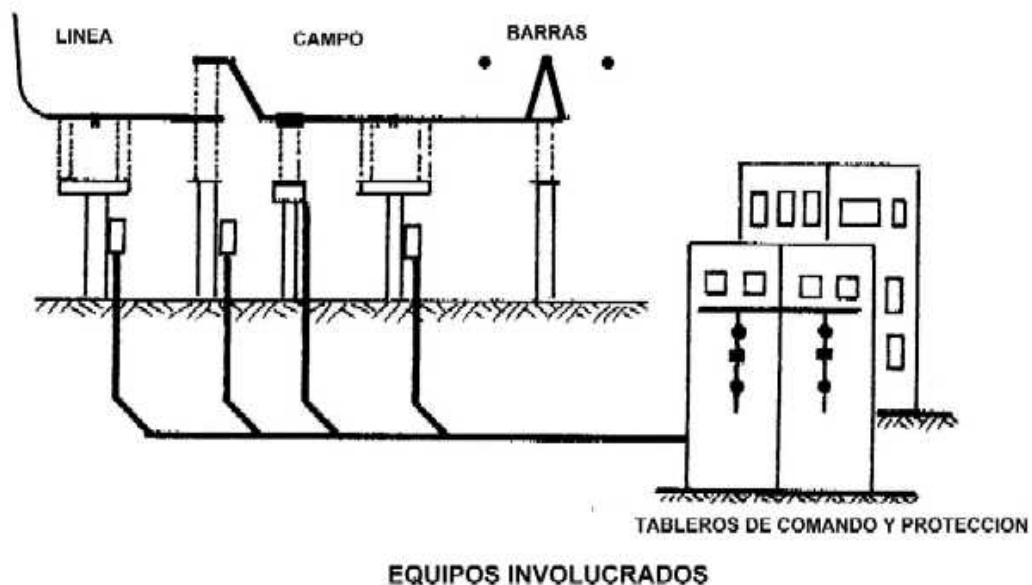


Figura 1.9

Componentes de la estación eléctrica

Al observar la estación, fotos o planos, vemos torres, estructuras donde están amarradas las líneas, y conductores (barras) de la estación, llama generalmente la atención su tamaño, la vista siguiendo estas estructuras sube.

Encontramos conductores tensados entre aisladores, o sostenidos por ellos, debajo los equipos cuya cabeza se encuentra en tensión y están sostenidos por aisladores y soportes estructurales.

Los conductores se deben unir entre sí y a los equipos, mediante morsetería adecuada.

En el suelo de la estación observamos canales de cables, por los que corren los cables de comando, medición, protección que están sumergidos en un ambiente de elevada interferencia electromagnética (corrientes y tensiones elevadas son causa de los intensos campos magnéticos y eléctricos que inducen en los cables sus efectos).

En el subsuelo se encuentra tendida una red de tierra que tiende a mantener el suelo de la estación con características equipotenciales, para evitar peligros a las personas y controlar interferencias electromagnéticas.

Además se tienen obras civiles, fundaciones, drenajes, caminos. En la estación se encuentran además edificios, ya en el campo, kioscos, y fuera del campo, edificio de comando donde se concentra esa función, medición, protección, telecomando etc.

En la Estación Eléctrica encontramos distintas construcciones, instalaciones y equipos con funciones particulares y características definidas.

Ya hemos citado los distintos equipos de la estación, pero conviene tratar de hacer alguna clasificación, en principio por función:

- instalaciones y equipos de potencia o principales: interruptor, seccionadores, transformadores de medición, descargadores, trampa de onda, transformadores de potencia.
- instalaciones y equipos de control y auxiliares: comando, señalización, protecciones, servicios auxiliares, servicios esenciales.

Equipos principales

Los equipos directamente relacionados con las magnitudes eléctricas en juego en la Estación, son llamados equipos principales ([figura 1.10](#))

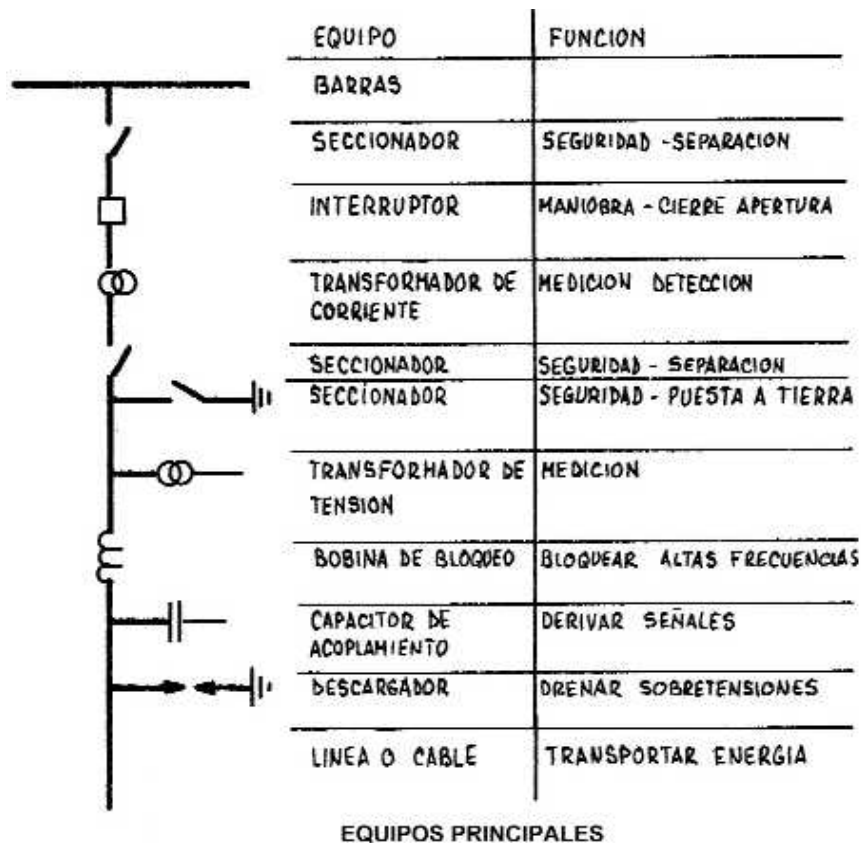


Figura 1.10

Las características eléctricas principales de la estación y de sus equipos están relacionadas con los niveles de tensión y cortocircuito.

Los equipos de potencia, son adquiridos y se instalan en la estación, pero no son en general construidos especialmente para la estación en cuestión, se construyen bajo normas que imponen las características de interés y fijan los ensayos que las comprueban.

Interruptor

El interruptor es un aparato de maniobra mecánico, capaz de establecer, conducir e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito; y también de establecer, conducir por un tiempo determinado, e interrumpir

corrientes en determinadas condiciones anormales como las de cortocircuito ([figura 1.11](#)).

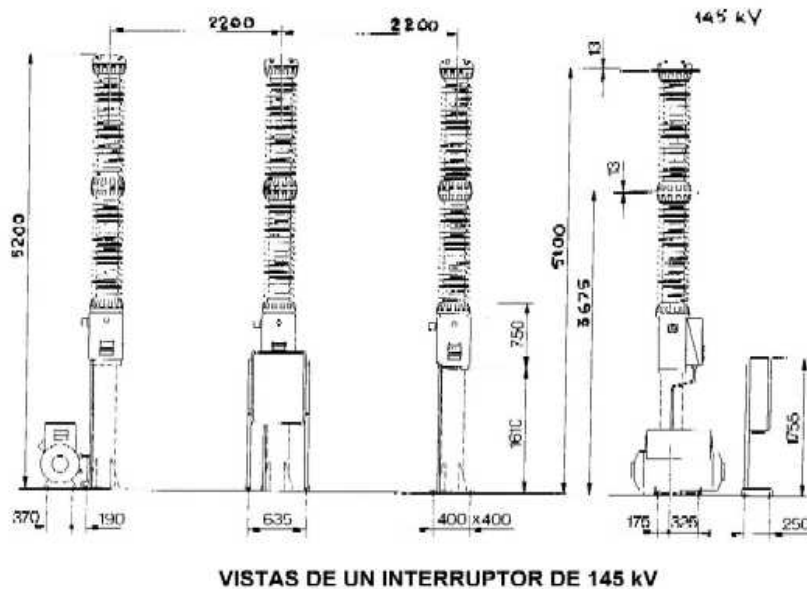


Figura 1.11

Este es el aparato que ha sufrido mayores evoluciones y cambios en sus principios de funcionamiento, casi podríamos decir que es como si hubiese habido modas (aunque la realidad fuera consecuencia frecuentemente de dificultad tecnológica) citemos solo los medios de interrupción aire (comprimido), aceite, gas SF6, vacío.

Seccionador

El seccionador es un aparato mecánico de conexión que asegura, en posición abierta, una distancia de seccionamiento que satisface condiciones especificadas. Un seccionador es capaz de abrir y de cerrar un circuito cuando se establece o interrumpe una corriente de valor despreciable, o bien no se produce ningún cambio importante de la tensión entre los bornes de cada uno de los polos del seccionador.

Es también capaz de conducir corrientes en las condiciones normales del circuito, y de soportar corrientes por un tiempo especificado en condiciones anormales como las de cortocircuito ([figura 1.12 a](#) - [figura 1.12 b](#)).

Se los clasifica por el plano en que se mueven las cuchillas, vertical, horizontal, por la distancia de seccionamiento, también vertical u horizontal, por el número de columnas de aisladores que tienen por polo, dos o tres columnas, por la posición relativa de los polos, diagonal, paralelos, en fila india.

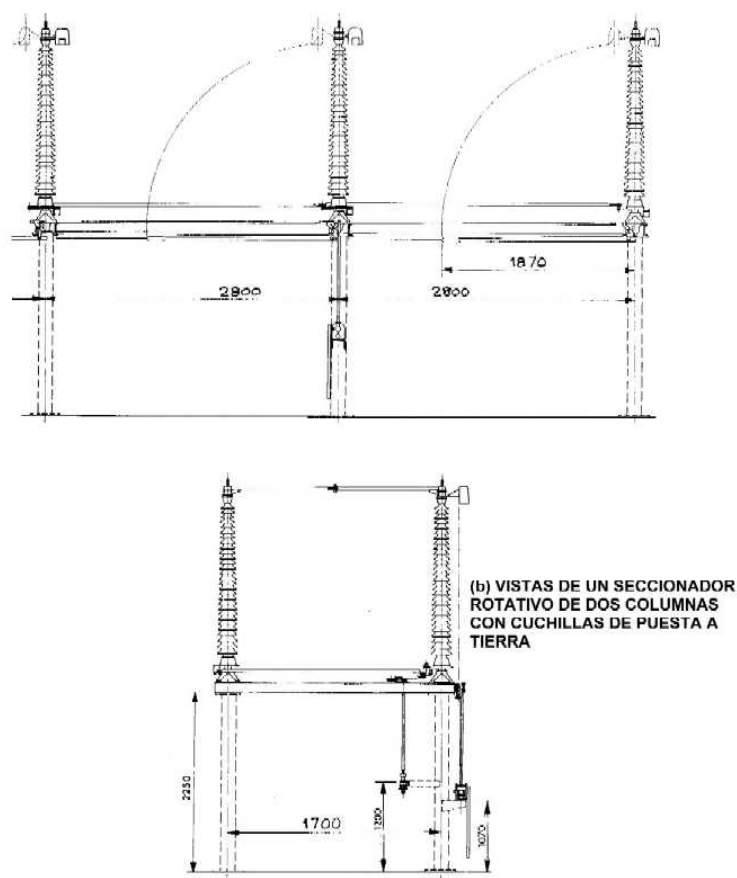
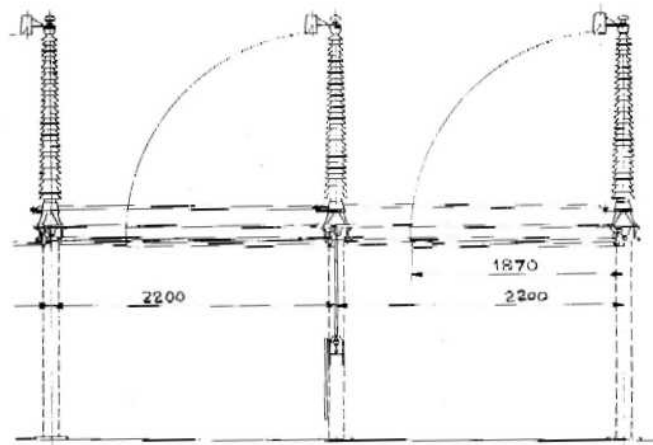


Figura 1.12a



(a) VISTAS DE UN SECCIONADOR ROTATIVO DE TRES COLUMNAS CON CUCHILLAS DE PUESTA A TIERRA

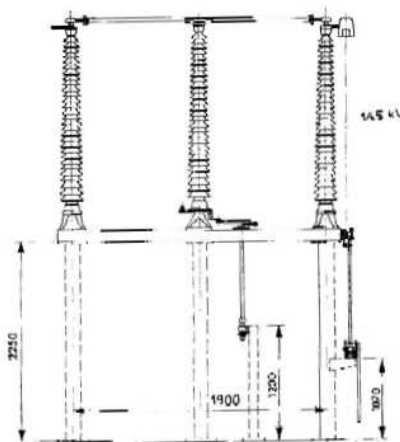


Figura 1.12b

Seccionador de puesta a tierra

El seccionador de puesta a tierra, tiene la función de conectar a tierra parte de un circuito.

El seccionador de tierra generalmente está asociado a un seccionador principal.

Normalmente este seccionador cortocircuita un aislador de soporte del seccionador principal al que se encuentra asociado.

Transformadores de medición

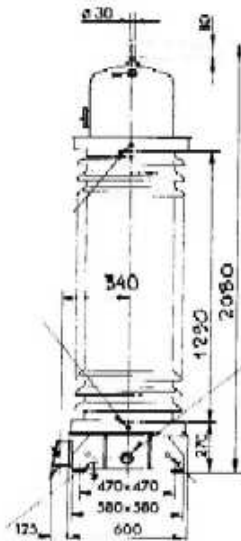
Los transformadores de medición están destinados a alimentar instrumentos de medida, indicadores, registradores, integradores, relés de protección, o aparatos análogos. Según la magnitud en juego se clasifican en Transformadores de Tensión y de Corriente.

Actualmente estas funciones se realizan con aparatos de tipo electromagnético, pero la tecnología ya ha comenzado a difundir transductores cuya señal de salida es luminosa y se transmite a los aparatos de visualización mediante fibra óptica.

Transformador de tensión

Es un transformador en cuyo secundario, en condiciones normales de uso se tiene una tensión cuyo módulo es prácticamente proporcional a la tensión primaria, y que difiere en fase en un ángulo próximo a cero, para una adecuada conexión.

En alta tensión se encuentra conectado entre fase y tierra ([figura 1.13](#)), sólo hasta 72.5 kV se encuentran construcciones para conexión entre fases (con dos aisladores).



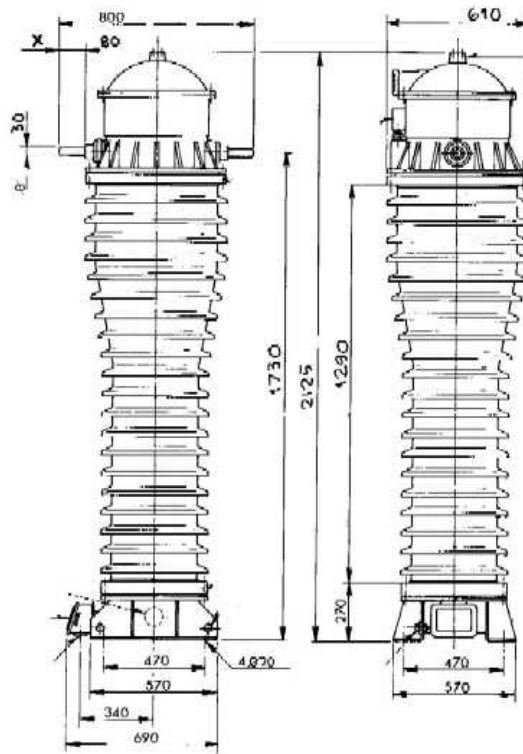
VISTA DE UN TRANSFORMADOR DE TENSION

Figura 1.13

Transformador de corriente

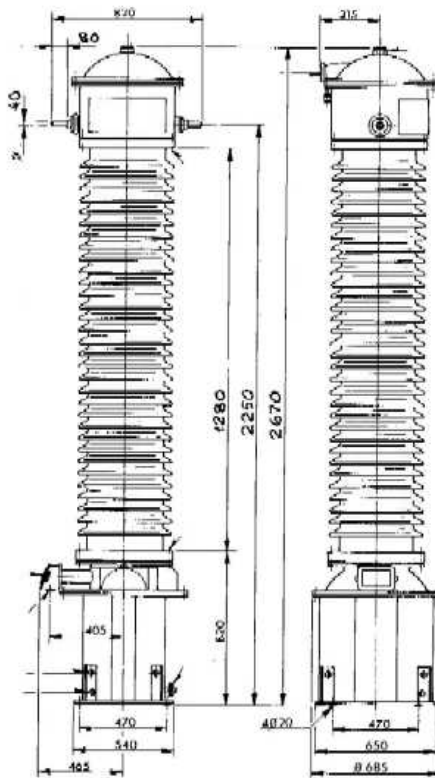
Los transformadores de corriente presentan una corriente secundaria cuyo módulo es prácticamente proporcional a la corriente primaria y que difiere en fase en un ángulo próximo a cero.

Los hay de distintas formas constructivas, para alta tensión con núcleo en la parte inferior, o con núcleo en la cabeza ([figura 1.14 a](#) - [figura 1.14 b](#)), para media tensión del tipo pasabarra o pasacable, o bobinados.



(a) VISTAS DE UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CON NUCLEO EN ALTO

Figura 1.14a



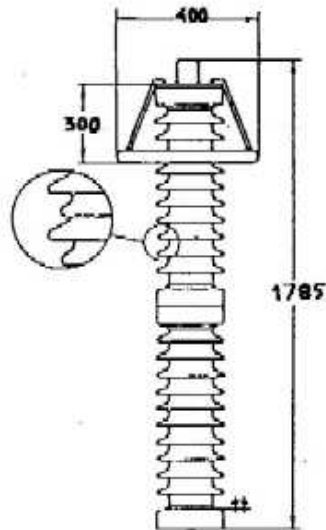
(b) VISTAS DE UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE
CON NUCLEO UBICADO ABAJO

Figura 1.14b

Descargadores

El descargador es un aparato destinado a proteger el material eléctrico contra sobretensiones transitorias elevadas y a limitar la duración y frecuentemente la amplitud de la corriente subsiguiente.

Modernamente se han impuesto los descargadores de óxido de cinc [\(figura 1.15\)](#).



DESCARGADOR DE SOBRETENSION

Figura 1.15

Capacitor de acoplamiento

Tiene la función de acoplar los sistemas de telecomunicaciones en alta frecuencia a las líneas aéreas de alta tensión [\(figura 1.16\)](#), que de esta manera actúan como soporte de comunicaciones.

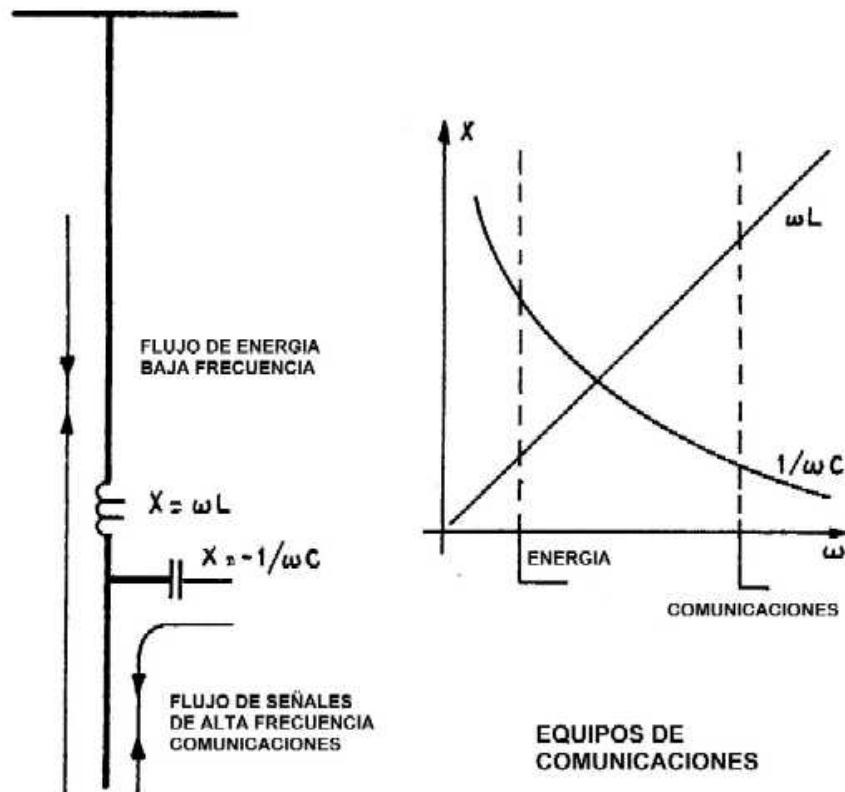


Figura 1.16

Los transformadores de tensión capacitivos pueden cumplir las funciones de transformador de tensión y de capacitor de acoplamiento [\(figura 1.17\)](#) para las altas frecuencias que sostienen la comunicación.

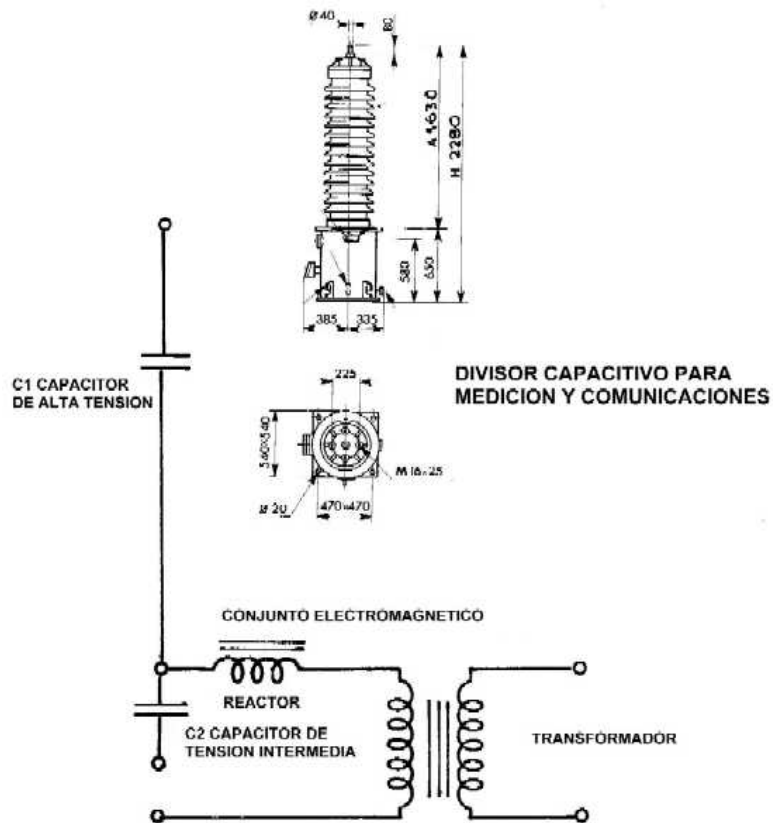


Figura 1.17

Bobina de bloqueo

La bobina de bloqueo, también llamada Trampa de Onda, es un dispositivo destinado a ser instalado en serie en una línea de alta tensión. Su impedancia debe ser despreciable a la frecuencia de la red, de manera de no perturbar la transmisión de Energía, pero debe ser selectivamente elevada en cualquier banda de frecuencia utilizable para la transmisión por onda portadora.

El equipo consiste en un inductor principal, un dispositivo de protección, descargador, y un dispositivo de sintonización ([figura 1.18](#)).

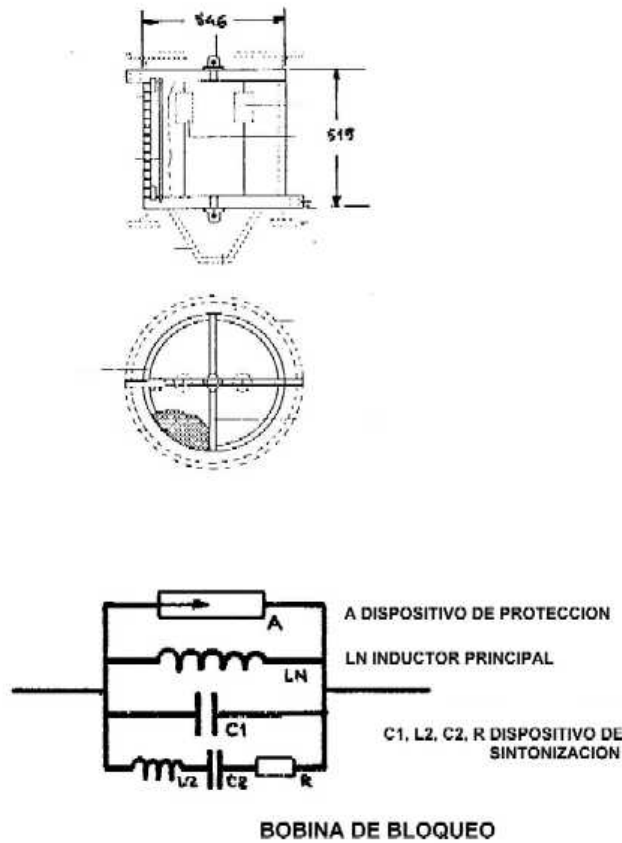


Figura 1.18

Aisladores

Los aisladores son dispositivos que sirven para mantener un conductor fijo, separado y aislado de partes que en general no están bajo tensión (a tierra).

Los aisladores que sirven para que un conductor atraviese una pared se denominan pasamuros. Se los denomina pasatapas cuando atraviesan la cuba de un transformador o la celda metálica de una instalación blindada.

Podemos denominarlos genéricamente como aisladores pasantes.

La definición de éstos incluye los medios de fijación al tabique o pared a atravesar.

Transformadores de potencia

En las estaciones de transformación la parte más importante está ciertamente representada por los transformadores, tanto por la función que ellos desarrollan como por su costo respecto a las otras partes de la instalación.

Los transformadores pueden dividirse en dos grupos:

Máquinas con aislamiento seco

Máquinas con aislamiento en aceite

Los transformadores secos tienen la parte activa en contacto directo con un medio aislante gaseoso (generalmente aire) o con un medio aislante sólido (resinas, materias plásticas, etc.) la potencia y tensión de las máquinas de este tipo es todavía limitada.

Los transformadores en aceite tienen en cambio las partes activas inmersas en aceite mineral y para estas máquinas no existen prácticamente límites en la potencia y las tensiones. Se construyen máquinas de varios centenares de MVA y para tensiones superiores a los 500 kV. La [figura 1.19](#) muestra distintos cortes de un transformador de 25 MVA, 130 kV $\pm 2' 3.8 \%$, con refrigeración tipo ONAF (aceite natural, aire forzado), con conmutador no bajo carga.

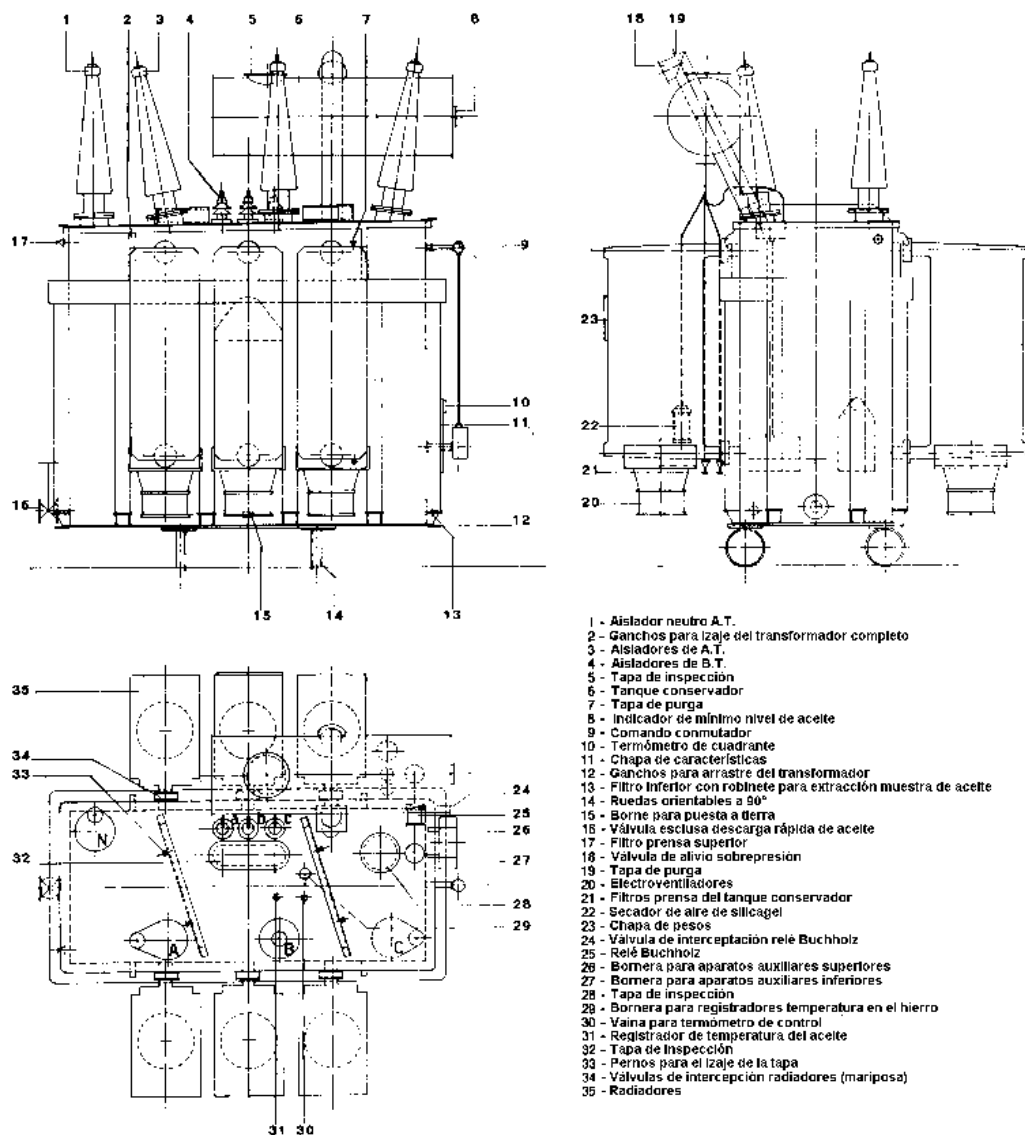


Figura 1.19

Líneas de alta tensión - Transmisión

La función de las líneas eléctricas es transmitir energía entre dos puntos en forma técnica y económicamente conveniente, para lo cual se busca optimizar las siguientes características:

Resistencia eléctrica, ligada a las pérdidas

Resistencia mecánica, ligada a la seguridad

Costo limitado, ligado a la economía

Esencialmente la línea debe estar formada por conductores, como es necesario mantenerlos a distancia del suelo y entre sí, la construcción de soportes, torres es la solución para sostenerlos mediante aisladores.

En el diseño se trata de buscar soluciones que reduzcan el costo de las torres desde el punto de vista de primera instalación y también de reconstrucción después de eventos destructivos.

Los soportes pueden ser metálicos [\(figura 1.20\)](#) o de hormigón [\(figura 1.21\)](#), aptos para soportar una o dos ternas.

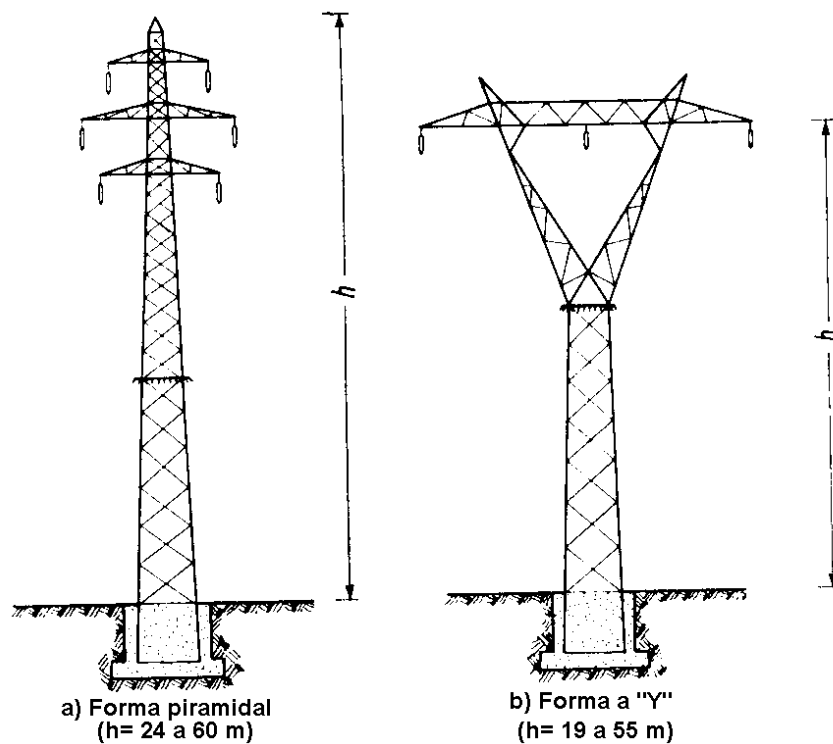


Figura 1.20

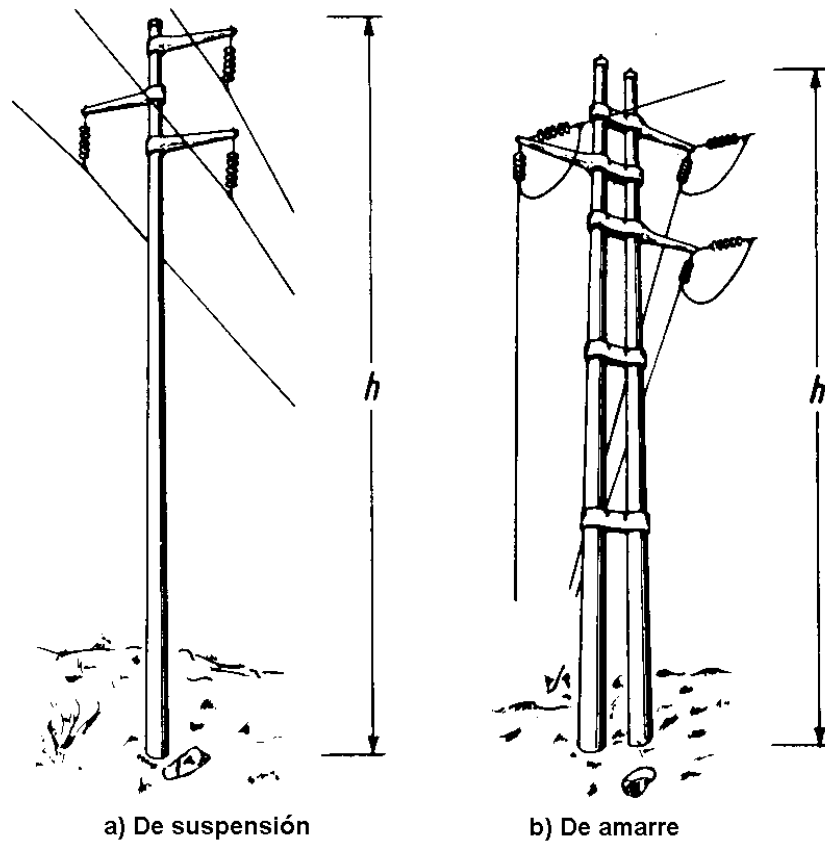


Figura 1.21

Las características de las líneas que son de mayor importancia son su longitud y su tensión. Los parámetros eléctricos de importancia para observar su comportamiento en la red son resistencia, reactancia inductiva y capacitancia derivación.

A veces las líneas tienen cables de guarda, estos apantallan los conductores, protegiéndolos de descargas atmosféricas directas (rayos), recientemente han comenzado a difundirse cables de guarda con fibra óptica que se utiliza como vector de transmisión de información entre las estaciones que une la línea.

Distribución

Se denomina distribución primaria la que se realiza en una tensión más elevada llegando a los primarios de los transformadores ([figura 1.22](#)), y distribución secundaria la que se realiza desde el secundario.

Desde el centro de cargas a cada una de las cargas se puede llegar en forma radial, con un único cable; esta solución tiene el inconveniente que la eventual falla del cable deja sin suministro la carga.

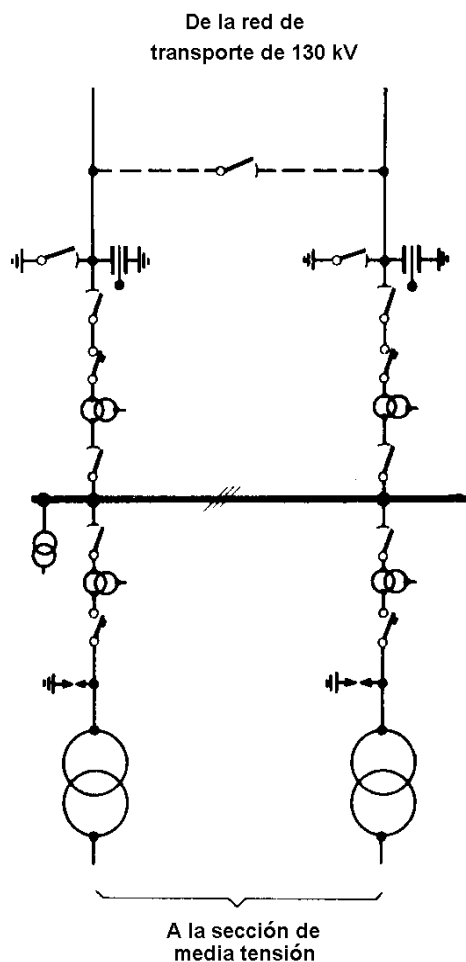


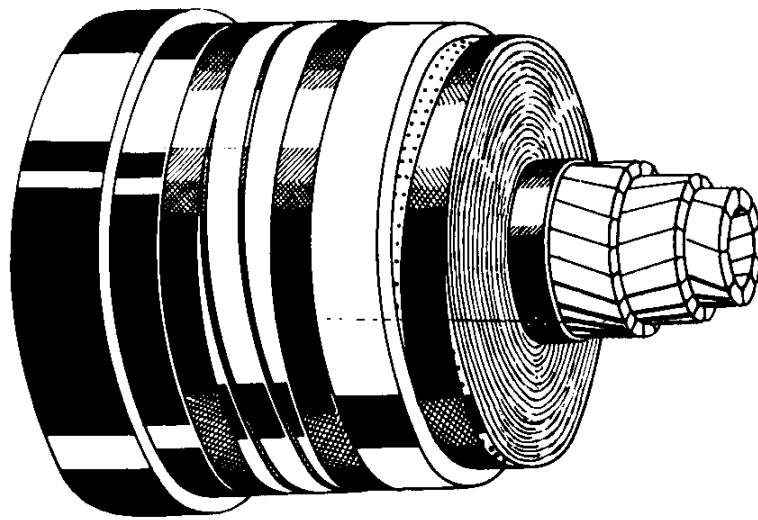
Figura 1.22

Cables

Por cable eléctrico se entiende un conductor uniformemente aislado (o un conjunto de más conductores uniformemente aislados y reunidos)

generalmente provistos con un revestimiento de protección. Se deben considerar bajo esta denominación distintos productos que van de los cables destinados a las redes de transmisión y de distribución a los cables de pequeñas dimensiones.

La [figura 1.23](#) muestra un cable de aceite fluido de tipo unipolar para alta tensión.



Cable de aceite fluido para alta tensión

Figura 1.23

Cabinas de transformación

Los centros donde se transforma energía de media a baja tensión reciben esta denominación, la asociación de equipos incluye tablero de media tensión, transformador y tablero de baja tensión.

En general son estaciones pequeñas de transformación con potencias nominales de hasta 630 kVA que encuentran aplicación en zonas residenciales, en edificios y en la industria.

La estación pequeña de transformación constituye una unidad cerrada, compuesta por un armario de alta tensión, el recinto del transformador y un

armario de baja tensión, estos componentes están cubiertos por un techo común. Esta estación blindada y compacta, con adecuada clase de protección, se puede instalar a la intemperie o en interiores. La [figura 1.24](#) muestra a la izquierda el armario de alta tensión y a la derecha del transformador el armario de baja tensión.

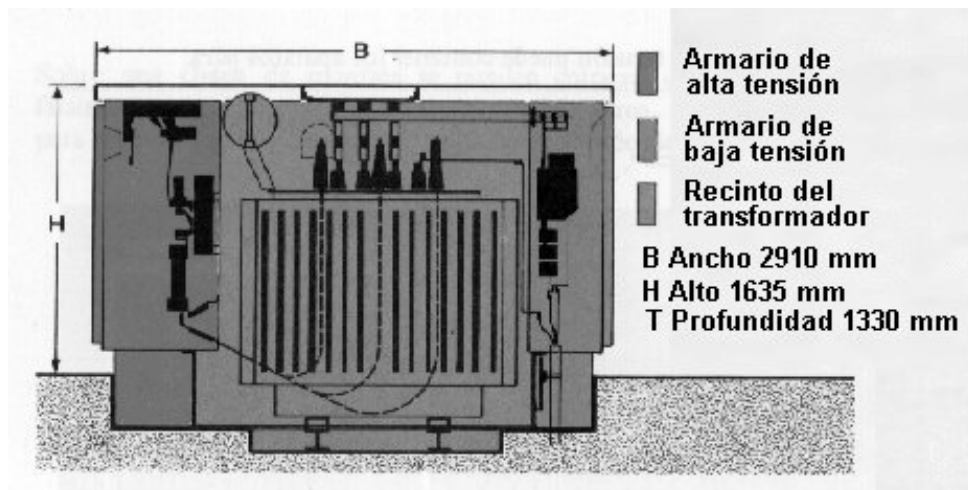


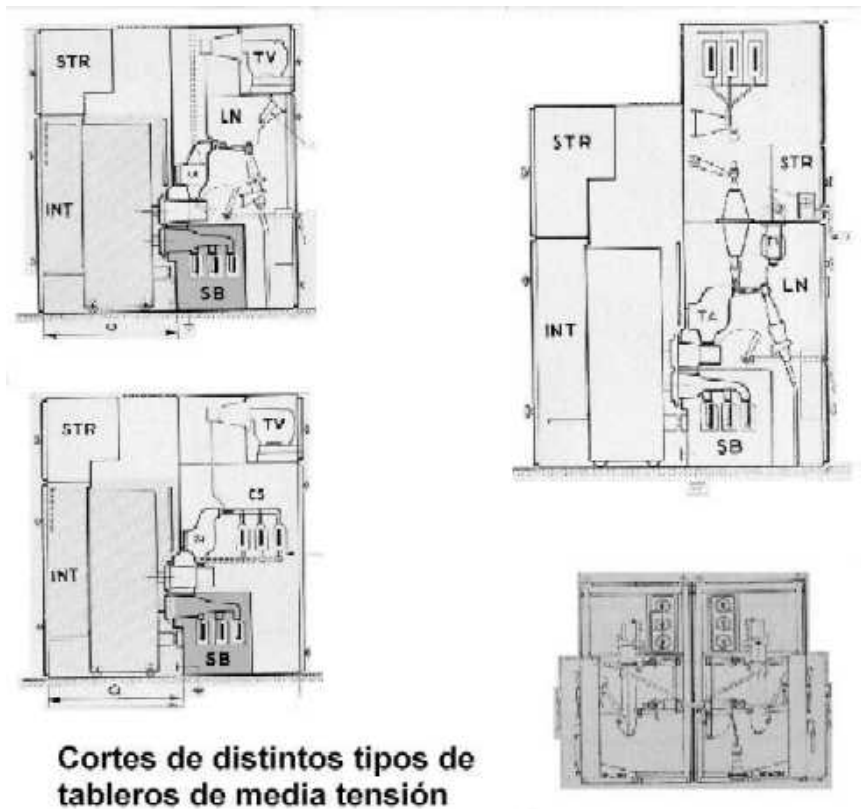
Figura 1.24

Tableros de distribución - Centros de potencia

Los aparatos de maniobra, de interrupción, de comando y de medición en tensiones medias y bajas, se encuentran reunidos y distribuidos en forma racional en tableros, con todas las conexiones de potencia (barras) y auxiliares (cableado) realizada.

En el concepto moderno un tablero debe ser robusto, apto para soportar todas las solicitudes mecánicas, térmicas y eléctricas que se presentan en el servicio; debe garantizar la ejecución de las operaciones de servicio y mantenimiento, debe ofrecer la máxima seguridad para la protección de las personas contra partes en tensión o en movimiento.

Además debe ser de construcción flexible, modular y normalizada, para permitir ampliaciones y/o modificaciones que pudieran ser requeridas durante su vida, la [figura 1.25](#) muestra distintas soluciones.



Cortes de distintos tipos de tableros de media tensión

Figura 1.25

Compensación

Las cargas en general son inductivas, si observamos una carga cualquiera en la red eléctrica podemos representarla por $P + jQ$, circuitalmente con una resistencia y una reactancia (inductiva) en paralelo.

La corriente que alimenta la carga es proporcional a la potencia aparente

$A = \sqrt{P^2 + Q^2}$, ya hemos visto que las pérdidas de transmisión (en la línea que alimenta la carga) dependen del cuadrado de la corriente (y para dada tensión) del cuadrado de la potencia aparente.

Una forma de reducir las pérdidas en la distribución es reducir A , y como la potencia activa P es la que exige la carga, la única posibilidad es reducir Q .

En paralelo con la inductancia de la carga, se pone un capacitor, en esta forma se cambia la potencia, y el factor de potencia que ve la red de distribución, que ahora será: $P + j(Q - Q_c)$ El distribuidor de energía empuja a los usuarios (a través de tarifa con multas y sobrepagos) a que compensen el factor de potencia ($\cos\phi$) de sus cargas, en esta forma se reducen pérdidas en la red, y se dispone de más capacidad de transporte, pudiendo postergarse inversiones que el crecimiento de la carga exige.

Esto se logra con capacitores que pueden ser pequeños, con cargas pequeñas, o grandes bancos con cargas mayores, que se ubican en puntos estratégicos de la red.

La presencia de capacitores en la red, exalta algunos fenómenos de armónicas, cuyo origen está en las cargas cada vez más controladas mediante electrónica de potencia, que son fuentes de corrientes armónicas, que se generan en las cargas y tienden a ir hacia los generadores, deformando la tensión, y perturbando a las otras cargas, en lo que se llama empeoramiento de la calidad de servicio.

Por ahora solo nos interesa saber de la presencia de capacitores en la red.

Utilización

Una gran parte de la energía eléctrica se utiliza en aparatos de baja tensión, lámparas, motores y otros artefactos con funciones dedicadas. Pero también en industrias y servicios encontramos motores (asíncronos y síncronos) alimentados directamente por media tensión.

La maniobra de los motores se realiza mediante contactores aptos para hacer una gran cantidad de operaciones con mínimo desgaste.

Algunas aplicaciones se alimentan con rectificadores desde la media tensión, instalaciones de tracción eléctrica, laminadores, etc., también se alimentan desde media o alta tensión grandes hornos eléctricos de arco en corriente alterna y más modernos en corriente continua.

En base a su función las instalaciones eléctricas destinadas a la alimentación de los usuarios, pueden clasificarse en instalaciones industriales e instalaciones para edificios civiles. La división de las instalaciones no es rigurosa si se entiende por edificios civiles aquellos dedicados exclusivamente a viviendas.

La elección de la tensión de alimentación es función de la potencia absorbida por la instalación: los grandes complejos tienen interés de adquirir energía a bajo costo alimentándose de la distribución primaria, mientras que para los usuarios más modestos (más numerosos) es más conveniente adquirir en baja tensión.

Accionamientos eléctricos

Por accionamiento eléctrico se entiende cualquier conjunto (sistema) apto para transformar potencia eléctrica en potencia mecánica que, aplicada a la máquina accionada, permite a esta última efectuar el trabajo requerido.

El continuo progreso técnico y las crecientes exigencias de la producción han puesto en evidencia la necesidad de accionamientos de velocidad variable dotados de gran flexibilidad, facilidad de control y elevada seguridad de servicio.

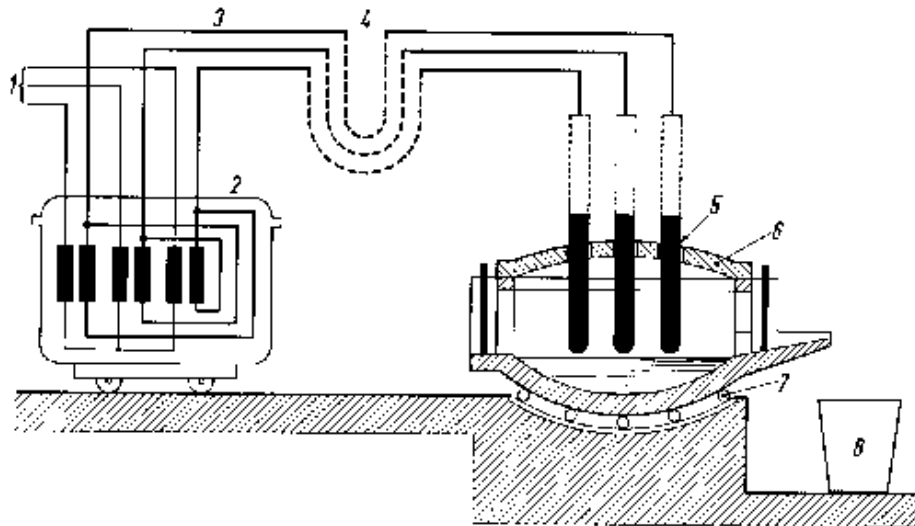
Por esta razón la elección de un accionamiento eléctrico se debe hacer en función de algunos factores técnicos, económicos y funcionales entre los cuales tienen particular importancia las características de la red de alimentación (tensión, corriente, frecuencia, factor de potencia, facturación, etc.), las características de la parte accionada (característica mecánica, inercia de las masas rotantes, etc.) y el costo de adquisición y grado de obsolescencia de las máquinas.

En algunas industrias como minería, siderurgia, química y petroquímica, plantas de cemento etc., se utilizan motores asíncronos trifásicos de jaula con un rango de tensiones que va desde 400 a 13800 V.

Hornos eléctricos de arco

La energía eléctrica también es muy utilizada para la producción de calor por medio del arco voltaico en los hornos de fundición de chatarra de hierro, de cobre o de otros metales, de difícil fusibilidad en hornos de reducción de óxidos metálicos (en estos últimos los electrodos penetran en la masa constituida por los óxidos metálicos a reducir).

La [figura 1.26](#) muestra el esquema de principio de un horno eléctrico de arco alimentado en alta tensión.



Esquema de principio de un horno eléctrico de arco para la fusión de chatarra de hierro

- | | |
|--|--|
| 1 - Línea de alimentación en alta tensión | 5 - Electrodos |
| 2 - Transformador reductor | 6 - Bóveda del horno |
| 3 - Circuito de alimentación del horno | 7 - Rodillos de desplazamiento para la inclinación del horno |
| 4 - Conductores flexibles para la conexión de los electrodos | 8 - Cuchara |

Figura 1.26

Fundamento del uso de tensiones elevadas en la electrotecnia de potencia

Cuando se deben transmitir grandes potencias desde la generación hasta los centros de consumo, es necesario en la electrotecnia de potencia el uso de tensiones elevadas. En la [figura 1.27](#) se muestra un esquema unipolar de una instalación de transmisión simple. Los elementos más importantes de alta tensión de una instalación son: generador (G), barras (SS), transformador (Tr) e interruptor (S) del lado de generación, la línea de transmisión y nuevamente un transformador, interruptor y barras del lado de consumo. La corriente se conduce a través de conductores metálicos. Por lo tanto se producen pérdidas, entre las cuales la pérdida por efecto Joule es la más importante.

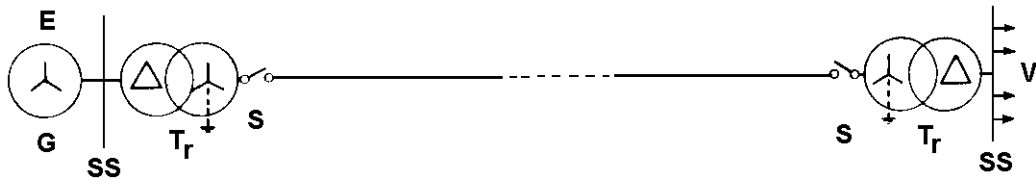


Figura 1.27

La pérdida Joule, P_j en un sistema de transmisión trifásico, cuando la resistencia óhmica de una fase es igual a R , resulta

$$P_j = 3I^2 R$$

Introduciendo la potencia a transmitir

$$P = \sqrt{3}UI \cos\varphi$$

En la expresión anterior, la pérdida Joule resulta:

$$P_j = P^2 \frac{R}{U^2 (\cos\varphi)^2}$$

Esta expresión muestra que la pérdida Joule de una línea es proporcional al cuadrado de la potencia a ser transmitida P , y a la resistencia óhmica R de la línea, además, inversamente proporcional al cuadrado de la tensión U y al factor de potencia $\cos j$.

Las pérdidas, por motivos económicos, no deben superar un determinado porcentaje de la potencia a ser transmitida. De esta expresión surge que la conclusión más eficaz es la elevación de la tensión a utilizar.

Con una elevación de la tensión, también, se eleva el costo de la instalación. Por eso es necesario, al proyectar una instalación de transmisión de potencia, considerar todas estos aspectos que inciden en el costo del sistema de transmisión.

La conclusión es que la tensión más económica de una línea es función de la distancia de transmisión y de la potencia, observándose una pequeña incidencia de la distancia y una gran influencia de la potencia en la determinación de la tensión más económica.

La pregunta es: ¿cuáles son los problemas que surgen al ingeniero, en la utilización de tensiones elevadas?

Ya hemos visto la gran variedad y complejidad de las instalaciones de alta tensión, hemos nombrado y descrito someramente gran cantidad de aparatos de distinto tipo y con distintas funciones a integrarse en el sistema eléctrico, no hay duda que los problemas son muchos, algunos los abordaremos en esta materia y otros quedarán para las materias futuras.

CAPITULO 2

INSTALACIONES DE ALTA TENSIÓN EN CORRIENTE CONTINUA

Introducción: ¿por qué se utiliza la corriente continua?

Históricamente las primeras aplicaciones de energía eléctrica, fueron en corriente continua, pero rápidamente se descubrieron las ventajas de la corriente alterna, que permitía independizar la aplicación (transmisión o utilización) de la tensión aprovechando los transformadores.

Iniciamos haciéndonos la pregunta: por que se utiliza la corriente continua en los grandes sistemas de transmisión y para algunas aplicaciones especiales, hasta aquí hemos visto todas ventajas para la corriente alterna, veamos ahora la contraparte, comencemos viendo necesidades y tipos de instalaciones de corriente continua, que se presentan.

En el mundo se ha difundido la corriente alterna, parte utiliza 50 Hz (Europa, y los países donde la industria Europea ha influido más) y parte 60 Hz (Estados Unidos, y su área de influencia), en algunos países coexisten ambas frecuencias por ejemplo Japón, en otros como Brasil en los años 70 se hizo un enorme esfuerzo para unificar y pasar todo lo que era 50 ciclos a 60.

La [figura 2.1](#) muestra como están distribuidas en el mundo las frecuencias de 50 y 60 Hz.

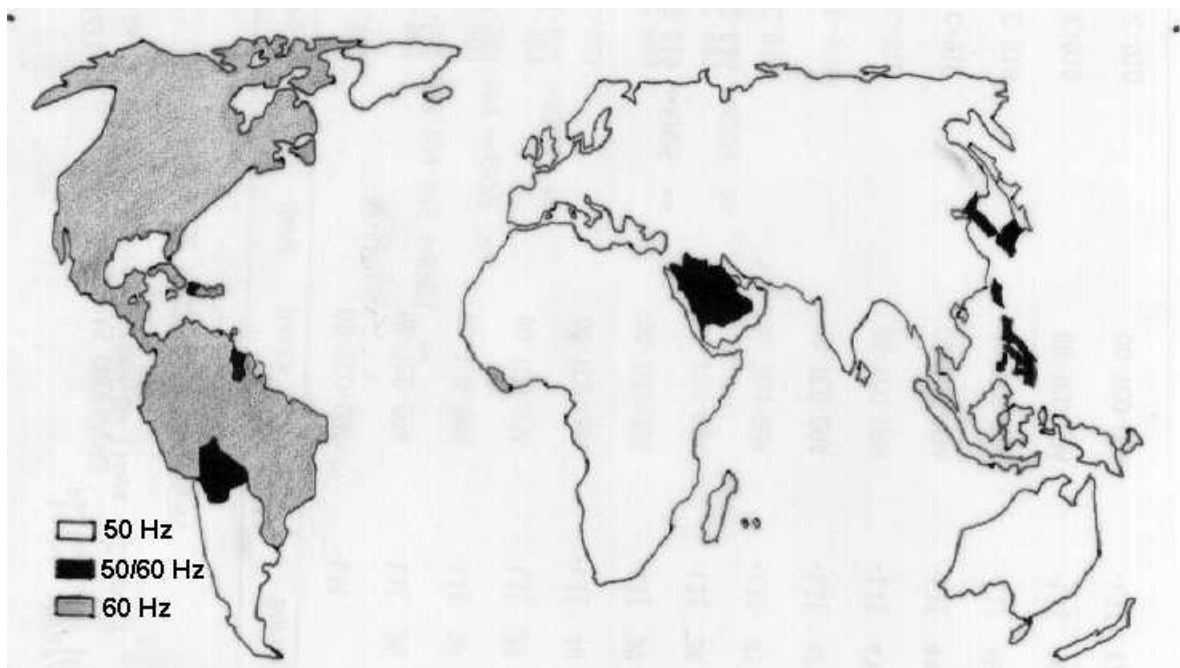


Figura 2.1

Cuando dos sistemas de 50 y 60 Hz se encuentran próximos, en nuestro caso por ejemplo las redes de Argentina y Brasil, puede ser de interés y de utilidad tratar de interconectarlos, estos sistemas se dicen asincrónicos (no son sincrónicos), la interconexión se hace con corriente continua.

En algunos casos los dos sistemas tienen igual frecuencia pero no tienen la misma estrategia de regulación de frecuencia, es el caso de las

interconexiones entre Europa del Este y del Oeste y por esa razón no pueden funcionar en paralelo la solución para unirlos es también utilizando la corriente continua.

En otros casos también se presenta la necesidad de interconectar grandes sistemas, permitiendo que conserven su característica de sistemas asincrónicos, aun teniendo igual frecuencia no deben conectarse directamente para no incrementar las dificultades de operación de la red.

Interconexiones asincrónicas sin línea de corriente continúa

Todas las instalaciones de este tipo (sin línea en corriente continua) son llamadas Back to back, la [figura 2.2](#) muestra un ejemplo de una instalación en India.

Se observan los dos sistemas trifásicos (en 400 kV), transformadores, convertidores electrónicos de corriente alterna a continua, una corta barra de unión (en 205 kV) entre los sistemas de corriente continua. Dentro de esta instalación además se encuentran filtros de armónicas.

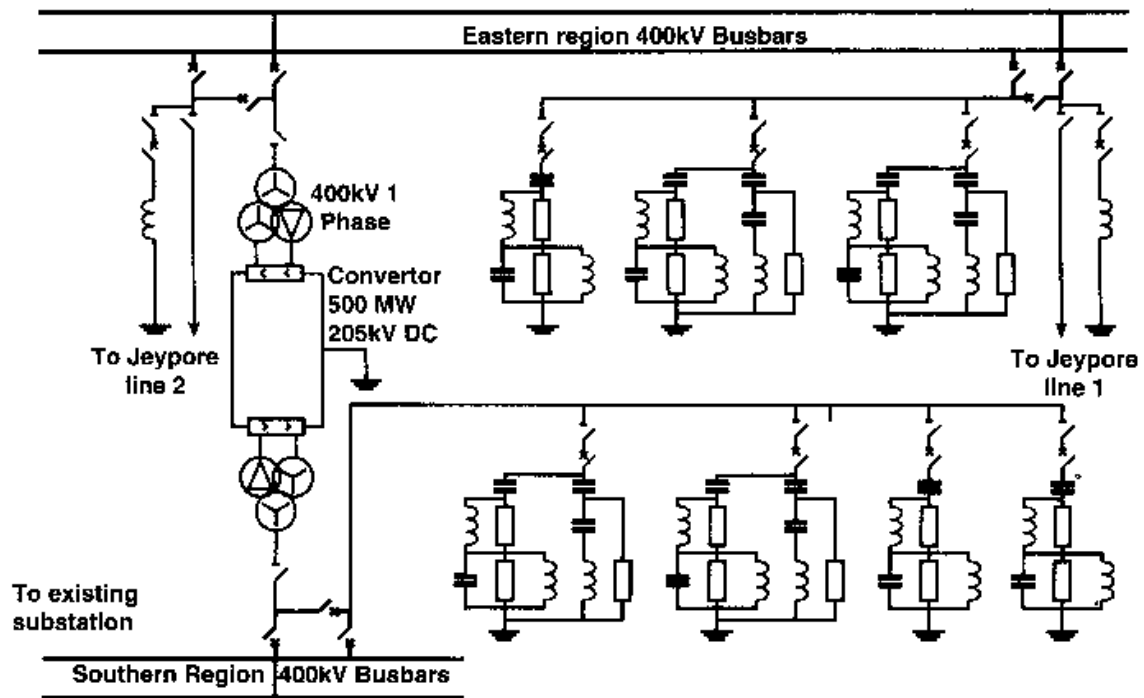


Figura 2.2

Interconexiones con cables aislados (submarinos)

Otra aplicación particularmente difundida en Escandinavia, es la interconexión en corriente continua mediante cables submarinos. Esta aplicación con corriente alterna no sería posible por la gran capacitancia de los cables, que exigiría al sistema de corriente alterna una gran potencia reactiva de compensación, manteniendo muy cargados los cables aun con potencia (activa) transmitida nula.

La [figura 2.3](#) muestra las estaciones de alta tensión terminales de corriente alterna, los transformadores, los convertidores de corriente alterna a continua, los reactores serie de corriente continua, que cumplen la función de filtros, los cables (101 km para el caso que se observa).

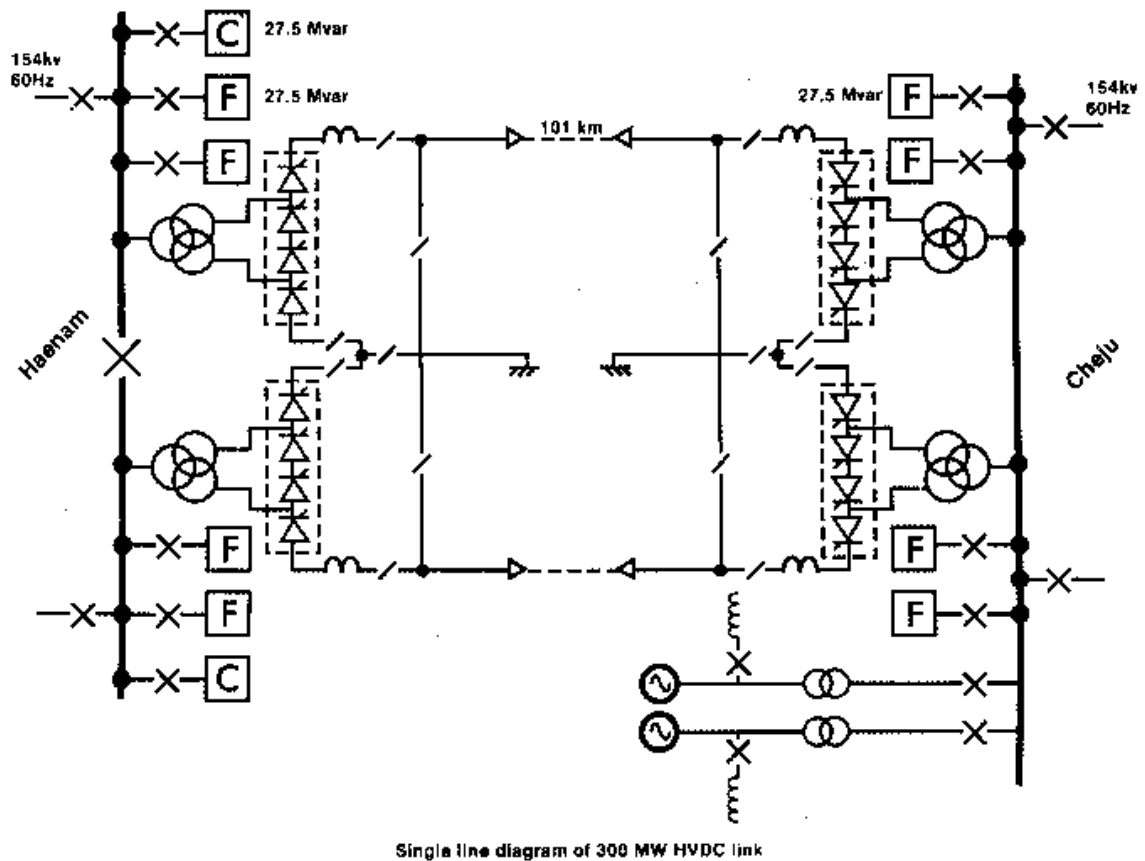


Figura 2.3

Hay algunas instalaciones con un solo cable y que utilizan el agua como retorno permanente.

En estas instalaciones adquiere importancia la puesta a tierra, que permite transmitir potencia (parcial) con uno de los cables fuera de servicio, utilizando la tierra (el agua) como conductor de retorno.

Se observan los filtros de armónicas en las estaciones de corriente alterna, y en caso de baja potencia de cortocircuito de los nodos, se hace necesario tener compensadores rotantes (generadores de potencia reactiva).

La [figura 2.4](#) muestra la planta de una estación convertidora, pueden encontrarse en ella los distintos componentes ya observados en el esquema unifilar, que son:

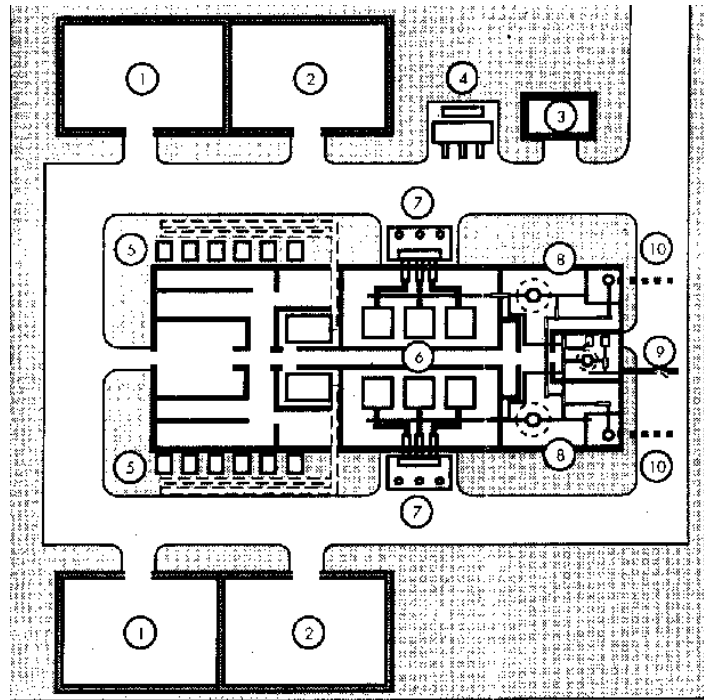


Figura 2.4

- 1) Filtro doble sintonizado
- 2) Filtro pasa alto
- 3) Almacén
- 4) Transformador de reserva
- 5) Intercambiadores de calor
- 6) Sala de válvulas
- 7) Transformadores de los convertidores
- 8) Sala de seccionadores de corriente continua
- 9) Línea del electrodo de tierra
- 10) Cable de corriente continua

La [figura 2.5](#) muestra cables submarinos aislados con papel impregnado con aceite, o aislados con polietileno reticulado XLPE.

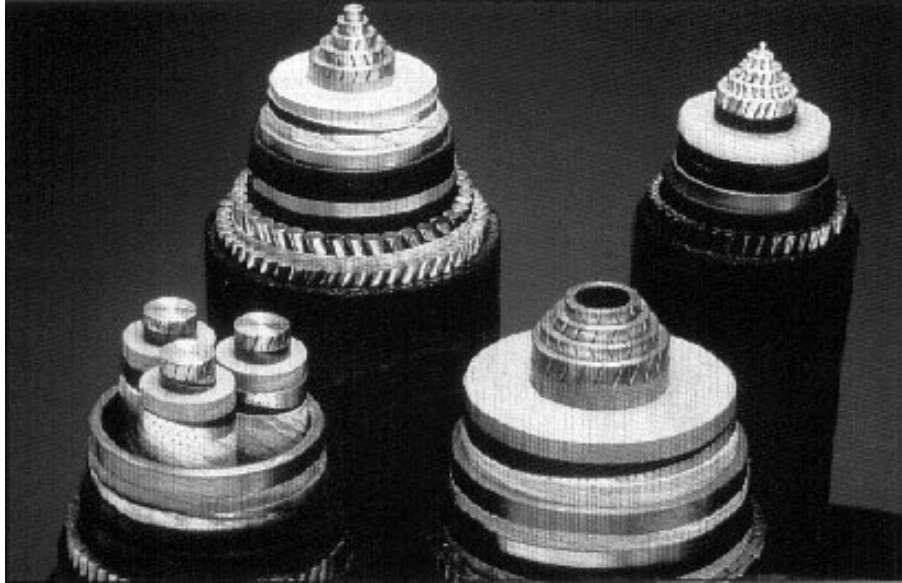
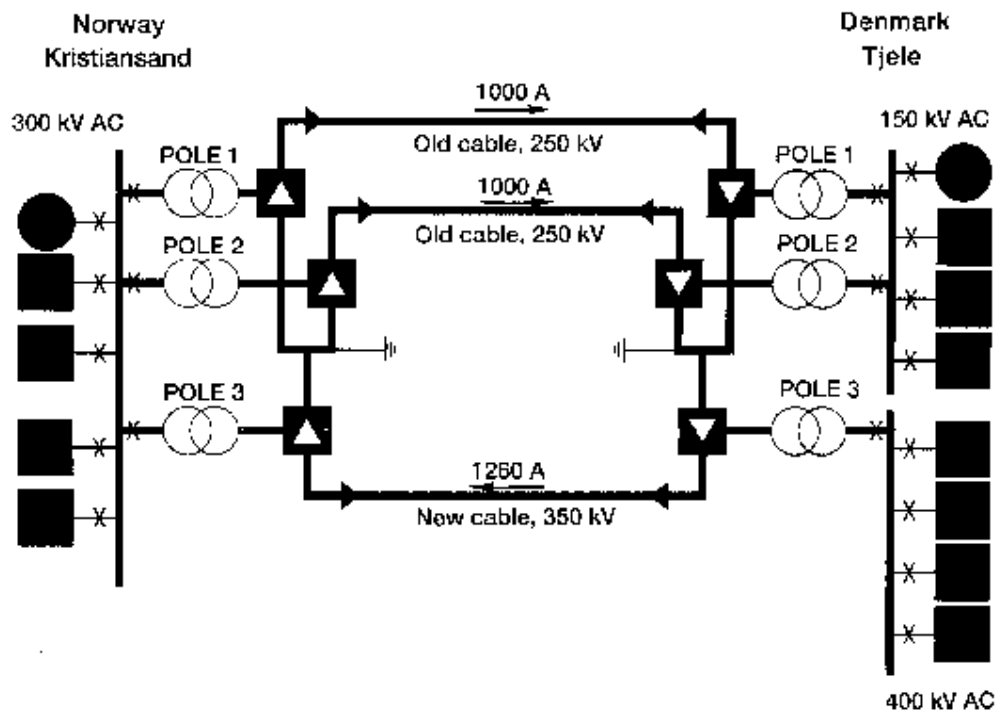


Figura 2.5

Otra instalación particularmente interesante es la transmisión submarina de Skagerrak que se ha ido desarrollando en etapas, agregándose sucesivamente cables de 250 kV y recientemente uno de 350 kV como se puede observar en la [figura 2.6](#).



Simplified diagram

Figura 2.6

Se puede ver en la [figura 2.7](#) y [figura 2.8](#) las perspectivas de las estaciones convertoras de ambos extremos del cable.

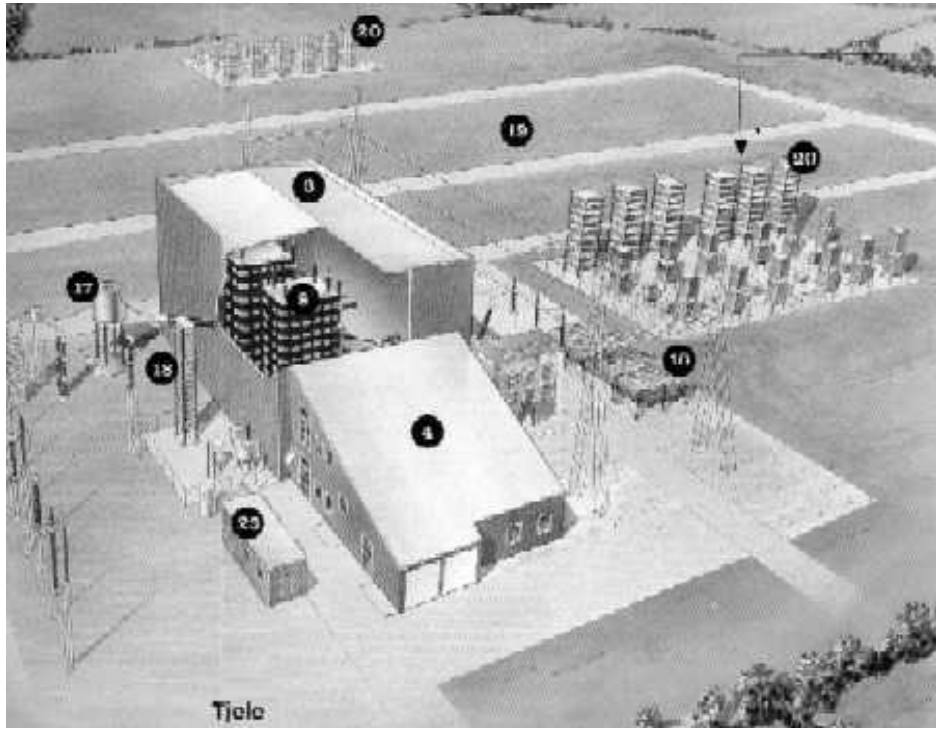


Figura 2.7

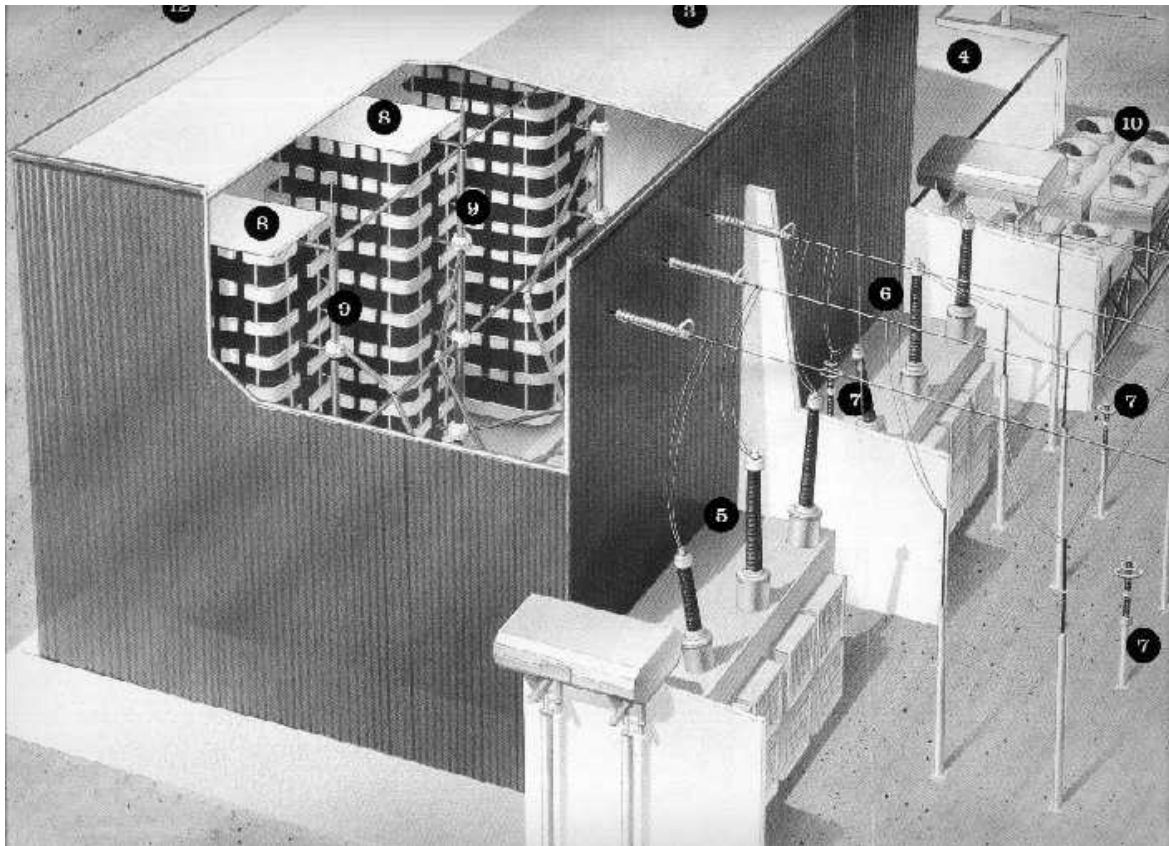


Figura 2.8

Una instalación monopolo (Baltic HVDC link monopolo) cruza el mar Báltico entre Lübeck (Alemania) y Arrie (Suecia) pudiéndose ver el detalle del cable utilizado en la [figura 2.9](#), el esquema unifilar en la [figura 2.10](#) y la perspectiva de una de las estaciones conversoras en la [figura 2.11](#).



Figura 2.9

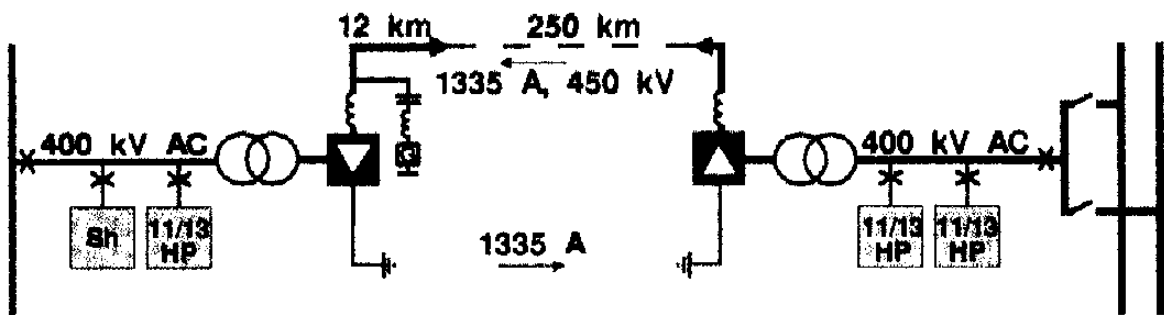


Figura 2.10

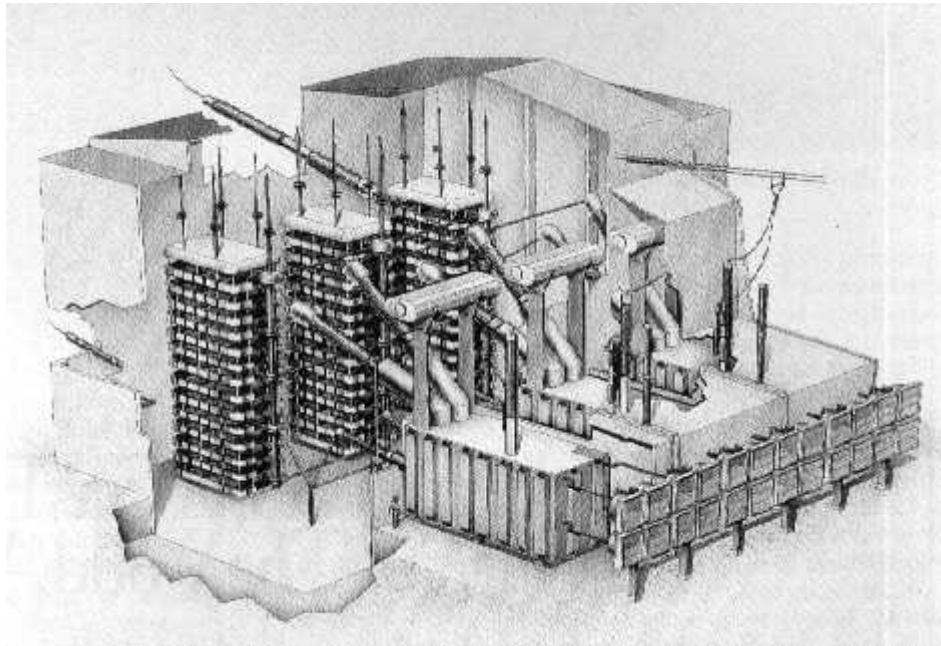


Figura 2.11

Interconexiones con largas líneas aéreas

Esta misma solución puede utilizarse para transmitir potencia en alta tensión entre puntos distantes, con líneas aéreas bipolares que son más económicas, que las líneas aéreas trifásicas, y esto compensa con su menor costo, los equipos conversores que el sistema de transmisión requiere.

La [figura 2.12](#) esquematiza la solución de transmisión en corriente continua de tipo tradicional con dos conductores uno por cada polo, la [figura 2.13](#) muestra como podría realizarse una transmisión monopolar, aprovechando una línea trifásica, y el retorno por tierra.

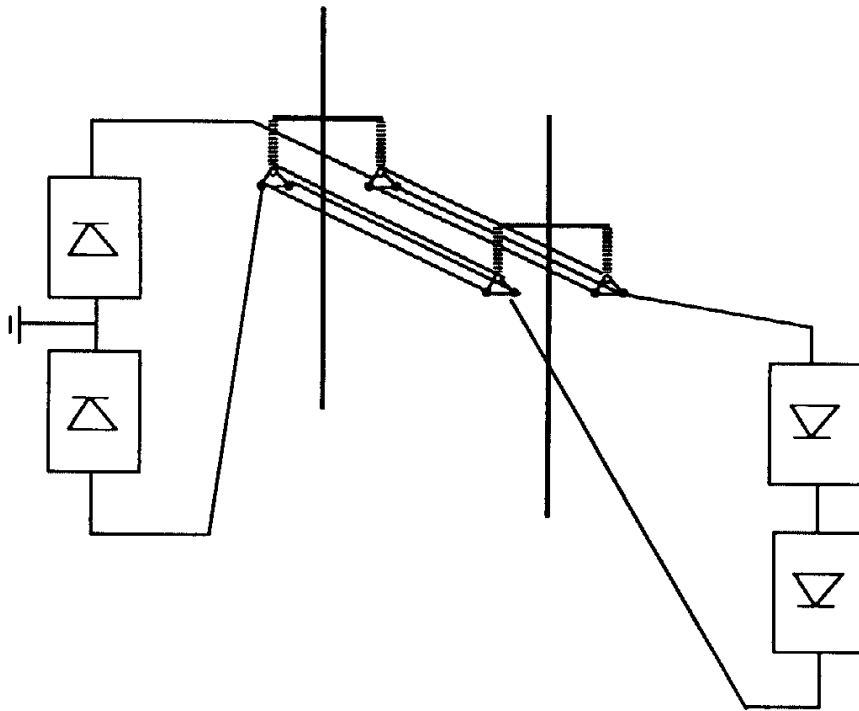


Figura 2.12

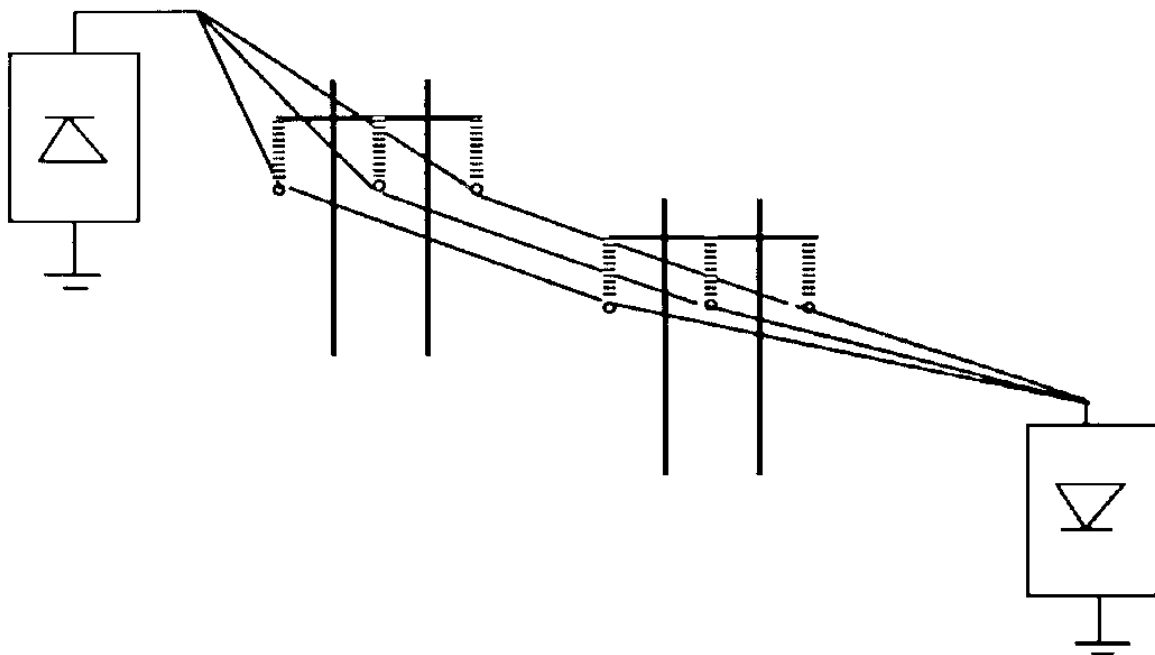


Figura 2.13

Para las líneas monopolares adquiere particular importancia la realización de las puestas a tierra de las convertoras, ya que su resistencia significa pérdidas,

es interesante en cambio notar que la sección del conductor de retorno es "infinita" y entonces no hay pérdidas atribuibles a éste.

La [figura 2.14](#) muestra las distancias que se adoptan entre conductores y estructuras en las transmisiones en corriente continua (es interesante comparar estas distancias con proyectos de corriente alterna).

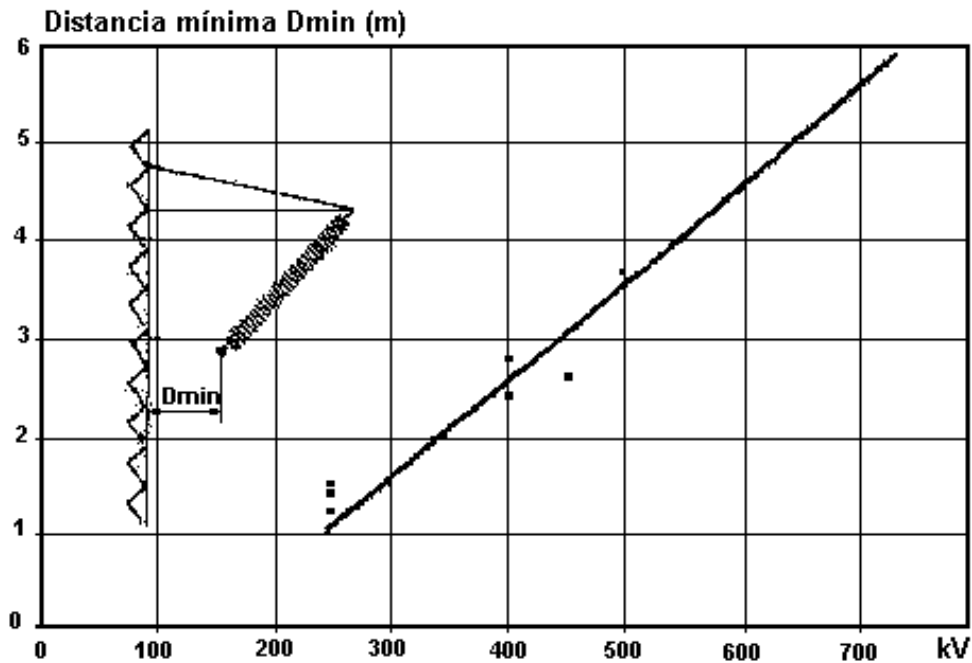


Figura 2.14

Para una línea de ± 500 kV resulta la distancia de 3.60 m

Esta distancia también puede obtenerse con la siguiente fórmula:

$$D_{est} = \frac{U}{100} - 1,4 \text{ m}$$

La longitud de la línea de fuga de los aisladores debe cumplir la siguiente ecuación, en casos de contaminación normales:

$$L_{fuga} = \frac{0.03 U}{3.2} \text{ m}$$

Para una línea de ± 500 kV resulta $L_{fuga} = 4.69$ m

Para la distancia al suelo (en el punto y condición de flecha máxima) se utiliza la siguiente fórmula:

$$D_{\min} = 6 + 0,006 (U - 45) \text{ m}$$

que para una línea de ± 500 kV resulta $D_{\min} = 8.73$ m

La línea de transmisión bifilar en corriente continua $\pm U$ presenta una caída de tensión que se determina fácilmente:

$$\Delta U = 2 \times r \times I \times l$$

$$P = I \times 2 \times U$$

$$\text{Pérdida} = 2 \times r \times I \times l \times I^2$$

La pérdida relativa es:

$$\frac{\text{Pérdida}}{P} = \frac{r \times l \times I}{U}$$

Siendo la resistencia del conductor $r = \text{resistividad} / \text{sección}$

Si la línea es monopolar de tensión U y siendo r_t la resistencia de las puestas a tierra, entonces:

$$\Delta U = (r \times l + 2 \times r_t) I$$

$$P = I \times U$$

$$\text{Pérdida} = (r \times l + 2 \times r_t) I^2$$

La pérdida relativa es:

$$\text{Pérdida} / P = (r \times l + 2 \times r_t) I / U$$

La tabla que sigue compara dos líneas de corriente continua para transmitir la misma potencia, con la misma tensión respecto de tierra en soluciones bipolo y monopolo.

Tabla – Valores comparativos de línea de corriente continua

Cálculo de la línea		Bipolo	Monopolo
Longitud	km	500	500
Potencia	MW	1000	1000
Tensión	kV	500	500
Corriente	A	1000	2000
densidad de corriente	A/mm ²	1	1
Resistividad	ohmm mm ² /km	30	30
Sección	mm ²	1000	2000
Resistencia	ohm/km	0.03	0.015
R	ohm	15	7.5
Resistencia tierra	ohm		2
D U	V	30000	19000
Pérdidas	kW	30000	38000
pérdidas relativas	%	3	3.8
D U/U	%	3	3.8

Para una misma potencia se puede observar la corriente que en cada línea se debe transmitir, la sección que se determina a partir de cierta densidad de corriente (que debe ser económica) y la consecuencia son las pérdidas, y la caída de tensión.

Este ejemplo de líneas en corriente continua es muy fácil de comprender, pero se observa que no se ha hecho un análisis equivalente al hablar de las líneas de corriente alterna, debido a que las relaciones son mucho más complejas. De todos modos a continuación intentamos algún avance comparativo.

Largas líneas aéreas de corriente alterna

Comencemos con una advertencia, trataremos someramente el tema con una visión muy simplificada. Supongamos una línea de longitud l , que transmite potencia P (sólo activa) a la tensión U (compuesta trifásica), la corriente será:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U}$$

Fijamos una densidad de corriente económica d , una resistividad r , queda determinada la sección del conductor de fase s , la resistencia por unidad de longitud y la resistencia de una fase de la línea R , las pérdidas son:

$$\text{Pérdidas} = 3RI^2$$

Una característica de la línea es su reactancia X por fase, la potencia reactiva requerida por la línea que transmite cierta corriente es:

$$Q_L = 3XI^2$$

Tabla – Valores comparativos de línea de corriente alterna

Cálculo de la línea de CA		Trifásica 1	Trifásica 2
Longitud	km	500	500
Potencia	MW	1000	100
Tensión	kV	500	500
Corriente	Amper	1154	115
Densidad	A / mm ²	1	
Resistividad	ohm mm ² /km	30	30
Sección	mm ²	1154.7	1154.7
Resistencia	ohm/km	0.0259	0.0259
R	ohm	12.99	12.99
Pérdidas	kW	51961.5	519.6
Pérdidas relativas	%	5.19	0.51
X _{reactancia}	ohm/km	0.3	0.3

X	ohm	150	150
Q _L	MVAr	600	6
C	microF/km	0.01	0.01
Frecuencia	Hz	50	50
w C		3.1415 10 ⁻⁶	3.1415 10 ⁻⁶
Q _C	MVAr	392.69	392.69
Tensión pico	kV	408.24	408.24

Observamos que aunque tratamos de transmitir sólo potencia activa nos aparece en la línea la necesidad de aportarle potencia reactiva, esto no lo observamos en la transmisión en corriente continua (porque sólo analizamos la línea y no las conversoras).

La capacitancia por fase C de la línea genera potencia reactiva

$$Q_C = \omega C U^2$$

La tabla que sigue reúne los cálculos sugeridos para una línea de corriente alterna de características comparables al ejemplo antes desarrollado para corriente continua, se han fijado dos estados de carga de la línea, 1000 y 100 MW, para evidenciar como varía la potencia reactiva inductiva de la línea.

Observemos por último que para una determinada corriente las potencias Q_L y Q_C se igualan, dejemos aquí el tema conservando la idea de la mayor complejidad del comportamiento del sistema de transmisión en corriente alterna.

Comparación entre transmisión en corriente alterna y continua

Es difícil hacer una comparación entre una transmisión en corriente alterna y una en continua, para hacer una comparación completa se deben tener en

cuenta muchos componentes, en particular en el sistema de corriente alterna los reactores derivación de la línea, y en el sistema en corriente continua las estaciones convertoras, y transformadores de ambos extremos.

Reduciendo la comparación a las solas líneas, se debe fijar una misma tensión máxima hacia tierra para ambos sistemas, en este caso si adoptamos 525 kV en corriente alterna corresponderá 428 kV en corriente continua, y calculando sección total y pérdidas se observa que la línea de corriente continua tendrá solo el 70% de la sección total y pérdidas correspondientes a la línea de corriente alterna, menor sección significa menos inversión, menores pérdidas son menor costo de operación... hasta aquí hemos llegado, proponemos al estudiante que retome el tema cuando tenga más elementos de diseño.

Repitamos una advertencia, estos últimos temas los hemos visto con hipótesis simplificativas drásticas, a fin de transmitir una idea simple, hemos simplificado el problema de la transmisión en demasía... frecuentemente este es un buen camino para encarar problemas de ingeniería, primero con una visión extremadamente simplificada... pero no quedarse en ella... sucesivas visiones más complejas sirven para mejorar y perfeccionar la solución buscada.

Aplicaciones - transmisión en alta tensión para el ferrocarril

Para la transmisión ferroviaria, fue ventajosa la alta tensión continua porque (con una misma tensión) al ser menores las caídas de tensión (por no presentar caída reactiva), el radio de acción de la línea de contacto es mayor, en consecuencia se requieren menos puntos de alimentación para lograr alimentar los trenes.

La alimentación con tensiones alternas de 25 kV es la solución que compite con este sistema en corriente continua en 6 kV o más.

Filtros de armónicas

La conversión de alterna a continua y continua a alterna se hace con equipamiento electrónico, y aparecen en consecuencia fenómenos de armónicas que deben ser controlados, se debe completar el sistema con filtros para contener las armónicas.

Los filtros más simples están formados por un reactor en serie con un capacitor, a veces también hay un resistor en serie, en otros casos el reactor tiene un resistor en paralelo, cada combinación presenta distinto comportamiento, y ventajas que deben ser analizadas en cada particular aplicación.

CAPITULO 3

PROCESOS ELECTROMAGNETICOS OSCILATORIOS Y DE CHOQUE

Introducción

La construcción de instalaciones eléctricas requiere adquirir equipamientos eléctricos que deben seleccionarse entre los existentes en el mercado, en general no se construyen equipos especialmente para una dada instalación, por lo tanto se inicia desarrollando estudios que tienden a fijar las características que deberían tener estos equipos, y se verifican que éstas características entren dentro de los rangos normales de producción.

Los estudios en cuestión (con distintas finalidades) reciben distintos nombres, y en ellos se trata de representar el funcionamiento normal del sistema eléctrico

(flujo de potencia que determina las corrientes nominales), las condiciones de corrientes de falla (estudios de cortocircuito para determinar la capacidad de interrupción y los esfuerzos), los estados de sobretensión (estudios transitorios para determinar los niveles de aislamiento).

Sobretensiones y sistemas de puesta a tierra

En los sistemas eléctricos, por distintas causas se presentan sobretensiones, que pueden producir colapsos de la aislación y en consecuencia daños y/o pérdida del servicio.

La aislación debe ser elegida económicamente, sobredimensionarla implica aumentos de tamaño y peso de los cables y equipos, aumento de la resistencia al flujo de calor (en consecuencia disminución de las densidades de corrientes y del aprovechamiento), factores que se reflejan todos en mayores costos.

La aislación debe estar dimensionada para soportar las sollicitaciones que efectivamente se presentarán en servicio; resumiendo el párrafo anterior un ulterior sobredimensionamiento no implica beneficio alguno.

Las sobretensiones que se presentan dependen de factores externos a la red, de características de componentes de la red, y de características de diseño de la red.

El problema debe ser correctamente planteado desde el comienzo del diseño, en forma tal de lograr que las sobretensiones sean mínimas, evitando configuraciones de la red que puedan causar sobretensiones, eligiendo componentes adecuados por sus parámetros y formas de operación, previendo y proyectando las protecciones oportunas.

Los valores de sobretensiones que se presentan están relacionados con las características de puesta a tierra del centro estrella del sistema eléctrico, pudiendo éste estar conectado rígidamente a tierra o aislado o en condiciones intermedias conectado a tierra a través de una impedancia (resistencia o reactancia).

Origen de las sobretensiones

Históricamente las sobretensiones se clasificaron por su origen, externas e internas, las primeras debidas a rayos, descargas atmosféricas y las segundas debidas particularmente a maniobras en la red.

Las solicitaciones en los equipamientos de un sistema eléctrico se originan por diversas causas y su estudio depende mucho del tipo de evento investigado.

Se hacen estudios de sobretensiones, cuyo objetivo es obtener los valores correspondientes a los fenómenos transitorios, resultados que se utilizan para la especificación de los equipos.

Estos estudios se pueden realizar con programas de computadora que incluyen modelos para cálculo numérico que resuelve las ecuaciones diferenciales que corresponden al sistema eléctrico (EMTP ElectroMagnetic Transient Program – ATP Alternative Transient Program).

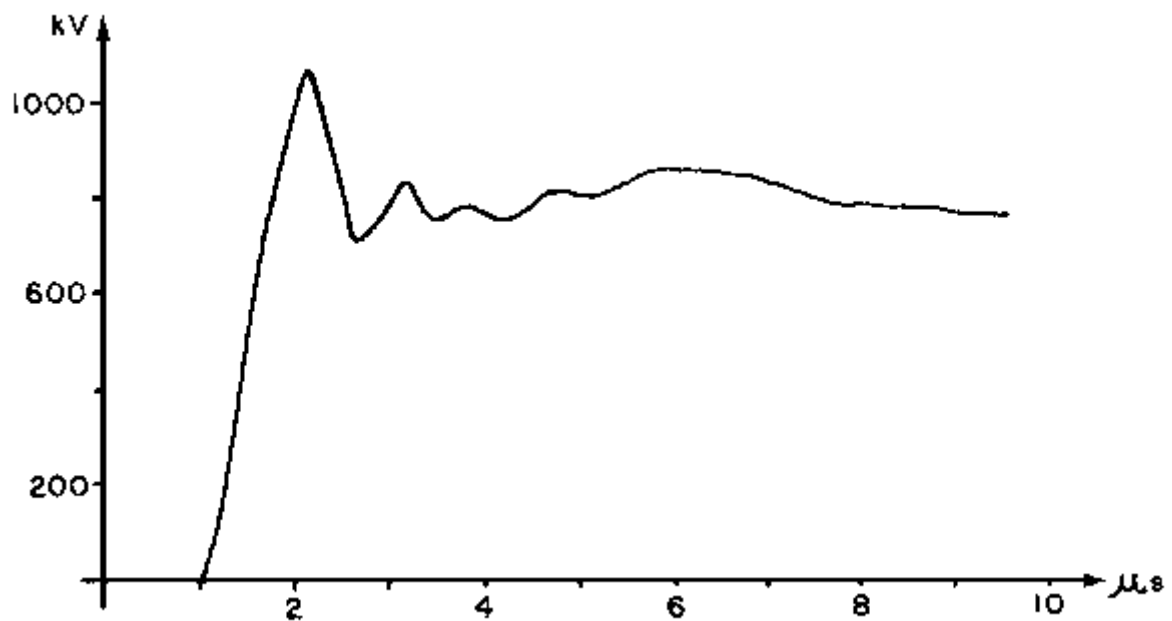
Anteriormente estos estudios se realizaban mediante modelos a escala, simuladores analógicos donde están representados los elementos del sistema eléctrico (TNA Transient Network Analyzer).

Ya hemos visto que las sobretensiones pueden ser clasificadas por su origen en forma muy amplia en dos grupos: sobretensiones externas y sobretensiones internas, respectivamente. Esta clasificación es meramente académica y no

tiene en cuenta los intereses relacionados con la especificación de los equipamientos, siendo más adecuada otra clasificación, asociada con el tiempo de duración y el grado de amortiguamiento de las sobretensiones. Basándose en este concepto, por su forma y duración, se clasifican en sobretensiones de tipo atmosférico, sobretensiones de tipo de maniobra y sobretensiones temporarias.

Las sobretensiones atmosféricas están caracterizadas por un frente de onda de algunos microsegundos a pocas decenas de microsegundos. Una sobretensión de cualquier otro origen, que tenga características de frente de onda similares a las utilizadas para definir las sobretensiones atmosféricas, también se clasifica como sobretensión atmosférica.

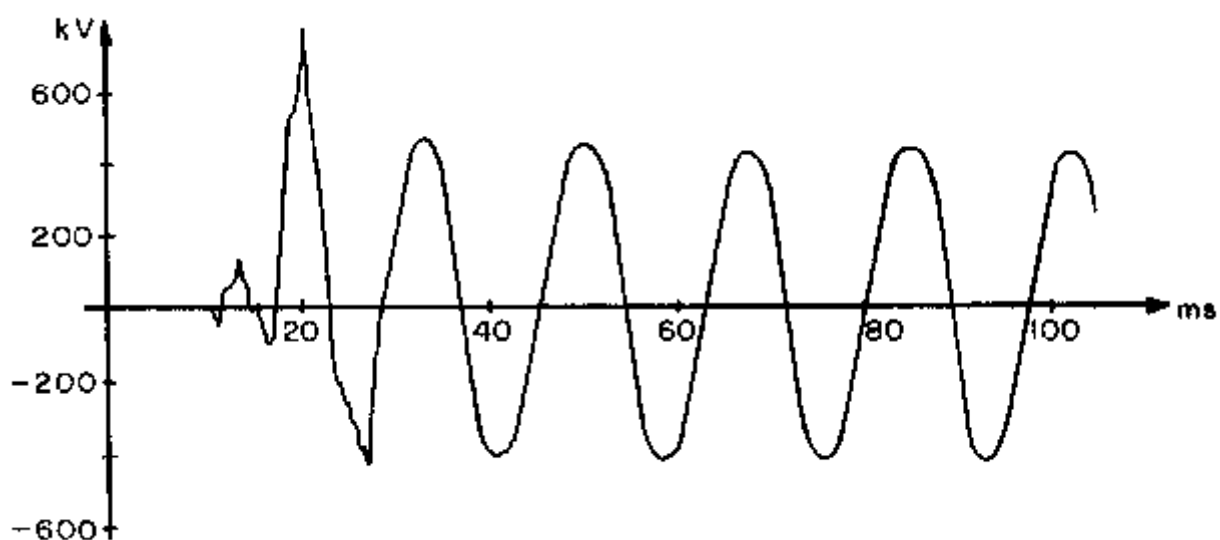
La [figura 3.1](#) representa un ejemplo típico de una sobretensión atmosférica, obtenida en bornes de un transformador de un estudio de inyección de sobretensiones en una subestación, incluyéndose, por lo tanto, el efecto de los descargadores que limitan la amplitud de la sobretensión.



Se puede observar que la tensión resultante es unidireccional y con un pico máximo bien definido.

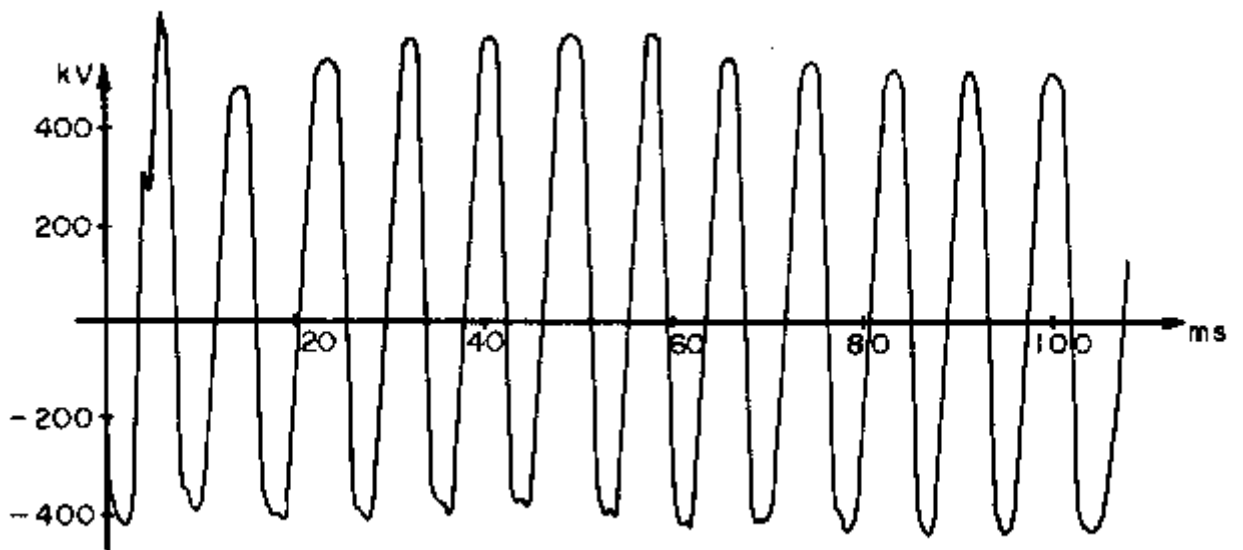
Las sobretensiones de maniobra resultan, principalmente por la apertura y cierre de circuitos y de fallas en el sistema eléctrico.

La [figura 3.2](#) representa un ejemplo típico de una sobretensión de maniobra fuertemente amortiguada, que corresponde a una simulación de energización de una larga línea de transmisión (alimentada de un extremo y abierta en el otro extremo).



La [figura 3.3](#) muestra un ejemplo típico de una sobretensión de maniobra oscilatoria, debida a una simulación de reconexión de carga en el sistema.

Los ejemplos más comunes de eventos que provocan sobretensiones de maniobra son energización y reconexión de líneas de transmisión, ocurrencia de fallas con desplazamiento del neutro y eliminación de fallas, energización de transformadores y reconexión de carga.



Las sobretensiones temporarias se caracterizan, principalmente, por su larga duración y picos de amplitud reducida. Están asociadas comúnmente a maniobras de reconexión de carga, ocurrencia de fallas con desplazamiento de neutro y energización de líneas en vacío.

Las tres categorías de sobretensiones discutidas hasta aquí son, generalmente, objeto de estudios para la determinación de las sollicitaciones de los equipamientos de un sistema eléctrico.

Causas y efectos

En un sistema trifásico, equilibrado, la tensión hacia tierra es la tensión de fase

$$E_{\text{fase}} = \frac{E_{\text{línea}}}{\sqrt{3}}$$

Se denomina sobretensión a toda tensión, función del tiempo, que supera el valor de cresta de la tensión más elevada, que puede presentarse normalmente.

Una sobretensión fase-tierra se refiere al valor de cresta de la tensión simple

$$U_m \sqrt{2} / \sqrt{3}$$

(valor de pico obtenido del valor eficaz de la tensión simple).

Una sobretensión entre fases en valor relativo se indica en la forma

$$K \sqrt{3}$$

y se refiere también a

$$U_m \sqrt{2} / \sqrt{3}$$

(se usa la misma referencia que para la tensión simple, y se pone en evidencia el factor

$$\sqrt{3}$$

para que el factor de sobretensión sea comparable a los fenómenos de las tensiones simples).

Las causas de sobretensiones pueden ser varias, y se enumeran a continuación las más frecuentes.

Los cables de guardia o los conductores de fase pueden ser afectados por descargas atmosféricas, en algunos casos la descarga incide en los cables de guardia y se propaga (arco inverso) a los conductores.

Estas descargas son causa de ondas de sobretensión que se desplazan por las líneas del sistema, alcanzando las estaciones eléctricas y solicitando los elementos de la red.

Las ondas de sobretensión, llamadas ondas viajeras se reflejan y refractan en los puntos de discontinuidad de la impedancia de las líneas variando su forma.

Una nube cargada produce sobretensiones estáticas de inducción capacitiva, y al desplazarse o descargarse la nube la sobretensión en la línea se desplaza en forma análoga a las sobretensiones atmosféricas.

Efectos análogos al frotamiento, debidos al viento (seco) producen cargas electrostáticas en las líneas.

Pueden producirse contactos entre una parte del sistema de tensión inferior, con un sistema de tensión más elevada, y en consecuencia se presentarán peligrosas sobretensiones en el sistema de tensión inferior.

Las vibraciones pueden producir condiciones de falla intermitente (cortocircuitos repetidos) y causar sobretensiones de importancia por carga de capacitancias.

Las conexiones en autotransformador en casos de falla del circuito, del lado alimentación, implican sobretensiones del lado carga que pueden ser inadmisibles.

Capacitancias e inductancias pueden producir condiciones de resonancia y en consecuencia sobrecorrientes y/o sobretensiones, como generalmente hay núcleos de hierro en muchos casos se pueden presentar fenómenos de ferroresonancia.

Las maniobras de interrupción, son origen de sobretensiones, de mayor o menor importancia según sea la forma de interrumpir del aparato, y las características del circuito.

El establecimiento de corriente en ciertos circuitos, el restablecimiento de corriente (durante una interrupción) pueden dar lugar a sobretensiones.

Las interrupciones bruscas de cargas, crean también sobretensiones en determinados puntos del sistema.

Acabamos de clasificar, en una forma detallada, por su origen las sobretensiones, en cambio analizando su duración, se puede decir que son

transitorias (de breve duración), temporarias (de duración importante) o permanentes.

Analizando su forma se reconocen como impulsivas o periódicas (de frecuencias bajas).

La clasificación por las características de duración y forma es particularmente importante porque la normalización de ensayos, cuyo objeto es demostrar que los equipos pueden soportar estas solicitaciones, se basa precisamente en dicha clasificación.

Así se justifican los ensayos con sobretensiones:

- de frecuencia industrial, que simulan condiciones originadas en contactos, desconexión de cargas, resonancia, etc.
- de maniobra, debidas a esta causa, y que se simulan con impulsos de tensión que crecen en tiempos de los 100 microsegundos y duran del orden de los 1000 microsegundos.
- de impulso, que simulan descargas atmosféricas que crecen en tiempos del orden de 1 microsegundo y duran del orden de 50 - 100 microsegundos.

Las solicitaciones que estas diferentes sobretensiones producen son totalmente distintas, y en consecuencia los aparatos deben tener características adecuadas para soportarlas.

Es importante que el equipamiento no sufra daños ni envejecimientos prematuros por causa de estas sobretensiones.

La amplitud de las sobretensiones está especialmente ligada a la conexión más o menos efectiva del neutro del sistema a tierra.

Si el sistema está aislado de tierra, en general las tensiones son elevadas ya que no existe posibilidad de descarga de las capacitancias de secuencia cero, en estos casos se pueden alcanzar tensiones elevadas por causas estáticas.

En casos de neutro aislado también los contactos con circuitos de tensión superior son muy peligrosos ya que no implican falla del sistema de tensión superior, y su desconexión.

En el diseño se deben evitar las condiciones que produzcan situaciones de peligro, de contactos, de arcos intermitentes, se deben controlar que las sobretensiones por condiciones transitorias (desconexión de las cargas, etc.) por maniobras, sean moderadas.

Las sobretensiones de origen interno están ligadas a la tensión nominal del sistema a través de algún coeficiente que depende de la puesta a tierra.

En cambio, las sobretensiones de origen externo tienen una amplitud que no depende de la tensión nominal del sistema, al menos en principio.

En su propagación por las líneas la amplitud de las sobretensiones queda limitada por fenómenos de efecto corona, o por descargas en determinados puntos.

Para limitar el valor de estas sobretensiones, y proteger al sistema de las solicitudes debidas a descargas atmosféricas se instalan descargadores.

A veces a los descargadores se les asigna la función de drenar también las sobretensiones de maniobra.

La variedad de situaciones, y la gran cantidad de parámetros que definen las características de interés, ha evidenciado particularmente para estos temas, conocidos como coordinación de la aislación, la importancia de la normalización, veamos estos conceptos partiendo de lo general.

Normas - Generalidades

Normalización y unificación no son conceptos nuevos, sino se remontan a los orígenes de las primeras comunidades humanas en las cuales, casi inconscientemente los hombres comenzaron a utilizar un lenguaje común (primeras unificaciones) y luego normas comunes de convivencia (primeras normalizaciones).

Hoy día en el campo industrial a las palabras "normalización" y "unificación" se atribuye el siguiente significado:

Normalización: se entiende el conjunto de aquellos criterios de índole general en base a los cuales deben ser proyectadas, construidas y ensayadas las instalaciones, las máquinas, los aparatos o los materiales objeto de las normas mismas, a fin de garantizar la eficiencia técnica y la seguridad de funcionamiento.

Unificación: se entiende el conjunto de prescripciones que fijan para la máquina, el aparato o el material objeto de unificación una estrecha gama de tipos constructivos y de dimensiones entre los infinitos posibles a fin de reducir los costos, de facilitar el aprovisionamiento de los repuestos y de permitir la reducción de las reservas en almacén.

Normalización y unificación liberan a las iniciativas de todas aquellas manifestaciones irracionales que no podrán producir ventajas ni a la comunidad, ni a sus mismos promotores. Tales iniciativas pueden requerir algún sacrificio a la libertad individual, pero este sacrificio debe ser evaluado en función de las ventajas de carácter colectivo que se consiguen.

La normalización en el campo electrotécnico

En campo internacional los trabajos de normalización electrotécnica son competencia del Comité Electrotécnico Internacional (IEC International Electrotechnical Commission).

Para obtener su finalidad el IEC publica recomendaciones internacionales (muchas de las cuales con el nombre de Normas Internacionales) que expresan dentro de los límites más amplios posibles un acuerdo internacional sobre los argumentos tratados.

Tales recomendaciones están destinadas a ayudar a los Comités Nacionales en la elaboración de las normas del propio país, de manera de armonizar las prescripciones técnicas de las distintas naciones y facilitar los intercambios de material eléctrico.

Existe además la Commission International de Reglementation en vue de l'approbation de l'Equipment Electrique (CEEI).

Este organismo esta limitado a países europeos y ha asumido la función de formular prescripciones precisas para la construcción del material eléctrico de uso común generalmente adquirido y utilizado por usuarios inexpertos, a fin de proteger personas y cosas de los riesgos que puedan derivar del uso de material eléctrico de calidad deficiente.

En Argentina el órgano oficial que provee a la normalización es el IRAM Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.

Existe también una Asociación Argentina de Electrotécnicos que publicó normas y reglamentos aplicables a instalaciones.

El Comité Electrotécnico Argentino CEA es el corresponsal del IEC en Argentina y se ocupa de distribuir las normas IEC y de participar en las discusiones en campo internacional.

A modo de ejemplo veamos como es la normalización electrotécnica en Italia:

El órgano oficial que en Italia provee a la normalización en el campo eléctrico es el Comité Electrotécnico Italiano CEI fundado en 1909 por la Asociación Electrotecnica Italiana AEI.

Las atribuciones del CEI son las siguientes:

Estudiar todos los problemas de carácter científico y técnico que se refieren a los materiales, las máquinas y los aparatos eléctricos como también la ejecución de las correspondientes instalaciones.

Compilar las normas que conciernen la producción, la instalación, el ensayo, y el servicio de los materiales, máquinas e instalaciones antes citadas.

Asegurar en el ámbito de la propia competencia la conexión con análogos entes extranjeros e internacionales y con el ente nacional de unificación.

La unificación en el campo electrotécnico

El órgano que tiene la función de unificar en Argentina también es el IRAM.

Sigamos comentando el caso Italiano, que presenta particularidades distintas.

El órgano cuya función es la unificación dimensional en el campo electrotécnico en Italia es el UNEL (Unificazione Elettrotecnica)

El UNEL tiene los siguientes objetivos:

Técnicos: aligerar el trabajo de las oficinas de proyecto de las fábricas, mayor rapidez de construcción de los materiales.

Organizativos: una más racional producción y en consecuencia un notable ahorro de tiempo en la ejecución de los trabajos.

Económicos: perfeccionamiento del proceso productivo, consiguiente reducción de costos, mejoramiento de la calidad de los materiales, expansión de las ventas.

El órgano nacional que en Italia se ocupa actualmente de unificación en campo general excluido el eléctrico es el UNI (Ente Nazionale Unificazione).

Los órganos de Control

En la Argentina el IRAM también se ocupa de la función de control, utilizando los servicios de distintos laboratorios y en particular de los laboratorios de los fabricantes.

La liberación de trabas aduaneras, y cambios comerciales que caracterizaron nuestro mundo de fin de siglo, generaron una invasión de productos muy económicos pero de baja calidad, que cumplen algunas normas en forma restringida (en rigor debe decirse no cumplen).

La iniciativa de evitar la penetración en el mercado de estos productos, particularmente destinados a los usuarios comunes que nada saben de calidad y normas, ha delegado a la Aduana la función de vigilancia.

Así es que la importación de productos electrotécnicos debe ser acompañada de declaración de normas que los productos satisfacen, y eventualmente con intervención de ciertos institutos la correspondiente verificación.

Es obvia la buena intención de esta iniciativa, y la dificultad de una ágil implementación en el breve plazo.

En los países altamente industrializados existen institutos que se ocupan de la marca de calidad, en Italia por ejemplo:

Instituto Italiano del Marchio di Qualita

Este instituto tiene la función específica de garantizar la calidad, y en modo particular la seguridad del material y de los aparatos eléctricos con referencia a los usuarios, para eliminar del mercado el material deficiente.

Controla si los productos para los cuales es solicitado el uso de la marca corresponden a lo prescrito por las normas CEI y las tablas UNEL; concede al fabricante el uso de una marca para aquellos productos de los cuales ha asegurado la conformidad; vigila además que estos conserven en el curso de la producción y en el mercado aquellas características técnicas que le valieron para la concesión.

Para comprobar la calidad y características de los productos, es necesario ensayarlos, en Italia existe entre otros institutos el CESI, que se ocupa de realizar las pruebas.

Centro Eletrotecnico Sperimentale Italiano (CESI)

La finalidad del CESI es poner a disposición de la industria un Laboratorio capaz de realizar pruebas de carácter eléctrico que sirvan tanto para el desarrollo de aparatos prototipo como para emitir certificados oficiales de los ensayos realizados.

Este organismo trabaja especialmente en el campo de tensiones y potencias muy superiores a las del Instituto Italiano del Marchio di Qualita.

Las normas de Ley sobre las instalaciones eléctricas

Las leyes que se ocupan directamente de estos problemas aun no han surgido con solidez suficiente en nuestro país.

Algunas leyes hacen referencia a condiciones generales de seguridad, en particular debe destacarse la ley de Higiene y Seguridad en el trabajo que cita el reglamento de la AEA.

Hemos comentado el intento de impedir la penetración en el mercado desde el exterior de productos no cubiertos por normas, la exigencia del cumplimiento de la norma IRAM es la condición de calidad que se está difundiendo en el país.

La aislación y las normas

Los conceptos ligados a las normas y unificaciones tratados deben servir de introducción al análisis de las características de aislación que nos interesan examinar para los sistemas y aparatos eléctricos.

La razón es que se ha desarrollado un enorme trabajo de normalización desde que se entendió la enorme importancia de las características de la aislación en los sistemas eléctricos.

Sin duda la aislación es uno de los temas que más afecta el costo de las instalaciones eléctricas y condiciona los progresos.

Comparación de las sobretensiones

La [figura 3.4](#) muestra una comparación entre la duración de los distintos tipos de sobretensiones que se presentan en el sistema eléctrico.

- La tensión máxima que puede presentarse en modo permanente, define la tensión nominal de los equipos.
- Las sobretensiones temporarias, resultan de cambios de configuración de la red, y se presentan ante pérdidas de carga, resonancias, fallas a tierra. Su duración es del orden del tiempo de actuación de los reguladores o las protecciones.

El nivel de las sobretensiones depende de la configuración de la red y del punto considerado, y en general es tanto menor cuanto más mallada es la red y cuantas más puestas a tierra de neutros se tengan.

- Las sobretensiones de maniobra se presentan ante los cambios bruscos de configuración de la red, asociadas a cierres y aperturas de interruptores o a fallas.

Se trata de rápidos transitorios, que dependen de la configuración de la red y de otras circunstancias que obligan a considerarlos aleatorios.

Se presentan por interrupciones de carga reactiva, de líneas de transformadores, por fallas, durante el cierre y el recierre, etc.

El valor de estas sobretensiones aumenta por la carga residual de las líneas, o por reencendidos durante las interrupciones.

- Sobretensiones atmosféricas se presentan particularmente en redes expuestas, ante fallas del blindaje dado por el hilo de guardia y la sobretensión puede provenir de una línea o producirse en la estación, que son las partes de la red eléctrica expuestas a la atmósfera.

La descarga en la estación es poco probable, por la superficie relativamente reducida, en comparación a la línea, es decir que es más probable que las sobretensiones lleguen desde las líneas.

La descarga puede ser directa pero un buen blindaje garantiza contra este efecto. También puede producirse contorneo inverso de la cadena de aisladores. Esta situación es muy poco probable que se presente en la estación por la baja resistencia de puesta a tierra de la misma, pero es probable en la línea (porque la resistencia de tierra de los soportes es elevada), y de esta

manera se originan las sobretensiones atmosféricas que penetran a la estación.

Las líneas de media tensión se realizan sin cables de guarda, este no es de utilidad debido a los aisladores que presentan baja aislación, respecto de las tensiones correspondientes a descargas atmosféricas, y toda descarga es acompañada por contorneo de los aisladores.

Las sobretensiones atmosféricas, conducidas por las líneas, sufren en la estación reflexiones múltiples que deben ser evaluadas a fin de comprobar que los valores alcanzados se mantienen bajo control.

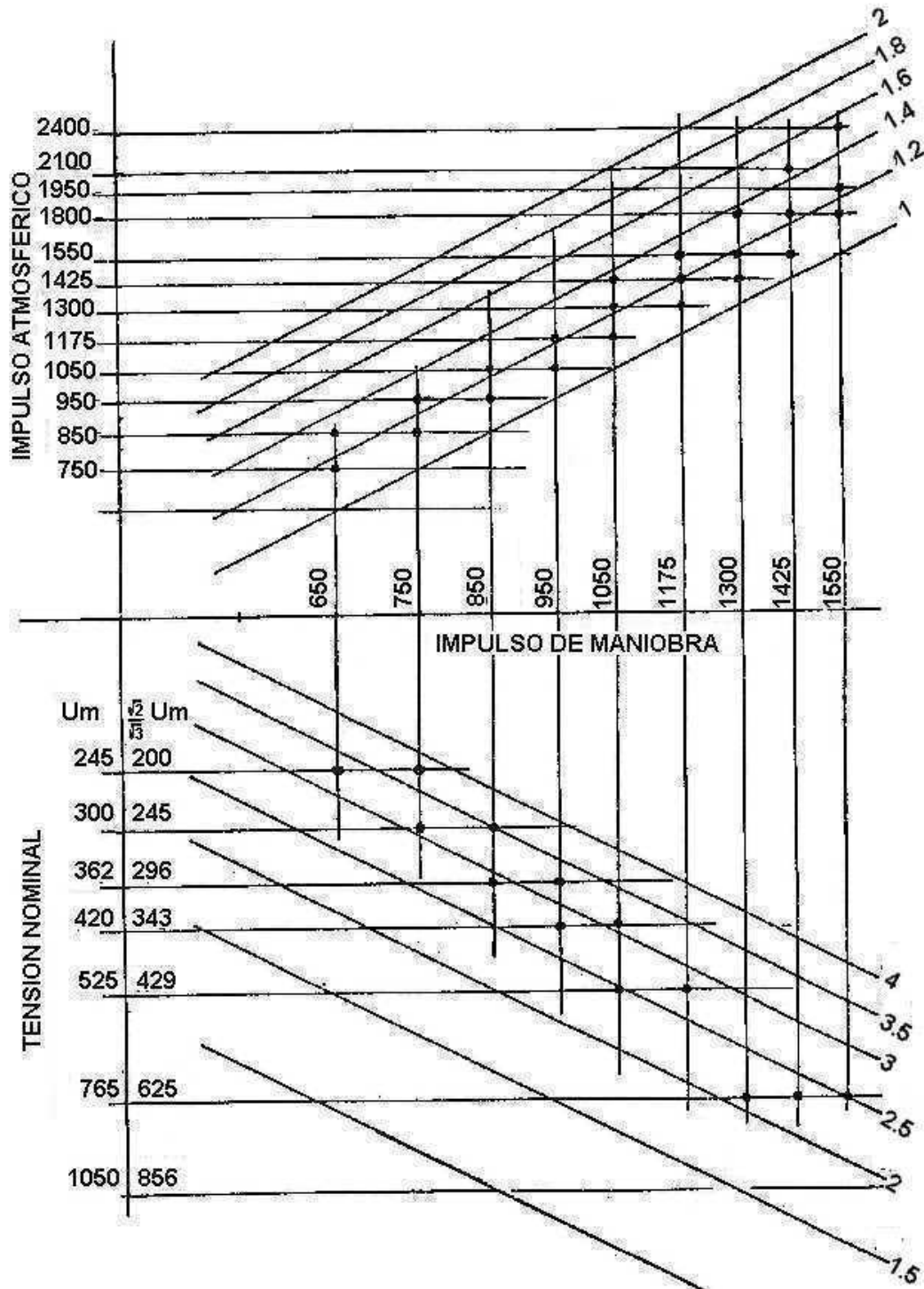
Mientras que las sobretensiones atmosféricas afectan una sola fase, o afectan a todas las fases en forma similar, las sobretensiones de maniobra afectan a dos o las tres fases simultáneamente; es entonces importante el estudio de su efecto sobre la aislación fase-fase.

Cada punto del sistema eléctrico se caracteriza por distintos valores de sobretensiones de los distintos tipos, modernamente estos valores se definen en forma estadística.

Las sobretensiones temporarias en cambio no pueden ser drenadas por su excesiva duración.

Los valores que deben soportar las aislaciones se eligen entre ciertos valores normales coordinados y propuestos por las normas IEC y que se observan en la [figura 3.5](#) destacados por un punto que muestra la coordinación posible entre tensiones máxima (y normal), sobretensiones de maniobra y sobretensiones atmosféricas.

NIVELES DE AISLACION NORMALES

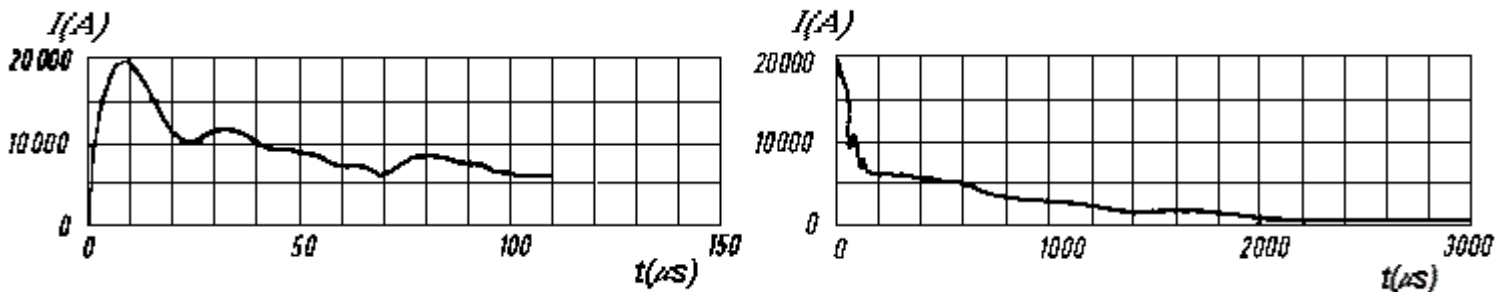


Características de las sobretensiones atmosféricas

La observación ha demostrado que la corriente debida a los rayos presenta en cada caso características distintas. El único elemento común a todos los rayos

es la forma de la corriente: no es oscilatoria, es unidireccional es decir de una única polaridad.

El comportamiento típico de la corriente de un rayo se indica en la [figura 3.6](#).



En la onda de corriente se pueden distinguir:

el frente, lapso que va desde el inicio de la onda a su valor de pico;

la cola, parte que sigue al frente.

En general las magnitudes características de la onda de corriente se encuentran dentro de los siguientes límites:

Duración del frente: 0.5 a 20 m s;

Duración del hemivalor en la cola: 15 a 90 m s;

Duración de la cola: 300 a 300000 m s

La amplitud de la corriente de descarga alcanza sólo en un pequeño porcentaje valores del orden de 100 a 150 kA, en el 80% de los casos la corriente de descarga es inferior a 40 kA.

La onda de corriente está relacionada con la onda de tensión a través de la impedancia que ven en su avance.

Propagación de las sobretensiones atmosféricas

En el caso de líneas aéreas la velocidad de propagación alcanza valores alrededor de 300 m/m s, es decir prácticamente la velocidad de la luz, mientras que la impedancia característica

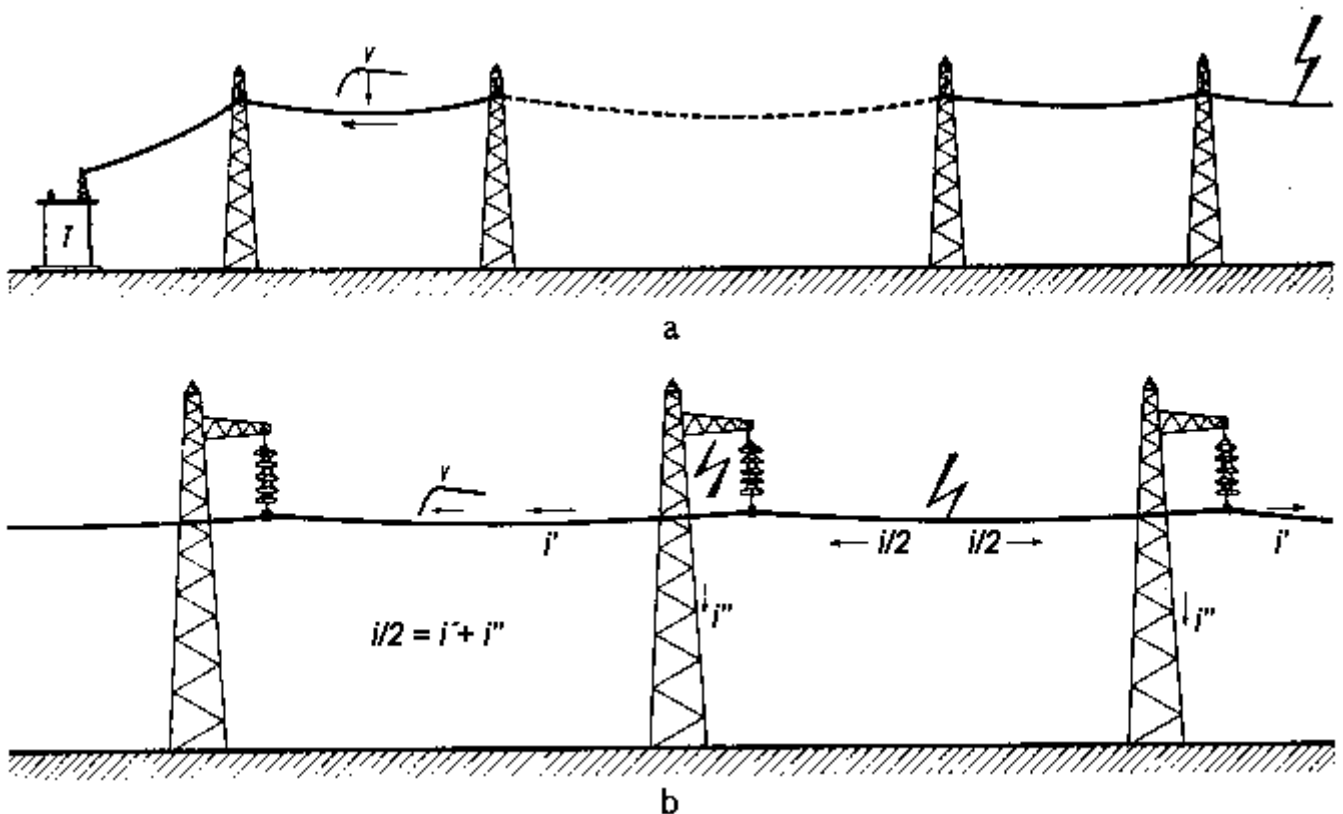
$$Z = \sqrt{l/c}$$

(Donde l y c son la inductancia y la capacidad por unidad de longitud) es un valor bastante constante alrededor de 400 a 600 W.

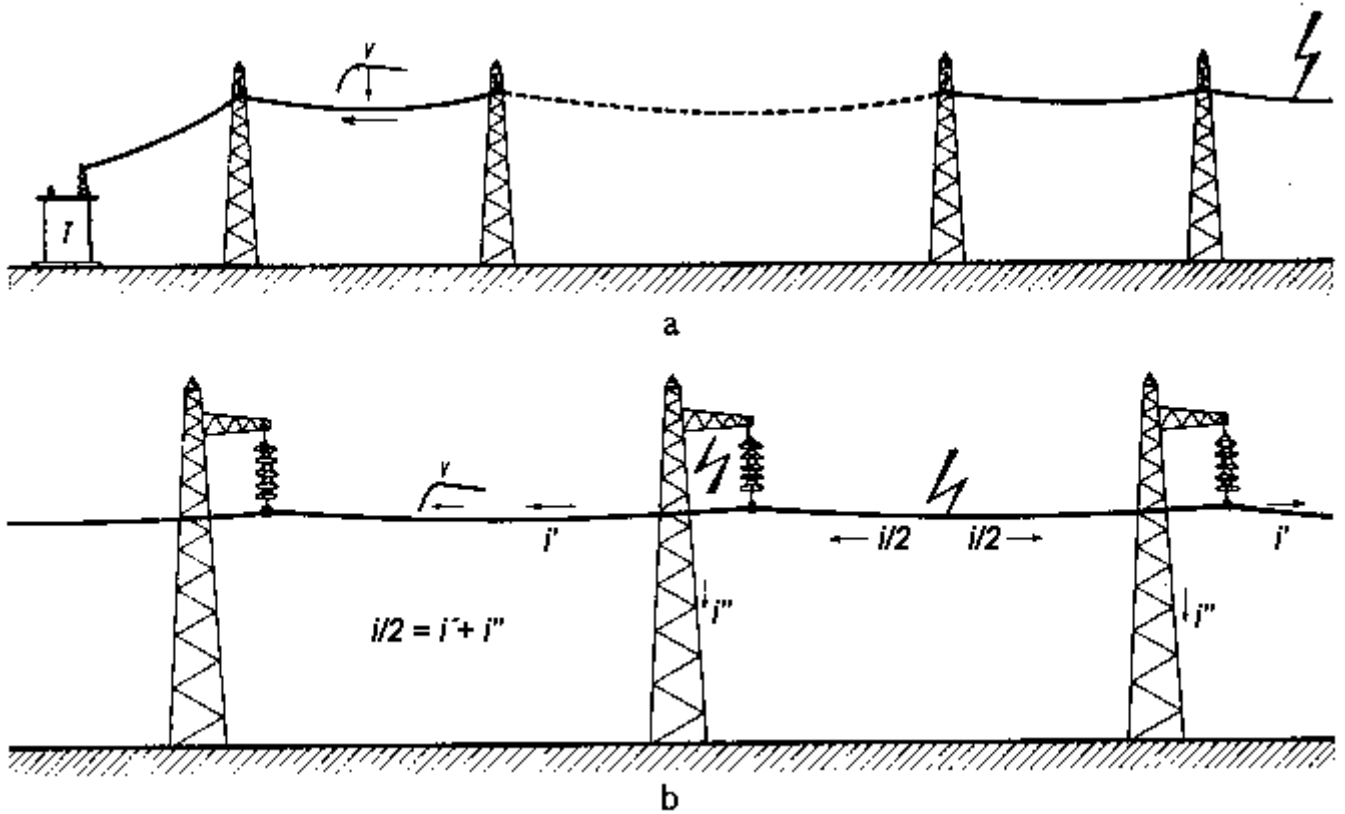
En el caso de cables la velocidad de propagación resulta de 150 a 160 m/m s y la impedancia característica alcanza valores más bajos, entre 30 a 50 W .

El comportamiento del fenómeno se puede sintetizar en dos casos que dependen de lo que se produce en el momento en que la sobretensión alcanza la primera cadena de aisladores:

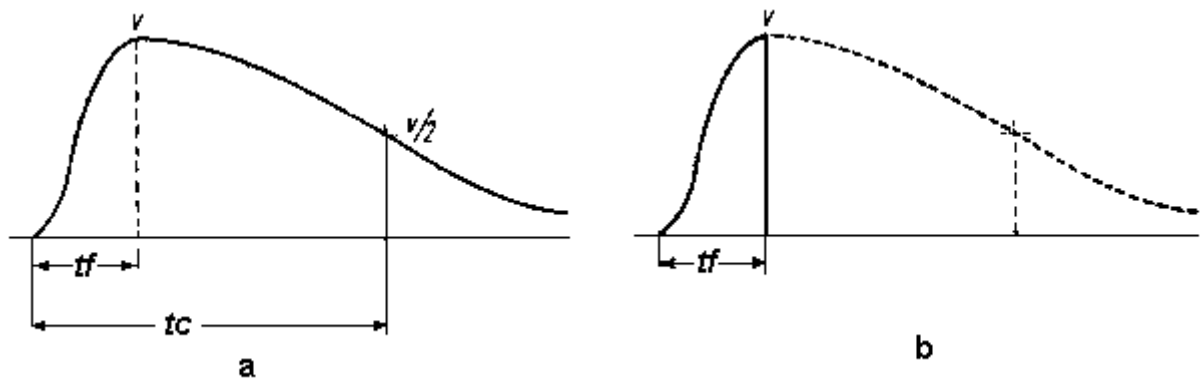
si la amplitud de la sobretensión es menor de la que provocaría un arco eléctrico en la cadena de aisladores, la onda se propaga a lo largo de la línea manteniendo su forma y termina alcanzando los aparatos que se encuentran en la extremidad de la línea [\(figura 3.7a\)](#).



si la sobretensión alcanza una amplitud tal de provocar el arco en la cadena de aisladores, la corriente del rayo se descarga hacia tierra y la onda de tensión se trunca. Esta onda truncada se propaga alcanzando los aparatos ubicados en la extremidad de la línea ([figura 3.7b](#)).

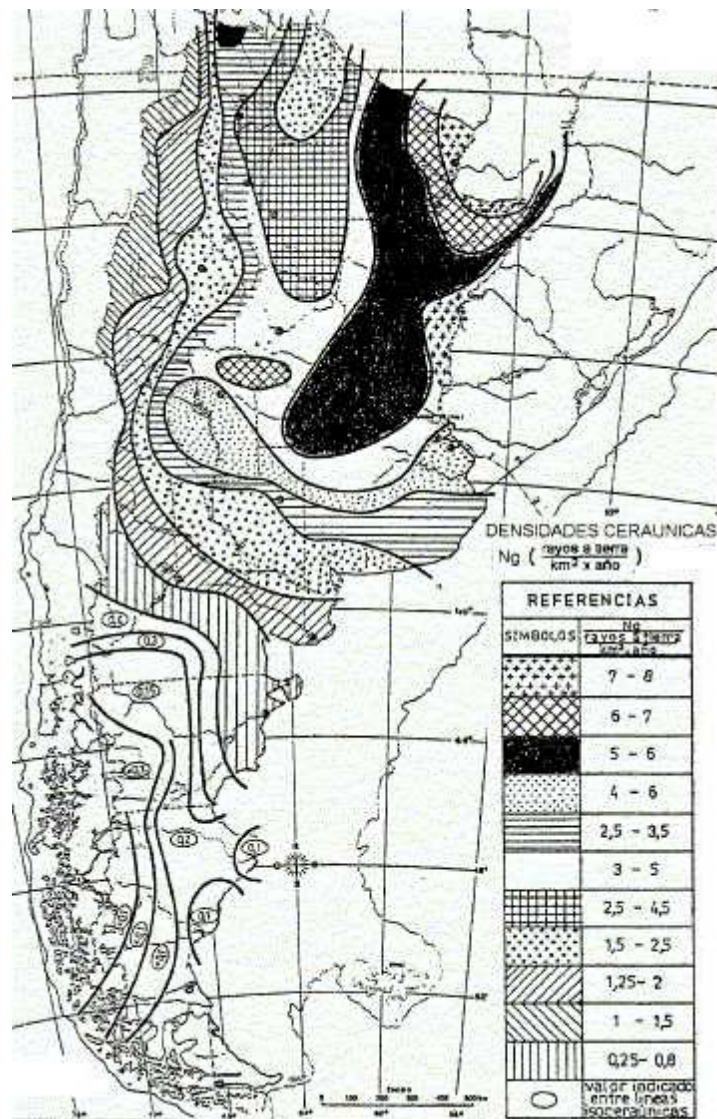


Los dos tipos de fenómenos considerados permiten individualizar dos formas típicas de sobretensiones de origen atmosférico que tienen características como se indica en la [figura 3.8a-b](#) onda plena y cortada respectivamente.



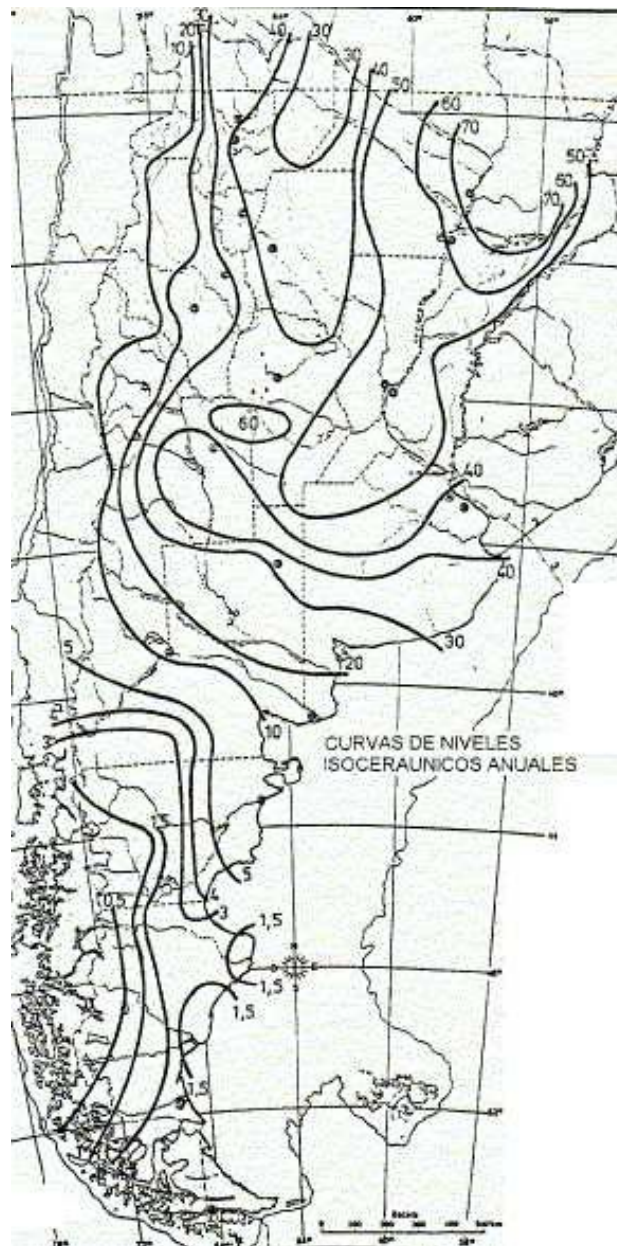
Estas sobretensiones pueden solicitar peligrosamente los aislantes de las máquinas (transformadores en particular) y de los aparatos con consecuencias a veces graves.

Un dato básico para el diseño de una línea de media y alta tensión frente a este tipo de sobretensiones, es la frecuencia de caída de rayos por unidad de superficie y por unidad de tiempo. Esta frecuencia se expresa en número de rayos por km² y por año, en la [figura 3.8c](#) se muestran las densidades ceraúnicas para las distintas zonas.



Este valor es función del nivel isoceráunico de la zona, que es el valor medio de los días de tormenta al año en dicha zona, en la [figura 3.8d](#) se muestras

estas curvas de niveles. Los niveles y densidades cerámicas continentales de la República Argentina se obtienen del Anexo B de la Norma IRAM 2184-1-1.

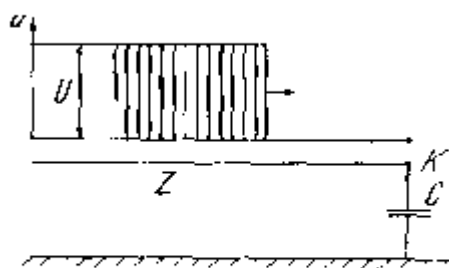


Deformación de las ondas por causa de bobinas y capacitores

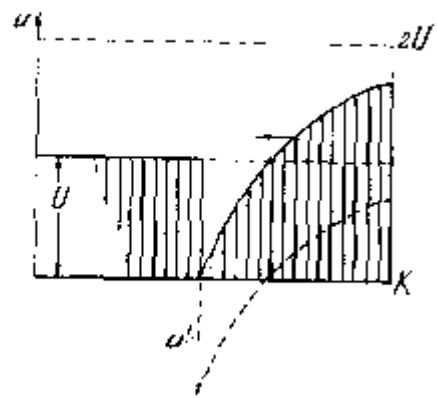
Una sobretensión que viaja hacia el extremo de una línea abierta se refleja, duplicando su valor, y retorna superponiéndose a la onda incidente.

Si en el extremo de la línea hay un capacitor la onda reflejada tiene un frente suavizado (crece exponencialmente) por el fenómeno de carga del capacitor

[figura 3.9.](#)



a



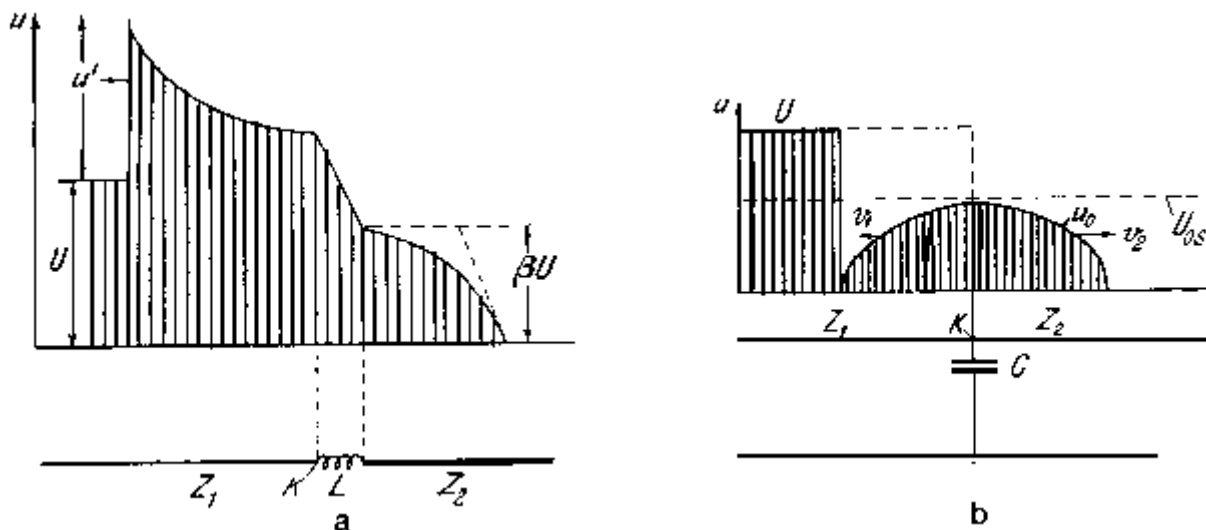
b

Una línea con intercalada una reactancia, o dos líneas de distintas impedancias separadas por una reactancia, esta ultima produce la modificación de la onda que se propaga, en parte reflexión de la onda con frente abrupto, y en cambio la onda que prosigue es con frente suave.

En el pasado se ponían bobinas con el objeto de proteger de sobretensiones viajeras los equipos ubicados a continuación, obsérvese que en cambio la línea es exigida con la onda reflejada de valor elevado.

Otra posibilidad es la existencia de un capacitor en un punto de la línea, la onda que continua se suaviza, y la reflejada también [figura 3.10](#).

La explicación de estos fenómenos requiere la resolución de las ecuaciones de propagación en líneas, por el momento es suficiente saber que estos estudios no son inmediatos ni simples.



Características de los aislamientos

Los aislamientos, de una forma general, abarcan las distancias en aire, los aislamientos sólidos y los inmersos en líquido aislante. De acuerdo con la finalidad a que se destinan, se los clasifica como aptos para uso externo o uso interno, conforme se los utilice en instalaciones sujetas a agentes externos, tales como humedad, polución, intemperie, etc., o no respectivamente.

Además de esa clasificación, de orden general existe otra de mayor importancia, desde el punto de vista del aislamiento, que es aquella que diferencia los aislamientos entre autoregenerativos y no regenerativos.

Los aislamientos autoregenerativos son aquellos que tienen capacidad de recuperación de su rigidez dieléctrica, después de ocurrida una descarga (ruptura dieléctrica) causada por la aplicación de una sobretensión.

En una subestación, los aislamientos autoregenerativos de los componentes pueden ser clasificados en dos grupos, dependiendo del tipo de utilización. El primer grupo es el de los aislamientos de los equipamientos, tales como: parte externa de los aisladores de los transformadores de potencia, reactores y transformadores de medición y parte externa de los equipamientos de

maniobra y de medición (interruptores, seccionadores y divisores capacitivos de tensión). Las partes internas de esos equipamientos, son de tipo no regenerativo y, por lo tanto, los equipamientos citados anteriormente poseen ambos tipos de aislamientos.

El segundo grupo de aislamientos es el que se refiere, solamente, a instalaciones propiamente dichas. En este grupo están incluidos los aislamientos en aire, correspondientes a la distancia conductor–estructura, barras–estructura, parte con tensión del equipamiento–estructura y conductor–conductor, los soportes aisladores, las cadenas de aisladores y las columnas aislantes de las bobinas de bloqueo. Todos estos son regenerativos.

Los aislamientos no regenerativos son aquellos que no tienen capacidad de recuperación de su rigidez dieléctrica, después de la ocurrencia de una descarga causada por la aplicación de una sobretensión. Habiendo la descarga dañado parcial o totalmente el aislamiento no regenerativo. Los elementos más importantes de una subestación están constituidos por este tipo de aislamiento, principalmente en su parte interna, como los transformadores de potencia y los reactores.

Principios básicos de coordinación del aislamiento

Se denomina coordinación del aislamiento al conjunto de procedimientos, utilizados principalmente para la especificación de los equipamientos, que tiene por objetivo fundamental la reducción, a nivel económico y operacional aceptable, de la probabilidad de fallas en los equipamientos y falta de suministro de energía, teniendo en cuenta las solicitaciones que pueden ocurrir en el sistema y las características de los dispositivos de protección.

Para efectuar la coordinación del aislamiento se actúa en dos direcciones:

Las máquinas y los aparatos se construyen de manera que sean capaces de soportar sin daños las solicitaciones provocadas por las sobretensiones de tipo atmosférico o de origen interno (maniobra) contenidas dentro de ciertos niveles, Con oportunos aparatos de protección (descargadores) y adoptando particulares criterios de construcción de las instalaciones, se trata de contener las sobretensiones dentro de los niveles tolerables para las máquinas y los equipos.

Las solicitaciones eléctricas se caracterizan por una magnitud y una duración y están, normalmente, asociadas a una probabilidad de ocurrencia.

Coordinación de la aislación (relación entre valores)

Con este nombre se trata la selección de la capacidad de soportar las distintas solicitaciones dieléctricas que deben tener materiales, equipos e instalación en función de las tensiones que pueden aparecer en las redes considerando también las características de los dispositivos de protección disponibles.

El enfoque tradicional de este problema consiste en evaluar la sobretensión máxima que se presenta en un punto de la red y elegir, con carácter ampliamente empírico, una tensión de ensayo que presente un margen de seguridad conveniente.

En muchos casos la elección del nivel de aislación es hecha simplemente en base a experiencia adquirida en redes análogas.

Una forma más elaborada de enfrentar el problema conduce a considerar el carácter de fenómeno aleatorio que tienen las sobretensiones.

Se trata entonces de llevar a un nivel aceptable desde el punto de vista de la economía y del servicio la probabilidad de que se presenten solicitudes que causen daños al equipo o afecten la continuidad del servicio.

No es económico realizar equipos y sistemas con grados de seguridad tales que permitan soportar sobretensiones excepcionales.

Se admite que aún en un material bien dimensionado puedan producirse fallas y el problema es entonces limitar su frecuencia teniendo en cuenta un criterio económico basado en costo y continuidad del servicio.

La coordinación de la aislación está esencialmente basada en limitar el riesgo de falla, en lugar de fijar a priori un margen de seguridad.

Debe reconocerse que los ensayos no permiten garantizar el 100 % de seguridad contra fallas.

La aislación puede ser externa, en aire atmosférico o de superficies en contacto con la atmósfera sometidas a la influencia de condiciones atmosféricas, polución, humedad, etc., interna, sólida, líquida o gaseosa, protegida de la influencia atmosférica.

La aislación externa puede ser para interior, protegida de la intemperie, o para exterior.

Se dice que una aislación tiene capacidad de regeneración cuando después de una descarga disruptiva recupera íntegramente sus características aislantes.

La capacidad de regeneración distingue fundamentalmente las aislaciones gaseosas, de las sólidas, una perforación del dieléctrico, para estas últimas, es un daño permanente, en cambio una descarga en gas (eventualmente en aire) una vez terminada, y transcurrido cierto tiempo, generalmente breve, no afecta las características de la aislación.

En consecuencia, mientras que las aislaciones en aire pueden fallar, las aislaciones sólidas no deben fallar; en otras palabras, los puntos débiles de la instalación deben tener capacidad de regeneración.

Las características de aislación de un aparato están ligadas a:

- La tensión nominal de la red, valor eficaz de la tensión entre fases a la que se refieren algunas características de funcionamiento de la misma.
- Tensión más elevada de la red, que aparece en un instante cualquiera y en cualquier punto de la red en condiciones de explotación normales. Este valor no tiene en cuenta sobretensiones transitorias (maniobras) ni temporarias (debidas a fallas o desconexiones).

El material se elige entonces teniendo en cuenta que su tensión más elevada sea mayor o igual a la tensión más elevada de la red en la cual se utilizará el material.

Mientras que por encima de los 100 kV la tensión más elevada de la red coincide con la del material utilizado, por debajo de dicha tensión estos valores pueden ser distintos, lógicamente la tensión más elevada de la red debe ser igual o menor de la del material.

Veamos algún ejemplo:

La red de 132 kV, tiene una tensión máxima de servicio de 145 kV, por lo tanto los equipos que se utilizan en ella tienen tensión nominal 145 kV, no habiendo objeción en utilizar equipos de mayor tensión (170 kV) pero que cuestan más.

En media tensión la industria produce equipos de tensiones nominales de 12 kV, y 17.5 kV según el origen (país) de los equipos. Nuestras redes de media tensión son de tensión nominal 13.2 kV, y con tensión máxima de servicio de

14.5 kV y por lo tanto sólo admiten el uso de equipos de 17.5 kV (o de 24 kV) pero no de 12 kV.

Se dice que el material es sometido a una sobretensión cuando la tensión en función del tiempo supera los valores de cresta fase-tierra, y entre fases que corresponden a la tensión más elevada del material.

Las sobretensiones son siempre fenómenos transitorios.

Un sistema correctamente realizado debe evitar que se produzcan sobretensiones debidas a fallas de contacto, con sistemas de tensión superior, fallas intermitentes, conexiones en autotransformador, condiciones de ferresonancia.

Las únicas sobretensiones que se presentan son entonces:

- Tensión a frecuencia industrial en condiciones normales.
- Sobretensiones temporarias.
- Sobretensiones de maniobra.
- Sobretensiones atmosféricas.

Para las aislaciones sujetas a contaminación o envejecimiento, debe considerarse que el comportamiento frente a estas sollicitaciones a lo largo de la vida varía.

Este hecho debe tenerse en cuenta en su dimensionamiento.

Fenómenos particulares

Una onda viajera mantiene prácticamente las mismas características (forma) en cualquier punto de la línea, y también en función del tiempo, hasta que no se verifique una discontinuidad en los parámetros de la línea misma.

Es necesario examinar que ocurre cuando las ondas viajeras de tensión y corriente alcanzan estos puntos singulares.

En cada instante se cumple la relación

$$Z = v/i$$

siendo Z la impedancia característica de la línea.

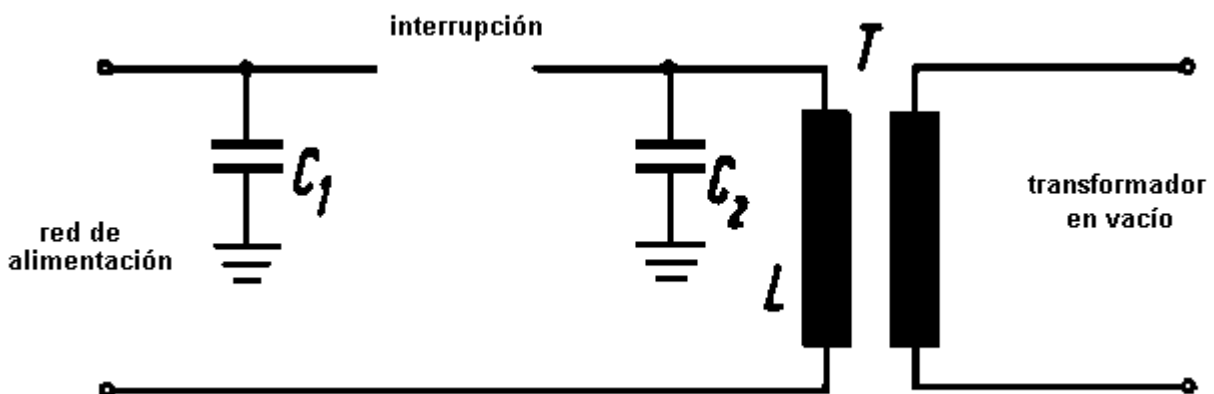
En los puntos de discontinuidad se verifican entonces fenómenos de reflexión y refracción: el primero de estos fenómenos admite que parte de la onda incidente sea rechazada hacia el punto de origen, mientras que el fenómeno de refracción se refiere a aquella parte de la onda que prosigue su camino en el sentido en que se originó.

El caso de una línea aérea conectada a un cable es un ejemplo de un punto singular, debido a que en ese punto se tiene un cambio en el valor de la impedancia característica.

Fenómenos de resonancia

En la mayor parte de los casos los fenómenos de resonancia se presentan a continuación de fallas, y en particular con la interrupción de los conductores.

Un caso frecuente que puede verificarse en las instalaciones se muestra en la [figura 3.11](#) donde se considera una línea de transmisión que alimenta un transformador en vacío, en la cual se tiene la interrupción de un conductor.



Las capacidades C_1 y C_2 representan la capacidad a tierra de los tramos de conductor interrumpido, se desprecia la capacidad existente entre el conductor interrumpido y el sano y entre éste último y tierra.

Estas simplificaciones son lícitas para un examen cualitativo de los fenómenos que consideramos.

Considerando en R todas las resistencias del circuito y de los elementos disipativos en él contenidos, se tiene la siguiente ecuación:

$$V = \left(R - j \frac{1}{\omega C_1} - j \frac{1}{\omega C_2} + j \omega L \right) I$$

las condiciones de resonancia se presentan cuando:

$$\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2} = \omega L$$

Los efectos que los fenómenos de resonancia pueden provocar se deben estudiar considerando la sobretensión entre bornes del transformador y entre los conductores de la línea, que pueden dar lugar a arcos externos, o peor, perforación de los aislantes líquidos o sólidos en el transformador.

Fenómenos de ferresonancia

Fenómenos más complejos que los anteriormente descritos se pueden presentar por la presencia de circuitos magnéticos saturables.

Para ver este fenómeno supongamos un generador de tensión alterna que alimenta un capacitor C en serie con una inductancia L con núcleo de hierro, se consideran despreciables la resistencia óhmica del circuito y los fenómenos disipativos del núcleo magnético y del capacitor.

Para cada condición de funcionamiento (valor de la corriente) la tensión de alimentación debe ser igual a la suma de las tensiones en bornes del capacitor y de la inductancia:

$$V = V_c + V_L$$

La tensión en bornes de la inductancia no es proporcional a la corriente, es una función de ésta según la característica de magnetización

$$V_L = \omega f(I)$$

La tensión en bornes del capacitor es en cambio proporcional a la corriente y la pendiente de esta característica es función de la capacidad (a un aumento de capacidad corresponde a una disminución de la pendiente).

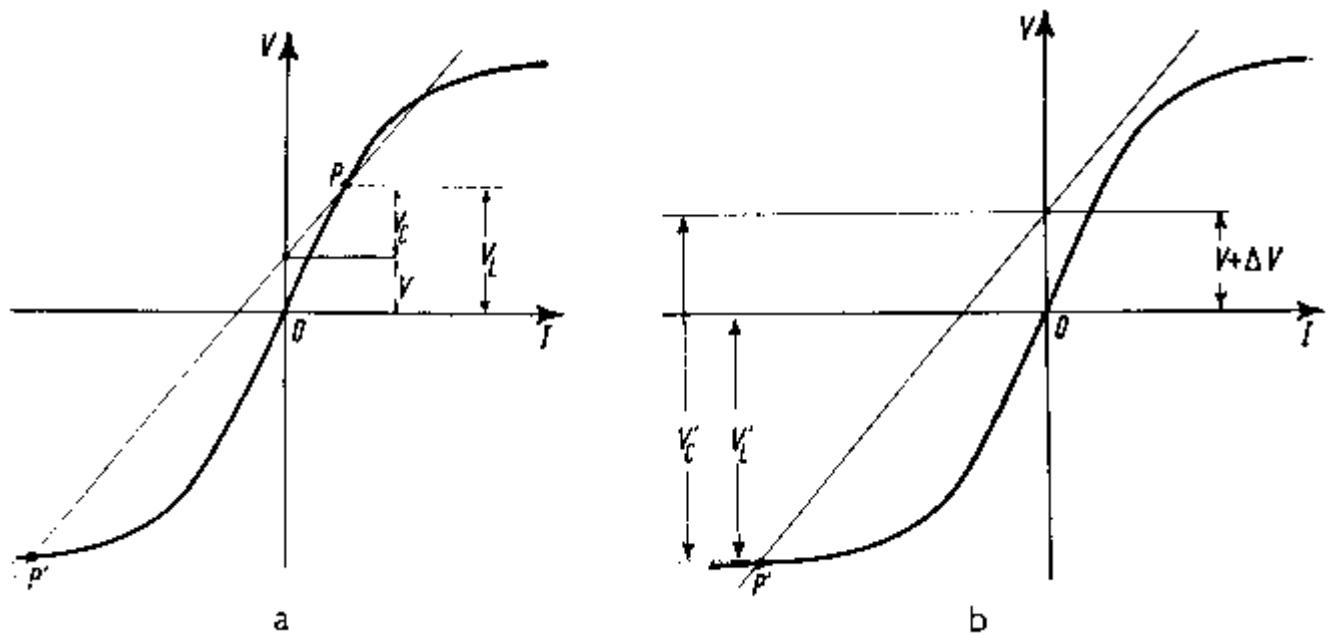
$$V_c = -\frac{I}{\omega C}$$

Se puede obtener la siguiente relación:

$$V_L = V + \frac{I}{\omega C}$$

y de esta expresión mediante un método gráfico determinar la solución del problema.

La recta que representa la tensión en bornes del capacitor cruza la característica de la inductancia en dos puntos que corresponden a dos condiciones estables de funcionamiento (P y P'). De estos dos puntos el de funcionamiento normal es P que se encuentra en el primer cuadrante (ver [figura 3.12](#)).



Si el punto P se encuentra próximo al codo de la característica de la inductancia, por efecto de un brusco aumento de la tensión de alimentación (DV), o por una brusca disminución de la capacidad del circuito (cambio de la pendiente), puede ocurrir que este punto se desplace de modo que las dos características no se cruzan más en el primer cuadrante, sino sólo en el punto P' del tercer cuadrante.

En este caso la corriente del circuito cambia su fase desplazándose en adelante de un cuarto de período (prevalece el efecto capacitivo).

Para este punto corresponden valores muy elevados de tensión tanto en el capacitor como en la inductancia y son estas las condiciones que en los casos prácticos son particularmente peligrosas.

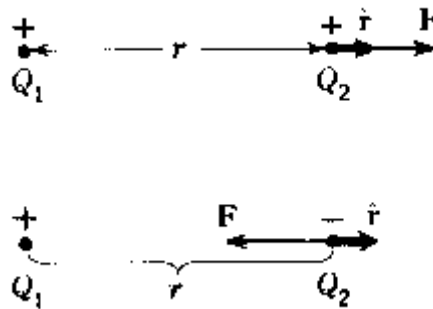
CAPITULO 4

EL CAMPO ELECTRICO

Introducción

El estudio del campo eléctrico es de mucha importancia cuando se encarán los problemas de alta tensión, la mayoría de los fenómenos de interés están muy ligados al campo eléctrico.

Repasemos como se determina el campo eléctrico, entre dos cargas eléctricas se presenta una fuerza [figura 4.1](#):



$$F = \frac{r_1 Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

siendo:

F: fuerza en (N)

r_1 : vector unitario (versor) en dirección de la recta que une las cargas, y que da sentido a la fuerza

Q_1, Q_2 : cargas eléctricas puntuales (Culomb)

ϵ_0 : permitividad del vacío = $8.859 \cdot 10^{-12}$ (F/m)

r: distancia entre las cargas (m)

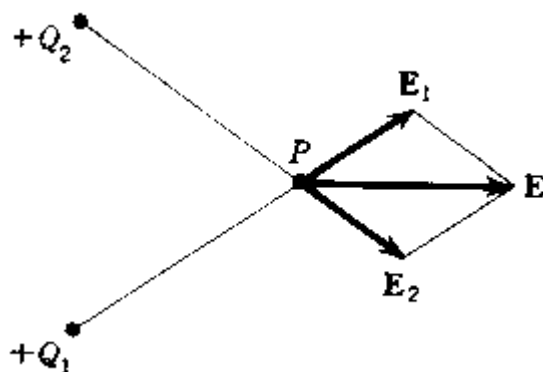
Si la carga Q_2 es una pequeña carga de prueba positiva, se define la intensidad del campo eléctrico (en Newton / Culomb = Volt / m):

$$E_r = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0 r}$$

Si la carga Q_1 es positiva, y como la carga de prueba también lo es, las cargas se repelen, la fuerza es en la dirección de la recta que une las cargas, en el sentido de alejarlas, y este es el sentido del campo también.

Campo entre dos esferas

Si hay varias cargas, consideradas individualmente en un punto nos dan varios (vectores de) campos, el campo total resultante puede obtenerse por suma vectorial de los campos componentes individuales en cada punto, este es llamado principio de superposición [figura 4.2](#).



En esta forma puede resolverse el campo entre dos esferas (con cargas de distinto signo), la primera aproximación es suponer que las cargas son puntuales, en el centro de las esferas.

Las superficies equipotenciales son esféricas, sus centros están ubicados sobre la recta de simetría, un par de estas superficies puede representar las esferas reales, al hacer esto se nota que las cargas puntuales usadas para calcular, no son concéntricas a estas esferas.

El espinterómetro a esferas, fue utilizado durante mucho tiempo como instrumento de determinación de la tensión.

Mientras la distancia entre las superficies de las esferas es del orden del diámetro, el campo en la proximidad del eje (que une los centros) es

sensiblemente uniforme, cuando el campo alcanza el valor crítico se produce la descarga. Para cada valor de distancia entre las superficies de las esferas, se produce la descarga para un valor determinado de tensión aplicada, se mide la distancia entre esferas, y en una tabla se determina la tensión.

Método de las imágenes

Obsérvese el campo entre dos esferas, el campo es simétrico respecto del plano de simetría de las cargas, una mitad del campo espacial es imagen especular de la otra mitad, de aquí comienza a intuirse el método de las imágenes.

El problema de un conductor cualquiera, y un plano conductor infinito, se puede resolver como dos conductores uno imagen del otro (suponiendo que el plano es un espejo).

Físicamente la superficie de reflexión se comporta como una pared metálica (en la cual las líneas de campo son normales).

El método puede ser usado para varias cargas próximas a una pared metálica o al suelo conductor (simplemente de elevada conductividad respecto del espacio dieléctrico).

Si se tiene el suelo y una pared se tienen dos superficies de reflexión normales entre sí, habrá dos imágenes (de reflexión en el suelo y en la pared) y otra imagen (de segunda reflexión).

Si la carga está entre dos paredes paralelas entonces las imágenes son múltiples (en teoría infinitas imágenes como cuando uno se observa entre dos espejos paralelos).

Este método también es válido para superficies curvas, como un conductor dentro de un tubo metálico excéntrico (problema de los conductores dentro de un cable con una única pantalla), o al plantear el campo en el espacio dieléctrico entre dos esferas (espinterómetro de esferas).

Campo de un conductor dentro de una sala

Al determinar el campo eléctrico alrededor de un conductor cualquiera, la tierra actúa como superficie especular, y por lo tanto podemos resolver el problema considerando el conductor y su imagen.

Si próximo al conductor se encuentra una pared (conductora) en ella se producirá otra imagen, como visto en el punto anterior.

Uno o más electrodos, encerrados dentro de una sala se resuelven por el método de las imágenes, reemplazando cada pared por las correspondientes imágenes.

El número de imágenes que se debe considerar al tener dos paredes paralelas es infinito, pero es suficiente con considerar un número finito, que no es necesario sea demasiado elevado (4 imágenes parece generalmente aceptable).

Esta simulación corresponde a una sala de ensayos con electrodos en su interior y con paredes techo y piso metálicos, un paralelepipedo.

Problemas de borde

Dentro de un medio el campo es continuo, de un punto a otro vecino cambia solo infinitesimalmente, en la frontera, límite del medio, el cambio puede ser abrupto (tanto en magnitud como dirección).

Conviene observar el campo en la frontera a través de sus componentes normal y tangencial.

El campo tangencial en la frontera conductor dieléctrico es nulo (efectivamente, el campo es normal al conductor).

Para determinar el campo alrededor de los conductores es necesario saber como se distribuyen las cargas, al determinar el campo en la frontera se obtiene la distribución de cargas.

Cuando se plantean problemas de campo, se tiene una ecuación diferencial valida dentro del área de interés del problema (dominio).

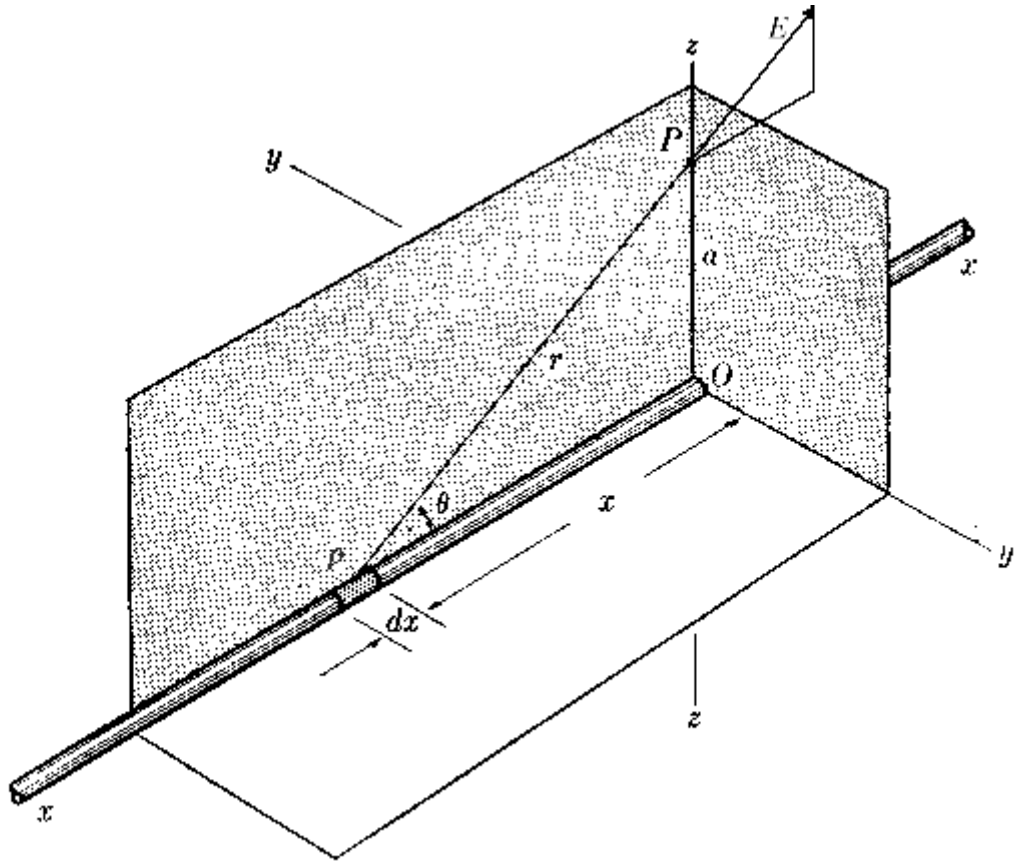
Además se presentan condiciones de borde (frontera, en los límites del área en estudio), estas pueden imponer el valor de la función (solución) en dichos puntos, por ejemplo se busca el potencial en un área, y se conoce el potencial en ciertos puntos, esta condición se la llama de Dirichlet.

La condición de Neumann impone el valor de la derivada (de la solución) en algunos puntos frontera, por ejemplo si dentro del área se tiene un círculo (objeto en general) metálico, la derivada del potencial es normal a dicha frontera.

También se pueden presentar condiciones de tipo mixto, que relacionan el valor de la función y su derivada, en la frontera.

Campo alrededor de un cilindro y de un haz de cilindros

Observemos [figura 4.3](#) una carga lineal indefinida de densidad lineal ρ_L , pensemos se trata de cargas $\rho_L \cdot dl$, que desde cierta distancia parecen cargas puntuales, determinamos el campo en una superficie normal a la línea de carga, aplicando superposición.



No debemos olvidar que E es un vector, con dirección r , por lo que si deseamos resultados escalares debemos integrar sus componentes, según una línea paralela a la línea de carga y otra paralela a la normal, la integral se debe extender entre los límites $-\infty$ a $+\infty$.

El resultado de la integral que se busca entre los valores de l , límites $-\infty$ e $+\infty$:

$$E_T = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0 r}$$

El campo que se determina es bidimensional, no se distingue entre una superficie normal al conductor y otra.

Vale comparar el campo bidimensional debido al conductor indefinido (punto o círculo en el plano), con el campo tridimensional debido a una carga puntual, (esférica en el espacio), el campo tridimensional varía con la inversa de r^2 , y el campo bidimensional en cambio varía con la inversa de r .

El potencial debido a un conductor rectilíneo indefinido se determina integrando el campo eléctrico:

$$V_{ab} = - \int_a^b E_r dx = - \int_a^b \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0 r} dx = \left[- \frac{\rho_L \ln r}{2\pi\epsilon_0} \right]_a^b$$

Se observa la diferencia con el potencial debido a una carga puntual en el espacio (tridimensional) que es proporcional a $1/r$, el potencial en el infinito (para el problema bidimensional) no puede ser determinado, mientras que lo pudimos adoptar nulo para el problema de la esfera cargada (tridimensional).

Con estas fórmulas se puede determinar el campo alrededor de un conductor, de un haz de conductores.

Campo provocado por una línea eléctrica

El cilindro, o el haz de cilindros se utilizan para hacer una representación de una línea con sus conductores únicos o en haz, a los que se aplican distintos valores de tensión en cada instante obteniéndose el campo eléctrico en la superficie de los conductores.

También es de interés determinar el campo eléctrico en el suelo debajo de la línea eléctrica, o en general en un punto cualquiera del espacio.

La relación tensión y cargas en los conductores de una línea multifilar es:

$$[V] = [I] \cdot [q]$$

$$[q] = [C] \cdot [V] = [I]^{-1} \cdot [V]$$

La matriz C cuadrada incluye coeficientes de capacidad (que no deben confundirse con las capacitancias de los conductores), se obtiene invirtiendo la matriz I , de coeficientes de potencial, que se construye de la siguiente manera.

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2} \pi \epsilon_0 \ln \frac{2h_i}{r_i}$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2} \pi \epsilon_0 \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}}$$

siendo:

r_i radio del conductor i

h_i altura del conductor i sobre el suelo (valor medio)

D_{ij} distancia entre conductores i - j

D'_{ij} distancia entre conductores i con la imagen del conductor j

Si los conductores son en haz se los puede representar todos uno por uno, y luego reducir la matriz de coeficientes, o bien el valor de r_i debe representar un conductor con el radio equivalente del haz. Para esto si es dato DM distancia entre los n conductores, el radio del haz es R.

$$DM = 2 \times R \times \text{sen}(\pi/n)$$

El radio equivalente resulta:

$$R_{eq} = R \sqrt[n]{\frac{nr}{R}}$$

donde:

r radio elemental

n número de conductores

R radio del haz

Este corresponde a un conductor único ficticio que presenta la misma capacitancia que el haz con todos los conductores vecinos.

Ya se determinaron las matrices [I] y [C], la relación para calcular las cargas en los conductores de una línea multifilar es:

$$[q] = [C] \cdot [V]$$

Se determina la carga eléctrica en los conductores y el gradiente medio, considerando las tensiones aplicadas en un instante a cada conductor.

$$E_{med} = \frac{Q}{n2\pi\epsilon_0 r}$$

Se admite que el campo alrededor del conductor varía conforme a la siguiente expresión, obteniéndose de ella los máximos y mínimos.

$$E_{\theta} = E_{med}(1 + (n-1)r \cos \theta / R)$$

donde θ es el ángulo de la dirección del campo respecto de la dirección radial.

Se observa un factor de aumento del campo que tiene un máximo, y un mínimo a medida que se rodea el conductor. Finalmente se tienen datos para ver el máximo campo que se presenta, lo que permite la evaluación de otros efectos de interés.

Efecto Corona en líneas de transmisión

El efecto corona designa el conjunto de fenómenos ligados a la aparición de conductividad de un gas (aire) en la proximidad de un conductor sometido a alta tensión.

La conductividad es debida a un fenómeno de ionización, en el aire existen pares iones(+) electrones libres(-), creados por la radiación cósmica o radioactividad natural. Estos sometidos a un campo eléctrico muy intenso son acelerados y chocan generando más iones.

El conductor, cuando está sometido a un fuerte efecto corona, presenta una luminosidad en la oscuridad, y una crepitación ininterrumpida, presentándose

pérdidas en el tubo corona, que se deben principalmente al movimiento de los iones.

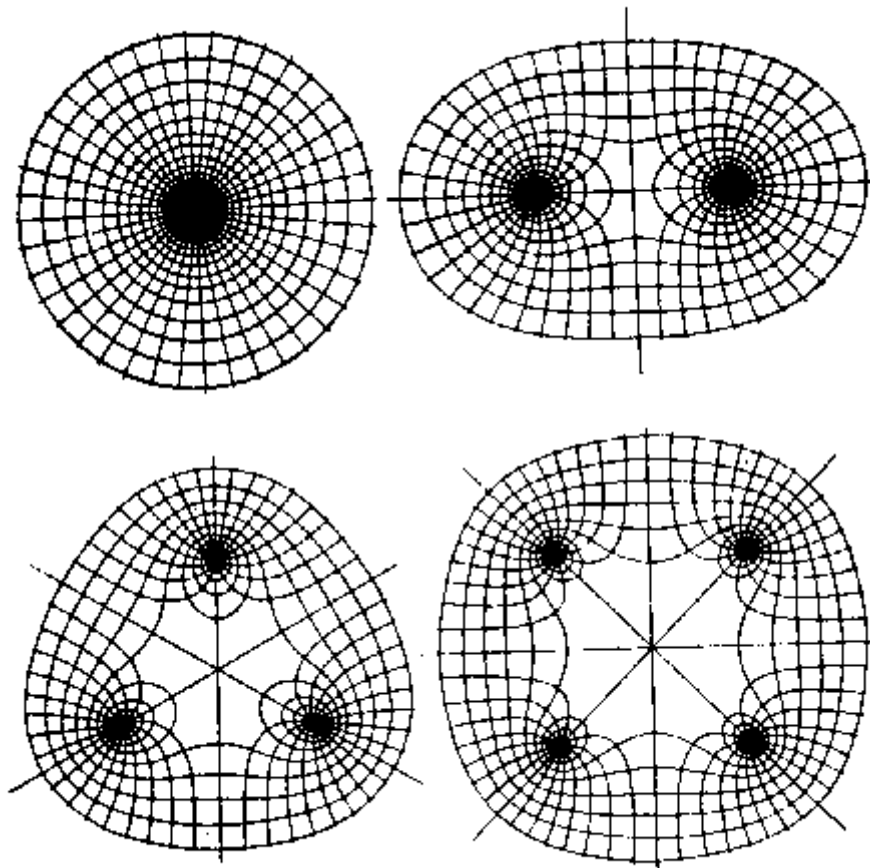
La tensión a la que aparece este fenómeno se denomina, tensión crítica de corona, o tensión de inicio de corona, que es función de la tensión, del diámetro de los conductores, de la distancia entre ellos y de las condiciones atmosféricas.

Con el aire seco este efecto resulta prácticamente insignificante pero al variar las condiciones climáticas, las pérdidas correspondientes pueden llegar a alcanzar valores económicamente considerables.

Para dos conductores paralelos que tienen el mismo potencial, cuyo diámetro es d , distanciados en a , en la zona donde se tiene la menor línea de campo, cuando la relación $a/d \gg 1$ se calcula la intensidad de campo periférico, con la expresión:

$$E_{\max} \approx \frac{U}{d \ln \frac{2a}{d}}$$

Para las líneas de altísima tensión, la solución racional consiste en la utilización de haces de conductores como se indica en la [figura 4.4](#), el efecto es como si se tuviera un conductor único con un diámetro equivalente elevado, del orden del diámetro del haz.



Peek propuso una fórmula que permite determinar el campo crítico de un conductor cilíndrico:

$$E_c (\text{kV}_{\text{pico}} / \text{cm}) = 31 \delta \left(\frac{1 + 0.308}{\sqrt{\epsilon_r}} \right)$$

donde:

$d = 3.98 p / (273 + t)$ densidad relativa del aire

$d = 1$ para $p = 76$ cm de Hg y $t = 25$ °C

r radio del conductor en cm

El estado de la superficie del conductor es muy importante, la relación precedente vale para superficies pulidas, a medida que la superficie no es pulida el campo crítico se reduce, para tener en cuenta este efecto se utiliza un factor $m < 1$.

Para el conductor de alambres el campo superficial varía sensiblemente, las imperfecciones de la superficie son un factor determinante en la práctica.

También las condiciones atmosféricas juegan un rol importante, lluvia, neblina, rocío, son causa de gotas de agua en la superficie del conductor, reduciendo el valor del campo crítico.

El factor m tiene un valor 0.9 para un estado normal de la superficie, la lluvia puede reducirlo hasta 0.6 y en algunos casos aun menos.

Asociados al campo eléctrico superficial se presentan fenómenos de radiointerferencia (causados por el campo), perturbaciones que afectan a la radiorecepción.

Este efecto es particularmente molesto en las zonas pobladas que son atravesadas por líneas, o en la proximidad de estaciones eléctricas.

Estando sometidos los conductores a cierta tensión se detecta el nivel de perturbación mediante un receptor definido, para completar la medida se debe determinar:

frecuencia de la medición

distancia del objeto (línea)

condiciones atmosféricas

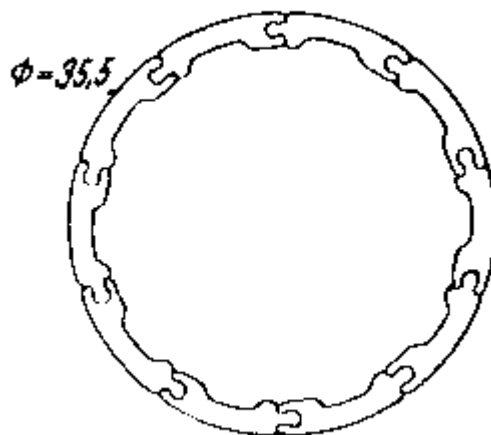
En la instalación en servicio parte de la radiointerferencia es generada por las piezas metálicas (que se encuentran bajo tensión), y parte por las aislaciones contaminadas, cuya influencia crece con la presencia de humedad.

También se presentan perturbaciones en frecuencias de televisión y radiofrecuencia en frecuencia modulada.

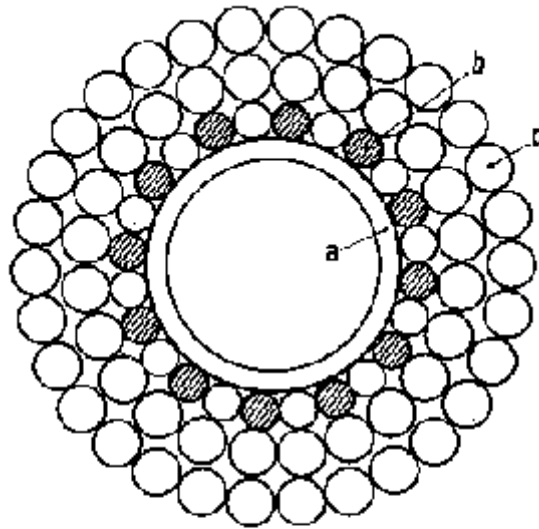
Otra perturbación que aparece es el ruido acústico, que también se incrementa con el mal tiempo.

Buscando la solución de estos problemas, debemos orientarnos a la reducción del campo eléctrico en la superficie del conductor, esto hoy se consigue con haces de conductores, y es así que en 220 kV abundan las líneas con haz de 2 conductores, también a veces hasta 500 kV, en 400 y 500 kV hay líneas con 3 conductores, y en 500 y 800 kV con 4 conductores.

Cuando se observan soluciones del pasado se encuentran líneas de solo un conductor de diámetro importante, construido especialmente para limitar el efecto corona, se trata de un conductor que llama poderosamente la atención por ser hueco, obsérvese la [figura 4.5](#)



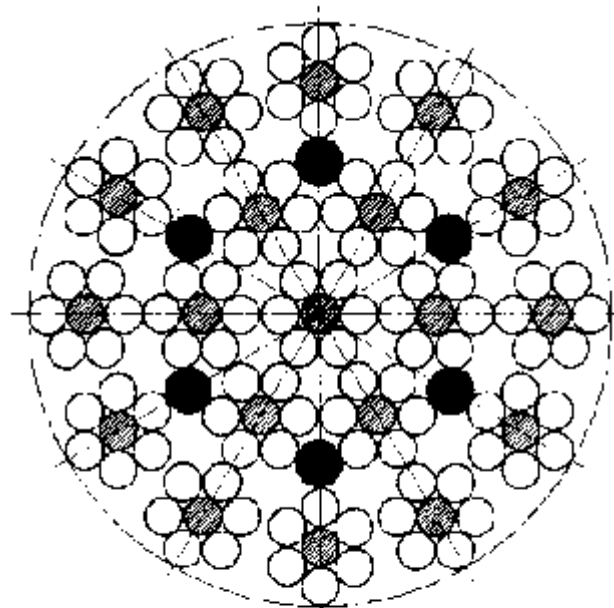
Que muestra el conductor hecho con planchuelas conformadas, y la [figura 4.6](#) con un conductor de haz de alambres cableado sobre un alambre en espiral para lograr un alma hueca, soluciones estas que no han soportado la comparación económica con haces de cables convencionales, y ya no se conciben como solución posible.



Conductor de aluminio-acero adecuado para líneas de altísima tensión, que presenta una cavidad central para obtener un diámetro externo más grande

- a - Espiral en conductor de acero**
- b - Conductores de acero**
- c - Conductores de aluminio**

Observamos también que son muy comunes los cables de aluminio con alma de acero, esto no es para aumentar el diámetro sino por la resistencia mecánica. Mientras observamos soluciones de cables especiales, llamamos la atención sobre un cable de alta resistencia, en el cual la sección de acero supera ampliamente la sección del material conductor (aluminio), se trata de un cable que cubre un vano muy grande (3.5 km aproximadamente, el cruce del estrecho de Messina entre Italia y la isla de Sicilia), ver [figura 4.7](#).



 Conductores de aluminio
  Conductores de acero

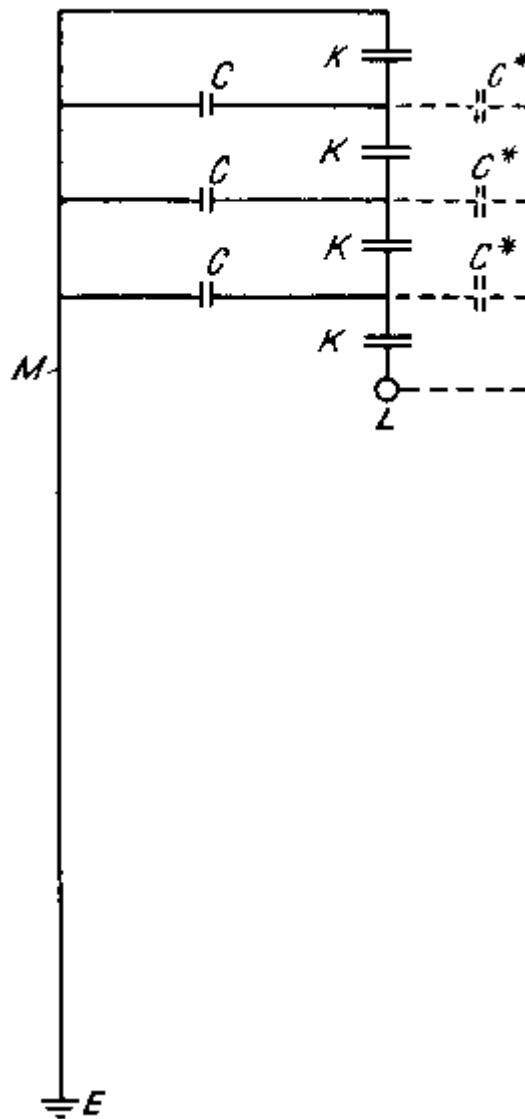
Disposición de los conductores elementales del cable utilizado para atravesar el estrecho Messina (entre Sicilia y Reggio Calabria).

Aisladores de líneas

La seguridad en la transmisión de potencia exige una gran aislación de la línea. Una regla práctica exige una tensión de arco en seco (no bajo lluvia) de tres a cinco veces el valor de tensión nominal de la instalación. La tensión de descarga externa de una cadena de aisladores es con buena aproximación proporcional a la distancia a tierra.

Los aisladores se comportan como si el espacio que ocupan se reemplazara por aire, quedan entonces los electrodos metálicos que corresponden a soportes vinculados a tierra y conductores en tensión.

Cada uno de los aisladores de la cadena tiene una capacidad propia entre las partes metálicas que constituyen su unión (K), una capacidad con relación al poste (C) y una capacidad con relación al conductor (C*), pudiéndose considerar este conjunto como una cadena de capacidades, como se indica en la [figura 4.8](#).



Cálculos y mediciones muestran que la distribución de la tensión a lo largo de la cadena de aisladores no es uniforme, es decir, los diversos elementos no representan $1/n$ de la tensión total, en el caso que la cadena esté constituida por n elementos.

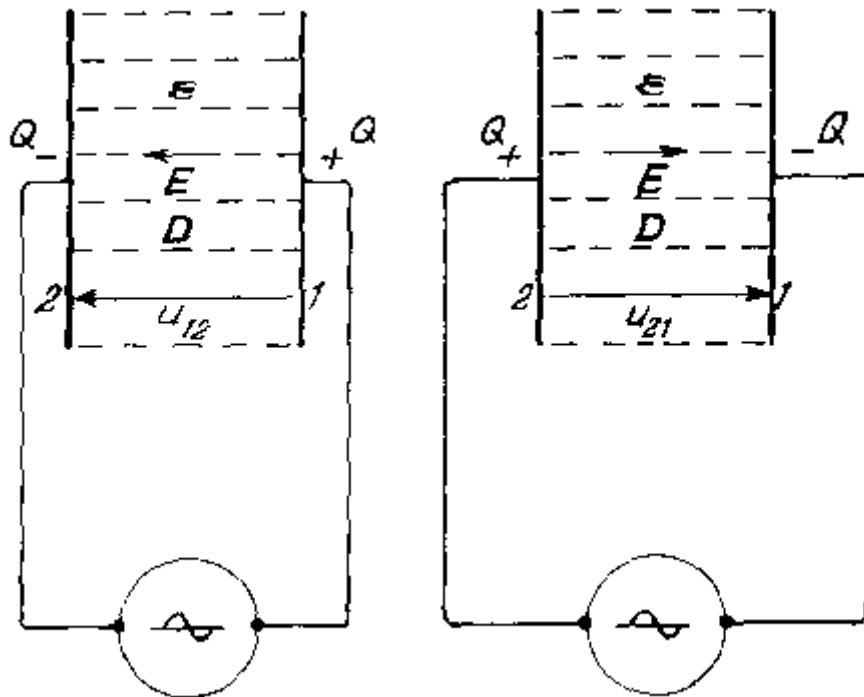
Este tipo de configuración aparece frecuentemente en la electrotecnia de tensiones elevadas, por ejemplo, para los devanados de los transformadores y de las máquinas, con efectos especialmente importantes en el caso de tensiones de impulso.

CAPITULO 5

AISLANTES SOLIDOS EN LA TECNICA DE LA ALTA TENSION.

Intensidad de campo eléctrico y desplazamiento

Supongamos un capacitor conectado a una tensión alterna como se indica en la [figura 5.1](#). Para una tensión de 50 Hz, el sentido de la tensión se invierte 100 veces por segundo, la carga Q del capacitor se desplaza 100 veces por segundo (a 60 Hz corresponden 120 veces) a través de la superficie de área A del dieléctrico. Se denomina a esta carga que fluye a través del dieléctrico como corriente de desplazamiento Q . Ella es igual a la carga del capacitor y está medida en Coulombs (C). La corriente de desplazamiento dividida por el área A , es el desplazamiento eléctrico D cuya unidad es C/m^2 .



Tenemos:

$$D = \frac{Q}{A}$$

Entre el desplazamiento y la intensidad de campo eléctrico E, existe la relación:

$$E = \frac{D}{\varepsilon}$$

donde ε es la constante dieléctrica del material aislante (dieléctrico). Está dada en kV/cm. D y E son vectores y tienen por lo tanto módulo, dirección y sentido.

Cálculo de la tensión a lo largo de las líneas de campo

Podemos distinguir dos casos:

Caso 1: Campo en el caso en que los vectores E y D son constantes. Entonces obtenemos para la tensión entre el punto 1 y el punto 2 a lo largo de una línea de campo la siguiente expresión:

$$u_{12} = E \cdot x_{12}$$

Si por ejemplo el camino de x_{12} está dado en mm, y E en kV/mm, se tiene u_{12} en kV.

Tratándose de un capacitor plano se tienen las siguientes relaciones:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{E d} = \frac{A \varepsilon}{d}$$

siendo:

Q carga eléctrica

E campo eléctrico

U tensión entre placas

A área de las placas

ε constante dieléctrica

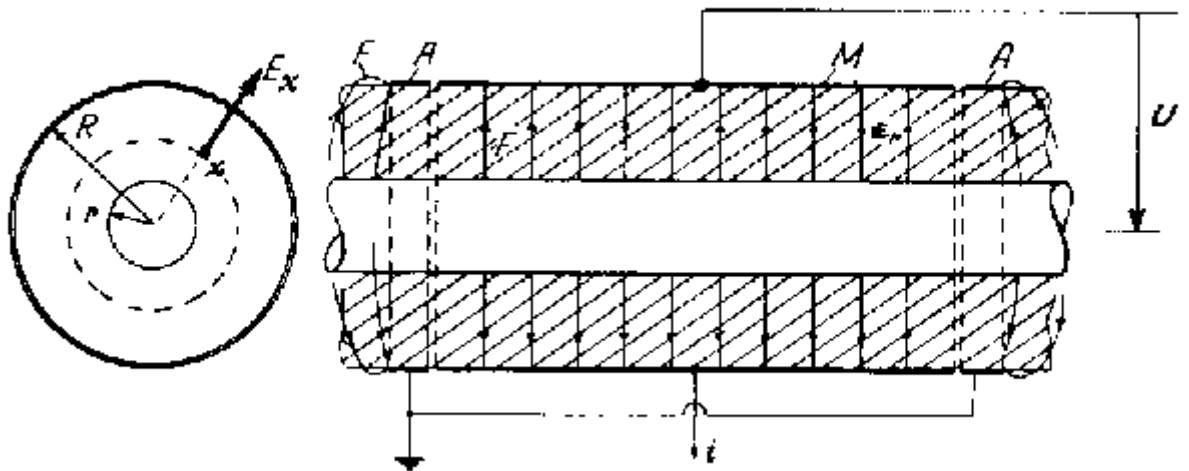
d distancia entre placas

Caso 2: E y D son función de x. Entonces resulta:

$$E_x = \frac{D_x}{\epsilon_x}$$

$$u_{12} = \int_1^2 E_x dx$$

Con estas últimas expresiones podemos calcular la capacidad de un capacitor cilíndrico de dieléctrico homogéneo, despreciando la influencia de deformación del campo en los bordes del capacitor. Tal capacitor cilíndrico ideal es relativamente fácil de ser construido, haciendo un blindaje en los bordes y analizando solamente el campo eléctrico situado dentro del blindaje como se indica en la [figura 5.2](#). De este modo, sólo la corriente i de los electrodos blindados es conducida por el dispositivo y las corrientes de los bordes son dirigidas directamente a tierra.



Llamando a la corriente de desplazamiento por unidad de superficie con Q , entonces el vector desplazamiento a través de una superficie cilíndrica de radio x dentro del dieléctrico, resulta:

$$D_x = \frac{Q}{2\pi x}$$

La intensidad de campo eléctrico, en la misma superficie, resulta:

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi x}$$

La tensión entre el electrodo interno de radio r y el cilindro conductor externo de radio R , a lo largo de las líneas de campo radiales, se puede calcular con la integral arriba indicada:

$$u_{12} = U = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi} \ln \frac{R}{r}$$

Relacionando carga y tensión resulta la capacidad y se tiene:

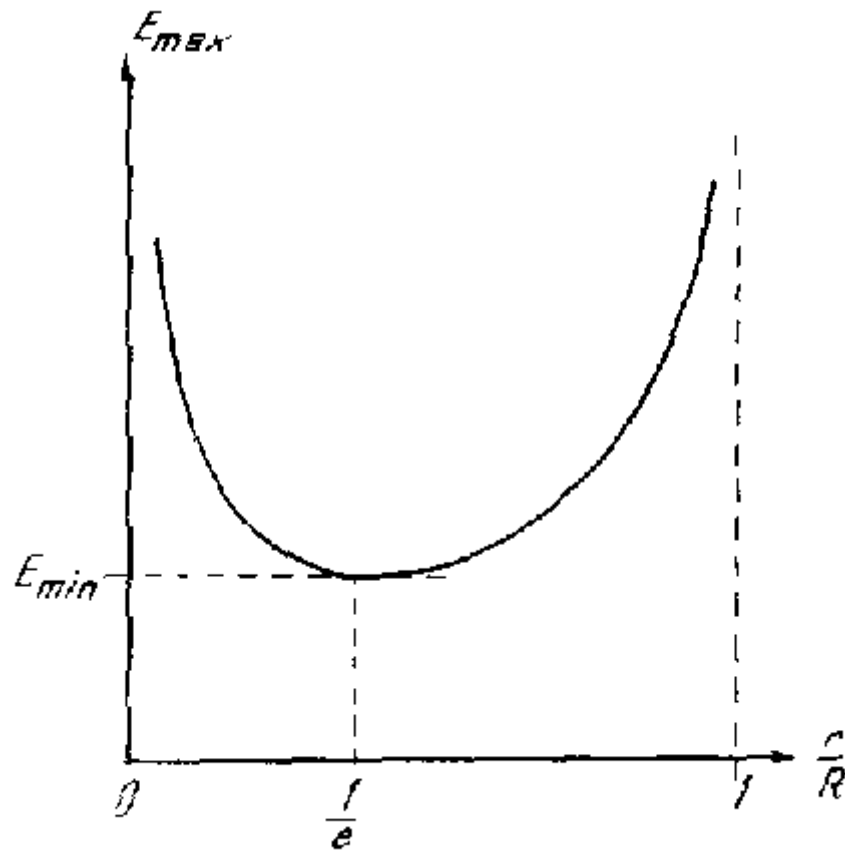
$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln R/r}$$

Finalmente haciendo otras sustituciones podemos expresar la intensidad de campo E en función del radio x :

$$E_x = \frac{U}{x \ln R/r}$$

donde E_x está dado en kV/mm, si U está dado en kV y x en mm.

Dados el diámetro externo y la tensión del capacitor cilíndrico, la dependencia de la máxima intensidad de campo en función de la relación R/r tiene el aspecto que indica la [figura 5.3](#). Cuando r es muy pequeño, entonces se tiene una gran intensidad de campo, debido a la gran curvatura. Si por otro lado, el valor de r es aproximado al valor R , el espesor del material aislante res



La intensidad de campo es mínima cuando el radio del cilindro interno r_0 tiene el valor de $1/e = 1/2.718$ del radio externo R , esta relación permite buscar condiciones de máximo aprovechamiento del aislante.

Capacitores planos con varias capas aislantes

En casos en que el dieléctrico de un capacitor plano se compone de dos (o más) capas de diferentes materiales aislantes la capacidad se calcula considerándose simplemente dos (o más) capacitores que están conectados en serie. Si los materiales tienen constantes dieléctricas ϵ_1 y ϵ_2 :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$C_1 = \frac{A \varepsilon_1}{d_1}$$

$$C_2 = A \frac{\varepsilon_2}{d_2}$$

$$C = \frac{A}{\left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} \right)}$$

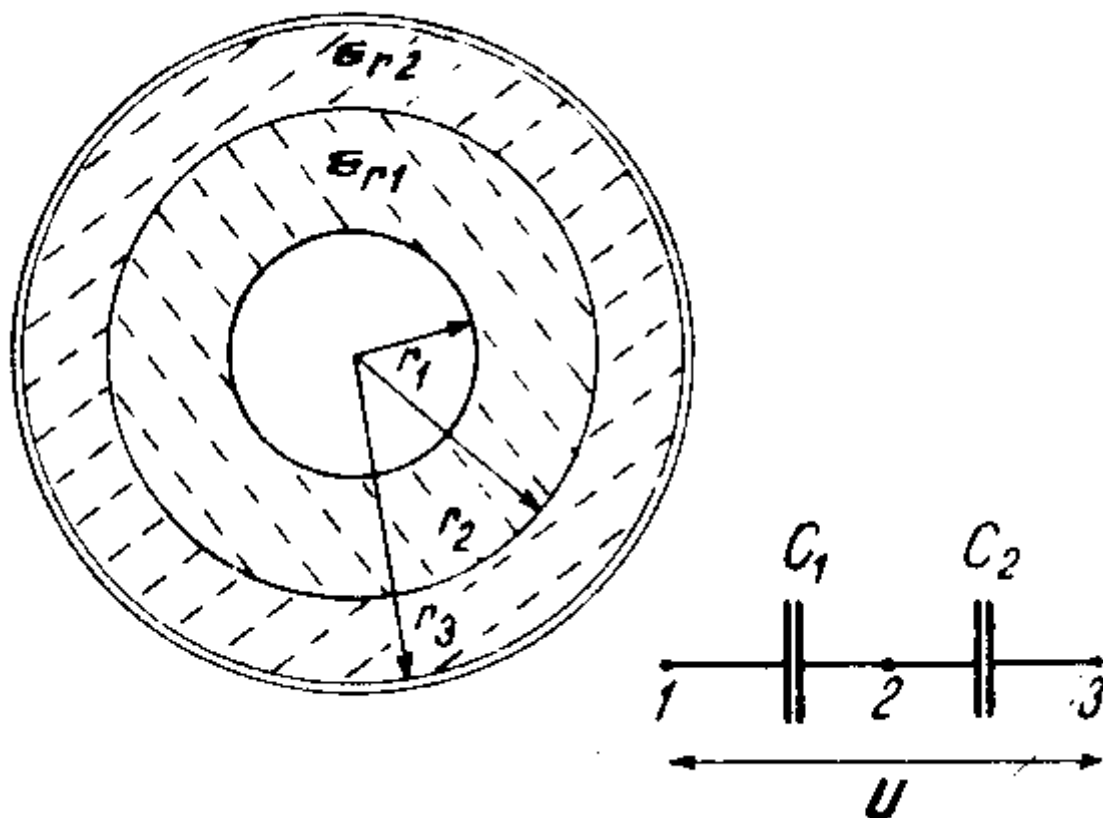
Interesa determinar el campo eléctrico en cada dieléctrico, lo que es una medida de la sollicitación que se presenta sobre cada material.

$$U = \frac{Q d_1}{A \varepsilon_1} + \frac{Q d_2}{A \varepsilon_2}$$

$$U = E_1 d_1 + E_2 d_2 = \frac{Q}{A \varepsilon_1} d_1 + \frac{Q}{A \varepsilon_2} d_2$$

Capacitores cilíndricos con varias capas aislantes

En muchos casos, el dieléctrico de un capacitor cilíndrico se compone de dos o más capas de diferentes materiales aislantes. En este caso también la capacidad se calcula fácilmente, considerándose en este caso, simplemente dos o más capacitores que están conectados en serie. Para dos materiales con constantes dieléctricas ε_1 y ε_2 vale para una disposición como se indica en la [figura 5.4](#):



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

reemplazando las capacidades C_1 y C_2 y desarrollando se tiene para un capacitor cilíndrico de longitud l y de m capas aislantes:

$$C = \frac{2\pi \cdot 8.85 \cdot l/m}{\sum_{n=1}^m \frac{1}{\epsilon_{rn}} \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}}$$

La tensión total aplicada al capacitor se distribuye en los distintos materiales como las constantes dieléctricas relativas ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , ϵ_{r3} ,... de tal modo que en una capa aislante, para la misma relación de radios, tenemos menor tensión cuanto mayor es la constante dieléctrica relativa de la capa.

$$U = U_{12} + U_{23} + U_{34} + \dots$$

Esta expresión muestra que en un dieléctrico formado por varias capas, la intensidad de campo en una capa aislante es tanto mayor, cuanto menor es su constante dieléctrica.

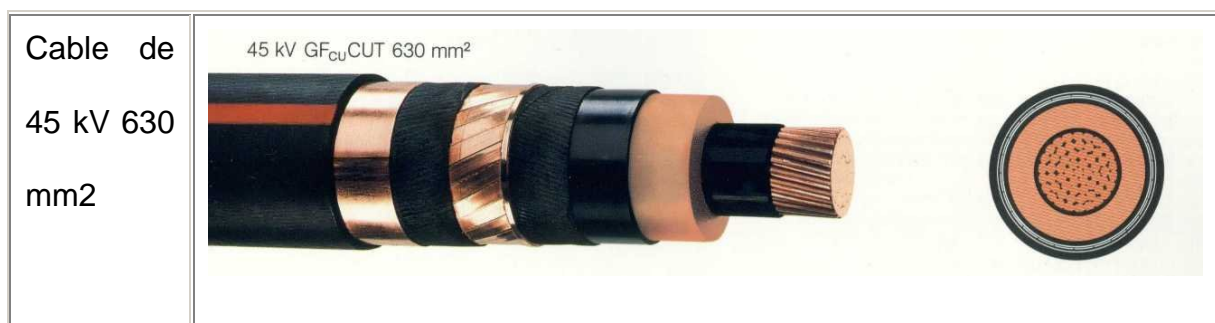
El material con la menor constante dieléctrica posible es el aire ($\epsilon_r = 1$). Por este motivo, capas de aire intercaladas en un material aislante sólido o líquido, asumen tensiones relativas mayores, o de otro modo, las intensidades de campo son mayores. Como el aire, a la presión normal poseen una rigidez dieléctrica baja con relación a otros buenos aislantes, es importante tener en cuenta el peligro de tener capas de aire en un aislante sólido o líquido.

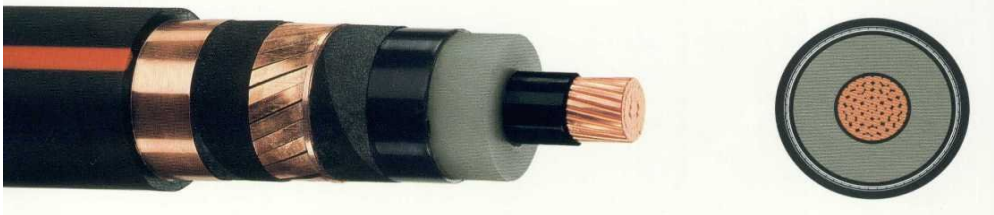

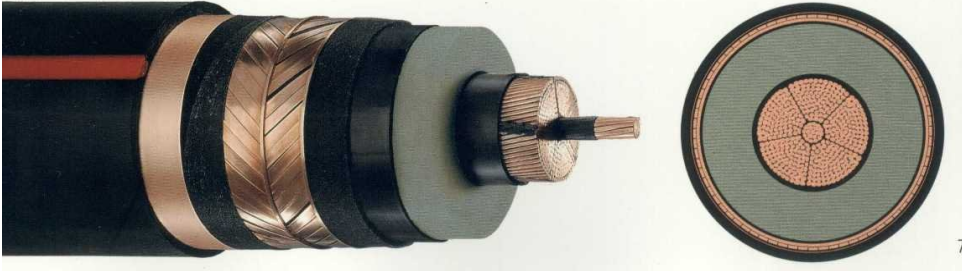
Campo en cable de un solo conductor

Un cable de un conductor (en la jerga unipolar) es un capacitor cilíndrico con un dieléctrico homogéneo como capa aislante entre el conductor y la protección externa (y/o pantalla).

Según el tamaño del conductor (su diámetro) queda definido un espesor de aislación conveniente.

Las figuras siguientes muestran cables unipolares con aislación sólida (solución moderna) de distintas secciones y tensiones, pudiendo verse gran cantidad de detalles constructivos y alternativas posibles.



<p>Cable de 110 kV 500 mm²</p>	<p>110 kV XF_{cu}CUT 500 mm²</p> 
<p>Cable de 220 kV 500 mm²</p>	<p>220 kV XALWT 500 mm²</p> 
<p>Cable de 400 kV 2000 mm²</p>	<p>400 kV XDFF_{cu}CUT 2000 mm²</p> 

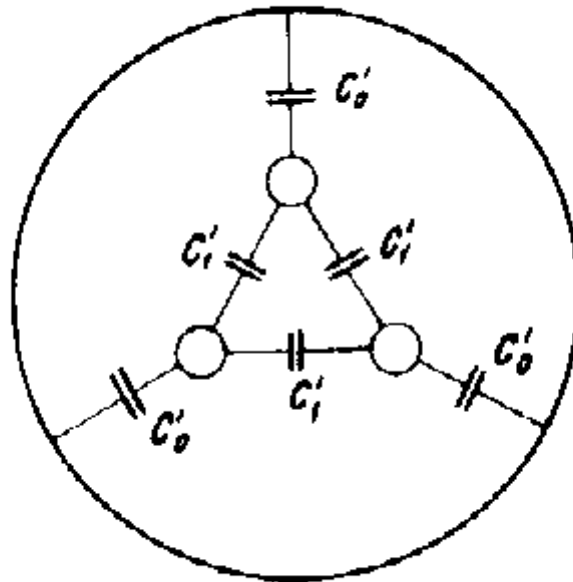
Muchas aplicaciones en la electrotecnia de altas tensiones pueden, con buena aproximación, considerarse como capacitores cilíndricos y de esa manera ser fácilmente calculados. De este modo por ejemplo, los arrollamientos de los devanados de los transformadores y también de los devanados de las máquinas, dispuestos en el interior de núcleos magnéticos, pueden ser considerados perfectos capacitores cilíndricos si despreciamos los efectos de bordes.

Campo en cable tripolar

La capacidad por unidad de longitud de un cable tripolar se calcula con:

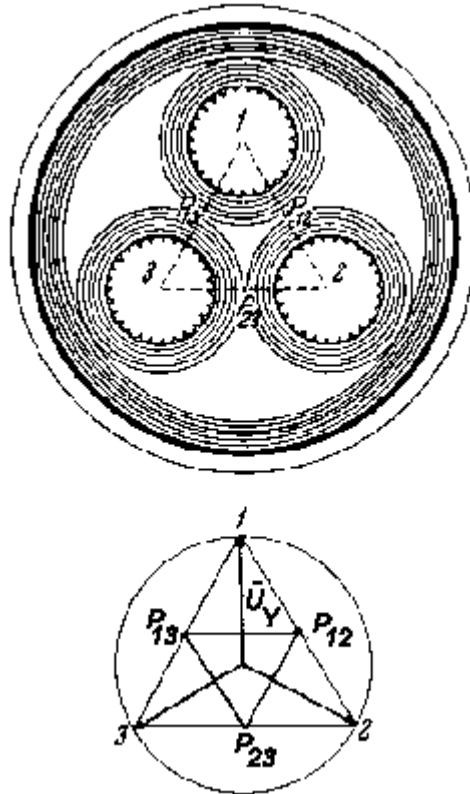
$$C' = 3C'_1 + C'_0$$

en la cual C'_1 representa la capacidad unitaria entre conductores y C'_0 la capacidad unitaria de cada conductor con relación a la pantalla a tierra del cable como muestra la [figura 5.5](#).



Se tiene una distribución de campo eléctrico menos favorable que en un cable de un solo conductor, o que un cable de tres conductores con tres pantallas independientes.

En un cable tripolar, la aislación envuelve cada uno de los conductores y además hay aislación de relleno que ocupa los vacíos. La aislación entre conductores se toca en los puntos P como se observa en la [figura 5.6](#).



La tensión entre estos puntos está representada en la figura por el triángulo vectorial P-P-P. El valor eficaz de tensión entre esos puntos resulta:

$$\frac{1}{2} U_Y \sqrt{3} = 0.866 U_Y$$

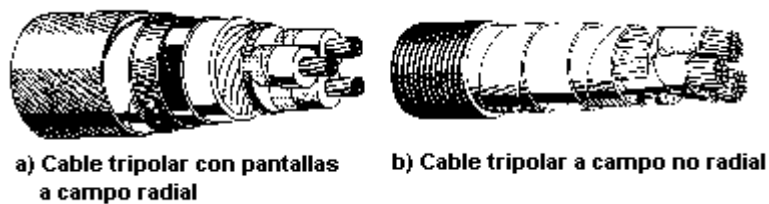
Como la rigidez dieléctrica de todos los materiales aislantes en sentido longitudinal es siempre menor que en el sentido transversal, se tiene en estos puntos una sollicitación desfavorable, que puede dar origen a descargas que con el tiempo pueden destruir la aislación. Por este motivo, este tipo de cable no puede tener el dieléctrico tan sollicitado como el cable de un solo conductor.

El cable aislado con papel impregnado constituye una de las primeras soluciones adoptadas y que ha perdurado para el transporte de energía con conductores enterrados.

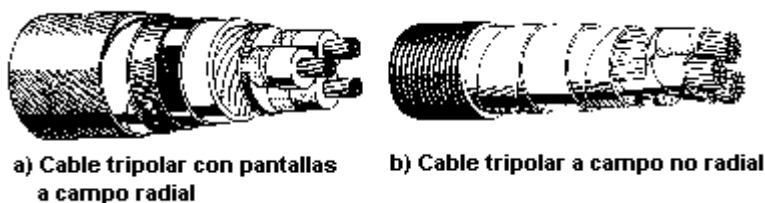
Un cable para energía, aislado con papel impregnado, está constituido generalmente por uno o más conductores destinados a conducir la corriente

eléctrica, revestidos por un material dieléctrico destinado a soportar la tensión eléctrica y por una vaina metálica que lo envuelve y lo separa del ambiente externo.

El cable puede ser del tipo a campo eléctrico radial y a campo eléctrico no radial. Al primer grupo pertenecen los cables en los cuales las líneas de fuerza del campo eléctrico están siempre dirigidas en forma radial, es decir en modo perpendicular al aislante, la [figura 5.7 a\)](#) muestra un cable tripolar de este tipo.



Al segundo grupo pertenecen en cambio aquellos cables en los cuales las líneas de fuerzas tienen también componentes tangenciales a las capas aislantes como arriba indicado, la [figura 5.7 b\)](#) muestra este tipo de cable, y ya se ha comentado la más desfavorable condición de sollicitación del dieléctrico.



Las pérdidas dieléctricas

Los capacitores con dieléctrico de material sólido o líquido, sollicitados por tensiones alternas presentan un ángulo de pérdidas, que está originado por las pérdidas dieléctricas de los materiales. La tangente del ángulo de pérdidas se denomina factor de pérdidas.

La medida de la pérdida dieléctrica determina la calidad media de una aislación, ella no sirve para detectar pequeños defectos, como por ejemplo

fallas del material, de una aislación que en su conjunto se presenta como buena. De todos modos la medida del factor de pérdidas es un óptimo control de la calidad del material, de la fabricación adecuada y principalmente para controlar el secado de una aislación.

Terminales de cables

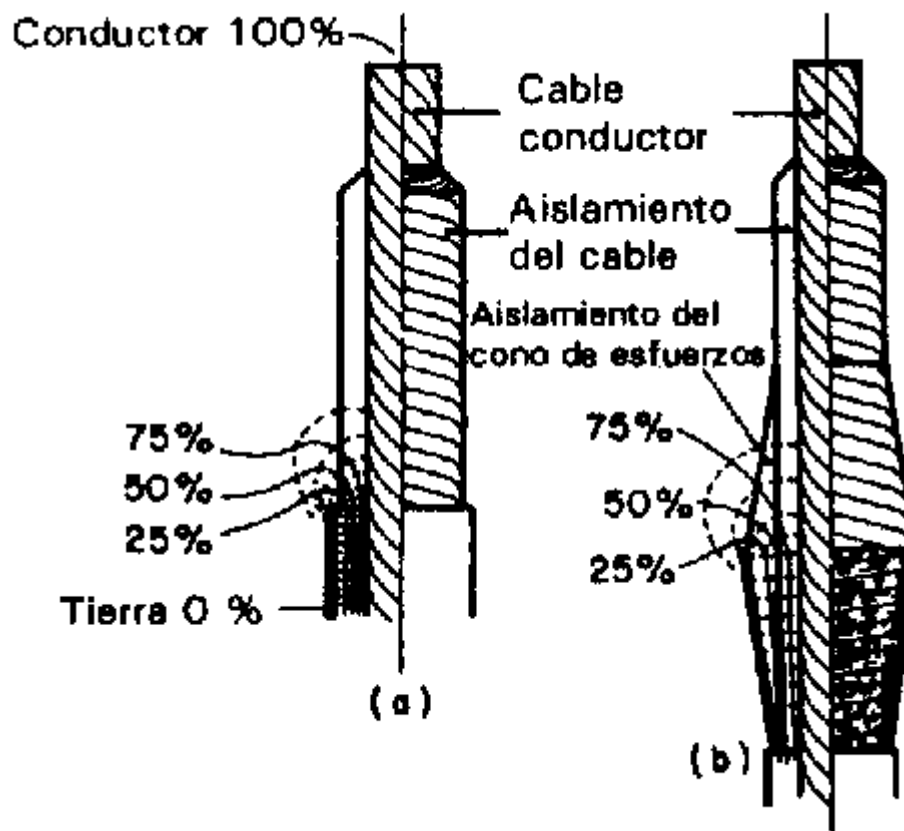
Los cables aislados de media y alta tensión están formados por un cable conductor, una capa de semiconductor que hace cilíndrico el núcleo, una capa aislante de espesor uniforme más o menos importante según sea la sección, nuevamente una capa de semiconductor, de muy pequeño espesor, una pantalla electrostática, y por lo menos una capa de protección externa.

Cuando se termina el cable para conectar un aparato, si se piensa que la distancia en aire entre conductor y pantalla no puede ser el espesor del aislante, la idea intuitiva para incrementar esta distancia es agregar distancia en aire de la superficie cilíndrica del aislante, limpiando cierta longitud eliminando el semiconductor exterior.

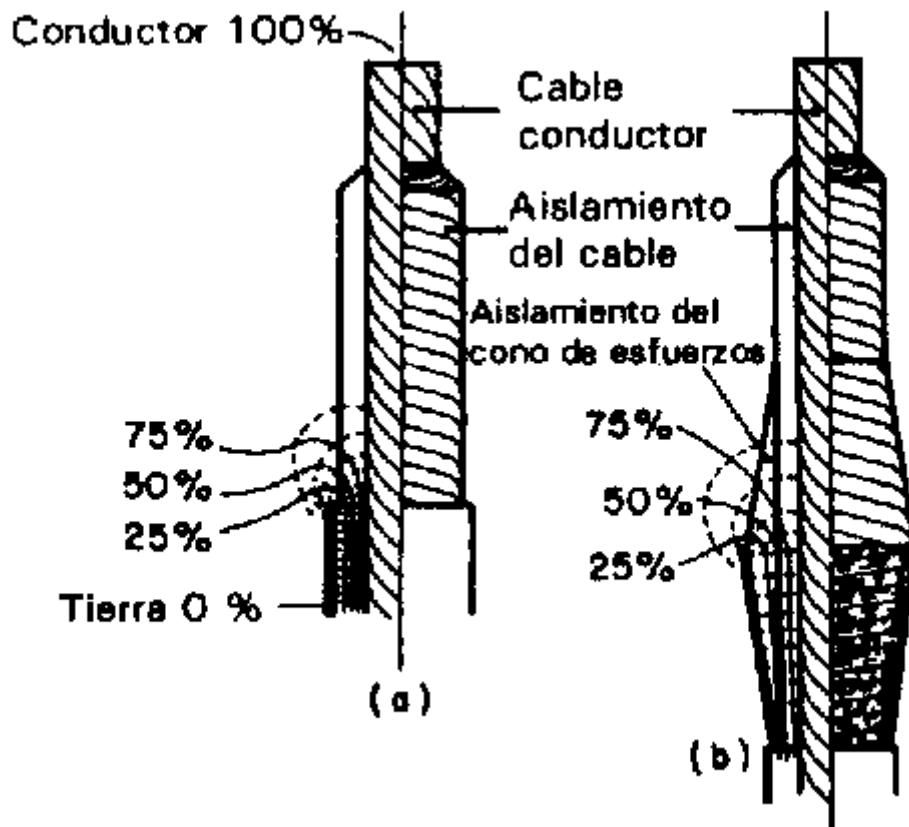
El aislante puede quedar con forma cilíndrica, o se le puede dar forma cónica, la distancia entre conductor y pantalla puede alcanzar un valor suficiente, si se estudia el campo de un terminal así hecho se observa una gran concentración de campo en la proximidad de la pantalla, y el material aislante no soportará estas condiciones permanentemente.

Para mejorar la condición debe controlarse el potencial en esta zona, para lo cual se puede recubrir una parte del cilindro aislante con semiconductor de elevada resistividad, de esta manera se logra cierta distribución del potencial y se mejora la distribución de campo, la [figura 5.8](#) muestra la distribución del

campo eléctrico (las líneas equipotenciales) entre conductor y pantalla en el terminal.



Otra forma de controlar el campo se logra agregando material aislante, dando al terminal que se construye sobre el cilindro una forma de dos troncos de cono, que partiendo del conductor crece primero, y luego decrece hasta el diámetro de la pantalla exterior, el cono que termina en la pantalla se recubre con semiconductor, y luego con una pantalla metálica, el otro en cambio queda de aislante limpio, ver [figura 5.8b](#).



Los troncos de cono se pueden realizar con cintas (vulcanizables) que se enrollan adecuadamente, con piezas sólidas prefabricadas, con material colado que fragua y se solidifica.

Los terminales para exterior se recubren con material aislante que soporta la intemperie, y que para controlar la contaminación tiene conos (polleras) que incrementan la línea de fuga.

En otros casos se introduce el terminal construido dentro de un aislador de porcelana hueco que cumple la función de protegerlo de la intemperie.

Para los cables aislados en papel impregnado de aceite (en particular fluido) el terminal se recubre con un aislador que contiene el aceite.

Los empalmes se construyen en forma parecida, se preparan los dos extremos, un manguito metálico une eléctricamente los conductores, el semiconductor se extiende sobre el manguito metálico dando formas suaves a la unión metálica,

encima se coloca el material aislante, en espesor mayor al espesor del aislante en el cable natural, formando conos y un cuerpo cilíndrico.

Estos diseños inician de un cuidadoso análisis del campo eléctrico en el material aislante (dieléctrico), que debe evitar puntos que sean solicitados en exceso.

Aisladores para transformadores

De acuerdo con sus funciones pueden clasificarse en:

aisladores de línea

aisladores de neutro

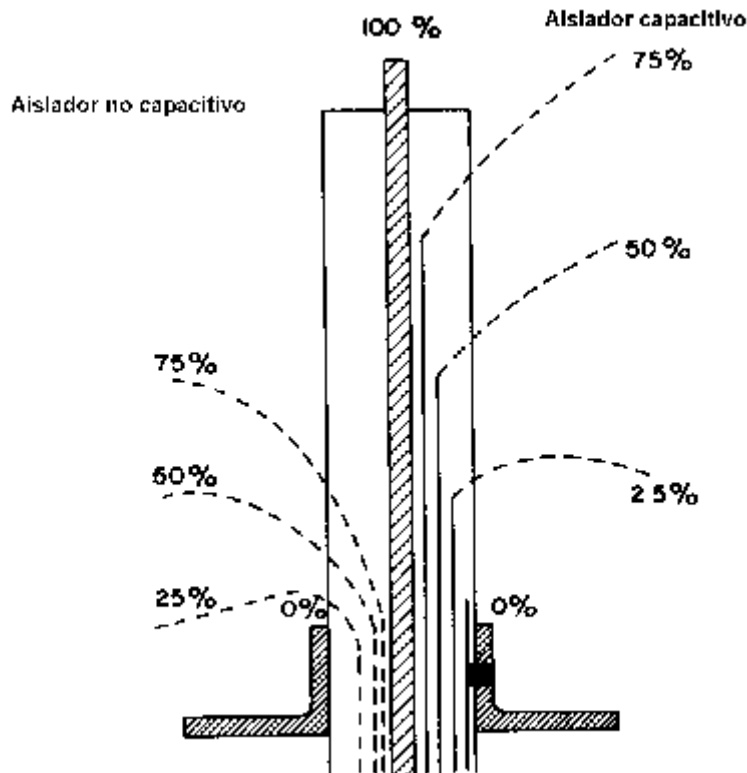
aisladores de terciario

Los aisladores para transformadores y reactores tienen una extremidad destinada a funcionar en aire y la otra inmersa en el aceite aislante.

Los aisladores de línea son de papel impregnado en aceite, con repartición capacitiva, y están provistas de una derivación para ensayos.

Los aisladores de neutro pueden ser de papel impregnado con aceite, papel impregnado con resina, papel aglutinado con resina, moldeadas, de cerámica, etc., con o sin repartición capacitiva.

En los aisladores capacitivos se tienen cilindros conductores concéntricos, como se indica en la [figura 5.9](#) (parte derecha), para formar superficies equipotenciales y mejorar la distribución de tensión.



La derivación de ensayo se utiliza como capacitor de acoplamiento para realizar mediciones de descargas parciales.

Los aisladores tienen un tubo central, de cobre o aluminio, que puede ser conductor o permitir el paso de un conductor rígido o flexible. En los aisladores para bajas tensiones y altas corrientes, el conductor está constituido por un cilindro central macizo.

La porcelana, además de sus funciones aislantes, ofrece protección contra los agentes externos. La parte expuesta está formada por polleras, que proporcionan una distancia de fuga adecuada para las condiciones de polución existentes en el lugar de utilización.

En las especificaciones de aisladores para transformadores y reactores deben considerarse los siguientes aspectos:

tensión nominal del equipamiento

corriente nominal

nivel de aislamiento del equipamiento

sobretensiones

nivel de cortocircuito

características ambientales

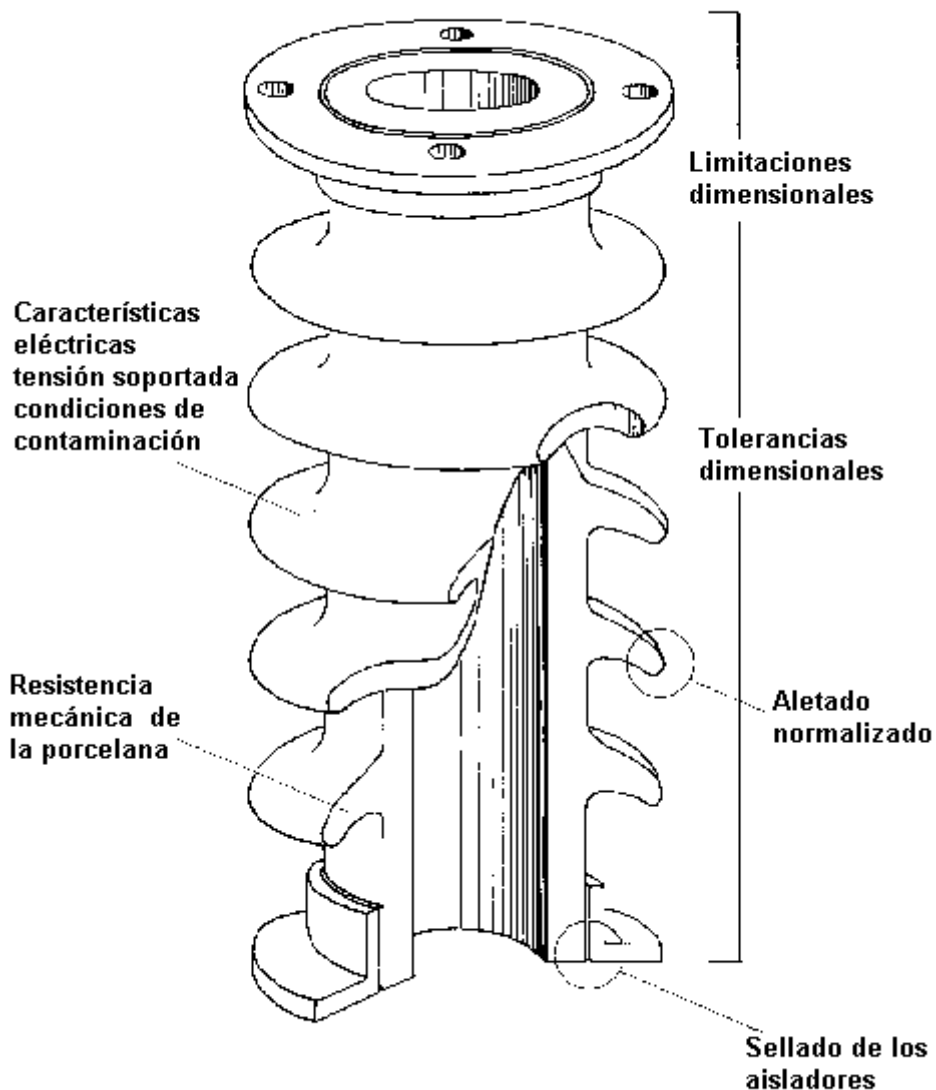
Aisladores soportes

Cumplen la función de mantener separados de tierra las partes en tensión de las construcciones.

Los materiales que se utilizan son porcelana y materiales sintéticos.

La porcelana contrariamente a lo que se piensa es muy sólida y resiste en modo excelente las sollicitaciones que se presentan.

Actualmente los aisladores de soporte han tomado forma de cilindro (aleteado para resistir la contaminación) como muestra la [figura 5.10](#).



En los extremos se cementan piezas metálicas con el objeto de fijar el aislador al resto del equipo, o a la estructura.

Para la aplicación son de importancia sus características mecánicas, ya que los aisladores están exigidos por:

esfuerzos de cortocircuito

esfuerzos sísmicos

presión del viento

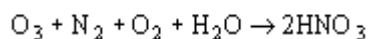
cargas de operación (cuando usados en equipos con movimientos)

Estas cargas presentan valores normales, valores excepcionales, y en algunos casos se deben considerar compuestas.

Aislación de arrollamientos de máquinas (descargas parciales, su efecto)

La aislación de las máquinas en la mayoría de las soluciones constructivas se realiza con capas de material aislante, que se tratan para que el dieléctrico quede lo más homogéneo posible, sin embargo el proceso constructivo puede hacer que queden capas de aire.

En el caso que se verifique una descarga parcial (ionización) en estas finas capas de aire, se tiene al mismo tiempo formación de ozono (O₃). Como en las capas de aire existen siempre vestigios de agua (H₂O) y naturalmente también nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂), se forma también en la descarga parcial en la capa de aire, ácido nítrico según la ecuación química:



El ácido nítrico y el ozono destruyen con el tiempo la aislación y también el material conductor. Se alcanza de este modo la perforación eléctrica de todo el capacitor. Por este motivo los cables, durante la fabricación, deben ser completamente liberados del aire y la humedad, lo cual se logra con un proceso de secado en vacío en alta temperatura (alrededor de 100 °C). Lo mismo es válido para otros materiales que deben trabajar con tensiones elevadas como por ejemplo los devanados de los transformadores de potencia y de medición.

Las estructuras aislantes en aire, como los arrollamientos de máquinas, no pueden lograrse totalmente libres de descargas. De algún modo la humedad del aire está siempre presente. De todos modos una buena aislación es posible utilizando adecuados materiales aislantes y procesos de fabricación.

Con esta técnica de aislación, difícilmente se construyen máquinas rotantes para tensiones superiores a 20 kV.

Recientemente se ha desarrollado un prototipo de máquina (generador) de mayor tensión, sus arrollamientos se construyen con cables de alta tensión.

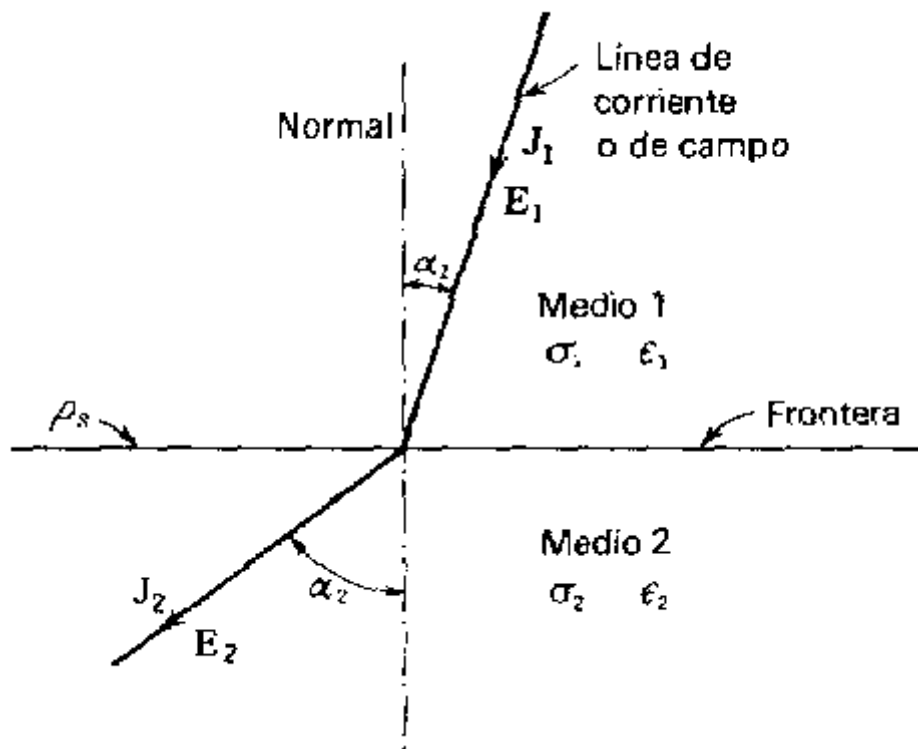
Esta máquina experimental puede generar en una tensión de 45 kV, desarrollos futuros se espera alcancen mayores valores pudiéndose entonces alimentar directamente una red eléctrica en alta tensión sin la necesidad de interponer transformadores elevadores. El nuevo generador puede ser dimensionado para producir energía eléctrica en una gama de tensión de 20 a 400 kV con algunas ventajas respecto a los generadores convencionales.

Refracción de las líneas de campo

Dentro de un medio el campo es continuo, de un punto a otro vecino cambia solo infinitesimalmente, en la frontera, límite del medio, el cambio puede ser abrupto (tanto en magnitud como dirección).

Conviene observar el campo en la frontera a través de sus componentes normal y tangencial.

En la frontera entre medios ϵ_1 y ϵ_2 las componentes tangenciales de E son las mismas a ambos lados de la frontera [figura 5.11](#):



$$E_{t1} = E_{t2} = \frac{D_{t1}}{\epsilon_1} = \frac{D_{t2}}{\epsilon_2}$$

El campo eléctrico tangencial es continuo a lo largo de la frontera entre dos medios (las diferencias de potencial entre dos puntos en los dos medios son iguales).

El campo tangencial en la frontera conductor dieléctrico es nulo (efectivamente, el campo es normal al conductor).

Cuando un campo alcanza una superficie con una dirección cualquiera, se puede descomponer en una componente perpendicular a la frontera, que se comporta como un "amplificador" del campo en el dieléctrico con menor permitividad.

Veamos por ejemplo el caso de un aislador que tiene una frontera porcelana – aire, que obligará al campo perpendicular en aire a crecer entre 6 y 7 veces por ser el ϵ_r de la porcelana 6 a 7 veces mayor que el ϵ_r del aire.

Tan elevada concentración de campo, evidentemente, provocará descargas localizadas en el material que tiene menor ϵ_r .

La componente paralela a la superficie de la frontera, cuya intensidad es igual en ambos medios sólido y aire, actúa como "gatillo", uniendo los distintos puntos de descarga localizada que provocan las componentes transversales. De este modo sin alcanzar una elevada sollicitación longitudinal se puede provocar la ruptura.

Se debe tener en cuenta que las aislaciones generalmente pueden tener un cierto grado de contaminación superficial. Esta situación contribuye a incrementar el efecto de "amplificación" transversal, deformando el campo eléctrico y concentrándolo en puntos específicos.

Este efecto se agudiza con la presencia de humedad, y la rigidez dieléctrica puede reducirse a 2 kV/cm o menos.

La forma aparentemente caprichosa de los aisladores sólidos en aire responde a distintas causas:

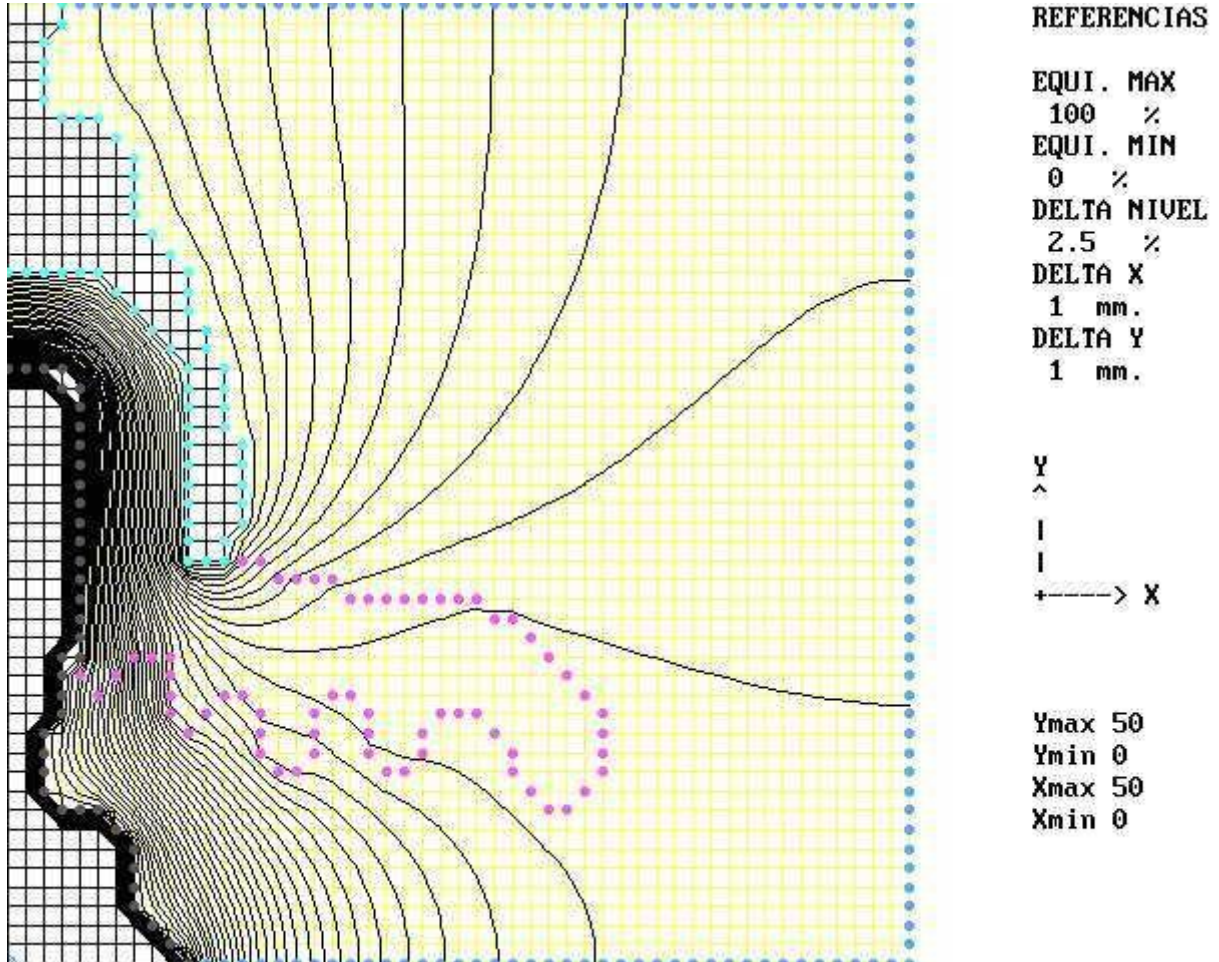
Se deben equilibrar las sollicitaciones transversales y longitudinales en la frontera, de modo que ninguna de ellas exagere su nivel.

Se debe alcanzar la frontera con el mínimo gasto de material, previendo el efecto pernicioso de la contaminación.

Se debe aumentar la zona protegida de los aisladores manteniendo algunos puntos libres de contaminación.

Se debe permitir el rápido escurrimiento de agua, ya que en condiciones de lluvia se debe evitar la permanencia de contaminación húmeda en la frontera.

En la [figura 5.12](#) se muestra un caso complejo e interesante de un aislador de campana, que muestra las correspondientes equipotenciales, observándose los puntos de quiebre donde se produce la refracción de las líneas de campo.



Determinación del campo eléctrico

La ecuación diferencial que se plantea para describir el potencial es de la forma

$$A \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \dots =$$

Según sea $B^2 - 4 A C$ se clasifica la ecuación, en elíptica (<0), parabólica ($=0$) o hiperbólica (>0).

Las ecuaciones elípticas corresponden a los problemas de campos eléctricos que finalmente se representan con ecuaciones de Poisson, o de Laplace.

Es difícil (si no imposible) resolver estos campos con métodos analíticos, por esta razón especialmente físicos e ingenieros han impulsado métodos numéricos, que fueron popularizados y difundidos por la posibilidad de usar las computadoras.

Los métodos numéricos pueden ser:

de diferencias finitas, con una retícula rectangular

de elementos finitos, aplicables a geometría cualesquiera

Las transformaciones de coordenadas permiten aplicar a geometrías complejas (curvas) los métodos de diferencias finitas (aplicables a geometrías rectangulares).

En los métodos de diferencias finitas, sobre el dominio se aplica una retícula regular, y se obtiene una ecuación de diferencias finitas aplicable a los puntos del dominio, con excepción de la frontera. Para la frontera se imponen condiciones (en general una condición mixta que fija la relación entre la solución y su derivada) y la ecuación de diferencias finitas aplicable en estos puntos es especial.

El caso general, con un retículo, presenta problemas en fronteras curvas, geometría no rectangular, para estos puntos se debe aceptar el error, o si se desea mejor solución es necesario actuar ajustando las diferencias, o aplicando al punto un método de elemento finito, o como se ha sugerido antes, aplicando una transformación de coordenadas que haga aplicable con la precisión deseada el retículo rectangular.

Si se plantea la ecuación de Laplace en diferencias finitas en un punto (0) del retículo (regular) caracterizado por una misma constante dieléctrica e en él y los puntos que lo rodean (1,2,3,4) se obtiene una relación:

$$V_0 = \frac{1}{4} (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)$$

Si el valor de ϵ es distinto en cada punto entonces se debe hacer un planteo similar pero considerando la constante dieléctrica, lográndose una relación más complicada.

CAPITULO 6

AISLANTES LIQUIDOS Y GASEOSOS

Introducción

Los aislantes líquidos son materiales que permanecen como tales en las aplicaciones eléctricas (máquinas, aparatos, componentes en general) y que cuando se encuentran en servicio no experimentan ninguna transformación física o química importante.

Se emplean para llenar espacios con dieléctrico homogéneo, para disipar el calor y para apagar arcos, como por ejemplo en: transformadores, cables, capacitores, aisladores pasantes, interruptores y otros aparatos.

Su presencia incrementa la rigidez dieléctrica entre partes pudiéndose observar aislantes sólidos impregnados y aparatos sumergidos en líquido aislante.

Las propiedades físicas de los dieléctricos líquidos como por ejemplo: peso específico, conductibilidad térmica, calor específico, constante dieléctrica, viscosidad, dependen de su naturaleza, es decir de la composición química, pero su rigidez dieléctrica, además está ligada a factores externos como por ejemplo: impureza en suspensión, en solución, humedad, etc., que, generalmente, reducen su valor, degradando la característica importante.

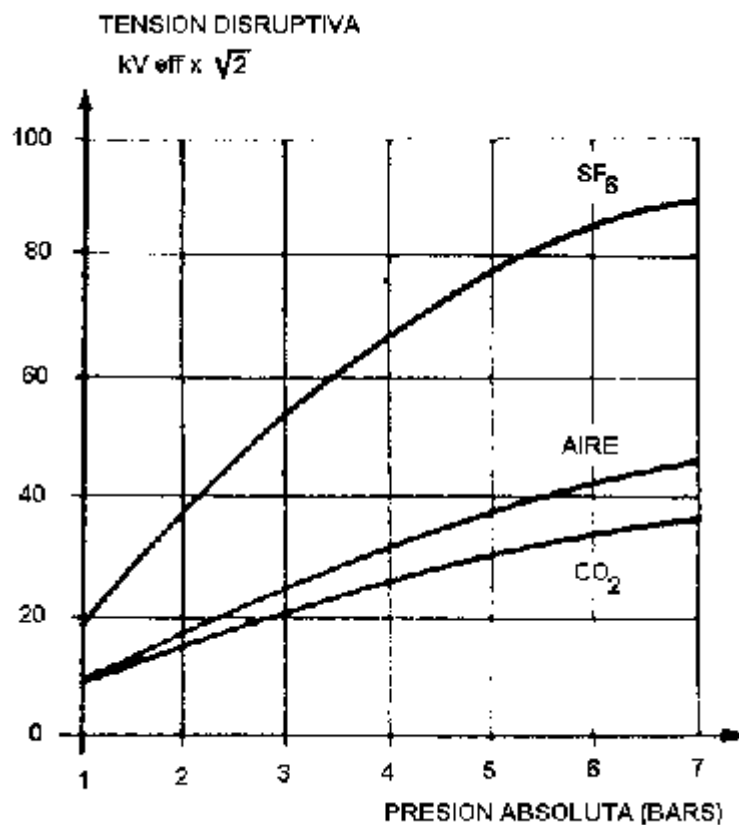
El aire y otros gases tienen elevadísima resistividad y están prácticamente exentos de pérdidas dieléctricas; su rigidez dieléctrica crece a medida que aumenta la presión.

El aire tiene una modesta rigidez, del orden de 32 kV/cm a la presión normal (1 bar), de alrededor de 160 kV/cm a 10 bar y aproximadamente 500 kV/cm a 30 bar.

La elevada rigidez dieléctrica a las más altas presiones se utiliza en los interruptores de aire comprimido para el apagado del arco. Se destaca que cada descarga en aire produce la formación de ozono activo, nocivo en particular para los aislantes a base de goma.

El gas que se ha utilizado y difundido desde los '70 en las aplicaciones eléctricas por sus excelentes propiedades es el SF₆, comparado con el aire es mejor aislante observándose en la [figura 6.1](#), que para una misma presión la rigidez es del orden del doble que la que corresponde al aire, además es mejor conductor del calor, cuando se descompone por arcos eléctricos se recombina en tiempo menores, en consecuencia se ha impuesto en aplicaciones de alta tensión y recientemente se ha difundido en aplicaciones de media tensión.

Se lo utiliza a una presión de 6 bars referido a una temperatura de 20 °C para que no se licúe a temperaturas muy bajas (-25 °C).



Lectura complementaria recomendada

En este punto se recomienda leer el Apéndice 4 "Aislamientos de las máquinas eléctricas" de los apuntes de "Cálculo y diseño de máquinas eléctricas".

Los temas que en él se tratan son:

Materiales aislantes, su clasificación,

Aislantes gaseosos y líquidos,

Barnices, resinas y su empleo,

Aislantes sólidos,

Distintos procesos de aislamiento de máquinas rotantes de alta tensión,

Aislación contra masa de máquinas rotantes de baja tensión.

A continuación se hace algunos comentarios adicionales sobre ciertos aislantes particulares.

Transformadores y capacitores con fluido dieléctrico a base de Bifenilos Policlorados

En cierta época se construyeron gran cantidad de transformadores y capacitores aislados en PCB, aislante conocido con distintos nombres comerciales tales como Askarel, Clophen, Inerteen, Pyralene, Arochlor, etc., y que tienen menor grado de inflamabilidad que el aceite mineral.

Al conocerse el alto grado de peligrosidad de los PCBs, su uso quedó excluido, pero para eliminar lo existente fue necesario desarrollar una tecnología de procesamiento, diseñar instalaciones y construir plantas que pudieran eliminar estos desechos (y otros) con la menor producción de componentes halogenados, dioxinas, furanos, metales pesados, compuestos de mercurio, etc.

Existen en el mundo plantas eliminadoras de desechos industriales peligrosos, los contaminantes deben ser remitidos a ellas, y como contraparte estas plantas entregan los certificados de destrucción.

En nuestro país si una empresa tiene transformadores o equipos con PCB, hay un reglamento que exige denunciar a la Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable de la Nación que posee estos objetos contaminantes y, entonces la empresa es considerada generador de PCB y es responsable por su tenencia.

Para su destrucción, como se requiere transportarlo, y esta es una operación de cierto riesgo, se deben obtener los permisos correspondientes.

La destrucción de las moléculas de PCB (componentes líquidos y sólidos no metálicos) se logra mediante temperaturas de 1300 °C con un tiempo de permanencia de los gases superior a 3 seg. Luego se enfrían los gases que provienen de los hornos a 80 °C en 0.025 seg., para evitar la reformación de moléculas de PCB, y la generación de dioxinas o furanos.

El SF₆ y sus productos de descomposición.

La característica saliente del gas SF₆ es su gran estabilidad (se descompone y recompone sin prácticamente generar productos de descomposición), por lo que eventuales pérdidas que pueden producirse permanecen largo tiempo en la atmósfera.

En la conferencia de Kyoto, donde se analizaron las distintas causas del efecto invernadero, se incluyó la recomendación de controlar el efecto que produce este gas.

Comparando la cantidad de SF₆ con los otros gases causantes del efecto invernadero, se observa que los efectos del SF₆ son de varios órdenes de magnitud inferiores a los otros gases.

Por otra parte este gas se usa en la industria electromecánica, en interruptores y estaciones blindadas de alta tensión, también se utiliza en transformadores de medida, también es muy usado en la industria de los vidrios dobles (por sus propiedades de aislación térmica y sonora) y en la suela de los calzados deportivos (por sus características de aislación).

Mientras que para las aplicaciones eléctricas es posible controlar los escapes de gas y garantizar que no hay pérdidas (1% por año o menos) y cuando se hace mantenimiento es posible y sencillo recuperarlo para reciclarlo con un interesante valor residual, la otras aplicaciones tienden a su dispersión (rotura del vidrio, destrucción del calzado).

Por lo tanto en base a estas consideraciones, puede aceptarse su uso en la industria electromecánica, (para profundizar este tema se recomienda consultar las normas IEC 376 y 480), en cambio se buscan sustitutos para las otras industrias.

Al abrir interruptores que han estado en servicio se observa la presencia de polvos blancos (productos de descomposición – tóxicos) que deben recogerse y para hacerlos inertes se tratan con cal viva y agua eliminándolos en esta sencilla forma.

Grandes transformadores aislados con gas SF₆.

El aumento de la demanda de potencia en grandes ciudades de Japón condujo a que hayan tenido que reforzar los sistemas de 154 kV y 275 kV para mantener una calidad de servicio.

Una de las soluciones fue la utilización de transformadores aislados con SF₆ para las subestaciones de distribución ubicadas en áreas urbanas altamente pobladas, en grandes edificios y en instalaciones subterráneas.

La [figura 6.2](#) muestra como evolucionó en el tiempo la potencia y tensión de los transformadores aislados con gas SF₆.

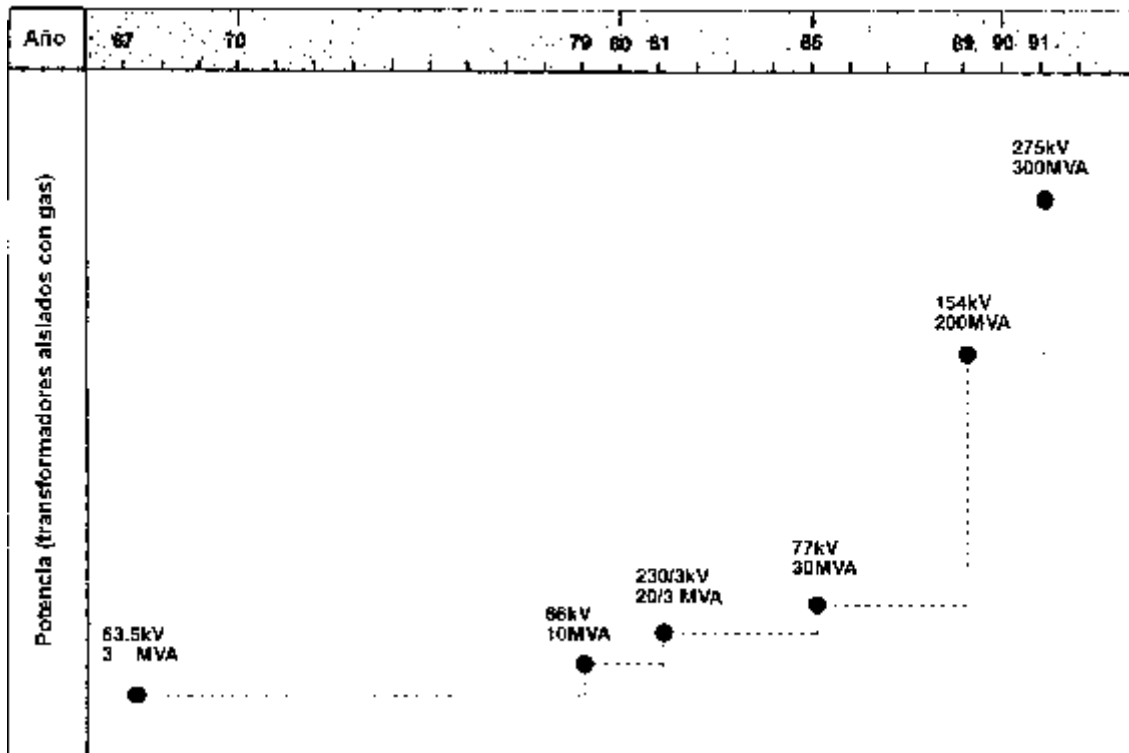


Figura 6.2

Las ventajas de la utilización de transformadores de alta tensión y potencia aislados con gas respecto a los transformadores en aceite son su diseño compacto y menor peso, bajo ruido y la eliminación del peligro de incendio (explosión).

Como los gases tienen menor conductividad térmica que los líquidos, para los transformadores aislados con gas que superan varias decenas de MVA se requiere además el uso de refrigerante líquido. Su elección está basada en el costo y sus propiedades eléctricas, físicas y químicas. En el Japón se utiliza

perfluorocarbon líquido $C_8F_{16}O$ que tiene importantes ventajas tales como buena resistencia dieléctrica, estabilidad térmica y química.

Para la aislación de las bobinas en transformadores con gas, se utiliza cinta de polyphenylene sulphide (PPS) que tiene una alta resistencia térmica que incrementa la resistencia dieléctrica del gas.

El perfluorocarbon líquido tiene menor viscosidad que el aceite de transformador y esto es una ventaja en el diseño del sistema de refrigeración, pero debido a que es mucho más costoso que el aceite de transformador, se trata de minimizar la cantidad que se utiliza.

CAPITULO 7

ANALISIS DE LAS EXIGENCIAS REALES A QUE SE HALLAN SOMETIDOS LOS DIELECTRICOS

Introducción

Hemos visto que en los sistemas eléctricos, por distintas causas se presentan sobretensiones, y que la aislación debe ser elegida económicamente, dimensionándola para soportar las solicitaciones que efectivamente se presentarán.

Recordemos que las sobretensiones que se presentan dependen de factores externos a la red, de características de componentes de la red, y de características de diseño de la red.

Las protecciones de sobretensión

La tensión de referencia para la sobretensión fase-tierra es el valor de cresta de la tensión simple

$$U_m \sqrt{2} / \sqrt{3}$$

Para limitar el valor de las sobretensiones impulsivas, y proteger al sistema de las solicitudes debidas a descargas atmosféricas se instalan descargadores.

Los descargadores tienen capacidad de drenar las corrientes correspondientes a sobretensiones impulsivas de muy breve duración.

Las corrientes que podrían corresponder a sobretensiones de maniobra (de mayor duración) representan demasiada energía y por esta razón sólo en contados y especiales casos a los descargadores se les asigna la función de drenar estas últimas.

La duración de las sobretensiones temporarias es muy grande y la protección de éstas se logra limitando su duración mediante relés de protección que desconectan los equipos.

No es económico realizar equipos y sistemas con grados de seguridad tales que permitan soportar sobretensiones excepcionales.

Métodos de control de las sobretensiones

Los equipamientos son solicitados por las sobretensiones durante todo el funcionamiento de un sistema eléctrico y en efecto estas solicitudes del aislamiento de los equipamientos deben ser minimizadas, para permitir una gran confiabilidad aceptable para la operación del sistema.

Las sobretensiones tienen una naturaleza intrínsecamente estadística, debido a una serie de variables aleatorias, tales como: dispersión del instante de cierre de los contactos de los interruptores, instante de ocurrencia de una falla del sistema, amplitud y relación de crecimiento de las descargas atmosféricas, condiciones operativas del sistema en el instante de ocurrencia, etc. y son, prácticamente, imposibles de ser eliminadas o mantenidas bajo riguroso control.

Como objetivo para evitar que el riesgo de falla del aislamiento de los equipamientos perjudique la operación del sistema y que los equipos se dañen con frecuencia, se adoptan dispositivos, o medidas especiales, para permitir un control de las sobretensiones, de manera de reducir sus amplitudes máximas y probabilidad de ocurrencia.

La utilización de métodos de control de las sobretensiones depende del tipo de sollicitación que se pretende controlar, de las características del sistema eléctrico, de factores climatológicos asociados con la región donde el sistema se extiende, etc. La adopción de un determinado tipo de mecanismo, para el control de las sobretensiones debe tener en consideración aspectos relacionados con su eficacia, costos y simplicidad de implementación, y otros. En principio, los sistemas de tensión más elevada son aquellos que necesitan de un mayor control en cuanto se refiere a las sollicitaciones de los equipamientos.

Los métodos o dispositivos más utilizados para controlar las sobretensiones son las resistencias de preinserción, los descargadores, las modificaciones de la configuración del sistema y el blindaje de líneas de transmisión y de subestaciones contra descargas atmosféricas.

Las resistencias de preinserción se conectan por un breve tiempo antes de que se produzca el cierre del contacto principal de los interruptores que ponen en tensión líneas de una cierta longitud que se considera importante.

Algunos interruptores que por su principio de interrupción generan sobretensiones, se diseñan para hacer la interrupción en dos etapas, primero insertando una resistencia de apertura y luego interrumpiendo la corriente reducida.

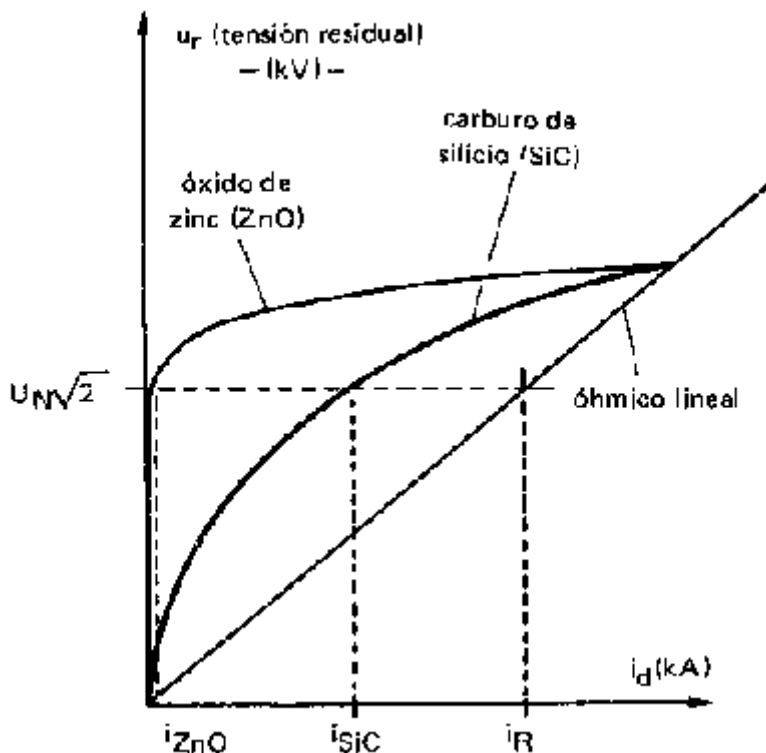
Descargadores

Los descargadores son aparatos destinados a proteger el material eléctrico contra las sobretensiones transitorias elevadas, drenándolas y limitando su duración, y eventualmente la amplitud de la corriente subsiguiente.

Estos aparatos comenzaron con formas de cuernos entre los cuales bajo una sobretensión se iniciaba una descarga, evolucionaron con resistencias no lineales (de carburo de silicio) en serie a un explosor, y luego apareció el óxido de cinc.

Los descargadores de óxido de zinc son los más modernos, comenzaron a penetrar en el mercado en la década de los años 70, y su efecto puede ser comparado al de los diodos zenner utilizados en electrónica.

La característica $u = f(i)$ del óxido de zinc se muestra en la [figura 7.1](#) donde se la compara con la de carburo de silicio y con una resistencia lineal. Las intensidades de corriente que circulan a través de estas resistencias para un determinado valor de tensión no requieren explicación, y se destaca el comportamiento del óxido de zinc.



El bajo valor de la corriente, que se observa al utilizar resistencias no lineales a base de óxido de zinc, facilita la extinción de la corriente de fuga, habiéndose podido suprimir el explosor de disparo (gapless arresters), eliminándose de este modo el comportamiento errático, desde un punto de vista probabilístico, de este dispositivo.

Este tipo de descargadores queda conectado galvánicamente a la red, drenan corriente permanentemente y su comportamiento térmico requiere mayor cuidado.

La corriente que demandan de la red es pequeña, igualmente que las pérdidas que resultan del orden de 0,15 W/kV.

Habitualmente se conectan entre los conductores de la red y tierra (en Y), en esta forma protegen de sobretensiones fase tierra.

Las sobretensiones fase tierra son características de las descargas atmosféricas, las sobretensiones llegan a una fase y quizás por acoplamiento capacitivo inducen en otras fases también una sobretensión, pero de igual polaridad, por lo que las sobretensiones entre fases no pueden ser mayores.

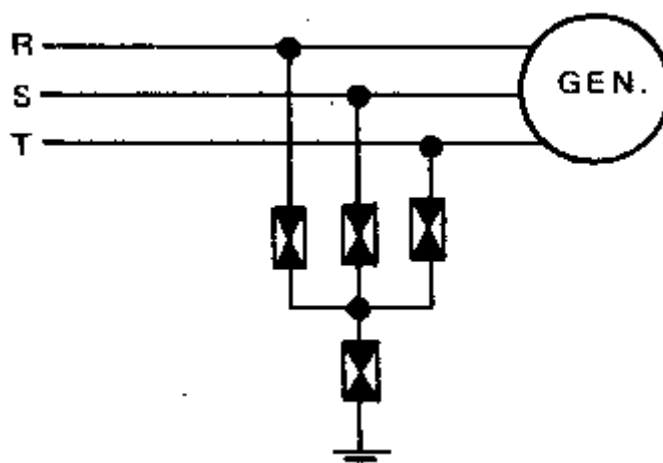
Las maniobras (interrupciones especialmente) generan sobretensiones distintas en las fases, y en consecuencia aparecen sobretensiones entre fases que pueden superar los valores que se presentan a tierra.

Estas situaciones se presentan en los generadores (por accionamiento del interruptor de máquina) y en los transformadores (por su interruptor de maniobra) y en algunos casos, en que se justifica por su importancia (valor de sobretensión o frecuencia con que se presenta, maniobra) se requiere limitar las sobretensiones entre fases.

Para estos casos se conectan descargadores entre bornes de los aparatos protegidos (en delta, entre los conductores), es así que se tiene 6 descargadores tres fase-tierra y tres entre fases.

Una alternativa que permite realizarse con solo 4 descargadores es la disposición llamada candelabro o tridente que tienen tres descargadores conectados a cada fase y a un punto intermedio, y un descargador entre este

último punto y tierra como se observa en la [figura 7.2](#).



En este caso siempre habrá dos pararrayos conectados (en serie) entre cada una de las fases y tierra, lo que permite su diseño para menos de la tensión nominal del sistema, y también dos descargadores en serie entre dos fases también de tensión nominal menor a la que requiere el sistema.

Una falla o daño permanente en uno de los pararrayos superiores (entre fases) podría conducir a un severo cortocircuito en bornes del equipo protegido (motor o generador). Es conveniente que estos pararrayos tengan una tensión nominal superior (en 50% o más) a la del equipo que debe proteger.

Las características de los descargadores son:

Tensión nominal, que es el valor máximo especificado de tensión eficaz a frecuencia industrial admisible entre bornes para la cual el descargador funciona correctamente. Esta tensión puede ser aplicada en forma continua sin modificar sus características de funcionamiento.

Como generalmente el descargador se instala entre fases y tierra, la elección de su tensión nominal debe tener en cuenta el grado de puesta a tierra de la red en el punto en que el descargador se instala.

Cuando la puesta a tierra está asegurada, los descargadores pueden ser para el 80 % de la tensión compuesta del sistema, a medida que la puesta a tierra es menos efectiva, este valor aumenta pudiendo llegar a ser necesario 100 % o más.

Frecuencia nominal, no requiere explicaciones.

Las ondas de impulso (tensiones o corrientes) se caracterizan por ser unidireccionales, sin oscilaciones apreciables, que crecen rápidamente hasta el valor máximo y caen luego a cero con eventuales pequeñas ondas de polaridad opuesta.

Los parámetros que definen una onda de impulso son los siguientes:

- Polaridad
- Valor de cresta (máximo)
- Duración del frente (que precede a la cresta) T_1
- Duración de la cola hasta el hemivalor T_2

Las ondas rectangulares de impulso en cambio crecen rápidamente, se mantienen en un valor prácticamente constante durante un tiempo largo y caen rápidamente a cero.

Los parámetros que definen esta onda son:

- Polaridad
- Valor de cresta
- Duración convencional de la cresta
- Duración convencional total.

Se dice que una onda de tensión de impulso es plena cuando no es interrumpida (cortada) por una descarga, contorneo o perforación, la onda

cortada puede serlo en el frente, en la cresta, o en la cola, y a partir del instante de corte la tensión cae bruscamente.

La onda de sobretensión normalizada que simula la descarga atmosférica es 1.2/50 microsegundos.

La onda de sobretensión cuyo tiempo de frente convencional es superior a 30 microsegundos se clasifica como sobretensión de maniobra.

Una vez comenzada la descarga, por una falla del descargador debida a sobretensiones anormales, corriente de descarga elevada o instalaciones equivocadas, puede no ser interrumpida la corriente subsiguiente; para evitar la explosión del descargador se prevén elementos de desconexión o dispositivos de alivio de presión, cuya función es evitar que permanezca la falla o al menos impedir la explosión.

Los ensayos tratan de representar en forma normalizada las sollicitaciones que el descargador sufrirá en su vida, y permiten controlar la calidad del diseño y uniformidad de la producción.

Ensayo de estabilidad térmica a la tensión máxima que les corresponde soportar (descargadores de óxido de cinc).

Ensayo de descarga a impulso, con impulsos de valor creciente se determina la curva tensión-tiempo, tanto para ondas de impulso atmosférico, como para maniobras si corresponde.

Ensayo de verificación de tensión residual, con corrientes de forma 8/20 microsegundos, entre 0,5 y 2 veces la corriente nominal del descargador se obtienen valores representativos.

Ensayos de resistencia a corrientes de impulso de gran amplitud, se aplica un impulso de corriente 4/10 microsegundos del orden de 10 veces la corriente nominal del descargador.

Ensayos con corrientes de larga duración (2000 microsegundos), se aplican 20 descargas, y las condiciones finales deben ser como para el ensayo anterior.

Ensayo de funcionamiento, éste trata de representar condiciones reales de funcionamiento aplicando simultáneamente una tensión de impulso y una tensión de frecuencia industrial sincronizada de tal manera de que las sollicitaciones que se presentan sean las máximas.

La tensión que se tiene en bornes del descargador difiere de la que se presenta en bornes del aparato protegido, por las caídas de tensión que se producen en los conductores de conexión del descargador a la línea y a la tierra y por las condiciones de propagación de la onda.

En consecuencia es de gran importancia que estas conexiones sean lo más cortas posibles, y que la red de tierra sea un punto común entre el descargador y el elemento protegido; en la medida en que la realización constructiva se aleje de esta condición la tensión sobre el elemento protegido sea mayor.

Asimismo es importante que el descargador esté próximo al elemento que debe proteger para que la protección tenga máxima eficiencia; en la medida que la distancia entre descargador y elemento protegido aumente, la protección resultará menos eficiente.

Explosores

Dos electrodos en aire, con forma adecuada son llamados explosores, y también realizan cierta protección contra sobretensiones, limitando el valor máximo de la tensión que puede haber.

El comportamiento posterior del explosor, depende de sus características, y particularmente de la potencia de cortocircuito en el punto en que el explosor se encuentra.

Por acción de estos elementos la onda de sobretensión se trunca, lo que produce otra sollicitación que sigue a las que corresponden al frente.

Con potencias de cortocircuito elevadas el arco en el explosor implica la actuación de las protecciones, por ser un arco a tierra (cortocircuito monofásico).

Filtros y supresores de sobretensión

Una onda de sobretensión que se propaga en una línea, se desplaza sin cambiar su forma (suponemos no hay efecto corona), si la línea finaliza, se produce la reflexión de la onda, y se duplica su valor.

Los descargadores se ponen precisamente en ese punto para limitar el efecto de reflexión de la sobretensión.

Un capacitor en el extremo de la línea crea un efecto parecido, particularmente reduce la pendiente del crecimiento de la sobretensión, influyendo de manera importante.

Este efecto beneficioso se presenta también cuando la línea prosigue, con la misma o distinta impedancia, y es muy utilizado cuando la línea es seguida por un equipo más sensible a las sobretensiones (protección de generadores, por ejemplo).

Cuando los fenómenos que se presentan son oscilatorios, el capacitor esta combinado con un resistor, que cumple la función de disipar energía de las oscilaciones de manera de eliminarlas (reducir su amplitud) en menor tiempo.

Esta protección es particularmente importante cuando se presentan sobretensiones debidas a maniobras (interrupción de corrientes inductivas, por ejemplo, transformadores que se desconectan frecuentemente como es el caso de alimentación de hornos de arco).

Estadística de los fenómenos, frecuencia

Los fenómenos de sobretensiones tienen características aleatorias, no siempre se presentan con el mismo valor, por lo que es difícil razonar sobre el valor máximo que alcanzan.

Esto es intuitivo, al observar fenómenos debidos a descargas atmosféricas.

Al observar sobretensiones de maniobra, también se adopta el enfoque estadístico, el interruptor hace muchas maniobras, y se obtiene cierta distribución estadística de sobretensiones, los distintos interruptores a su vez producen distintos valores de sobretensión en un punto determinado.

La presencia de descargadores de óxido de cinc, autoválvula o cuernos modifica los valores de las sobretensiones. En particular los descargadores deben drenar las sobretensiones atmosféricas. En ciertos casos se desea que drenen y limiten las sobretensiones de maniobra; lógicamente deben ser adecuados para soportar la sollicitación consiguiente.

Es importante tratar de lograr una relación entre el valor de la sobretensión y la frecuencia con que se presenta.

En la práctica, además de los valores posibles de sobretensiones en los terminales de los equipamientos, resulta de interés también, la determinación de los valores de corriente y energía en los descargadores.

CAPITULO 8

ESPECIFICACIONES DE ENSAYOS EN ALTA TENSIÓN

Consideraciones básicas

El objetivo principal de someter los equipamientos a determinados ensayos es demostrar si ellos son aptos para soportar los requisitos especificados. De esta forma, se tiene una cierta garantía de que los equipamientos podrán operar satisfactoriamente en las condiciones reales del sistema, simuladas durante los ensayos.

Los ensayos a que cada equipamiento deberá ser sometido están establecidos por las Normas referentes a cada equipamiento. Las normas están preparadas por entidades especializadas, normalmente con la colaboración de fabricantes y usuarios, estableciendo todas las características eléctricas, métodos de ensayo y de cálculo de ciclos de trabajo que representan lo que el equipamiento deberá realizar en servicio. Evidentemente, esta normalización tiene efecto directo en la reducción del costo de los equipamientos.

En este capítulo, haremos referencia a los tipos de ensayos a que pueden ser sometidos los equipamientos eléctricos, como así también un vistazo general de los ensayos dieléctricos para los distintos tipos de equipamientos. Los ensayos requeridos en una especificación técnica (ensayos de tipo, de rutina y especiales) están relacionados con cada uno de los equipos en particular.

Clasificación de los ensayos

Los ensayos se pueden clasificar básicamente en:

a. Ensayos de rutina

Son los ensayos que deben ser realizados en todas las muestras que representan los equipamientos comprados, o en una determinada cantidad de la partida total, con el fin de verificar la calidad y la uniformidad de fabricación y de los materiales utilizados en la fabricación.

b. Ensayos de tipo

Son los ensayos realizados apenas en uno o dos equipamientos idénticos o de tipo semejante, con el fin de verificar una determinada característica. Se trata en general de ensayos costosos, o de difícil interpretación.

c. Ensayos especiales

Son los ensayos que la norma pertinente no considera ni de tipo ni de rutina, requiriendo para ser realizados un acuerdo previo entre fabricante y comprador.

d. Ensayos de mantenimiento

Son los ensayos realizados con equipamientos que ya están en servicio, a fin de verificar su estado de conservación después de un cierto período de operación, o a la primera puesta en servicio los eventuales posibles daños resultantes del transporte y de la instalación.

Estos ensayos se realizan con niveles inferiores de sollicitación que corresponden a equipamientos nuevos.

e. Ensayos de campo

Estos ensayos son realizados para evaluar el desempeño global de un sistema eléctrico, incluyendo la operación y ajuste de los sistemas de protección y control.

Generalidades

En la norma IEC 60-1: "High-Voltage test techniques" Parte 1, se establecen las definiciones, prescripciones y modalidad seguida para los ensayos de materiales cuya tensión máxima U_m es superior a 1 kV.

El campo de aplicación cubre:

ensayos dieléctricos con tensión continua,
ensayos dieléctricos con tensión alterna,
ensayos dieléctricos con tensión de impulso,
ensayos con impulso de corriente,
ensayos combinados con los indicado arriba.

Su objeto es:

definir los términos de aplicación general y particular,
presentar las prescripciones generales referentes al objeto a ensayar y la modalidad de ensayo,
describir los métodos para producir y medir las tensiones y las corrientes de ensayo,
describir la modalidad de los ensayos,
describir los métodos de interpretación de los resultados de los ensayos e indicar los criterios de aceptación o rechazo.

Características referentes a la descarga disruptiva y tensión de ensayo

Pueden requerirse a veces variantes de los procedimientos de ensayo para obtener resultados reproducibles y significativos, que dependen de las particularidades del equipo que se ensaya.

El término descarga disruptiva (o rotura del dieléctrico), es aplicable a los fenómenos asociados con la falla de la aislación bajo condiciones de sollicitación eléctrica, en la cual la descarga cortocircuita completamente la

aislación ensayada, reduciendo la tensión aplicada entre los electrodos a un valor prácticamente nulo. Es aplicable a la falla de dieléctricos sólidos, líquidos y gaseosos o sus combinaciones.

Se pueden producir descargas fugitivas durante las cuales el objeto en ensayo es momentáneamente cortocircuitado por un encendido o un arco. La tensión en bornes del objeto en ensayo entonces se reduce momentáneamente a cero o a un valor muy pequeño. Según las características del circuito de ensayo y del objeto el dieléctrico puede restablecer sus características, asimismo, la tensión de ensayo puede ser superada. Esto en principio debe considerarse como una descarga disruptiva.

El término "salto de chispa" (sparkover) se utiliza cuando una descarga disruptiva se produce en un medio gaseosos o líquido.

El término "contorneo" (flashover) se utiliza cuando una descarga se produce en la superficie de un dieléctrico en un medio gaseoso o líquido.

El término "perforación" (puncture) se utiliza cuando una descarga disruptiva se produce a través de un dieléctrico sólido.

Una descarga disruptiva en un dieléctrico sólido conduce a la pérdida permanente de su característica dieléctrica en cambio en un dieléctrico líquido o gaseoso la pérdida puede ser solamente temporaria.

Descargas no disruptivas como aquellas entre electrodos o conductores pueden producirse sin reducción de la tensión a cero. Esta situación no debe considerarse como una descarga disruptiva a menos que un Comité de Estudios pertinente especifique lo contrario.

Ciertas descargas no disruptivas son denominadas "descargas parciales" que son tratadas por la Publicación IEC 270: "Partial Discharge Measurements".

Características presuntas de una tensión de ensayo

Las características presuntas de una tensión de ensayo en la cual se produce una descarga disruptiva, son aquellas que se hubieran tenido si no hubiese ocurrido ninguna descarga.

Características estadísticas de las tensiones de descarga disruptiva

Las tensiones de descarga disruptivas están sujetas a variaciones aleatorias y, en general, se deben realizar un cierto número de observaciones para determinar el valor de la tensión que tenga un significado estadístico.

Los procedimientos de ensayos, descritos en esta norma, están generalmente fundados en las condiciones estadísticas, y la información sobre la evaluación estadística de los resultados de los ensayos se dan en el Anexo A de este documento.

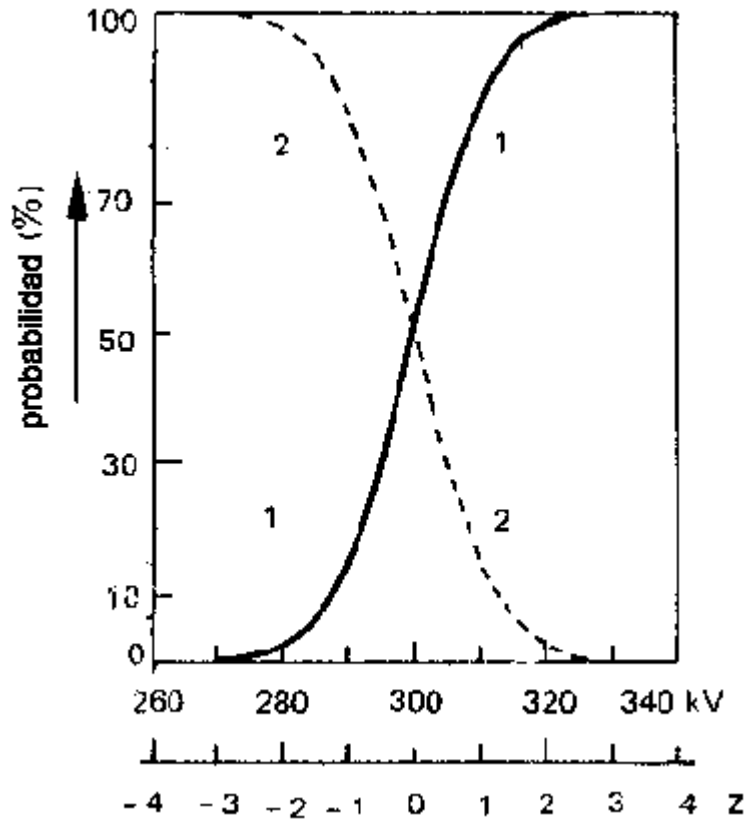
Probabilidad de descarga disruptiva de un objeto ensayado

La distribución de la rigidez del aislamiento de un componente de los sistemas eléctricos, por ejemplo de una cadena de aisladores, se determina mediante ensayos en los laboratorios de alta tensión, aplicando un impulso de tensión de polaridad y forma definidas, cuyo valor pico se va incrementando lentamente para cada nivel de tensión.

El número de descargas disruptivas que se presentan para cada nivel de tensión dividido por el número de veces que se aplicó esta sollicitación se denomina probabilidad de descarga p .

La curva de distribución acumulativa 1 que se indica en la [figura](#) muestra a modo de ejemplo la probabilidad p de descarga disruptiva en función de la tensión aplicada U , mientras que la curva 2 es la probabilidad q de soportar la

descarga, siendo q igual a (1-p). Se puede demostrar que ambas curvas satisfacen a la denominada distribución normal o gaussiana.



El punto $p = 50\%$ tiene particular importancia, indica que de un número total de impulsos aplicados, la mitad de ellos no será resistido por el objeto ensayado.

La abscisa se puede indicar en kV o bien con la variable normalizada

$z = (U - U_{50})/\sigma$, siendo $U_{50} = \sum U/n$ la tensión presunta que tiene una probabilidad 50% de producir una descarga disruptiva, para el ejemplo es igual a 300 kV, n

el número de ensayos y $\sigma = \sqrt{\sum (U - U_{50})^2/n}$ la desviación estándar que para este ejemplo resulta $s = 10$ kV.

La ventaja de la distribución normal o gaussiana consiste en que conocida la tensión U_{50} y la desviación estándar se puede estimar la probabilidad de descarga disruptiva para cualquier tensión.

Por ejemplo para el caso analizado se puede determinar el valor de la tensión de descarga $U_{10\%}$ o la tensión resistida $U_{90\%}$ mediante la relación:

$$U_{10} = U_{90} = U_{50} - 1.28 \sigma$$

Requerimientos generales para la modalidad de los ensayos

Los procedimientos de ensayos aplicables para tipos particulares de objetos a ensayar, por ejemplo la polaridad que se aplicará, el orden preferencial si las dos polaridades son aplicables, el número de aplicaciones y el lapso entre cada aplicación, están especificados para cada tipo de aparato, teniendo en cuenta factores tales como:

precisión exigida para los resultados de los ensayos,

la naturaleza aleatoria de los fenómenos de descarga y la influencia de la polaridad en las características medidas,

el riesgo de un deterioro progresivo en el caso de aplicación repetida de la tensión.

Disposiciones generales del objeto ensayado

En el momento del ensayo, el objeto a ensayar debe estar completo, con todos sus accesorios, y debe haber sido construido normalmente (para ser representativo) como otros objetos similares.

Las características disruptivas del objeto ensayado pueden afectarse por la disposición del montaje del objeto (por ejemplo distancia del objeto con otros vecinos con tensión, o la proximidad de estructuras a tierra, por su altura con respecto al suelo, por la disposición de los conductores que alimentan con tensión). Las condiciones generales deben ser especificadas por cada tipo de aparato.

Ensayos a seco

El objeto a ensayar debe estar seco y limpio. Si no se especifica lo contrario se debe realizar a temperatura ambiente y la modalidad de aplicación de la tensión se indica en la norma IEC 60-1.

Ensayos de polución artificial

Los ensayos de polución artificial suministran información del comportamiento de la aislación externa en condiciones de polución que se tienen en servicio.

Se indica como se debe preparar el objeto a ensayar, la modalidad de los ensayos, los métodos para simular la contaminación como así también los grados de polución.

Condiciones atmosféricas

Las condiciones atmosféricas normales son:

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

Presión $b_0 = 101,3 \text{ kPa}$ (1013 mbar)

Humedad absoluta $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

Factores de corrección atmosféricos

La descarga disruptiva de una aislación externa depende de las condiciones atmosféricas. Habitualmente, la tensión de contorno para un intervalo de aire se incrementa con el aumento de la densidad del aire o de la humedad. Sin embargo cuando la humedad relativa excede el 80%, la tensión de contorno se vuelve irregular, especialmente cuando el contorno se produce a lo largo de una superficie aislante.

Aplicando factores de corrección, la tensión de ensayo medida en ciertas condiciones de temperatura, presión y humedad, se deben referir al valor de tensión que se debe utilizar en condiciones normales

$$U = U_0 K_t$$

Siendo $K_t = k_1 \cdot k_2$ donde k_1 es el factor de corrección de densidad del aire (altura sobre el nivel del mar) y k_2 el factor de corrección de humedad.

El factor de corrección de la densidad del aire k_1 depende de la densidad relativa del aire d y se puede expresar por:

$$k_1 = d^m$$

La densidad relativa del aire se obtiene por:

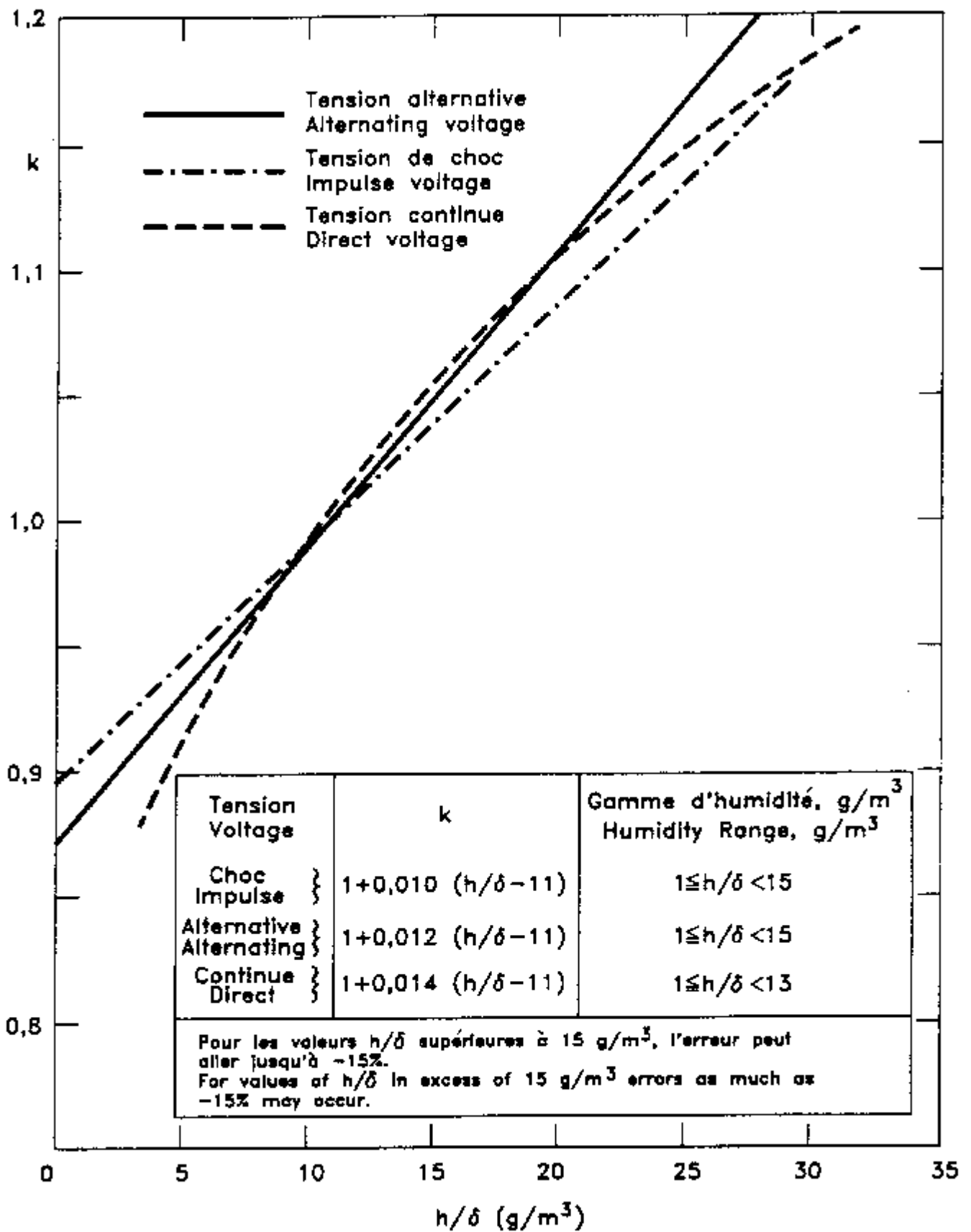
$$d = \frac{b \cdot 273 + t_0}{b_0 \cdot 273 + t}$$

Donde t y t_0 están dadas en grados centígrados y la presión atmosférica b y b_0 en kilopascal o milibar.

El factor de corrección por humedad k_2 se puede expresar por:

$$k_2 = k^w$$

Donde k es un parámetro que depende del tipo de tensión aplicada y se obtiene en función de la relación entre la humedad absoluta h y la densidad relativa d de la [figura 8.1](#)

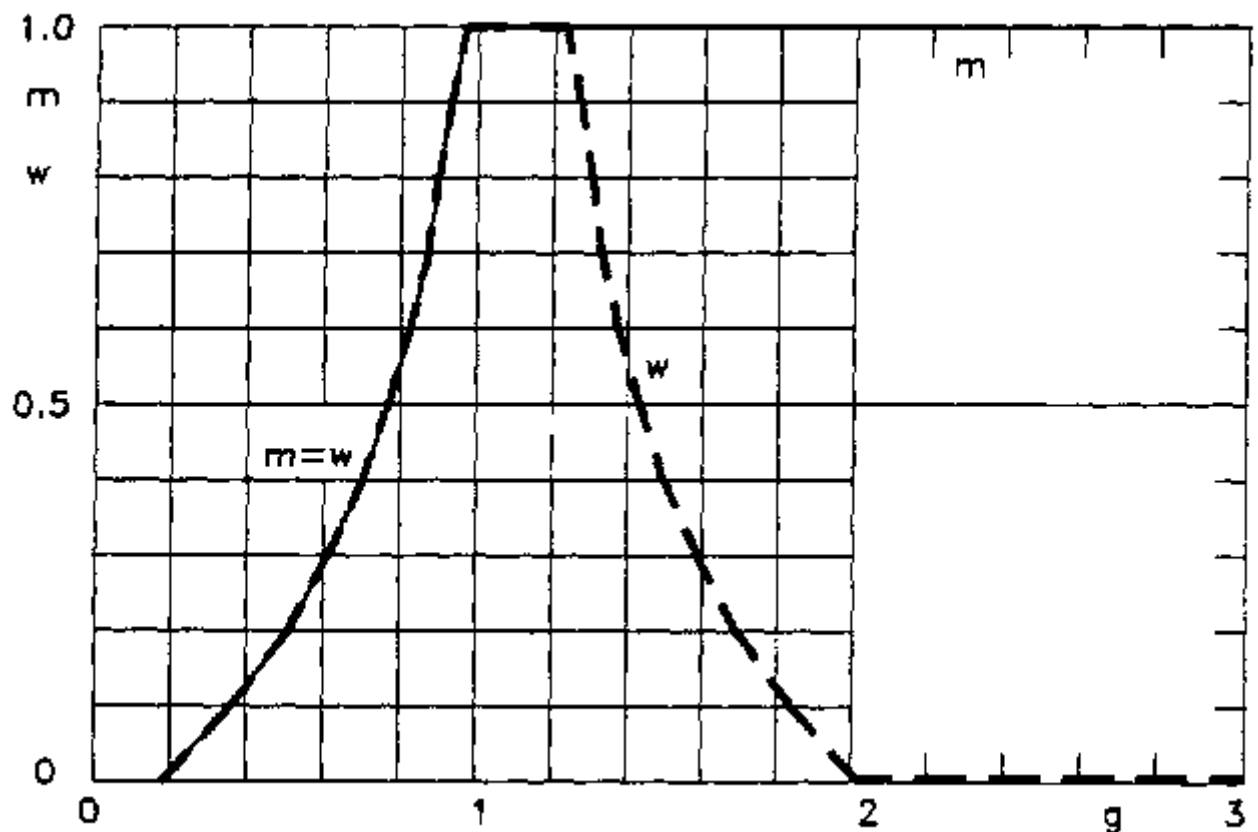


Los factores de corrección dependen del tipo de descarga y para ello se considera el parámetro:

$$g = \frac{U_B}{500 \times L \times \delta \times k}$$

Donde U_B es la tensión de descarga 50% (medida o estimada) para las condiciones atmosféricas reales, en kV, L la distancia mínima de descarga en metros, con los valores reales de densidad del aire d y de k . En el caso en que no se disponga de la tensión estimada de 50%, se puede suponer que U_B es igual a 1,1 veces la tensión de ensayo.

Los valores aproximados de los exponentes m y w se pueden obtener de la [figura 8.2](#).



Ensayos con tensión de impulso

Como hemos ya visto un impulso es una tensión o una corriente transitoria aperiódica aplicada intencionalmente que habitualmente crece rápidamente hasta alcanzar un valor de cresta, y después decrece más lentamente hasta cero.

Para casos especiales, los impulsos que se utilizan tienen el frente con crecimiento lineal, o transitorios de forma oscilatoria o aproximadamente rectangular.

El término "impulso" debe distinguirse del término "sobretensión", que como hemos ya visto, se refiere a fenómenos transitorios que se producen en los equipos eléctricos y en las redes en servicio.

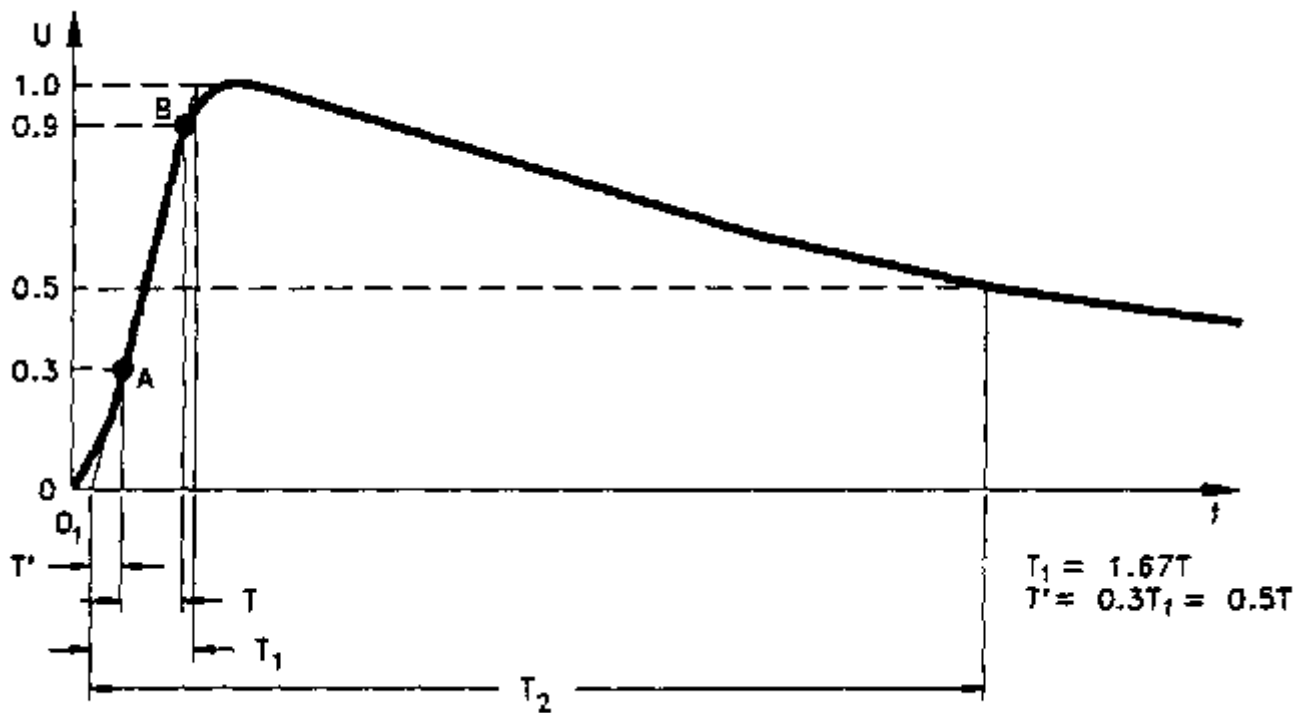
Recordamos la distinción entre impulso atmosférico y de maniobra en cuanto a la duración del frente. Los impulsos con una duración de frente de hasta 20 μ s se los considera como impulsos atmosféricos, y aquellos con una duración mayor impulsos de maniobra.

Generalmente, los impulsos de maniobra se caracterizan también por una duración total considerablemente mayor que los impulsos atmosféricos.

Estas definiciones son aplicables a impulsos sin oscilaciones ni rebasamientos o para la curva media trazada a través de las oscilaciones y rebasamientos.

Definición de onda de impulso atmosférico

Una onda de impulso plena es aquella que no se interrumpe por una descarga disruptiva como se indica en la [figura 8.3](#).

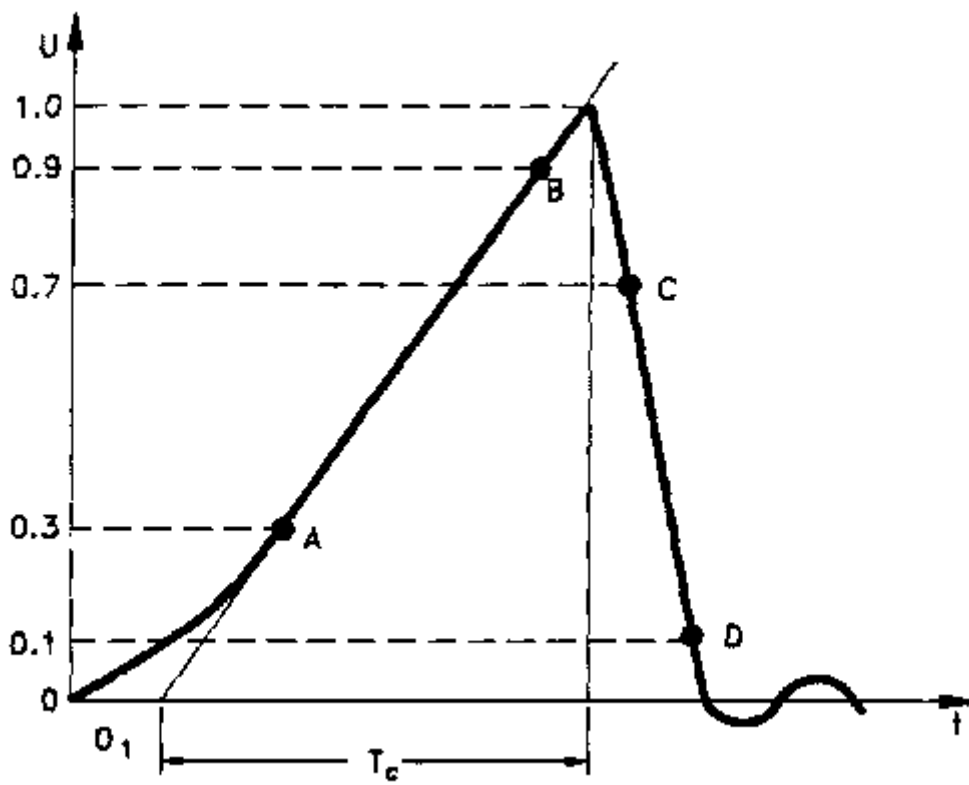


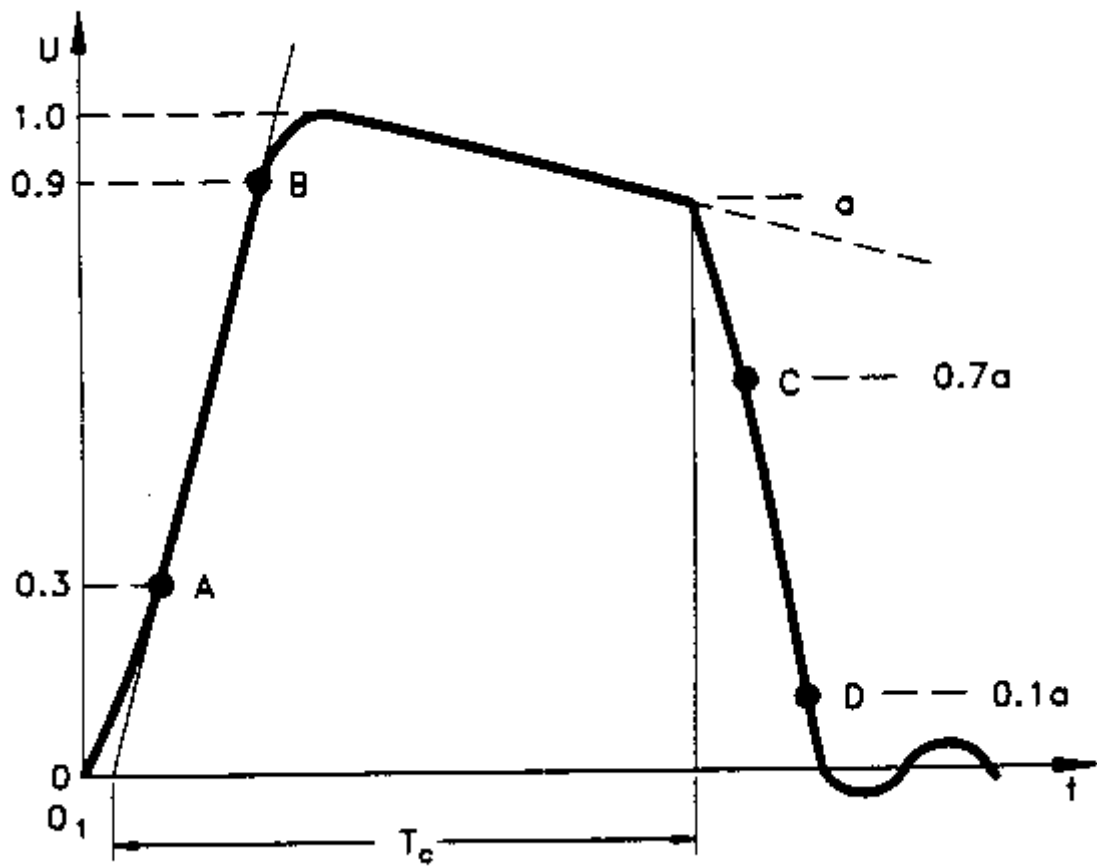
En la figura se observa como se procede para determinar el tiempo T_1 de duración del frente de la onda y el tiempo T_2 (hemivalor) de duración de la cola.

Una onda de impulso atmosférico cortada es aquella que se interrumpe bruscamente por una descarga disruptiva provocando una brusca caída de tensión, prácticamente a cero como se indica en la [figura 8.4](#) y [figura 8.5](#).

El colapso se puede producir en el frente, en la cresta o bien en la cola.

La duración hasta el corte es un parámetro convencional definido como el lapso entre el origen convencional O_1 y el instante de corte.





Tensión de ensayo

El impulso atmosférico normalizado es un impulso pleno con una duración de frente de 1,2 m s y una duración hasta el hemivalor de 50 m s, denominado impulso 1,2/50.

No es fácil lograr las duraciones del impulso por lo que se aceptan tolerancias entre los valores especificados y los valores realmente medidos:

Valor de cresta $\pm 3\%$

Duración del frente $\pm 30\%$

Duración del hemivalor $\pm 20\%$

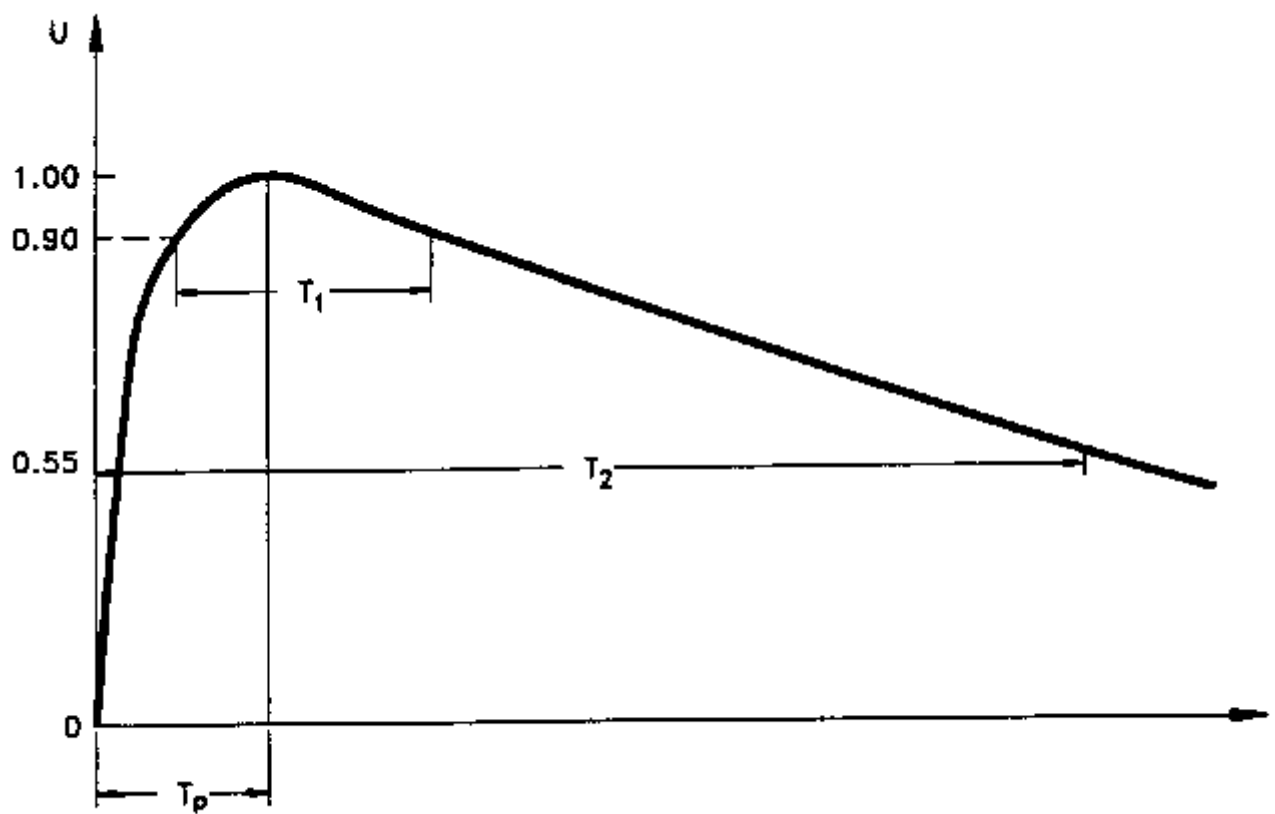
Se debe distinguir estas diferencias de los errores de medición que son las diferencias entre los valores realmente medidos y los valores verdaderos.

El impulso atmosférico cortado normalizado es un impulso cortado mediante un explosor (gap) exterior, después de 2 a 5 m s. Otros tiempos de corte pueden ser especificados para algunos casos especiales.

En razón de las dificultades prácticas concernientes a las mediciones, la duración de la caída de tensión durante el corte no ha sido normalizada.

Definición de onda de impulso de maniobra

Las características de una onda de maniobra implican algunos parámetros adicionales que se indican a continuación y que se ilustran en la [figura 8.6](#).



El tiempo de pico T_p es el lapso entre el origen real y el instante en que la tensión alcanza el valor de cresta.

El tiempo hasta el hemivalor T_2 es el lapso entre el origen real y el instante en que la tensión alcanza la mitad de su valor de cresta.

El tiempo por encima de 90% T_d es el lapso durante el cual la tensión excede 90% de su valor de cresta.

El tiempo a cero T_0 es el lapso entre el origen real y el instante en el cual la tensión pasa por cero por la primera vez.

Tensión de ensayo

El impulso de maniobra normalizado denominado impulso 250/2500 es un impulso con una duración hasta la cresta de 250 m s y una duración hasta el hemivalor de 2500 m s.

También en este ensayo es difícil lograr las duraciones del impulso, aceptándose las siguientes tolerancias entre los valores especificados y los valores realmente medidos:

Valor de cresta $\pm 3\%$

Duración del frente $\pm 20\%$

Duración del hemivalor $\pm 60\%$

En ciertos casos, por ejemplo con objetos de baja impedancia, puede resultar difícil ajustar la forma del impulso para quedar dentro de los valores de tolerancia recomendados. En estos casos, otras tolerancias u otras formas de onda pueden ser especificadas para un equipo en particular.

La tensión de descarga disruptiva para grandes intervalos de aire puede influenciar la duración del valor de cresta y del hemivalor del impulso de maniobra.

Coordinación de la aislación

Criterio de comportamiento

El comportamiento del aislamiento de un sistema se juzga en base al número de fallas de la aislación en servicio. Las fallas pueden tener consecuencias diferentes según el lugar del sistema donde se producen. Por ejemplo, en un sistema mallado, un defecto permanente en una línea o un recierre no exitoso de un interruptor de línea debido a una sobretensión de frente lento no son tan graves como una falla en barras.

En consecuencia, el índice de falla R_a admisible en un sistema puede variar de un punto a otro, dependiendo de las consecuencias de la falla en cada uno de esos puntos.

Las estadísticas de fallas concernientes a los sistemas en servicio y a los proyectos de diseño teniendo cuenta de estas estadísticas suministran ejemplos de índice de fallas admisibles.

Para aparatos, el índice de fallas R_a debido a sobretensiones se encuentra entre 0,001/año y 0,004/año en función de los tiempos de reparación. Para líneas aéreas, el índice de fallas admisible, debido a descargas atmosféricas varía entre 0,1/100 km/año y 20/100 km/año (el valor mayor se acepta para líneas de distribución).

Las cifras correspondientes para el índice de fallas admisible debido a sobretensiones de maniobra se encuentran entre 0,01 y 0,001 por maniobra.

Los valores para índices de fallas admisibles deberían encontrarse dentro de estos órdenes de magnitud.

Procedimientos de coordinación del aislamiento

La determinación de los valores de coordinación consiste en establecer los valores más bajos de tensiones soportadas por la aislación, que satisfaga los criterios de comportamiento del aislamiento, cuando estas aislaciones son sometidas a sobretensiones representativas de las condiciones de servicio.

Existen dos métodos de coordinación del aislamiento respecto a las sobretensiones transitorias: el determinístico y el estadístico.

Método determinístico

Este método se utiliza generalmente cuando no se dispone de información estadística proveniente de ensayos para determinar el índice de fallas del equipamiento en servicio.

Con este método, no se hace referencia al índice de falla eventual del equipamiento en servicio.

Método estadístico

Este método está basado en la frecuencia de ocurrencia de una causa dada, la distribución de probabilidad de sobretensiones relativa a esta causa y la probabilidad de descarga de la aislación.

Igualmente se puede determinar el riesgo de falla combinando simultáneamente, para cada aplicación de tensión, las probabilidades de descarga y de sobretensión teniendo en cuenta la naturaleza estadística de las sobretensiones y de la descarga mediante procedimientos adecuados, por ejemplo utilizando los métodos de Monte-Carlo.

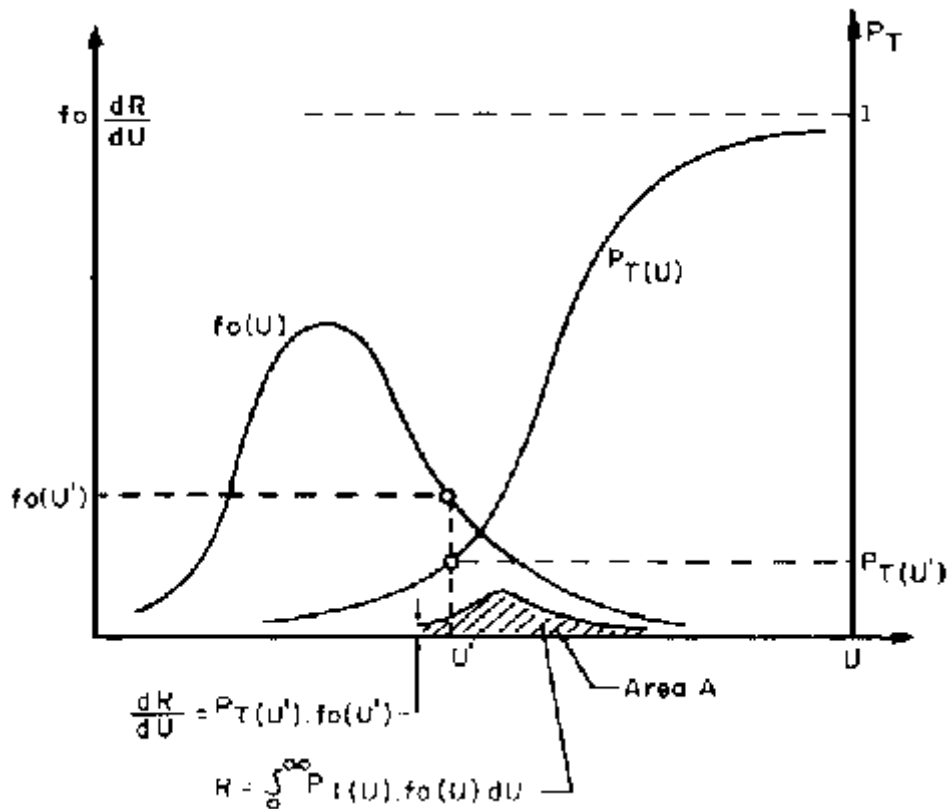
Se puede obtener el índice de indisponibilidad del sistema debido a fallas del aislamiento repitiendo los cálculos para diferentes tipos de aislamientos y diferentes configuraciones del sistema.

Particularidades de la tensión soportada a impulso de maniobra

La probabilidad de descarga varía con la tensión con una distribución que, para los fines prácticos de diseño, se puede considerar Gaussiana.

Para el diseño de la aislación de una línea o estación, se debe determinar el valor de s (desviación estándar) con la mejor exactitud posible.

Sin pretender profundizar el tratamiento matemático de este fenómeno, consideraremos como ejemplo una línea de transmisión para la cual se estudia mediante el uso del ATP, las sobretensiones que se presentan para un cierto número de energizaciones (por ejemplo 100), representándose la densidad de probabilidad de sobretensiones $f_0(U)$ que se indica en la [figura 8.7](#).



Se debe además realizar con los aisladores que se utilizan para la línea, ensayos de laboratorio para determinar la probabilidad de descarga $P_T(U)$ que también se indica en la figura.

Se denomina densidad de riesgo de falla al producto de ambas funciones y que se indica en la figura como dR/dU , finalmente el área A de esta característica se conoce como riesgo de falla.

Este último debe ser lo más bajo posible, en particular si se tiene en cuenta que la línea puede estar formada por un número grande de aislaciones en paralelo, y que basta que una falle para que la línea salga de servicio.

El criterio expuesto es aplicable a aislaciones del tipo regenerativo, cuando la aislación no puede regenerarse el aislante debe ser capaz de soportar la sobretensión sin presentar ninguna descarga.

Los equipamientos cuyos aislamientos no regenerativos son las partes principales del equipamiento (transformadores y reactores) son ensayados con un número reducido de impulsos: 1 pleno de amplitud reducida y 3 plenos, para cada polaridad, de amplitudes iguales a la tensión soportada, a fin de evitar daños al aislamiento por la aplicación de gran número de impulsos durante los ensayos.

Ensayos dieléctricos en transformadores de potencia

Los transformadores son sometidos a distintas pruebas de recepción para verificar su diseño y construcción, mencionaremos a continuación solamente las dieléctricas.

Las pruebas que se realizan se clasifican en tres grupos:

Pruebas individuales o de rutina

Pruebas de tipo

Pruebas especiales

Dentro de las pruebas individuales se realizan las siguientes pruebas dieléctricas:

Tensión aplicada

Tensión inducida

Medición de descargas parciales

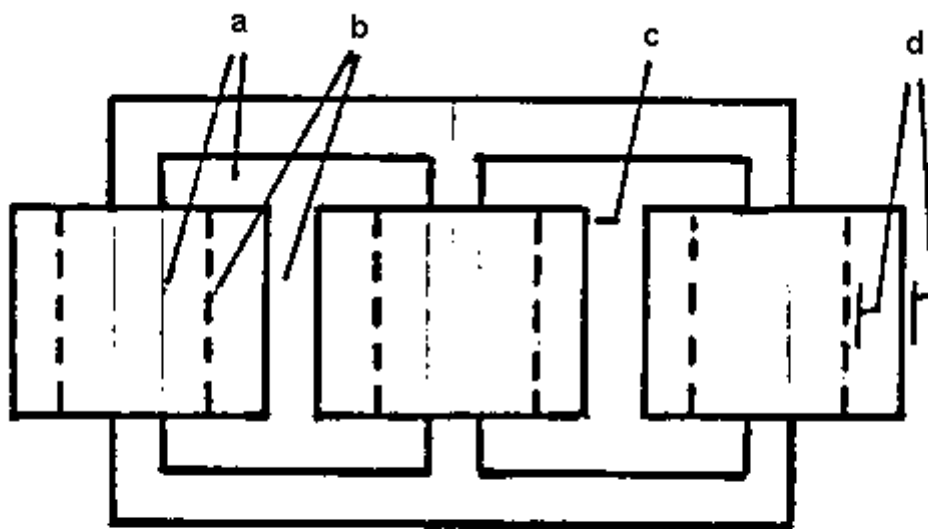
Controles del aceite mineral, por ejemplo, rigidez dieléctrica, factor de pérdidas, resistividad volumétrica, tensión interfacial, acidez, humedad, etc.

El ensayo de impulso atmosférico o de maniobra se encuentra dentro de los ensayos de tipo.

Dentro de los ensayos especiales se realizan mediciones de otro tipo, por ejemplo, medición de la impedancia de secuencia cero, nivel de ruido, determinación de armónicos de la corriente de vacío.

Esquema dieléctrico de un transformador

En la [figura 8.8](#) se indica en forma esquemática el aislamiento interno de un transformador.



- a) aislamiento principal
- b) aislamiento secundario
- c) aislamiento entre espiras
- d) aislamiento longitudinal

La aislación principal, está dada por las distancias dieléctricas a masa (núcleo o cuba), se realiza con papel impregnado, placas impregnadas y distancias en aceite.

La aislación secundaria, está dada por las distancias dieléctricas entre devanados de una misma fase, (baja y alta tensión) y entre fases adyacentes, utilizándose los mismos materiales que para el caso anterior.

La aislación entre espiras, es decir, entre conductores de un mismo devanado, se realiza con papel impregnado.

La aislación longitudinal está constituida por fronteras dieléctricas papel-aceite, que pueden verse solicitadas tangencialmente por una componente de campo eléctrico.

En el ensayo de tensión aplicada se prueba la aislación principal y secundaria. El ensayo de tensión inducida tiene por finalidad probar la aislación principal, secundaria y entre espiras. En el ensayo de descargas parciales se controla el estado microscópico del aislamiento total (transversal y longitudinal). Finalmente en el ensayo de impulso se prueba la aislación del devanado a este tipo de solicitaciones.

Desarrollo del ensayo de impulso

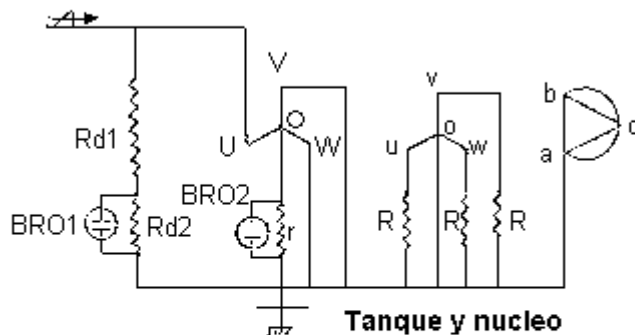
El ensayo de impulso debe realizarse sólo cuando las otras pruebas dieléctricas han sido exitosas, ya que en caso de duda, puede constituirse en un ensayo destructivo.

La calibración del circuito de impulso para ajustar las formas de onda dentro de los valores de tolerancia fijados por las normas se debe realizar con disparos de tensión reducida (aproximadamente 25% de la tensión de ensayo).

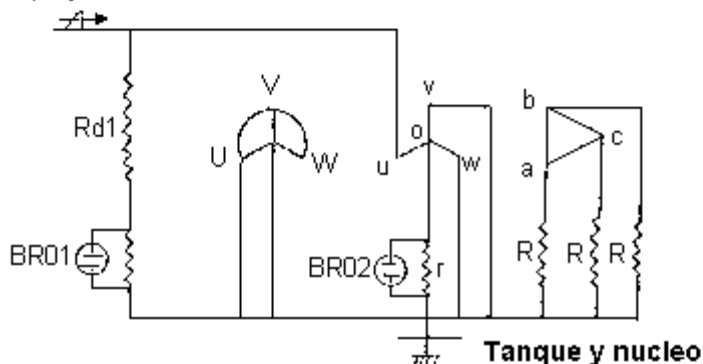
A modo de ejemplo para un transformador de 300/300/100 MVA con tensiones de 500/138/13.8 kV en la [figura 8.9](#) se muestran los diagramas de conexión para la realización de estos ensayos en los distintos devanados.

Diagramas de conexión para el ensayo con tensión de impulso

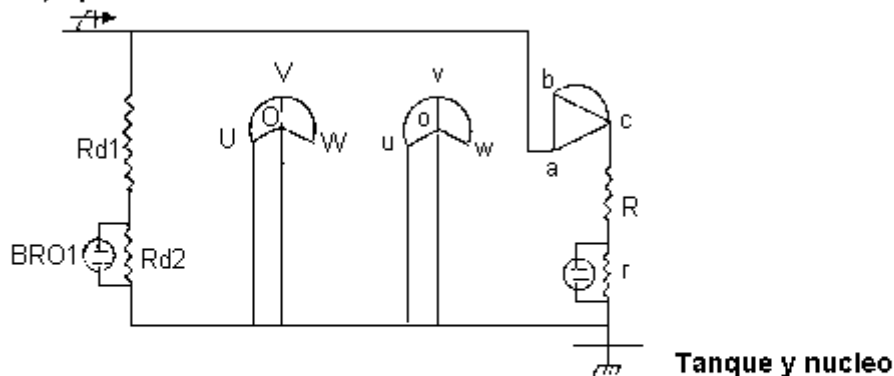
1) Aplicación en el terminal de AT



2) Aplicación en el terminal de MT



3) Aplicación en el terminal de BT



Nota:

BR01: osciloscopio para el registro de onda de tensión aplicada

BR02: osciloscopio para el registro de la corriente

r: resistencia derivación

R: resistencia de puesta a tierra para compensar la longitud de la cola de onda

Rd1 - Rd2: divisor resistivo de tensión

Se observa que para el ensayo de AT se ha insertado entre cada fase del devanado de MT y tierra una resistencia R para lograr la cola de la onda, como

así también durante el ensayo del devanado de MT las resistencias se han insertado en el devanado de BT.

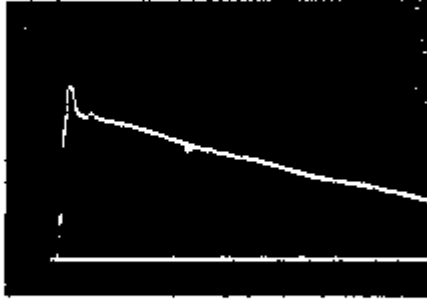
La forma de onda lograda es de 1.5/46 m s encontrándose dentro de los valores de tolerancia anteriormente indicados.

Para uno de los terminales del devanado de AT cuyo nivel de aislamiento (BIL) es de 1425 kV en la [figura 8.10](#) se muestran los oscilogramas de tensión y corriente correspondientes a esta fase, adoptándose para la onda de tensión reducida un valor de 999.5 kV (70% de la tensión de ensayo).

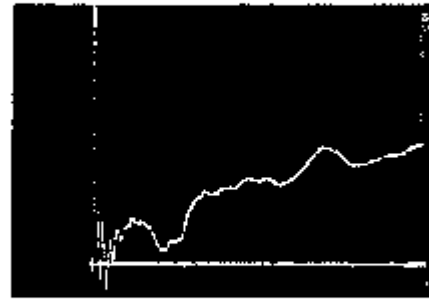
Oscilogramas del ensayo con onda de impulso

Terminal U

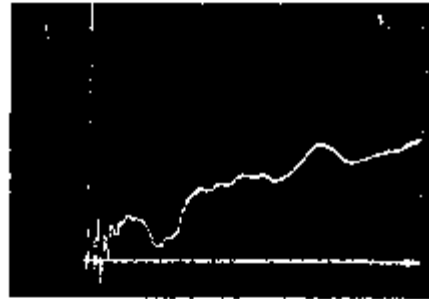
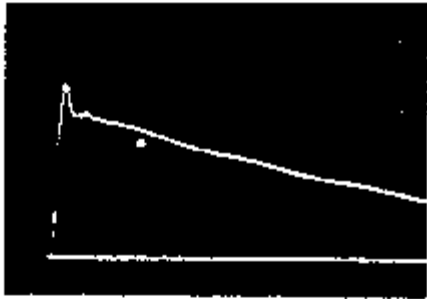
Onda de tensión aplicada



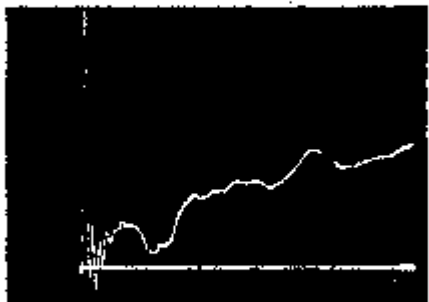
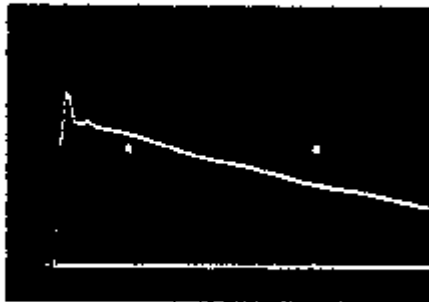
Onda de corriente detectada



Onda reducida



Onda plena



Onda plena



5 μ s

5 μ s

Análisis de los resultados

Se considera satisfactorio el ensayo cuando los oscilogramas de referencia (50% o 70%), son idénticos a los correspondientes con las ondas plenas 100%,

para lo cual se deben ajustar adecuadamente las ganancias de amplitud del osciloscopio.

Se comparan los registros de tensiones y corrientes obtenidos con ondas plenas entre sí y con los registros con onda reducida.

En caso que se requiera realizar también ensayos con ondas cortadas (previstos por las normas), para efectuar la comparación entre los distintos registros se requiere que tengan idéntico instante de corte.

Las diferencias de fase, sobre oscilaciones, de amplitud, etc., son indicadores de falla.

La interpretación exacta de la falla a partir de los oscilogramas requiere mucha experiencia, y en general sólo puede ser ilustrada con casos comprobados.

Descargas parciales

La descarga parcial es una descarga localizada de baja energía que se presenta en puntos del aislamiento donde la sollicitación supera la rigidez dieléctrica de un espacio microscópico, denominado vacuola.

Por sollicitación se entiende la intensidad de campo eléctrico, o gradiente de potencial $E(x) = \partial U / \partial x$.

La rigidez dieléctrica E_{di} es la máxima intensidad de campo tolerada por la aislación, en aire se toma $E_{di} = 24,5 \text{ kVpico/cm}$ (aproximadamente 17 kV/cm).

Si las descargas parciales se presentan en espacios abiertos de los sistemas de alta tensión en aire (por ejemplo entre una punta y una placa) se las denomina comúnmente "descargas corona", si en cambio se presentan en el interior de un material "descargas internas" son las que comprometen el aislamiento sólido.

El parámetro más significativo es la carga eléctrica Q transferida en la vacuola, denominada descarga aparente, y su unidad de medida es el pC.

Esta descarga aparente no es directamente leída por el instrumental de laboratorio debido a la atenuación propia del circuito de medida, la interpretación del resultado de medición es difícil debido a que:

La descarga real encuentra múltiples caminos de acceso al terminal de medición (capacidades de dispersión, acoplamientos entre devanados).

Además el pulso real experimenta en su desplazamiento, rebotes y deformaciones (ondas viajeras).

CAPITULO 9

INSTALACIONES DE PRUEBA PARA ALTA TENSIÓN

Introducción

Para entender mejor la función de los grandes laboratorios actuales en el mundo, se requiere analizar cuales fueron las necesidades que originaron los primeros laboratorios en el pasado.

El desarrollo de la industria electrotécnica en distintas regiones del mundo está ligada a la presencia próxima de las posibilidades de realización de investigaciones. En particular la alta disponibilidad de laboratorios de ensayo en ciertas regiones promueve el desarrollo, viceversa la no disponibilidad lo impide.

A modo de ejemplo puede analizarse el caso de la industria de Italia que después de una etapa de rígida autarquía, al final de la segunda guerra se orientó en un intento de lograr un sostenido desarrollo autónomo.

La revolución industrial y tecnológica que se presentaba (en Italia) terminada la segunda guerra en lo referente al desarrollo eléctrico y electromecánico, no solo debía ser ordenada, sino que para continuar mejor el proceso de expansión se debía comenzar a pensar también en nuevas necesidades que se presentaban como consecuencia del progreso técnico alcanzado en otros países más avanzados.

Superada la emergencia inmediata de la posguerra y retornada la casi normalidad, las empresas eléctricas habían recommenzado a producir describiendo con optimismo que la energía parecía no ser suficiente.

El problema de la unificación de las frecuencias y de la interconexión de las redes, para poder intercambiar energía, fue resuelto para permitir alcanzar la unidad de la Italia eléctrica a inicios de los '50.

Algunas grandes industrias electromecánicas desarrollaban entonces sus propios productos con investigación interna en sus propios laboratorios, alcanzando algunas de ellas niveles tecnológicos de vanguardia a nivel internacional.

Otras industrias trabajaban con licencia o participación accionaria extranjera. Estas sociedades madres tenían sus propios laboratorios y probaban todos sus aparatos y productos.

Recordemos el slogan de una empresa americana que decía a sus clientes: "Usted puede confiar en Westinghouse", quedando sobreentendido, cómpralo sin probarlo.

Pero la industria italiana sentía no poder continuar con la dependencia que frenaba el avance, los constructores debían resolver por ejemplo la realización de pruebas de los interruptores... Aparato que se encuentra en tantas

estaciones eléctricas, está cerrado e inerte semanas y semanas, pero si ocurre una falla debe ser capaz de intervenir.

Pero esto se debía verificar, y para comprobar que los interruptores podían efectivamente interrumpir corrientes de cortocircuito existía sólo la prueba.

En consecuencia se requería además de laboratorios para pruebas de alta tensión, de un laboratorio de gran potencia, inexistente en Italia antes de 1950, año en el cual la Magrini, había adquirido un alternador para poder realizar pruebas de cortocircuito.

Este alternador era de modesta potencia aplicable a pruebas de media tensión y no atraía muchos clientes: además difícilmente otros constructores aceptaban realizar pruebas de sus propios productos en el laboratorio del competidor, viéndose, entonces obligados a realizar las pruebas en laboratorios lejos de su país.

Esta situación condujo a algunos pioneros a impulsar la construcción de un laboratorio propio independiente que dio origen al núcleo del primer laboratorio (denominado "Laboratorio X") del futuro Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (CESI).

Objetos de ensayo y procedimientos

Se indican a continuación algunos de los objetos que se ensayan en un laboratorio:

Aisladores de suspensión y de soporte

Interruptores

Celdas

Descargadores

transformadores de medida

Transformadores de distribución

capacitores

bushings

Torres y modelos de torres de líneas

Conductores

Cables

Equipos aislados con aceite

Equipos aislados con gas

Los procedimientos más comunes de ensayos son:

Ensayos de tensión soportada y contorneo con corriente alterna, continua e impulsos atmosféricos y de maniobra en seco, bajo lluvia y menos frecuentemente bajo condiciones de polución artificial

Medición de descargas parciales, radio interferencia

Medición de pérdidas en una línea de corriente alterna y continua

Medición de pérdidas dieléctricas ($\tan \delta$)

Ensayos de calentamiento

Medición de pérdidas en vacío y en carga de transformadores y reactores

Investigación

Definir que es la investigación resulta bastante difícil y frecuentemente muchas de las actividades denominadas de investigación no son tales, sino simplemente una colección de datos experimentales, o un trabajo distinto al normal.

Estas actividades se convierten en investigación cuando los datos son analizados, sistematizados y utilizados en un modelo de validez general.

La verdadera investigación consiste en encontrar respuesta a las preguntas "cómo" y "porqué" y hacer una razonable estimación de "cuánto cuesta".

Elección de los métodos de ensayo y recursos de investigación

Los métodos para obtener suficiente y precisa información de ensayos y para realizar investigación, dependen además de los recursos, del tipo de laboratorio.

Se pueden considerar básicamente tres tipos de laboratorios:

Laboratorios para propósitos generales

Laboratorios industriales

Laboratorios para propósitos específicos

Al primer grupo pertenecen aquellos laboratorios que están equipados para poder realizar prácticamente todo tipo de ensayos requeridos por clientes tales como fabricantes, empresas suministradoras de energía, o usuarios de equipamiento electromecánico que desean realizar pruebas en un laboratorio independiente (no del fabricante del producto).

Se trata de laboratorios de prestigio internacional que tienen una amplia trayectoria en estas actividades, y que han ido progresivamente creciendo y adecuándose a las necesidades y requerimientos que el avance tecnológico impone, desarrollando nuevos métodos de prueba y exigencias que años atrás eran impensables.

Los laboratorios industriales son aquellos que se encuentran instalados en las empresas y que tienen por finalidad permitir al fabricante resolver sus propias

necesidades de pruebas (control de materiales, procesos de fabricación, probar y experimentar nuevos prototipos), y además realizar todos los ensayos de rutina (control de la fabricación) y también algunos de los ensayos de tipo (control del diseño).

Al último grupo pertenecen aquellos laboratorios construidos por una universidad para la realización de ensayos de alta tensión y/o potencia que están destinados a satisfacer requerimientos de empresas locales que no disponen de adecuados laboratorios y además el desarrollo de nuevas técnicas.

Es evidente que este tipo de laboratorio está en condiciones óptimas para poder realizar trabajos de investigación que aunque modestos permiten una mejor formación de los alumnos que tienen acceso al mismo para la realización de cursos de entrenamiento.

Se debe tener en cuenta que ciertos problemas de alta tensión pueden resolverse utilizando papel y lápiz, o con la ayuda de programas de computación.

Muchos ensayos de aceptación pueden realizarse con equipos modestos, pero es indispensable preparar el ensayo para que no presente ninguna dificultad que lo invalide, al momento de ejecutarlo.

Las particularidades de cada ensayo, condiciones del mismo, repetibilidad, dificultades de medición, obtención de información que posibilita confirmar que el ensayo es correcto, son muchas, y la experiencia es un componente importante para lograr éxito.

Finalidades

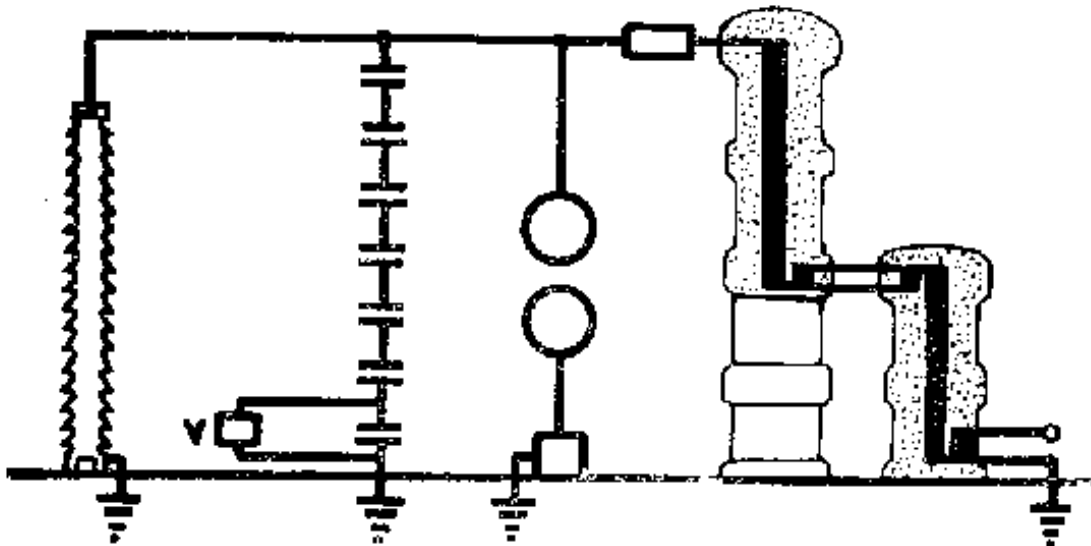
En los laboratorios de alta tensión se determinan las características y comportamiento de los distintos aislamientos de los equipamientos electromecánicos a través de los siguientes ensayos dieléctricos:

- a. Ensayos de frecuencia industrial (onda senoidal)
- b. Ensayos de impulsos atmosféricos (onda $1.2 \cdot 50 \text{ m s}$)
- c. Ensayos de impulso de maniobra (onda $250 \cdot 2500 \text{ m s}$) para todos los equipamientos.

Ensayos de aislación de frecuencia industrial

Los ensayos de aislación a frecuencia industrial se realizan normalmente con transformadores especiales, alimentados desde la red eléctrica o alimentada con un generador dedicado.

El esquema de conexión generalmente utilizado se observa en la [figura 9.1](#).



9.1

Las unidades de la cascada son exactamente iguales, la única diferencia es la aislación contra masa de cada unidad.

Cuando se utilizan varios transformadores en cascada las unidades se montan de manera de poder ser utilizadas cada una por separado o en serie o en paralelo.

El arrollamiento primario en las unidades generalmente está dimensionado para una tensión nominal no mayor de 1 kV.

La primera unidad y las unidades intermedias de la cascada tienen un arrollamiento terciario que sirve para alimentar el primario de las unidades sucesivas.

Sobre las superficies de las partes en tensión de los aparatos conectados al circuito de ensayo no deben presentarse efluvios y entonces estos aparatos tienen anillos y pantallas metálicas de forma conveniente.

La tensión de ensayo puede medirse directa o indirectamente.

En la [figura 9.2](#) se observa la cascada de transformadores adoptada por el CESI en su laboratorio de alta tensión.

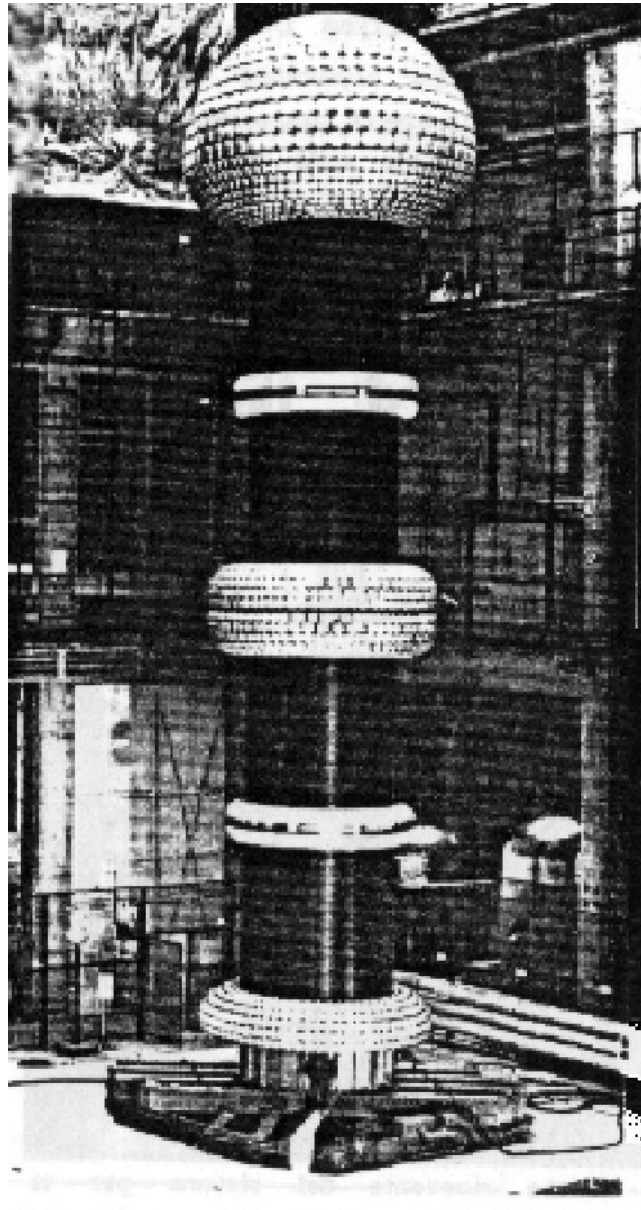


Figura 9.2

En particular la cascada de transformadores está constituida por dos unidades de 800 kV cada una, compuesta a su vez por dos semiestadios idénticos como se muestra en la [figura 9.3](#). Cada semiestadio dispone de una toma capacitiva que es utilizada para la medida de la correspondiente tensión.

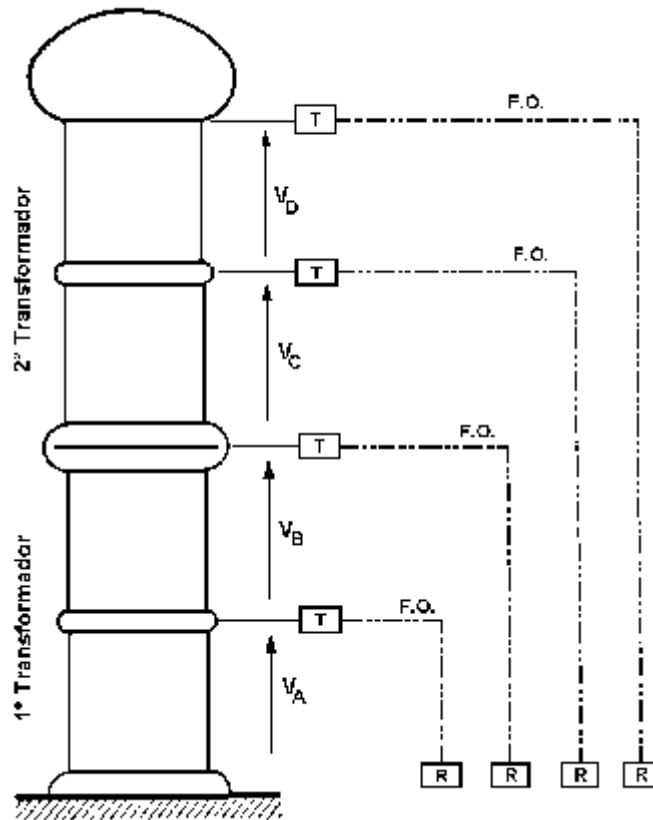


Figura 9.3

Cada una de las cuatro señales de tensión se transmite a tierra mediante una cadena electro óptica cuyas características se indican en la tabla 1.

Tabla 1 – Principales características de la cadena electro óptica

Banda pasante	10 kHz
Linealidad	$\pm 2\%$
Relación señal / ruido	70 dB
Tipo de fibra óptica	monofibra
Alimentación del transmisor	$6 V_{cc}$
Consumo del transmisor	0.25 W
Tensión de ingreso al transmisor	$\pm 1 \pm 2 \pm 4$ seccionables por el receptor mediante telecomando
Tensión de salida del	$\pm 10 V$

receptor	
Encendido del transmisor	Mediante telecomando

En la [figura 9.3](#) se muestra el esquema de medición. Las señales de salida de los cuatro receptores se envían a un sistema electrónico que permite efectuar la suma (parcial o total) de cada tensión, indicar su correspondiente valor en kV eficaces y visualizar la forma de onda con un osciloscopio normal.

Ensayos de aislamiento a impulso

Los ensayos de aislación a impulso normalizado que simulan las sollicitaciones con frente brusco de origen atmosférico o de maniobra, se realizan con generadores de impulso.

El esquema básico de los generadores de impulso es generalmente el de Marx que muestra la [figura 9.4](#), consiste en grupos de capacitores que se cargan en paralelo por medio de rectificadores de alta tensión, a través de resistencias de carga. La descarga de los capacitores se realiza a través de espinterómetros a esferas de un circuito serie que incluye resistencias amortiguadoras de las oscilaciones.

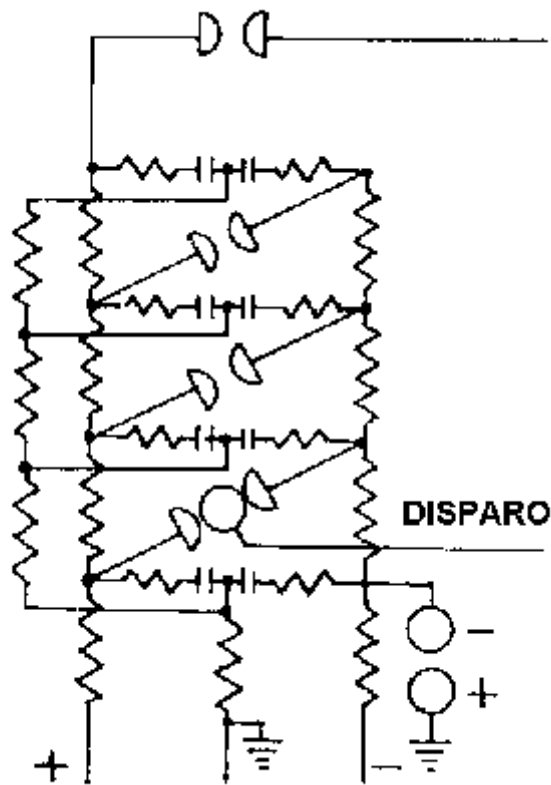


Figura 9.4

La carga de los capacitores y en consecuencia la tensión total del generador puede variarse regulando la tensión del rectificador. La polaridad de la tensión se cambia invirtiendo las conexiones de los capacitores al rectificador.

El método más utilizado para originar la descarga del generador consiste en aplicar un impulso de tensión al electrodo central de un espinterómetro con tres esferas, que está colocado entre el primer y segundo grupo, por medio de una fuente auxiliar.

Iniciada la descarga, ésta se propaga a todos los espinterómetros de la cadena.

Hay ensayos en los que se requiere la aplicación de tensión alterna al aparato y simultáneamente aplicar la onda de impulso, esto exige que el dispositivo de disparo actúe en modo sincronizado.

Además se debe registrar automáticamente el fenómeno.

Para relevar la tensión de descarga se utiliza normalmente un divisor de tensión de tipo resistivo o un divisor de tensión de tipo capacitivo.

La [figura 9.5](#) muestra un generador de impulso de 2400 kV, 240 kJ con pupitre de comando.

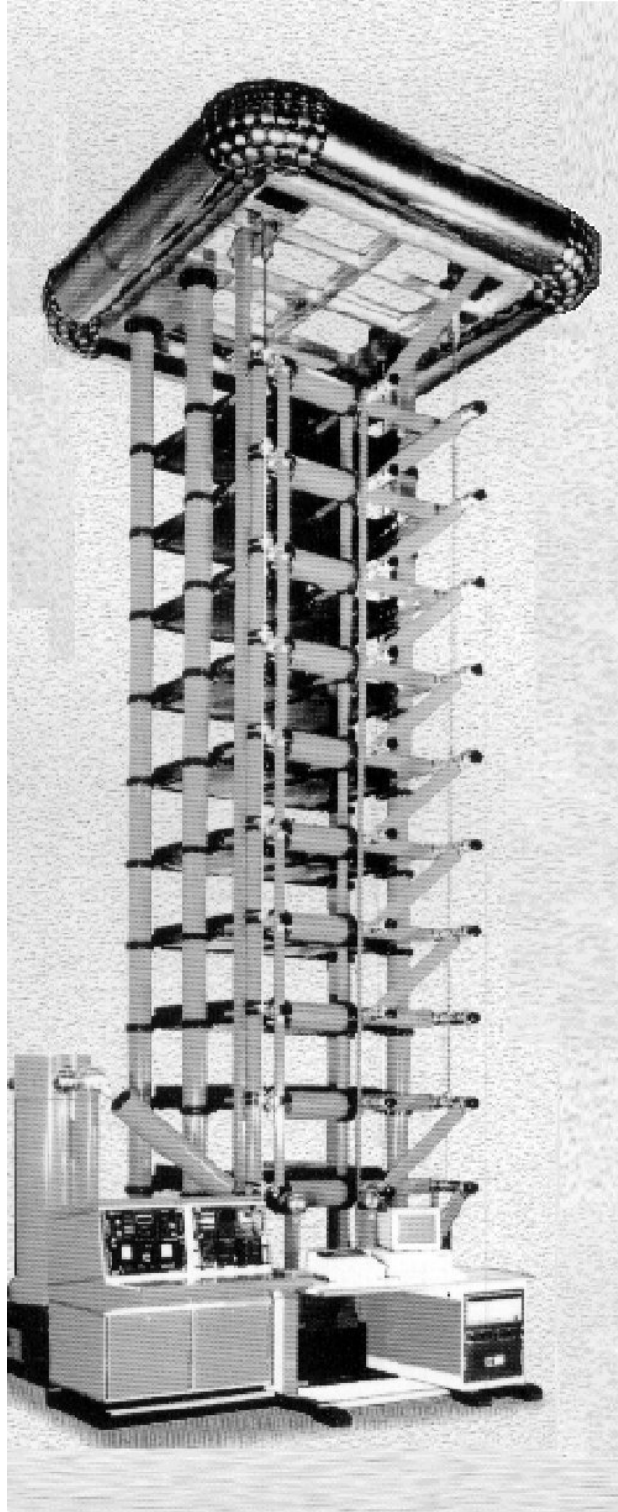


Figura 9.5

Circuito de prueba

Los elementos conectados juntos para la prueba a impulso se pueden subdividir físicamente en tres circuitos como se indica en la [figura 9.6](#):

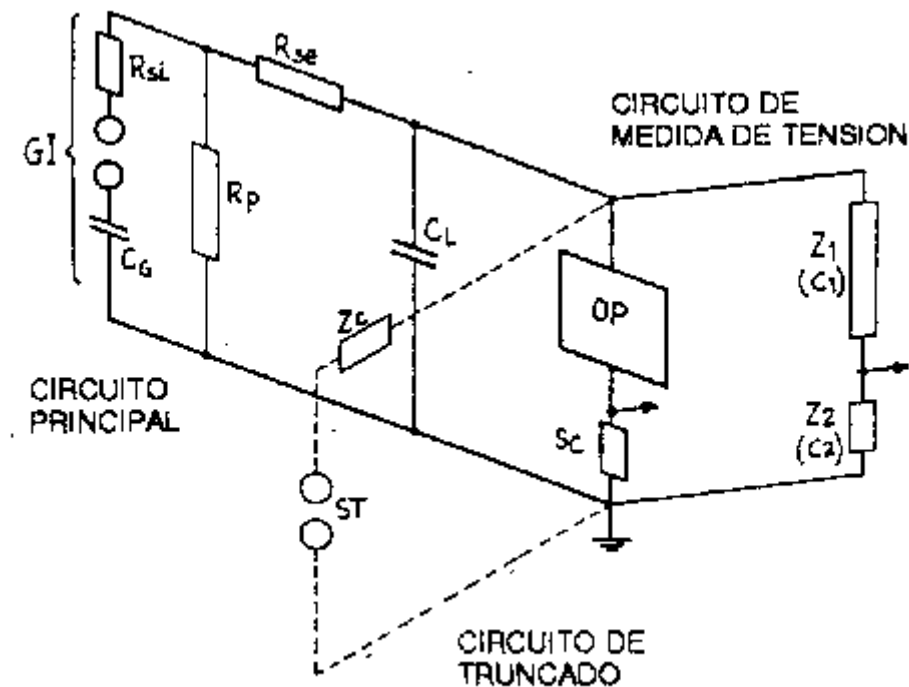


Figura 9.6

- Circuito principal que comprende el generador a impulso y el objeto en prueba (transformador, reactor etc.)
- Circuito para la medida de las tensiones
- Circuito de truncamiento (si son previstas pruebas de onda truncada)

Los símbolos utilizados tienen el siguiente significado:

GI	generador de impulsos
CG	capacidad del generador
CL	capacidad de carga
CT	capacidad equivalente del objeto en

	prueba
LT	inductancia equivalente del objeto en prueba
Rsi	resistencia serie interna
Rse	resistencia serie externa
Rp	resistencia en paralelo
SC	shunt para la medida de la corriente
ST	espinterómetro de corte
OP	objeto en prueba
Z1, Z2	divisores de tensión
Zc	impedancia adicional del circuito de corte

La forma del impulso depende de los parámetros del circuito y del objeto en prueba. En particular el tiempo de frente T1 depende substancialmente de la capacidad del objeto en prueba y de la resistencia en serie.

El tiempo para el hemivalor T2 está determinado por la capacidad del generador y de la resistencia en paralelo.

En la Publicación IEC 722 "Guide to the lightning impulse and switching impulse testing of power transformers and reactors" se pueden obtener indicaciones más detalladas acerca de la elección de los parámetros del circuito de prueba y de las dificultades para obtener la forma de onda requerida para la prueba de impulso.

Siendo la velocidad de variación de las tensiones y de las corrientes impulsivas muy elevada y teniendo en cuenta y dado el valor finito de las impedancias en juego, no se puede suponer que durante las pruebas de impulso todo el sistema de tierra está a potencial cero.

Por esto es importante elegir una apropiada "tierra de referencia", adoptándose normalmente un punto cercano al objeto en prueba que se conecta con el sistema de tierra de la sala de pruebas.

Las conexiones de retorno del objeto en prueba y del generador de impulsos con el punto de referencia deben ser de baja impedancia.

También el circuito de medida de tensiones debe estar conectado al mismo punto de referencia.

Transductores

Se entiende por transductor un dispositivo que transforma la magnitud física a medir en una señal de tensión compatible con las características de ingreso del instrumento registrador.

Por otras exigencias los transductores de tipo tradicional no resultan suficientes y por lo tanto ha sido necesario desarrollar soluciones particulares.

A continuación se considera, como ejemplo, una de estas exigencias. En particular se trata de un transductor que adopta particulares recursos para obtener una amplia banda pasante y para minimizar la influencia de las conexiones de alta tensión.

Como es conocido durante el seccionamiento de cargas capacitivas por parte de seccionadores blindados en SF₆ (hexafluoruro de azufre) se generan sobretensiones de valor bastante elevado (hasta 2 a 3 p.u.) y con frecuencias muy altas (decenas de MHz).

La determinación de tales sobretensiones es de fundamental importancia para el dimensionamiento del aislamiento, en cuanto a su amplitud es comparable

(sino más alta) a aquellas de origen atmosférica y además su frecuencia de aparición es muy elevada.

Con el objeto de efectuar correctamente la medida de tales sobretensiones con la necesaria precisión se ha realizado un divisor con una amplia banda pasante (> 50 MHz) y fácilmente insertable en el interior de los blindados industriales.

El divisor consiste en una unidad particular de baja tensión (sonda de campo) sensible a la variación de campo eléctrico del electrodo de alta tensión.

La [figura 9.7](#) muestra el esquema de principio del divisor utilizado en una típica aplicación con un equipamiento blindado. El conjunto puede considerarse como un divisor capacitivo cuya capacidad de alta tensión, C_1 , está constituida por la capacidad parásita entre el conductor y la sonda de campo y la capacidad de baja tensión, C_2 , por la propia sonda.

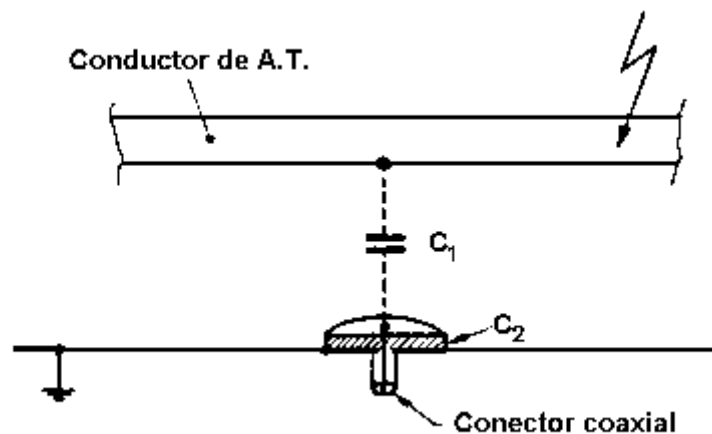


Figura 9.7

Transmisión de las señales

La transmisión de las señales de bajo nivel tanto de comando como de medición en un laboratorio de alta tensión es muy crítica a causa de las fuertes perturbaciones existentes.

Las soluciones adoptadas para reducir tales disturbios pueden variar de caso en caso y además pueden clasificarse en:

Transmisión mediante cables coaxiales

transmisión mediante sistemas electro ópticos

La tabla 2 muestra, en forma sintética, las mayores ventajas e inconvenientes de cada solución.

Tabla 2 – Características de los sistemas de transmisión

Sistema	Ventajas	Desventajas
cables coaxiales	simplicidad gran confiabilidad gran movilidad	<input type="checkbox"/> sensibilidad de los disturbios inducidos <input type="checkbox"/> imposibilidad de transmisión de señales entre puntos no equipotenciales
cadenas electro ópticas	posibilidad de transmisión de señales entre puntos con potencial diverso escasa sensibilidad a los disturbios inducidos	<input type="checkbox"/> movilidad limitada <input type="checkbox"/> mayor complejidad

Para este último sistema de transmisión se tienen además de las características correspondientes a la cadena electro óptica ya vistas en la tabla 1, las siguientes:

Dimensiones reducidas de los transmisores, que permiten su inserción en el interior de los electrodos de apantallamiento de los transformadores

Posibilidad de controlar continuamente la repartición de potencial en los diversos estadios de la cascada

Desacoplamiento óptico de la medida de tensión a frecuencia industrial durante las pruebas "combinadas" (por ejemplo impulso sobrepuesto a la frecuencia industrial)

Costo de la realización decididamente inferior a las soluciones tradicionales.

Registro de las señales

Las características en base a las cuales se elige el instrumento de medición dependen del tipo de señal que se debe medir y en particular de la gama de frecuencia contenida en la señal.

En el ámbito de las medidas que se efectúan en un laboratorio de AT se pueden, desde este punto de vista, individualizar cuatro grupos:

Pruebas de breve y larga duración, en corriente continua (c.c.) y frecuencia industrial (f.i.) con frecuencias de las señales ≤ 1 kHz

Pruebas en atmósfera contaminada, con frecuencias de las señales ≤ 50 kHz

Pruebas de impulso normales (atmosféricas y de maniobra), con frecuencias ≤ 2 MHz

Pruebas especiales (SF_6 , descargas parciales, impulso en transformadores, etc.) con frecuencias de señales > 2 MHz.

Conclusiones

Las exigencias de pruebas y de investigación han obligado a adecuar los sistemas de medición de los laboratorios de alta tensión.

La necesidad de obtener informaciones de fenómenos de alta frecuencia ha impuesto por un lado el mejoramiento de la precisión de los transductores existentes y por otro el desarrollo de nuevos tipos de transductores.

Los principales problemas relativos a la transmisión de señales en un laboratorio de alta tensión son:

Reducción de las interferencias

Transmisión desde puntos en tensión

El primer punto puede ser resuelto adoptando un adecuado apantallamiento de la sala de prueba, el segundo utilizando sistemas de fibra óptica.

Es también necesaria la optimización de los sistemas digitales de medición para adecuarlos a las reales necesidades de prueba.

APENDICE

Problemas de aplicación

A continuación se desarrollan y enuncian algunos problemas, que están relacionados con los capítulos de la materia.

Estos problemas reflejan algunos aspectos que se pueden presentar en el ejercicio de la profesión, y que resultan de utilidad para que los alumnos aplicando los conceptos teóricos que han adquirido en ésta y otras asignaturas, experimenten y logren una mejor comprensión de los mismos.

Los alumnos deben tratar de resolver estos problemas ansiosos de aprender, tendrán dificultades, y en las sucesivas materias de aplicación, con una visión más amplia de los distintos argumentos, lograrán obtener distintos enfoques.

Esperamos con esto ayudar en su formación, y solicitamos a los alumnos su colaboración para seguir mejorando nuestra función.

1-2. Instalaciones de corriente alterna de alta tensión, instalaciones de alta tensión en corriente continua.

Problema 2.1

A lo largo de un camino corre una línea de 13.2 kV, de 20 km de longitud, al final de la cual hay un pueblo alimentado con varios transformadores sumando 1 MW la carga, usaremos la planilla (ver nota), y aceptamos la hipótesis que las restantes variables del problema son independientes de la tensión (reactancia, resistividad, capacitancia)

Obtenemos características que quedan definidas para la línea, sección 44 mm², pérdidas 7%, Q_x y Q_c despreciables respecto de la carga...

Obsérvese que la sección no es un valor normalizado, cámbielo adecuadamente, el material puede ser identificado por su resistividad, ¿qué material propone la planilla?

Nota:

Para ayudar a resolver rápidamente, en modo aproximado, este problema y los siguientes, se han preparado una planilla que contiene las fórmulas, y permite obtener las soluciones numéricas ([bajar planilla Atpr2-1.zip](#), luego expandirla y levantarla con Excel)

Problema 2.2

Nuestro ojo no está perfeccionado para garantizarnos que la línea es de 13.2 kV, nos asalta la duda de que fuera de 33 kV, manteniendo los demás datos, ¿cuáles serían los resultados?

La sección necesaria se reduce a 17 mm^2 , con esta sección el conductor es muy débil, las secciones mínimas que se utilizan en las soluciones constructivas son mayores.

Varíe la sección a valores normales, cambie de material, busque ventajas e inconvenientes, una ventaja es el precio del material conductor.

Problema 2.3

Suponiendo la línea de 33 kV se piensa poner en el pueblo una industria que consumiría 3 MW más, dando un total de 4 MW, ¿cuál sería la línea?

La sección necesaria es ahora 69 mm^2 , y las pérdidas 3%, comparando con los resultados del problema 2.1 se observa la conveniencia del desarrollar obras con tensión más elevada, tienen más capacidad para el futuro, mejor rendimiento... pero tienen más costo.

Problema 2.4

Observamos una línea de 132 kV, de 100 km que llega a una ciudad cuya carga es 40 MW.

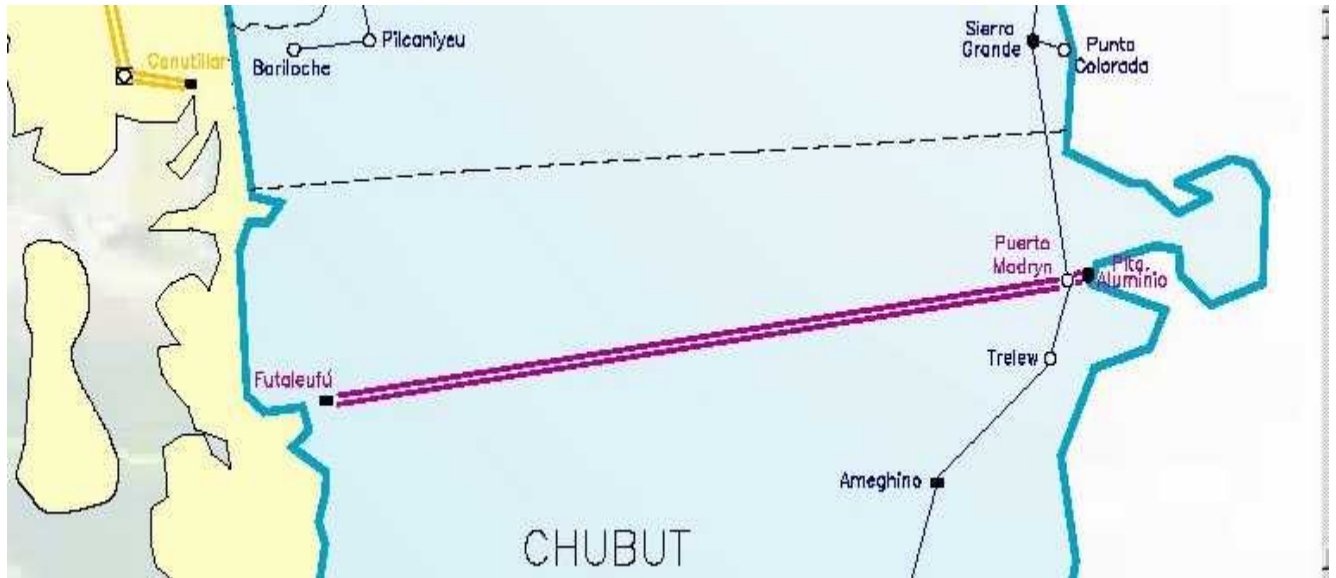
Los resultados que observamos son, sección 175 mm^2 , pérdidas 4%, $Q_x = 3 \text{ MVar}$, $Q_c = 6 \text{ MVar}$

La capacidad de una línea de esta tensión es indudablemente mayor, si pensamos en transmitir 100 MW que pasa?

Las secciones normalizadas son otros valores, propóngalas, observe como cambian los resultados.

Problema 2.5

Entre [Futaleufú y Madryn hay dos líneas](#) de 330 kV de 550 km que transmiten 350 mW, veamos que resultados nos muestra la planilla.



Cargando una sola línea con estos datos tenemos sección 612 mm^2 , pérdidas 8%, $Q_x = 185 \text{ MVar}$, $Q_c = 188 \text{ Mvar}$

Si en cambio ponemos ambas líneas en servicio (cada una esta cargada con la mitad) resulta: sección 306 mm^2 , pérdidas 8%, $Q_x = 46 \text{ MVar}$, $Q_c = 188 \text{ MVar}$, recordemos que ahora están en servicio ambas líneas por lo que en rigor sección y Q se duplican, las pérdidas en cambio se dan en valor relativo, y su valor se mantiene.

Los datos reales de estas líneas están contenidos en documentos a disposición del público llamados guías de referencia, y que pueden consultarse, la línea que estamos examinando esta formada por dos conductores por fase según norma Canadiense y que se identifican bajo el nombre de EGRET.

¿Cuál es la sección real de esta línea? Para ajustar entonces el problema se debe hacer una comparativa ajustando la densidad de corriente, anímese y

haga el cálculo, compare las dos condiciones de servicio con sólo una terna (contingencia) y con ambas ternas (situación normal).

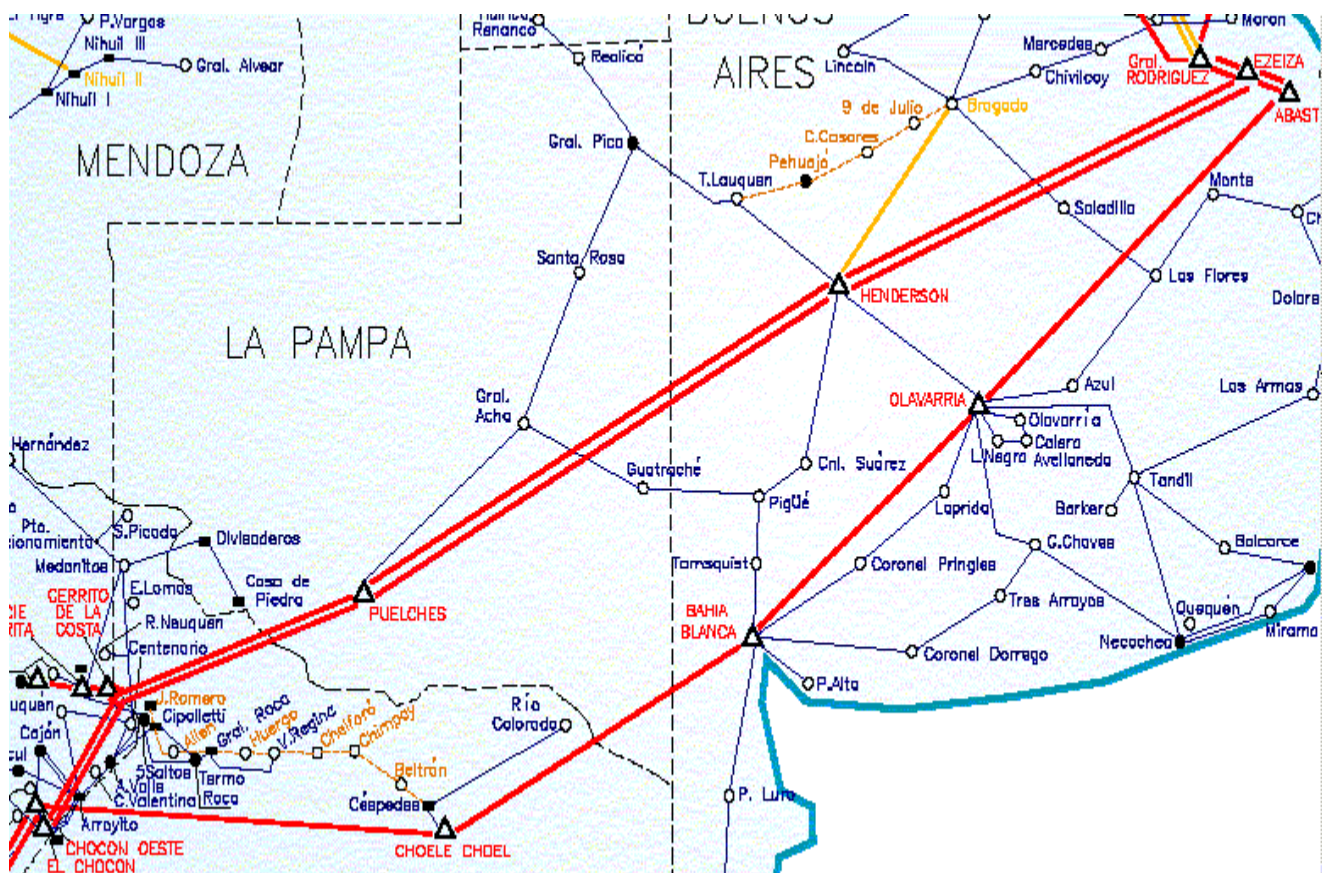
Problema 2.6

La obra que comentamos antes pudo también hacerse en otras tensiones, pruebe con 220 kV y con 500 kV e intente sacar alguna conclusión.

Observe la sección que el programa le propone para la línea de 500 kV, busque soluciones reales y compare la sección del conductor. Varíe la densidad de corriente para que la sección corresponda a 4 conductores DOVE.

Problema 2.7

Cada tramo del [sistema Chocón Buenos Aires \(Alicura Abasto\)](#) es de 350 km y transmite 1000 MW, veamos que resultados obtenemos:



Sección 1154 mm², pérdidas 3.6%, $Q_x = 420$ MVar, $Q_c = 270$ Mvar...

Cada línea está formada por un haz de 4 conductores, las nuevas por otro conductor PEACE RIVER de tamaño parecido, la transmisión total es de 3 tramos... las pérdidas son entonces 3 ´ 3.6%, las potencias Q_x y Q_c involucradas son considerando 12 tramos...

El [esquema geográfico](#) de la Red Eléctrica de la República Argentina puede obtenerse buscando en la dirección siguiente: <http://www.cammesa.com.ar/> donde se presenta abundante información de la red eléctrica argentina (además del esquema geográfico, el diagrama unifilar, para llegar a este: buscar MEMNet, Publicaciones MEMNet, Informes varios, Esquemas de la red eléctrica).

Problema 2.8

Con los datos del problema 2.5 propóngase una transmisión en corriente continua, utilice distintas alternativas de tensión y número de polos.

Problema 2.9

La distancia Chocón Buenos Aires supongámosla de 3 ´ 350 km, imagínese una transmisión en continua de 1000 km expreso (sin estaciones intermedias) de 1000 MW, y de 2000 MW... ¿qué puede proponer?

Problema 2.10

Difícilmente uno trabaja en grandes sistemas de transmisión, pero todos en la profesión tienen que ver con plantas industriales de potencias y tamaños limitados.

Volvamos a un problema de media tensión, se debe alimentar una carga de 3 MW, si se la alimenta en 13.2 kV y se desean limitar las pérdidas al 5% a que distancia puede estar ubicado el centro de alimentación? Y si fuera en 33 kV?

Como aclaración a estos problemas es importante destacar que la realidad no es tan fácil, hay muchas otras consideraciones que se deben hacer antes de decidir orientarse a una solución.

Los problemas que hemos planteado requieren también desarrollar muchas otras evaluaciones, la obra debe funcionar durante muchos años económicamente, debe adaptarse a un futuro incierto, debe dar el servicio en condiciones técnicas (llamadas hoy calidad de servicio), debe afectar el ambiente lo menos posible (hoy llamado impacto ambiental).

Esto sólo pretende dar el primer paso, ayudar a orientar algunas características de las líneas de alta tensión que son una parte enorme de la inversión del sistema eléctrico.

3. Procesos electromagnéticos oscilatorios y de choque.

Problema 3.1

Para una red de 500 kV (máxima de servicio 525 kV) basándose en estudios estadísticos de sobretensiones de maniobra (SIL), que se realizan utilizando programas de computadora que resuelven las ecuaciones diferenciales que corresponden al sistema eléctrico (ATP), se tiene que la máxima sobretensión alcanzada es del orden de 1.8 a 1.85 pu.

Cuando se utilizan como elementos de protección descargadores de óxido de zinc, el SIL del equipamiento debe ser igual o mayor de 1.4 pu de la máxima sobretensión de maniobra.

Se desea saber como se deben especificar los niveles de aislación de un transformador de potencia que debe ser instalado en dicha red.

El valor de pico de la tensión de fase es $\sqrt{2} \times 525 / \sqrt{3} = 429 \text{ kV}$, por lo tanto cuando se tiene una sobretensión de 1.85 pu el valor de la tensión de fase resulta $1.85 \times 429 = 793 \text{ kV}$.

Con descargadores de óxido de zinc, el equipamiento debe poder soportar como mínimo una sobretensión de impulso de maniobra de $1.4 \times 793 = 1110 \text{ kV}$.

La norma de transformadores de potencia IEC 76-3 "Insulation levels and dielectric tests" en la Tabla V, para la tensión $U_m = 525 \text{ kV}$ fija los siguientes valores de tensión de impulso de maniobra: 1050 y 1175 kV. Como el valor calculado es 1110 kV corresponde adoptar el valor de tensión de ensayo de 1175 kV.

Además la Tabla en correspondencia con la tensión de ensayo a impulso de maniobra indicada, fija dos valores de tensión de ensayo a impulso atmosférico (BIL), 1425 y 1550 kV.

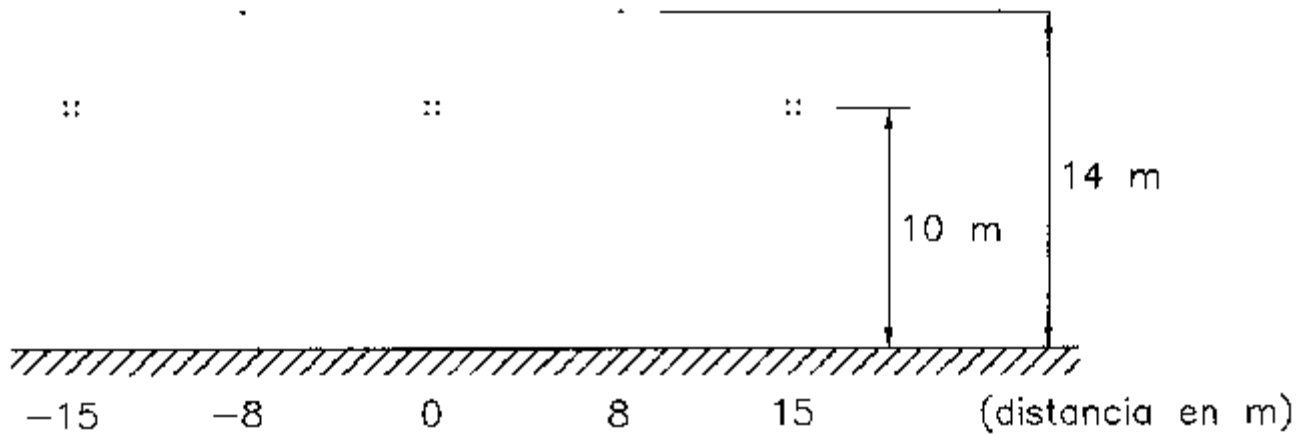
Queda a criterio de quien debe especificar los niveles de aislación, adoptar para esta tensión de ensayo, el valor más representativo de las reales condiciones de sollicitación a impulso atmosférico a las que estará expuesto el transformador en servicio.

4. El campo eléctrico

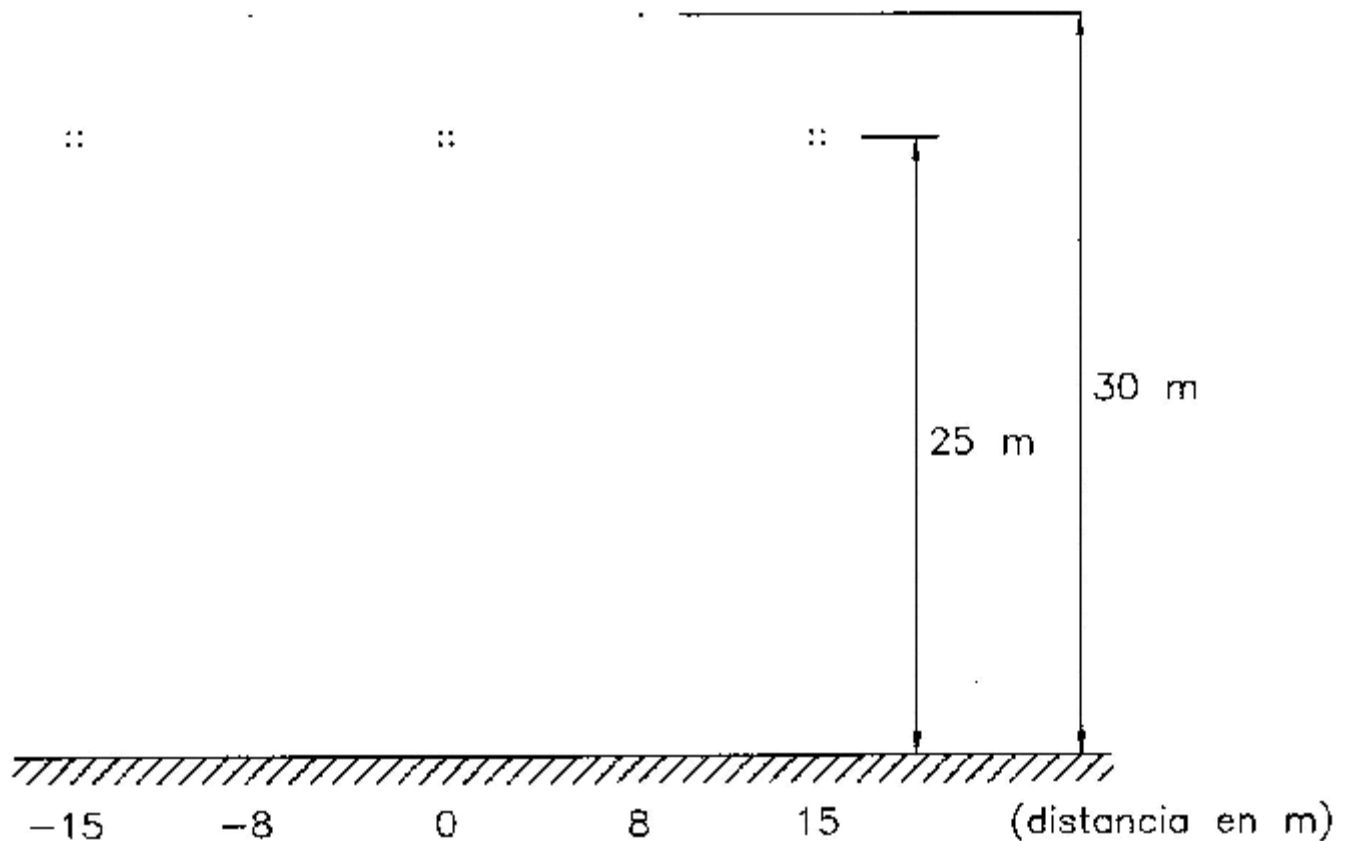
Problema 4.1

Determinar el campo eléctrico en la superficie de los conductores en haz de una línea de 500 kV (medio de un vano) cuyos datos y distancias se indican en las figuras.

La [figura a4.1-1](#) corresponde al centro del vano, la [figura a4.1-2](#) al punto donde el conductor está sostenido en la torre, los dos resultados dan el rango dentro del cual los valores varían en el vano.



DISPOSICION PARA FLECHA MAXIMA (MEDIO DE UN VANO)
LINEA DE 500 kV
CONDUCTOR DOVE ϕ 2,354 cm SECCION ALUMINIO 282 mm²
SUBCONDUCTORES 4
DISTANCIA ENTRE SUBCONDUCTORES 45 cm



Hacer una tabla resumen y comparar los resultados para conductor central, lateral en el centro del vano y en el extremo.

Comparar con los valores que se obtienen sin los cables de guardia.

Una de las posibilidades de resolver este problema es utilizando el programa CORCAM cuyas características principales se describen a continuación.

El programa calcula el campo eléctrico sobre conductores con el método propuesto por CIGRE, (Perturbations engendres par l'effet de couronne des reseaux de transport 1974), considerando la influencia de la tierra y los cables de guardia, y realiza el cálculo de los parámetros de la línea representada.

Para la resolución de este problema los cables de guarda se consideran a tierra, asumen cierta carga y tienen influencia sobre el campo superficial del

conductor de fase, (cuando están aislados asumen una tensión y su carga es nula).

Los datos se deben preparar de acuerdo a lo que indica CORCAM.TXT, se han preparado dos lotes de datos TAT001.DAT y TAT002.DAT.

Se ingresan para cada haz de conductores los datos que lo describen:

Para cada uno de los cables de guarda se ingresan los datos con los valores organizados de la misma manera que para los conductores.

A continuación se ingresan pares de valores para cada conductor que corresponden a tensión y ángulo.

El último registro indica el ángulo de incremento en grados, para analizar el fenómeno en el transcurso del tiempo.

El valor del campo máximo es 16.865 kV/cm para el centro del vano, y las capacitancias (simetrizadas) de secuencia directa 13.34 picoF/km, y de secuencia cero 11.189 picoF/km.

Para la suspensión en cambio los resultados son 16.454 kV/cm, capacitancias 12.653 y 8.757 picoF/km.

Problema 4.2

Para líneas de alta tensión se deben realizar ensayos para verificar la presencia de efecto corona visible en las cadenas de aisladores y su correspondiente morsetería. También es importante determinar si los niveles de radio interferencia (RIV) no superan los límites fijados.

Estos ensayos pueden realizarse en instalaciones al aire libre o bien en una sala de ensayos que tiene paredes y techo metálicos.

En una instalación de ensayos al aire libre se desea probar el haz de conductores de la línea de 500 kV arriba especificado, la distancia al suelo es de 5 m, el haz es único, no están las fases laterales.

En rigor hay un edificio metálico lateralmente al área de prueba, la distancia al edificio es de 4 m, y el edificio es de gran altura, ¿cómo es el campo considerando la presencia del edificio?

Utilizar el método de las imágenes, hacer la imagen del conductor debida al edificio la tensión aplicada al conductor imagen desfasada 180 grados, ¿por qué?

Lotes de datos TAT011.DAT y TAT012.DAT, y con ellos se han obtenido los resultados siguientes:

Campo superficial 17.313 kV/cm.

Campo superficial 19.671 kV/cm.

Estos valores deben compararse con los que corresponden a la línea del problema anterior, se nota que para lograr que las exigencias del ensayo igualen a las de la línea, es necesario ajustar la tensión aplicada en el ensayo.

Problema 4.3

Los ensayos se hacen en una sala de 15 m entre paredes, 20 m de altura, el cable está suspendido a 5 m del suelo y 4 m de una pared lateral (a 11 m de la otra).

Aplicando el método de las imágenes, se rodea el conductor con sus primeras imágenes, en rigor deberían considerarse infinitas imágenes, experimentar con más capas de imágenes, extraer conclusiones.

Lotes de datos TAT013.DAT y TAT014.DAT, y con ellos se han obtenido los resultados siguientes:

Con 14 imágenes 20.015 kV/cm.

Con 24 imágenes 19.822 kV/cm.

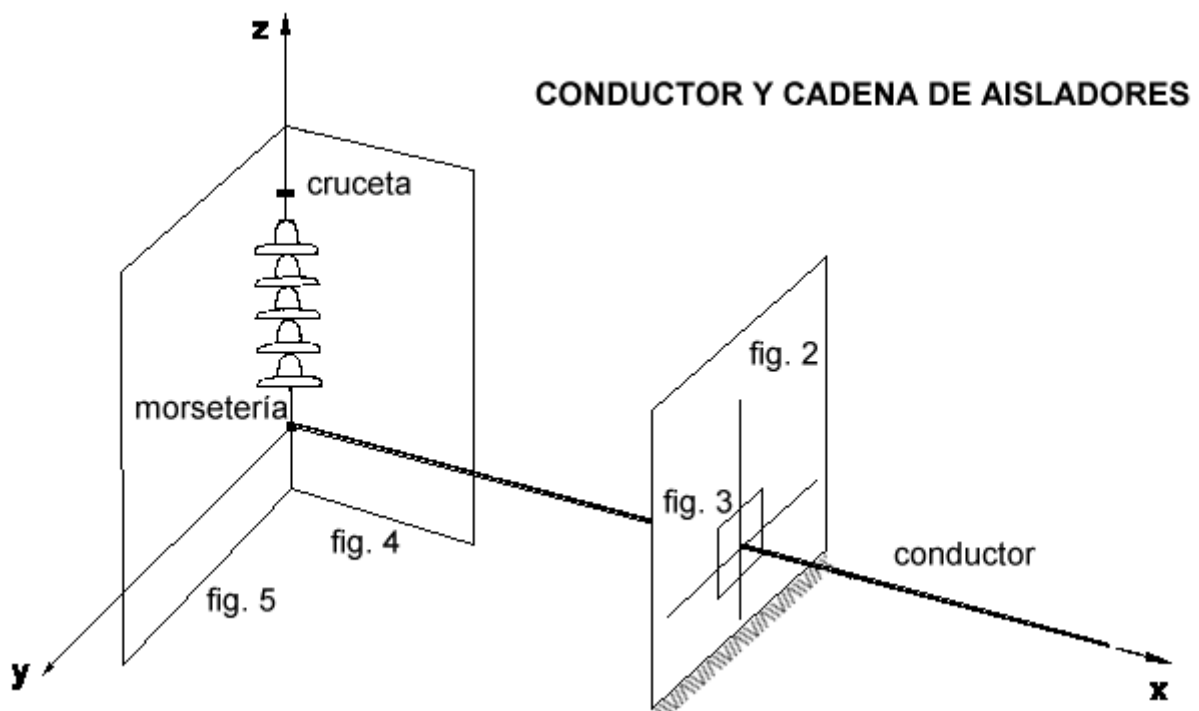
Problema 4.4

Campo eléctrico alrededor de conductores y cadenas de aisladores

Se trata de estudiar el campo eléctrico que se presenta alrededor del conductor de una línea, y de las cadenas de aisladores que soportan el conductor (para estudiar la solución [hacer click](#)).

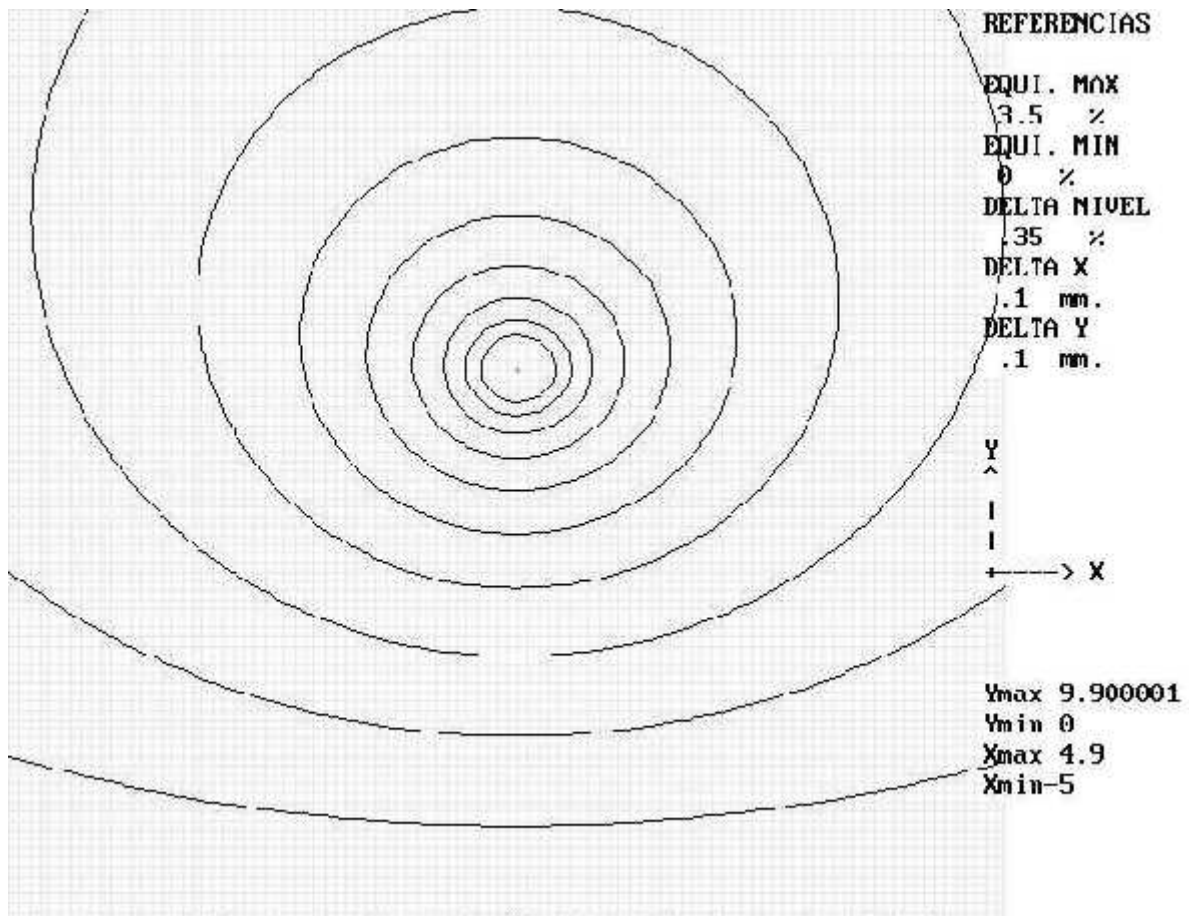
Problema 4.4

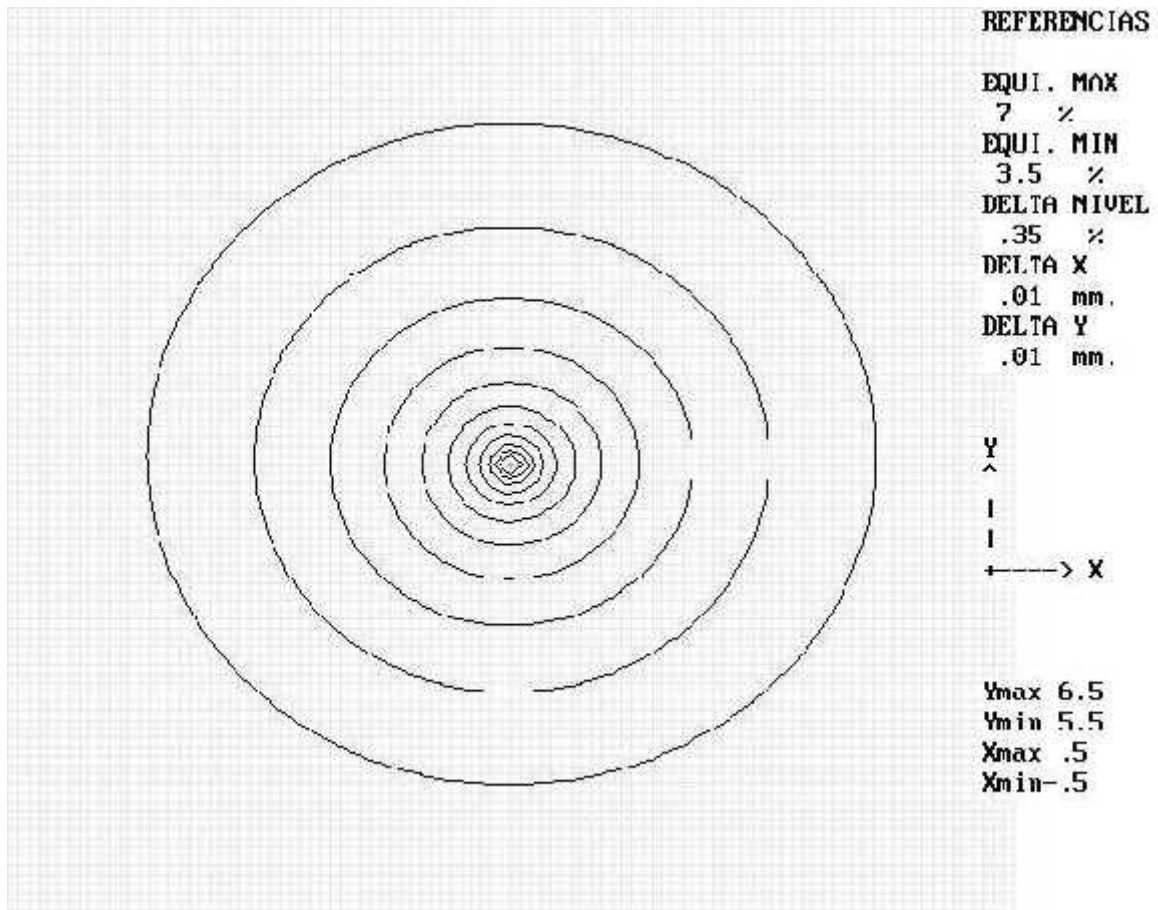
Nos proponemos estudiar el campo eléctrico que se presenta alrededor de una línea, una primera visión podemos tenerla observando el campo eléctrico de un conductor cilíndrico rectilíneo infinitamente largo que corre sobre el suelo a cierta altura [figura a4.4-1](#) en un plano paralelo al zy perpendicular al conductor.



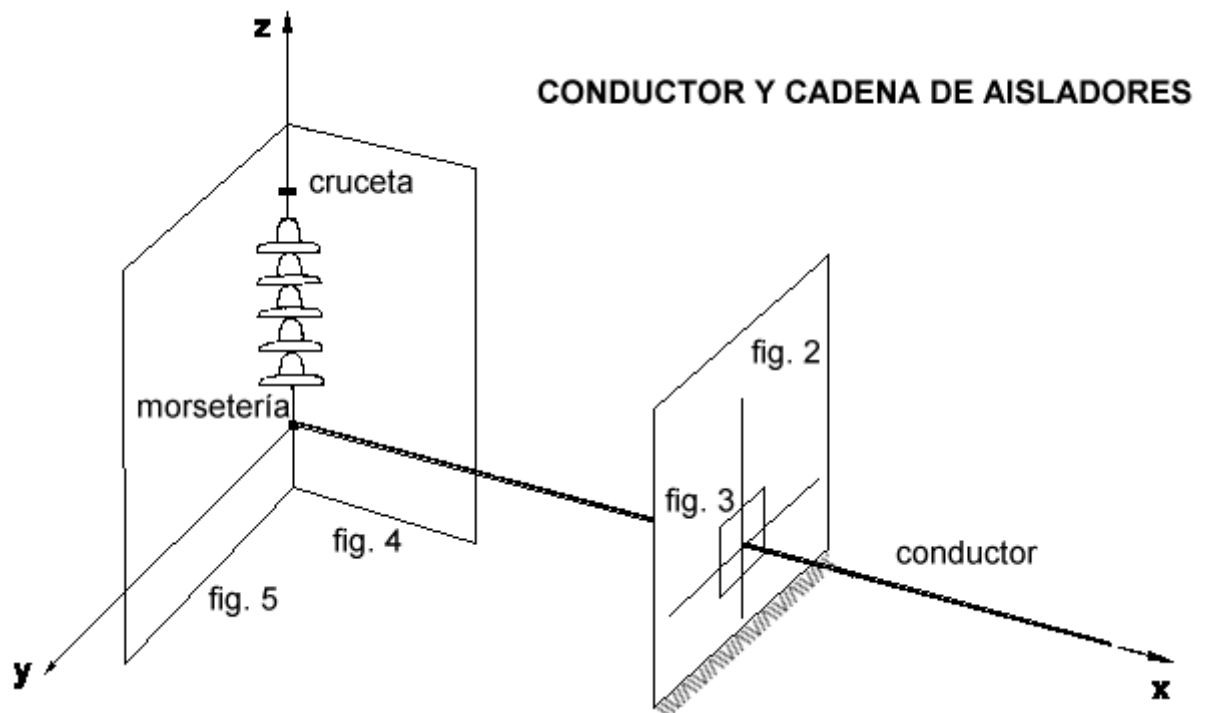
El programa POTESF nos permite hacer el modelo con un conductor de 2 cm de diámetro y a 6 metros de altura, por el método de las imágenes, representamos las equipotenciales desde 0 hasta 50 % en un área de 10 m x 10 m (en x de -5 a 5 y en y de 0 a 10 m).

Notamos que potenciales mayores de 50 % nos dan una densidad de líneas equipotenciales tal que sólo se ve una mancha... observamos entonces los potenciales de 50 % a 100 % en un área menor de 1 m x 1 m [figura a4.4-2](#), y con paso de graficación menor [figura a4.4-3](#) (entre -0.5 y 0.5 según x y 5.5 y 6.5 según y).

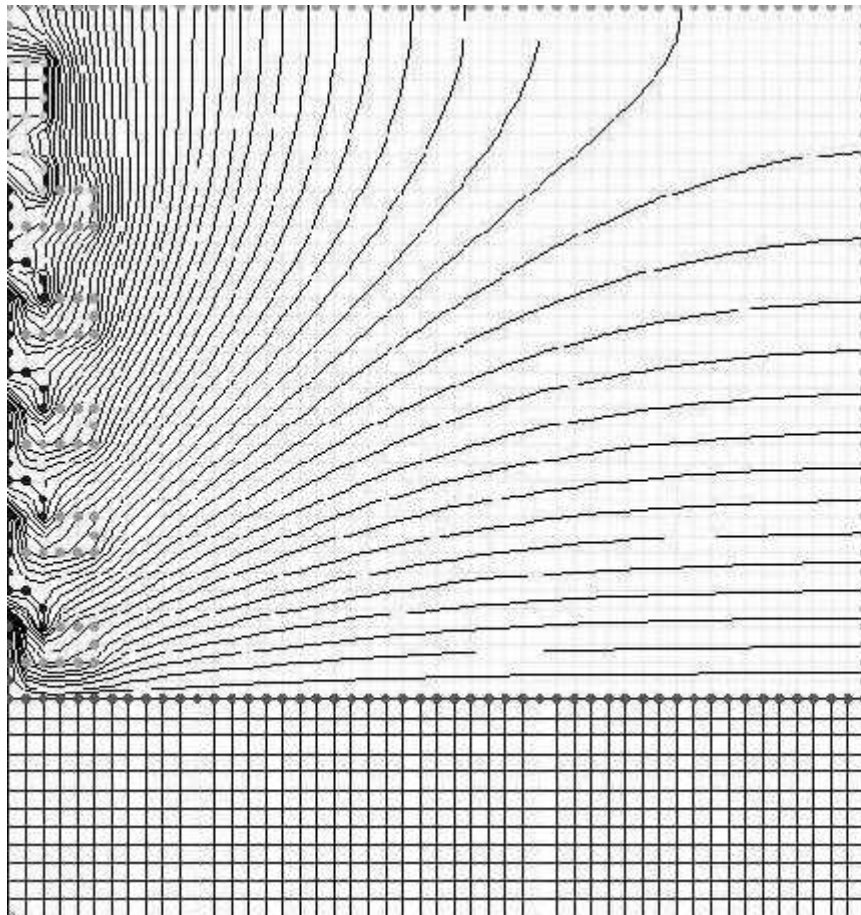




Nos interesa ahora acercarnos a la cadena de aisladores, representamos en POTRES la cadena, que está en una escala cualquiera, y contiene algunos aisladores que nos permite una cuadrícula de 50 x 50, observamos de arriba hacia abajo la cruceta los aisladores y el conductor como se observa en la [figura a4.4-1](#).



El corte de la cadena lo hacemos según el conductor, el área esta limitada por un contorno de líneas que serán normales a las equipotenciales, líneas de corriente o de campo. La cadena es de simetría cilíndrica sobre su eje, resolvemos el problema con simetría cilíndrica y con adecuado número de iteraciones resulta una gráfica satisfactoria [figura a4.4-4](#) (y que no depende de continuar iterando).



REFERENCIAS

EQUI. MÁX
 100 %
 EQUI. MÍN
 0 %
 DELTA NIVEL
 2 %
 DELTA X
 1 mm.
 DELTA Y
 1 mm.

Y
 ^
 |
 |
 +-----> X

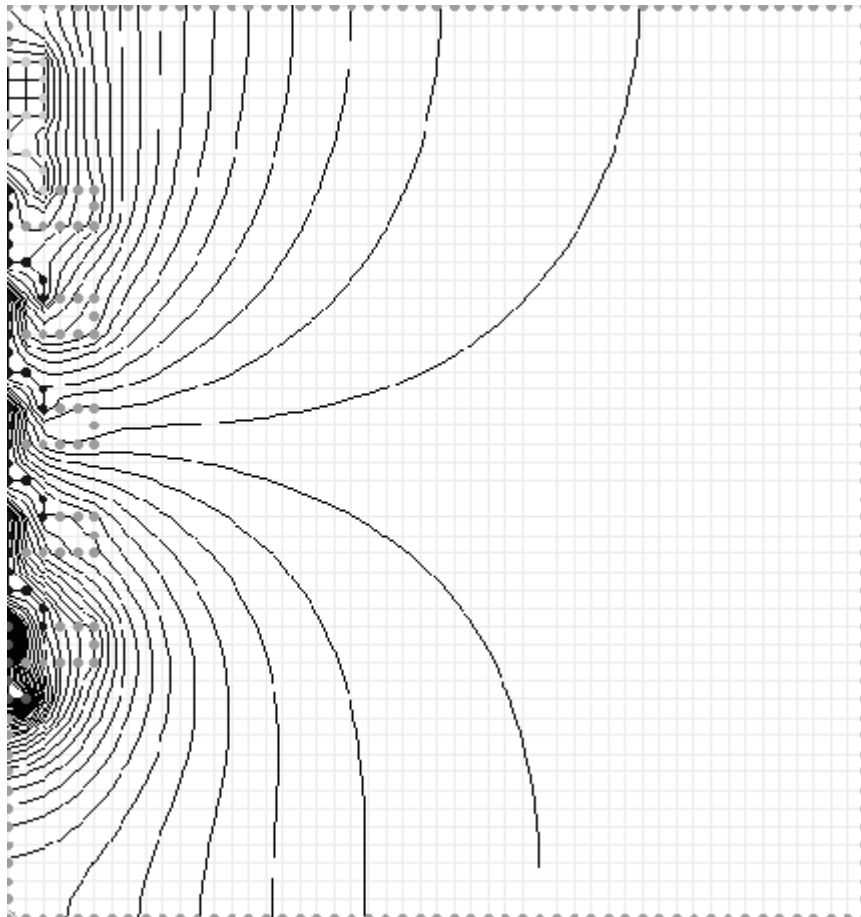
Ymax 50
 Ymin 0
 Xmax 50
 Xmin 0

Interpretemos lo hecho, al hacer simetría cilíndrica el conductor se ha transformado en un disco plano normal al eje, los límites del área estudiada fuerzan las equipotenciales a ser normales al límite, el área de estudio es contenida, y los resultados no son válidos en partes del borde.

Aun así aceptando las hipótesis simplificativas tenemos una buena imagen del campo correspondiente al corte a lo largo del conductor.

Para completar el estudio hagamos ahora un corte de la cadena normal al conductor, también resolvemos el problema suponiendo simetría cilíndrica, el conductor resulta entonces una esfera en el extremo de la cadena [figura a4.4-](#)

[5.](#)



REFERENCIAS

EQUI. MAX
 100 %
 EQUI. MIN
 0 %
 DELTA NIVEL
 2 %
 DELTA X
 1 mm.
 DELTA Y
 1 mm.

Y
 ^
 |
 |
 +-----> X

Ymax 50
 Ymin 0
 Xmax 50
 Xmin 0

Miremos cualitativamente el conjunto de gráficas, al acercarnos a la cadena notamos que las líneas equipotenciales se acercan al conductor, mayor densidad de líneas significan mayor campo eléctrico, ¿cual es la razón de este aumento?

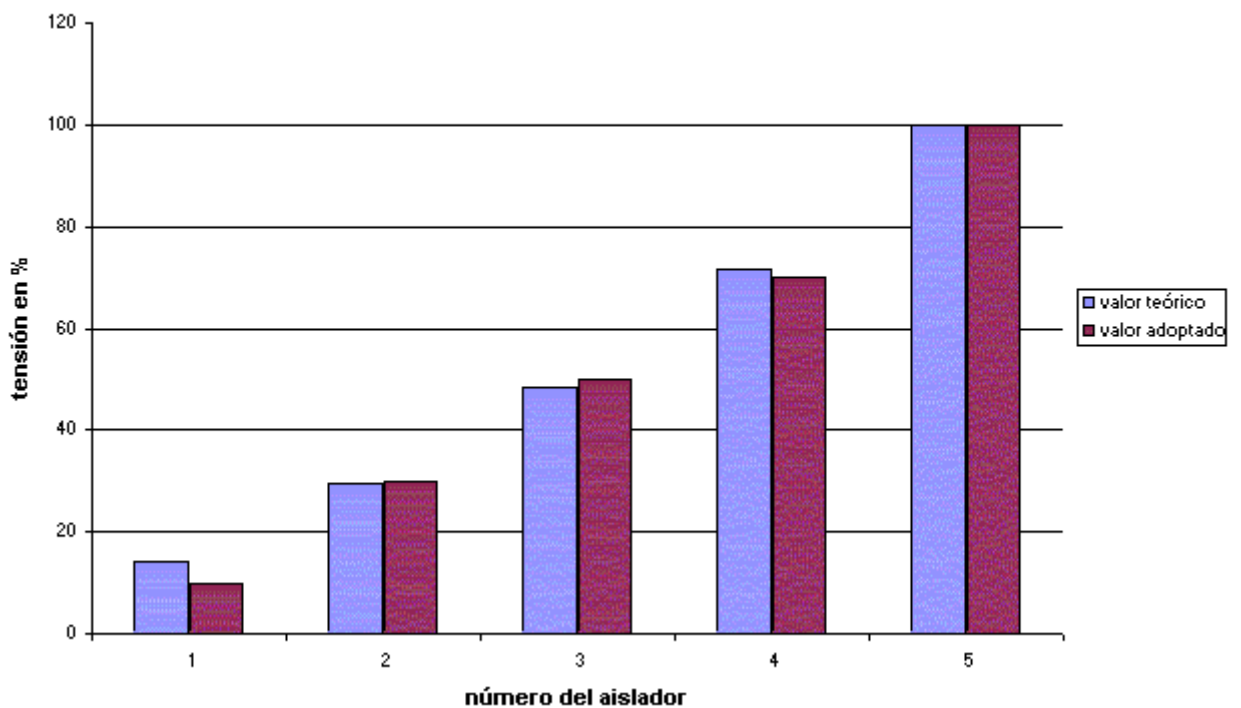
Recordemos que en la representación del cálculo el cable no está bien representado, de todos modos el último aislador de la cadena esta forzando una gran caída de potencial en la proximidad del conductor, que es la razón del aumento de campo en esta zona, que se debe controlar con un mejor diseño (o con anillos equipotenciales).

Una observación:

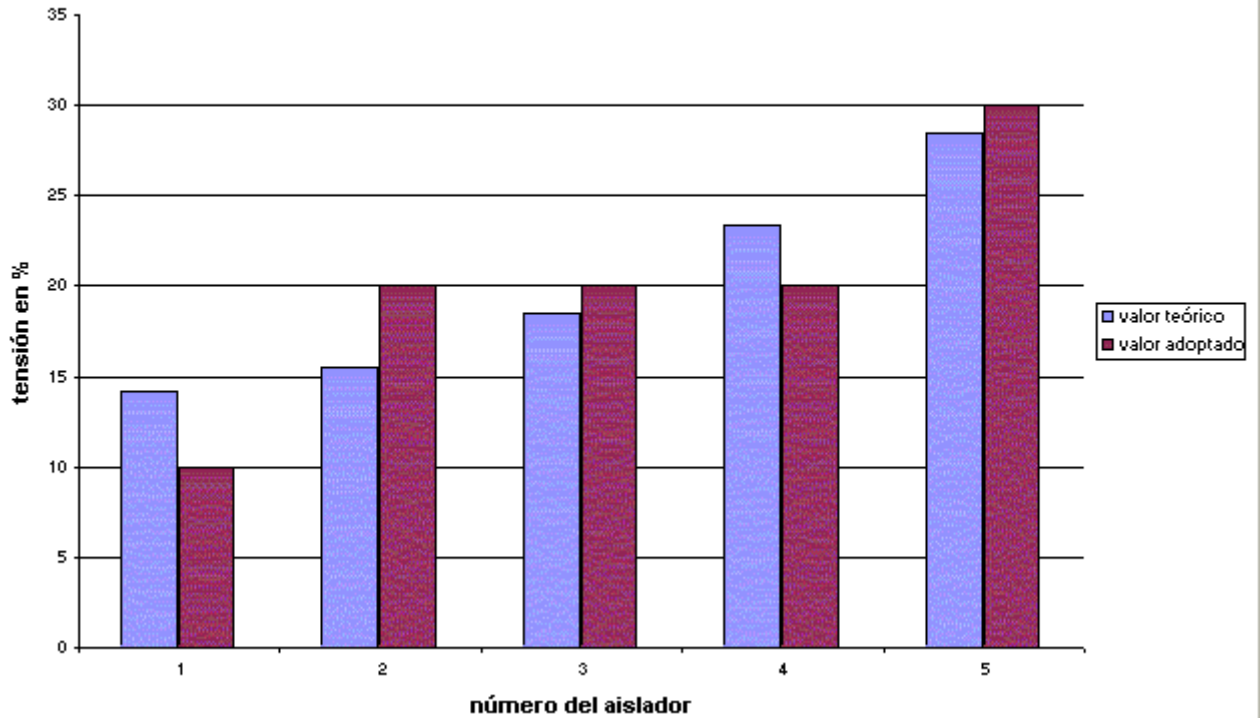
La cadena de aisladores nos ha obligado a forzar los potenciales intermedios de los aisladores, el programa POTRES no tiene capacidad de calcular potenciales flotantes (elementos intermedios metálicos de las cadenas).

La bibliografía brinda ciertos valores de repartición del potencial en las cadenas, y estos se han redondeado a valores de 10 en 10 % que son los que el programa permite. Los valores de la bibliografía y los valores efectivamente asignados se muestran en la [figura a4.4-6](#), la tensión en cada elemento de la cadena se muestra en la [figura a4.4-7](#), observándose que la tensión sobre cada elemento es mayor cuanto más próximo está al conductor.

Distribución de tensión en la cadena



Tensión en cada elemento de la cadena



Problema 4.5

Plantear y resolver el problema de la distribución de la tensión a lo largo de una cadena de aisladores considerando las distintas capacitancias, de aisladores, aisladores a tierra y aisladores a conductor. Observar la no uniformidad de la distribución (para estudiar la solución [hacer click](#)).

Problema 4.5

Cálculos y mediciones evidencian que la distribución de la tensión a lo largo de una cadena de aisladores no es uniforme, es decir la tensión aplicada no se reparte en forma proporcional al número de elementos, su distribución se puede calcular mediante un modelo, siendo este método indicado en el caso de configuraciones complicadas.

Si se conocen los valores de capacidad parcial a tierra C y la capacidad propia de cada aislador K de una cadena de aisladores, se puede hacer un modelo

(físico) análogo resistivo, se sustituye en el modelo resistivo C por r y K por R, despreciando la capacidad parcial con el conductor C* (ver Capítulo 4 [figura 4.4](#)).

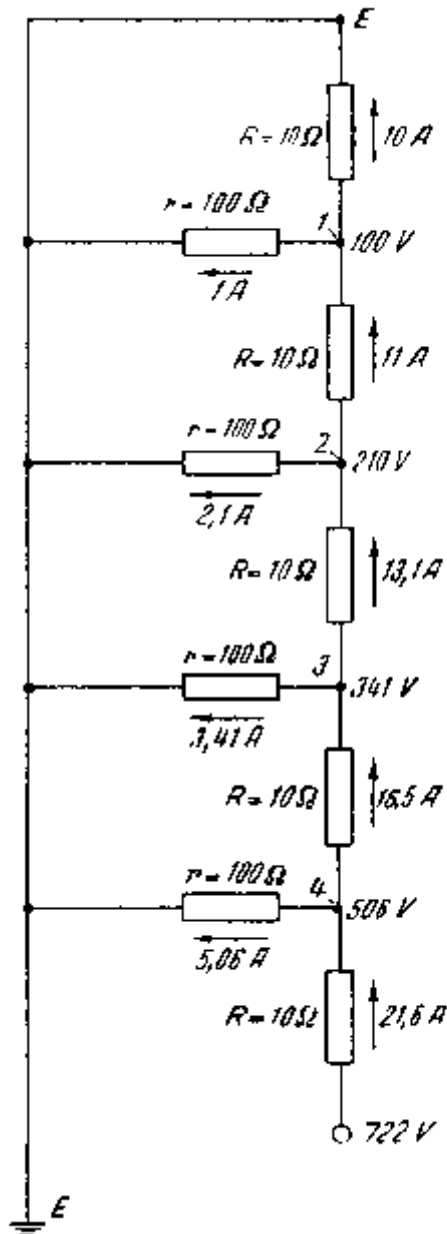
Se tiene entonces que:

$$\frac{1/r}{1/R} = \frac{\omega C}{\omega K} = \frac{C}{K}$$

por lo tanto:

$$\frac{R}{r} = \frac{C}{K}$$

Veamos un ejemplo de una cadena que tiene 5 elementos, si se adopta una relación $C/K = 0.1$ y fijamos arbitrariamente para $R=10 \text{ W}$ resulta $r=100 \text{ W}$ siendo la tensión del primer elemento contra tierra de 722 V la distribución de tensiones se observa en la [figura a4.5-1](#) (del libro *Introdução à Técnica das Altas Tensões* – M. Wellauer).



Con esta base se desarrolló el programa CADENA que recibe los siguientes datos: el valor de capacidad de un solo aislador (CA), el número de aisladores (HN). Entre el potencial cero y el potencial 100 % hay $n-1$ puntos en tensión para los que se debe determinar su potencial. Para cada uno de estos puntos intermedios se debe informar el valor de la capacidad (CT) hacia tierra (soporte) y de la capacidad hacia el conductor (CC, en general sensiblemente menor).

Con estos datos el programa prepara un sistema de n-1 ecuaciones, cuyas incógnitas son las tensiones en los puntos intermedios de la cadena.

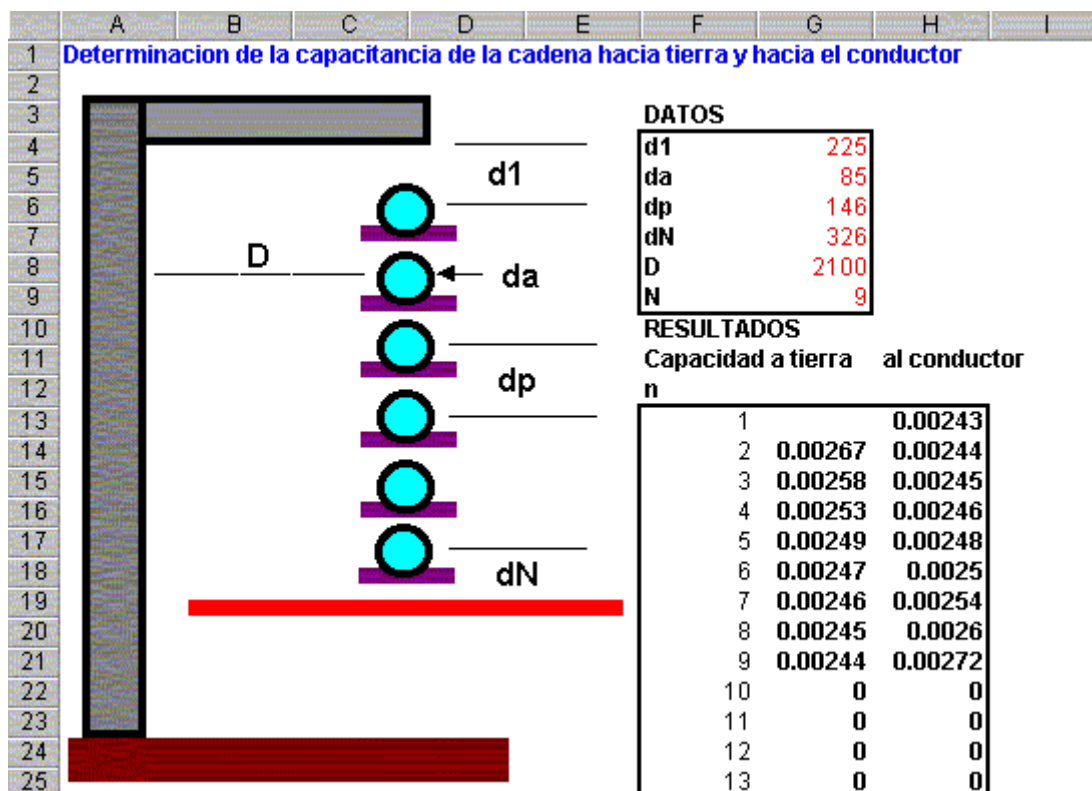
La planilla de cálculo AISLADOR.XLS permite estimar la capacitancia de los aisladores, y las capacitancias hacia tierra y hacia el conductor, de cada aislador, el cálculo se hace con hipótesis simplificativas que se observan en la planilla.

La [figura A1](#) muestra como se estima la capacitancia del aislador, siendo las hipótesis simplificativas drásticas, se adoptan como diámetro interno y externo los que corresponden al vidrio o porcelana donde están alojados la caperuza y el badajo, considerando el cemento de fijación como conductor.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Determinacion de la capacitancia de un aislador de campana								
2									
3	el aislador se puede esquematizar como un capacitor cilindrico coaxial, el cilindro interior es el badajo y el cilindro								
4	exterior es la campana, entre ambos cilindros esta la porcelana o el vidrio								
5	DATOS EN ROJO								
6	epsilon relativo del material del aislad				5				
7	diametro interno				42 mm				
8	diametro externo				85 mm				
9	longitud del cilindro				45 mm				
10									
11	semiesfera				0.01154152 picoFaradios				
12	cilindro				0.0088203 picoFaradios				
13	capacitancia del aislador				0.02036182 picoFaradios				
14									
15									
16									



La [figura A2](#) muestra el cálculo de las capacitancias hacia tierra (poste) y hacia el conductor, como se observa en la planilla el primer punto está a tierra su capacidad es nula, y el valor de la capacidad hacia el conductor no se la considera, en rigor es la capacidad del conductor a tierra, con lo que se tienen los datos necesarios para el programa CADENA, y se puede determinar la distribución de tensión en la cadena de aisladores.



Es interesante comparar los resultados de la corrida del programa CADENA teniendo en cuenta las capacidades hacia el conductor (CC) y considerándolas nulas, observando su influencia en la distribución de la tensión.

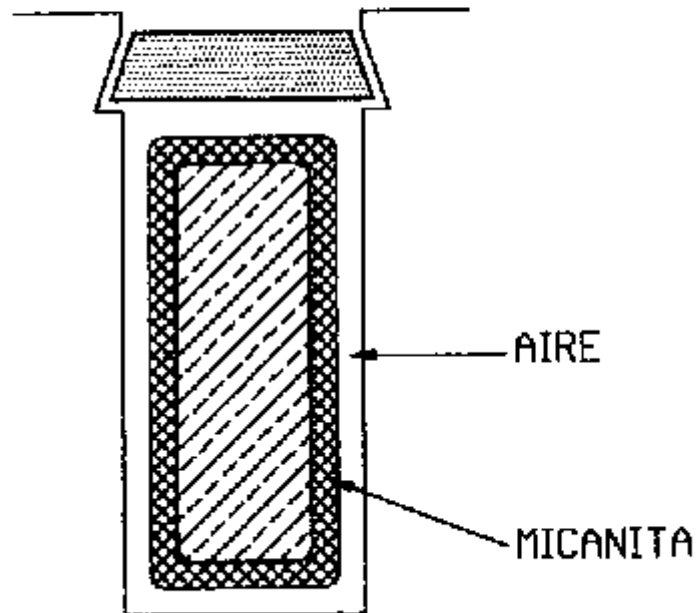
Si desea el archivo que contiene planilla, programas y ejemplo haga [click aquí](#) (baja AISLADOR.ZIP).

5. Aislantes sólidos en la técnica de la alta tensión.

Problema 5.1

El conductor de un devanado de un alternador alojado en una ranura según muestra la [figura a5.1-1](#), está aislado contra masa con micanita cuya constante dieléctrica es $\epsilon_r = 5$ y su espesor es $l_1 = 4$ mm.

ESQUEMA GRADIENTE DE TENSION AISLANTES ENTRE CONDUCTOR Y RANURA



Entre la pared de la ranura y el aislante del conductor se tiene un delgado estrato de aire ($\epsilon_r = 1$) cuyo espesor es $l_2 = 0.2$ mm.

Si la tensión contra masa es igual a 7.62 kV se requiere calcular el gradiente en el aire, y hacer un breve comentario acerca de su valor.

Sobre la micanita se aplica normalmente una capa de pintura semiconductor (que se comporta como conductora), explicar cual es su efecto y que ventajas se obtienen.

Problema 5.2

Se propone estudiar el campo eléctrico para algunas configuraciones interesantes que se presentan en las máquinas y equipos eléctricos de alta tensión.

Dada la dificultad que implica encarar la resolución de estos problemas con métodos analíticos, se utiliza un programa de cálculo que resuelve el problema mediante un método numérico.

Los datos se esquematizan sobre una retícula regular donde se fuerza la configuración simplificada del objeto alrededor del cual se desea estudiar el campo.

El resultado deseado se obtiene en un archivo de salida que se visualiza con un programa auxiliar.

A modo de ejemplo se plantean los siguientes casos particulares:

El terminal de un cable de alta tensión es un elemento muy delicado de la instalación, se desea estudiar el campo cuando el terminal se realiza simplemente cortando la aislación (sin ningún tipo de terminal de control de campo). En media tensión sobre la aislación se tiene una pantalla conductora, obsérvese el campo donde esta termina.

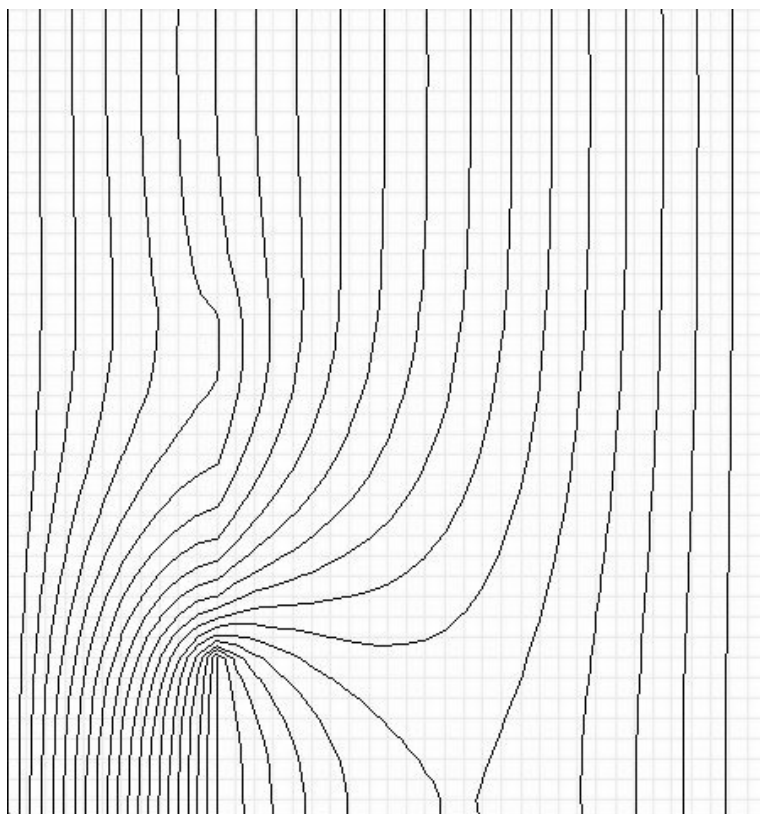
Explicación del caso 1 (método de análisis de los resultados obtenidos).

El programa POTRES resuelve la ecuación diferencial de Laplace, en los casos plano (bidimensional x, y) y de simetría alrededor de un eje (también bidimensional, r, z).

Se plantea estudiar la distribución de potencial en el aislante de un cable, y se esquematiza el problema dentro de un área cuadrada, (ver archivo potres1.dat) un lado representa el conductor a potencial 100% (Q), un segmento representa la pantalla a potencial 0 sobre la superficie del aislante, el espacio está relleno de aislante (representado por X , $e = 5$) y aire (I , $e = 1$), la separación entre aislante y aire está representada por L .

El límite del espacio (cuadrado) debe estar formado por líneas equipotenciales o líneas de campo (y no se dispone en este programa de otra posibilidad).

El problema se ha planteado preparando los datos, y el ejemplo se ha resuelto como plano observándose el resultado obtenido en la [figura a5.2-1](#),



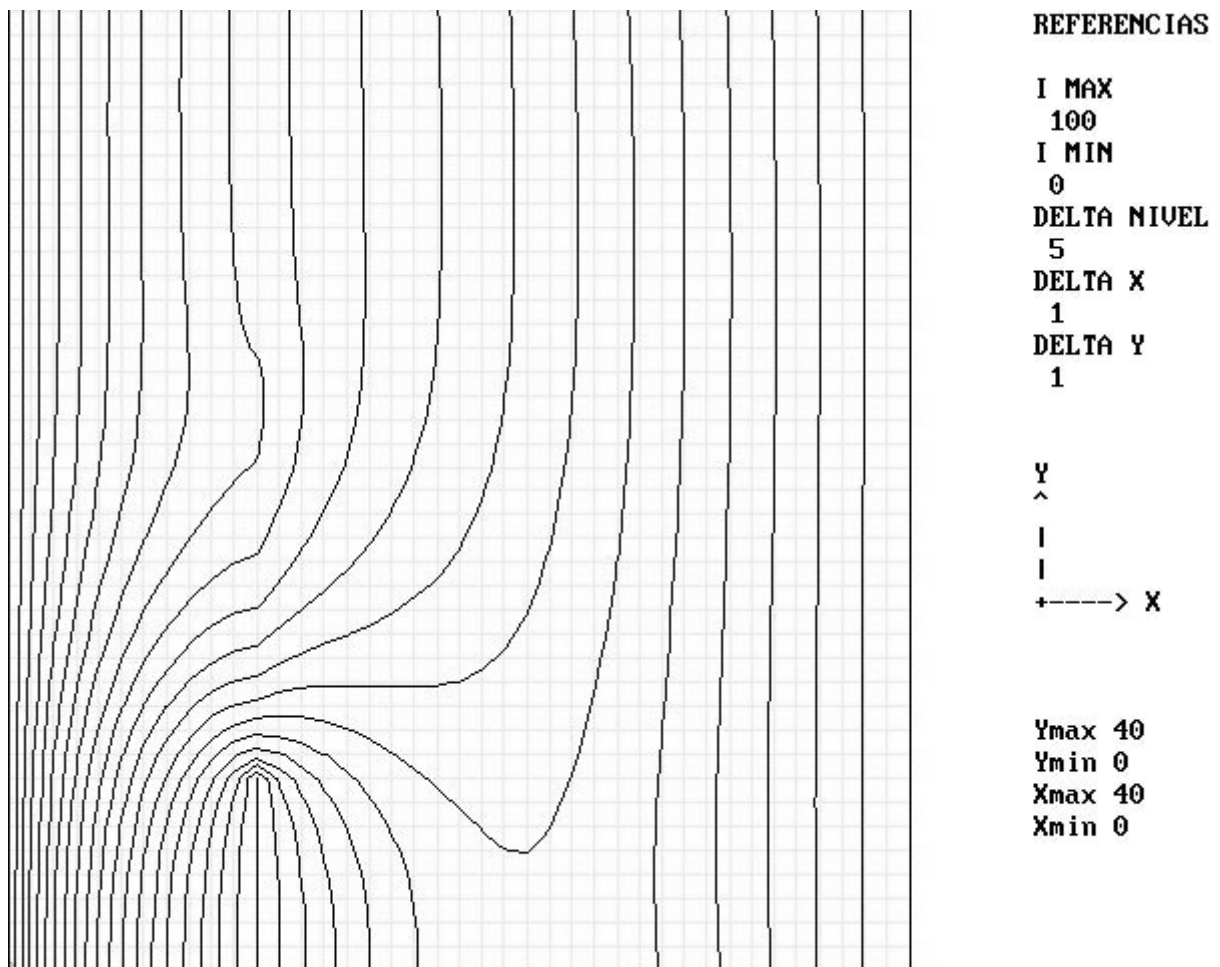
REFERENCIAS

I MAX
100
I MIN
0
DELTA NIVEL
5
DELTA X
1
DELTA Y
1

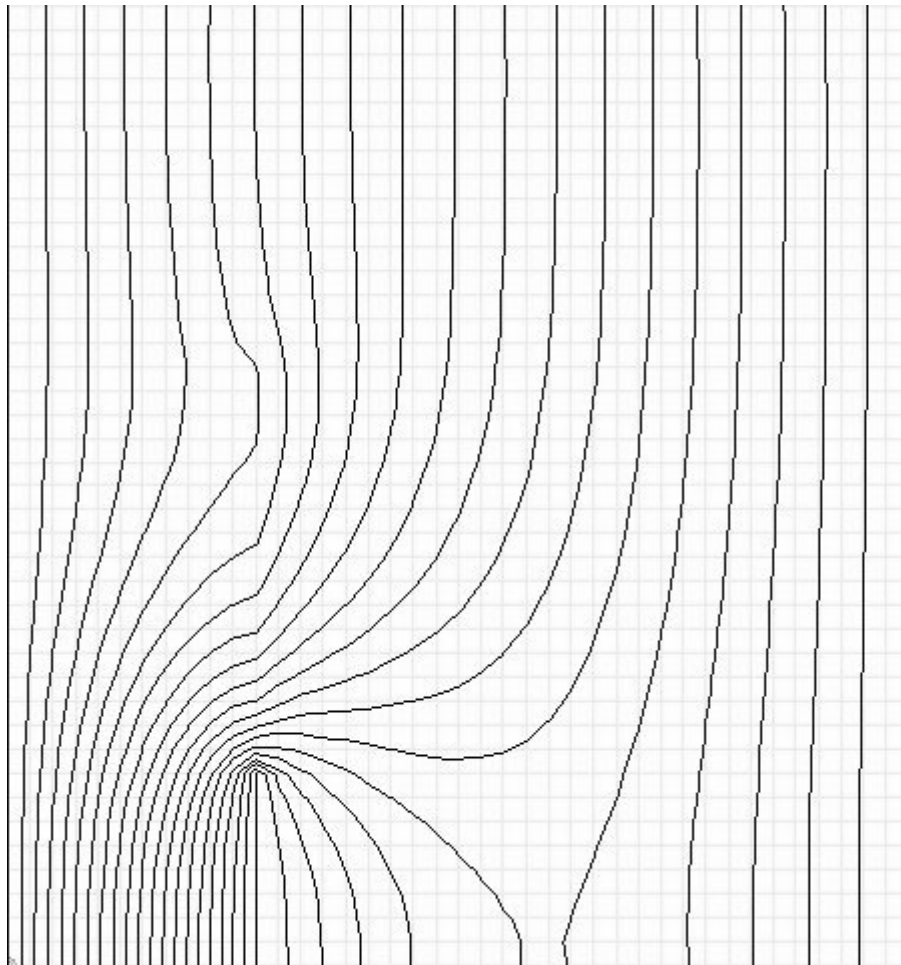
Y
^
|
|
+----> X

Ymax 40
Ymin 0
Xmax 40
Xmin 0

esto es lo que puede obtenerse de un programa que sólo considere casos planos, si en cambio se resuelve el problema como simetría cilíndrica, suponiendo el conductor con radio 3 (unidades de cuadrícula) se obtiene un gráfico [figura a5.2-2](#) con cierta diferencia, que particularmente se aprecia en la proximidad del conductor (eje), si el radio se incrementa, a medida que se hace muy grande se reproduce nuevamente la [figura a5.2-1](#) (que puede considerarse corresponde a radio infinito).



En esta esquematización se ha fijado con potencial cero el lado opuesto al conductor, en alguna medida puede considerarse que representa un caño metálico a tierra que contiene el cable.



REFERENCIAS

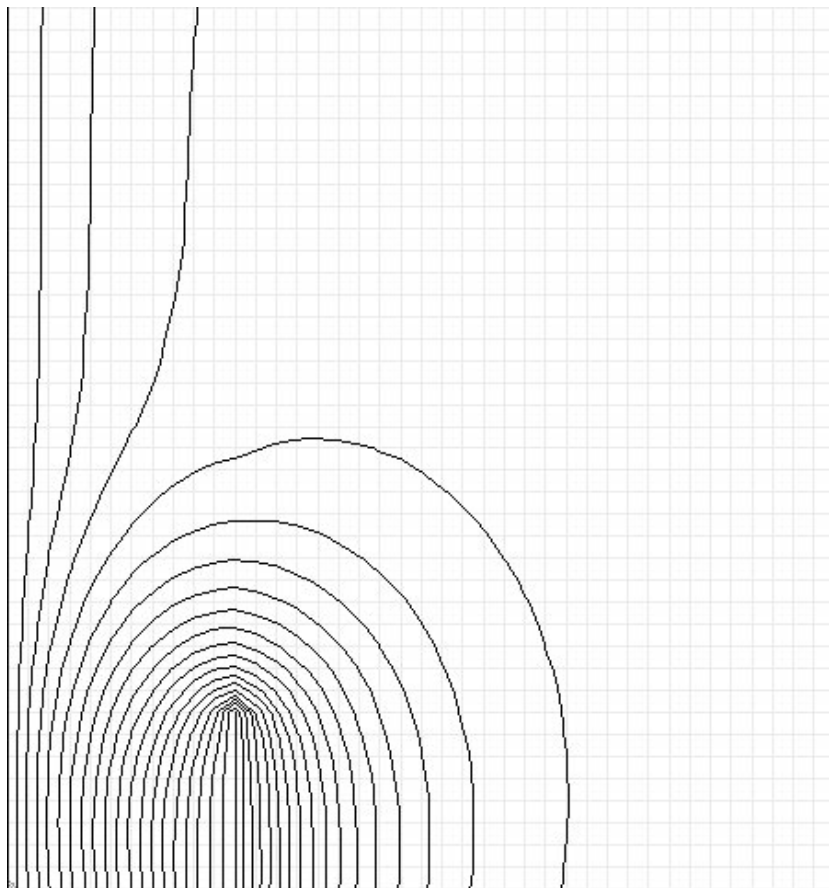
I MAX
100
I MIN
0
DELTA NIVEL
5
DELTA X
1
DELTA Y
1

Y
^
|
|
+----> X

Ymax 40
Ymin 0
Xmax 40
Xmin 0

Si se considera que el cable esta en el aire, y no dentro de un caño, se puede plantear entonces que el espacio analizado está completamente rodeado de líneas de campo, la verdad quizás sea un caso intermedio...

Resolvamos el problema en estas condiciones, el resultado del cálculo mostrado en la [figura a5.2-3](#), intuitivamente no se entiende muy bien, si repetimos el cálculo reduciendo el error (diferencia máxima ente sucesivas iteraciones) obtenemos una [figura a5.2-4](#) que es ligeramente distinta.

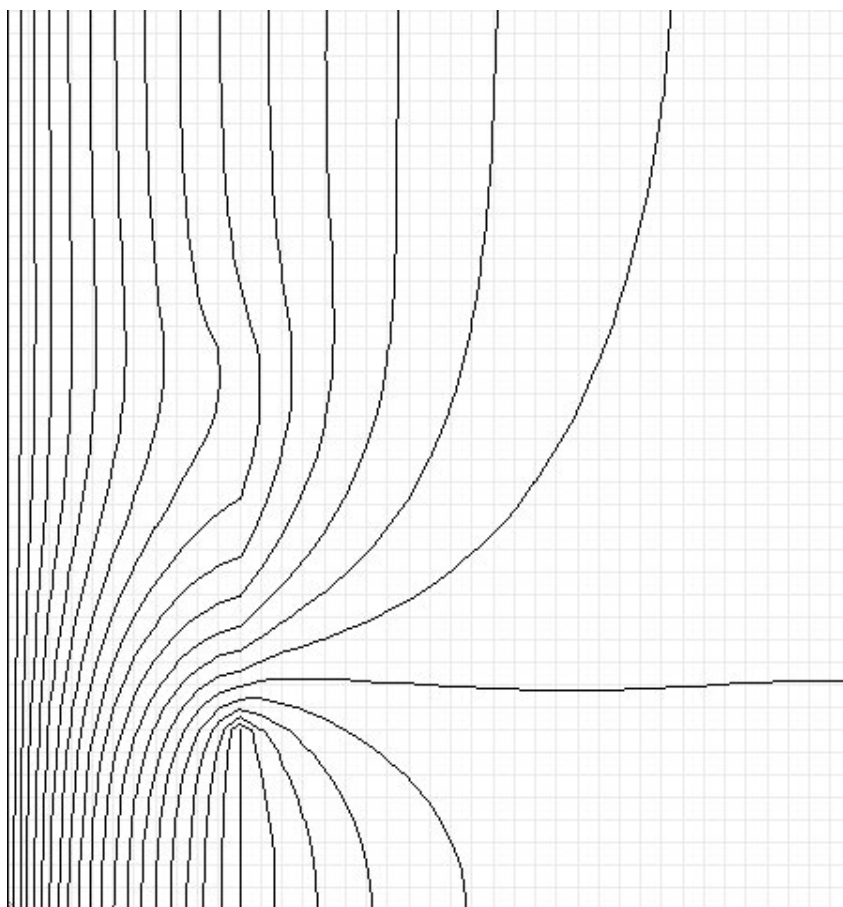


REFERENCIAS

I MAX
100
I MIN
0
DELTA NIVEL
5
DELTA X
1
DELTA Y
1

Y
^
|
|
+----> X

Ymax 40
Ymin 0
Xmax 40
Xmin 0



REFERENCIAS

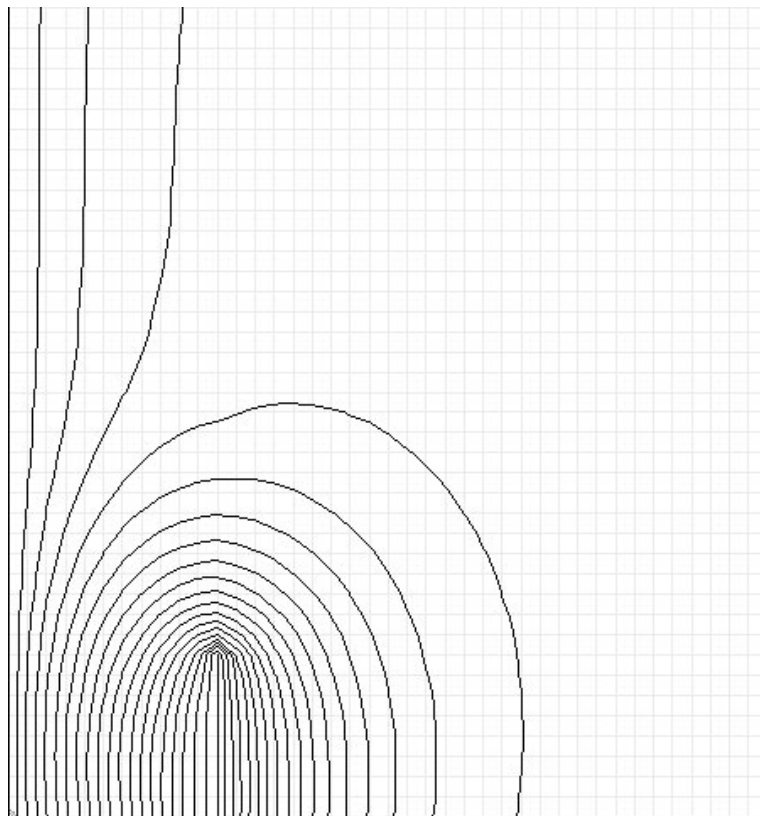
I MAX
100
I MIN
0
DELTA NIVEL
5
DELTA X
1
DELTA Y
1

Y
^
|
|
+----> X

Ymax 40
Ymin 0
Xmax 40
Xmin 0

El hecho de que al variar el error se obtenga una figura distinta pone en evidencia que el programa no obtiene un resultado correcto.

Existe otra posibilidad de variar los resultados, el programa cuando inicia asigna un potencial medio a todos los puntos en los cuales se debe calcular el potencial, esto se ha hecho para ayudar al programa a llegar más rápido a la solución correcta, este valor es propuesto por el programa pero puede asignarse al inicio en forma arbitraria, el valor que el programa asigna en el caso de la [figura a5.2-3](#) es aproximadamente 80%, si asignamos ahora 20% a este valor obtenemos la [figura a5.2-4](#) que parece mas acertada.

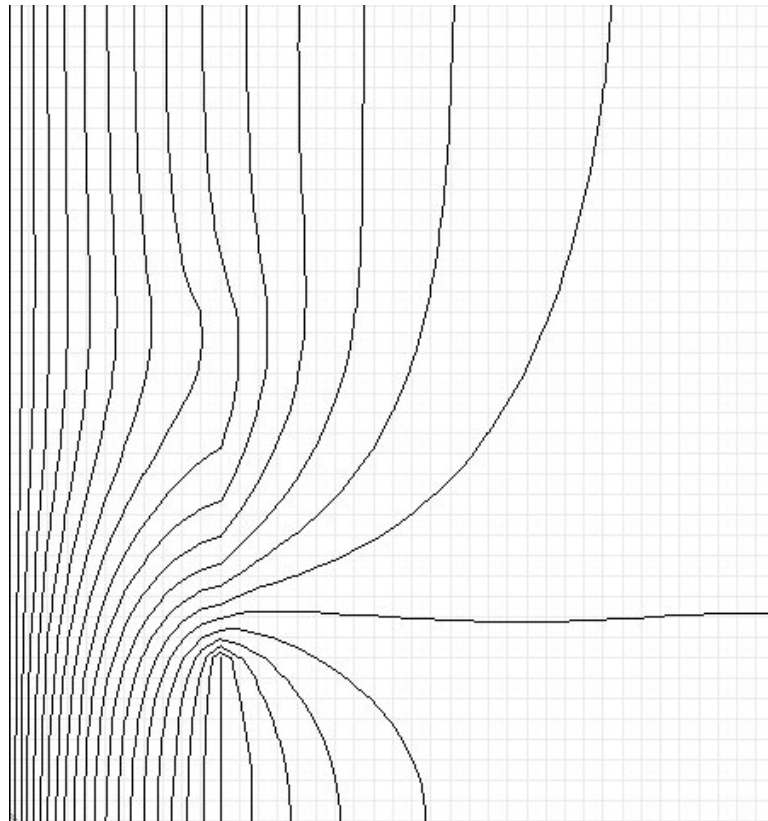


REFERENCIAS

I MAX
100
I MIN
0
DELTA NIVEL
5
DELTA X
1
DELTA Y
1

Y
^
|
|
+----> X

Ymax 40
Ymin 0
Xmax 40
Xmin 0



REFERENCIAS

I MAX
100
I MIN
0
DELTA NIVEL
5
DELTA X
1
DELTA Y
1

Y
^
|
|
+----> X

Ymax 40
Ymin 0
Xmax 40
Xmin 0

Se trata entonces de probar con otros valores hasta haberse convencido que los resultados no dependen del límite de error, ni del valor inicial... mientras se nota esta dependencia seguramente los resultados obtenidos no son todavía correctos, pese a que el criterio de fin del cálculo está satisfecho.

Es importante realizar un cuidadoso análisis crítico de los resultados obtenidos y convencerse que se satisfacen las leyes de la física, antes de extraer conclusiones, que podrían basarse en algo erróneo...

Sobre la aislación se dispone un par de conos cuya función es controlar el campo eléctrico, compárese los resultados de este caso con el anterior.

Sobre el cono de expansión que está del lado del cable se dispone una capa conductora, el cono de expansión del lado extremo se deja sin cubrir, compárese este caso con los anteriores, obsérvese la ventaja de utilizar el cono de expansión.

Se trata de un aislador pasamuros para interior que tiene una superficie lisa y forma de tronco de cono. Obsérvese el campo eléctrico en su interior y en el aire. Analícese como influye un aumento de longitud del cono en los valores máximos del campo eléctrico en el material del aislador.

Un aislador pasamuros para exterior se caracteriza por tener polleras o campanas cuya función es lograr en poca distancia una línea de fuga importante para controlar el efecto de la contaminación. Obsérvese el campo eléctrico para este diseño y compárese con el caso anterior.

Los aisladores soporte cumplen la función de mantener separados de tierra las partes en tensión, es importante estudiar la configuración del campo eléctrico tanto dentro del aislador como en el aire que lo rodea. En particular muchos aparatos eléctricos (seccionadores, interruptores) tienen aisladores de este tipo, de aquí la importancia de estos estudios.

En los casos de tensiones elevadas para uniformar el campo se dispone de un anillo de guarda en su parte sometida a tensión, compárese con el caso anterior observando las diferencias de campo que se presentan. Este artificio se utiliza también para controlar la uniformidad del campo eléctrico dentro de los descargadores de sobretensión.

Resulta interesante estudiar el campo cuando se tiene una disposición varilla - plano, es decir una punta que se encuentra a un potencial dado y un plano que está a potencial de tierra.

Analice el campo de un aislador de suspensión de una línea aérea, a partir de una figura del mismo, realice la esquematización en un retículo suficientemente denso, prepárese el lote de datos, y obsérvense los resultados.

Configuración del campo eléctrico que se tiene en el extremo de un devanado de un transformador de alta tensión, teniendo en cuenta la presencia de los elementos de fijación (prensayugos) y soporte de las bobinas que se encuentran a potencial de tierra.

Los extremos de bobinas de un alternador sincrónico se encuentran a un determinado potencial, el paquete magnético a potencial de tierra, estudiar la configuración del campo en esta parte y hacer las observaciones que correspondan.

Problema 5.3

Los cables aislados, de baja y de alta tensión se fabrican en forma continua y se enrollan en bobinas de longitudes adecuadas a una conveniente manipulación. Uno de los ensayos que demuestran la calidad consiste en aplicar a la aislación cierta tensión durante cierto tiempo, y comprobar que no se presentan descargas.

Es necesario que la aislación quede sometida a la tensión de prueba, esto no es difícil para los cables que tienen sobre la aislación una lámina conductora (pantalla) pero en el caso de los cables que no tienen se los prueba sumergiendo la bobina en un tanque de agua, los extremos del cable se mantienen fuera del agua y se aplica cierta tensión de ensayo entre conductor y tanque (agua).

Examinamos un caso en el que se aplica tensión mediante un transformador que tiene una tensión en vacío de 4000 V y una corriente de cortocircuito de 1 A.

Se ensayan cables de aproximadamente 0,33 microF/km, y se observan algunos fenómenos que son interpretados como anómalos por quien está realizando estas pruebas.

El operador del ensayo observa que con distintas bobinas (de distinta longitud) se presentan corrientes de ensayo que no son proporcionales, como él cree debería ser.

Por otra parte parece que las tensiones aplicadas a las bobinas son distintas de los 4000 V que el operador cree aplicar.

Se pide a la oficina técnica que explique las observaciones y determine que significan los ensayos de las muestras.

El problema esta resuelto en una planilla de cálculo (ver nota), en la que se pueden cambiar los datos, para lograr determinar las distintas condiciones de ensayo.

Se determina la fuente de Thevenin equivalente, en particular su impedancia (reactancia), se determina por otra parte la impedancia por unidad de longitud del cable, y para distintas longitudes de bobinas sus reactancias capacitivas.

Con la impedancia total del circuito, para cada longitud surge la corriente absorbida y la tensión aplicada al capacitor equivalente al cable, el gráfico que relaciona longitud y tensión sobre el cable muestra cierta curvatura, que pone en evidencia la no linealidad de la relación entre longitudes y tensiones de ensayo, y explica brevemente las perplejidades del operador antes comentadas.

Nota:

Para este problema se ha preparado una planilla que permite obtener los valores de interés ([bajar planilla Atp5-3.zip](#), luego expandirla y levantarla con Excel)

Problema 5.4

Las configuraciones geométricas más frecuentes en los equipos eléctricos son la de un capacitor de placas paralelas, campo homogéneo, pues todos los puntos del dieléctrico se encuentran a idéntica sollicitación (estrictamente si las placas tienen superficie infinita), otra es la cilíndrica coaxial, es decir el conductor interno energizado y el externo a tierra, siendo en este caso la sollicitación interna no homogénea.

Un material cuya rigidez dieléctrica $E = 60 \text{ kV/cm}$ se lo somete a las siguientes pruebas: entres dos placas separadas 1.5 cm y entre dos cilindros coaxiales cuyos diámetros son 2 y 5 cm respectivamente, calcular el potencial de ruptura en cada caso.

a) Campo homogéneo $U = E \times d = 60 \times 1.5 = 90 \text{ kV}$

b) Campo no homogéneo $U = E \times R_i \times \ln \frac{R_e}{R_i} = 60 \times \ln \frac{2.5}{1} = 55 \text{ kV}$

Se observa que si bien el espesor del dieléctrico es el mismo en ambos casos, sin embargo en la sollicitación del campo no homogéneo, el material soporta sólo el 61% del caso de campo homogéneo tomado como referencia.

Problema 5.5

El campo eléctrico que llega a una frontera entre dos medios dieléctricos experimenta una refracción (cambio de dirección).

Si el campo es perpendicular a la frontera se tiene que $E_{1n}\epsilon_1 = E_{2n}\epsilon_2$, si en cambio es tangencial a la frontera resulta $E_{1t} = E_{2t}$.

Cuando el campo llega a una superficie con una dirección cualquiera, se puede descomponer en dos componentes una perpendicular y otra tangencial a la frontera.

Explicar que ocurre con cada uno de las componentes del campo que llega a una superficie de un aislador con una dirección cualquiera, por ejemplo una frontera porcelana - aire (siendo ϵ_r de la porcelana de 6 a 7 veces mayor que el del aire).

Problema 5.6

Capacitor plano con armaduras paralelas

En un capacitor plano con armaduras paralelas (campo uniforme) con varias capas de distintos dieléctricos en serie al cual se le aplica una tensión alterna U , las distintas capas son solicitadas por gradientes inversamente proporcionales a las respectivas constantes dieléctricas.

Todos los estratos serán atravesados por un flujo dieléctrico común $\Phi = A' D_x$, siendo A la superficie de la armadura.

La inducción dieléctrica será por lo tanto la misma en cada uno de los estratos

$$D_1 = D_2 \dots = D_x = D$$

Por lo tanto el gradiente en cada capa resulta

$$E_1 = \frac{D_1}{\epsilon_1} = \frac{D}{\epsilon_1}$$
$$E_x = \frac{D_x}{\epsilon_x} = \frac{D}{\epsilon_x}$$

La tensión aplicada resulta

$$U = E_1 \times d_1 + \dots + E_x \times d_x = D \left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \dots + \frac{d_x}{\varepsilon_x} \right) = D \sum_1^x \frac{d_x}{\varepsilon_x}$$

$$D = \frac{U}{\sum_1^x \frac{d_x}{\varepsilon_x}}$$

Por lo tanto el gradiente para una capa dada resulta

$$E_x = \frac{U}{\varepsilon_x \sum_1^x \frac{d_x}{\varepsilon_x}}$$

Siendo el valor de la sumatoria el mismo para todos los aislantes en serie, el más solicitado de los aislantes es que tiene la constante dieléctrica más pequeña.

Se puede afirmar que la disposición óptima de los aislantes en serie corresponde a aquella que utiliza materiales que tienen en común el producto $\varepsilon_r \cdot E_r$ (en la práctica valores no muy distintos).

Esto se verifica particularmente en los transformadores en aceite, cuando entre dos arrollamientos separados por un canal de aceite ($\varepsilon_r = 2.2$) se interpone un cilindro de papel impregnado ($\varepsilon_r = 4.2$). Suponiendo que los radios de los cilindros son suficientemente grandes como para considerar planas las paredes de los cilindros se puede asimilar a un capacitor plano.

El gradiente en el aceite se incrementa respecto al valor que tenía antes cuando solamente se tenía aceite, y el aumento es tanto más grande cuanto mayor es el espesor del cilindro.

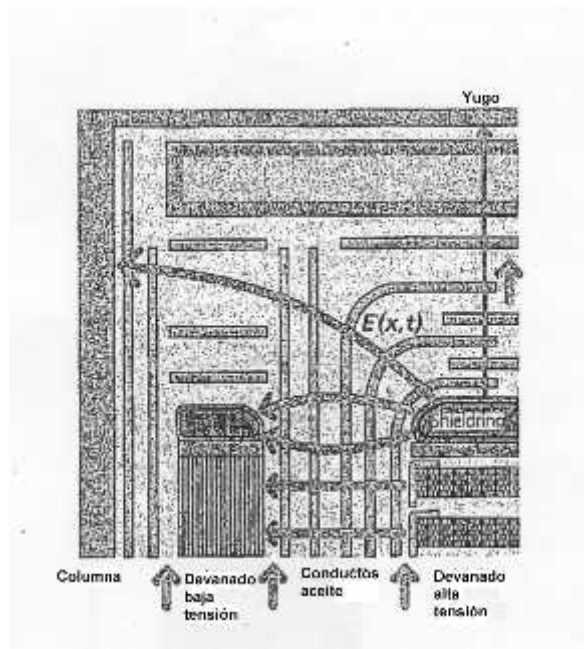
El cilindro de papel resulta igualmente útil debido a que interrumpe la continuidad del aceite que puede contener en suspensión impurezas, que alineándose en el sentido del campo, pueden provocar la descarga.

Es importante optimizar los diseños de los aislamientos de los transformadores incrementando la resistencia dieléctrica con volúmenes no mayores de los

requeridos, reduciendo de este modo el tamaño, peso y costo del transformador.

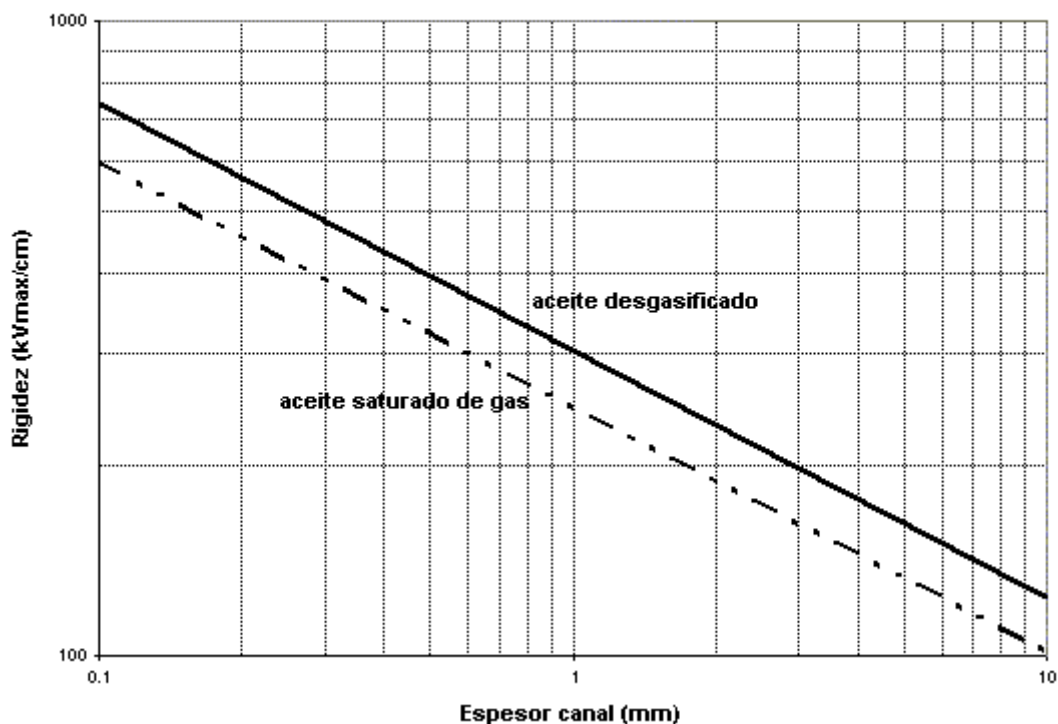
La reducción del volumen aislante requiere un conocimiento completo de la función de los aislantes líquidos y sólidos.

La aislación sólida se utiliza formando barreras para subdividir los canales de aceite altamente solicitados en canales más estrechos. La [figura a5.6-1](#) muestra un esquema de la parte superior del devanado de alta tensión, la disposición de estas estructuras aislantes debe realizarse siguiendo las líneas equipotenciales para minimizar los esfuerzos tangenciales en el papel.



Siendo el aceite el elemento más solicitado, por su menor permitividad relativa, el espesor del canal se puede estimar según la [figura a5.6-2](#), que muestra la rigidez dieléctrica en corriente alterna (kV_{max}/cm) en función del espesor (mm), para aceite en distintas condiciones.

Canales de aceite en corriente alterna



Los campos dieléctricos en las máquinas y aparatos eléctricos no son casi nunca uniformes, como en el caso antes considerado, el cálculo del gradientes es variable de un punto a otro y en muchos casos se lo puede asimilar a un campo cilíndrico.

Capacitor cilíndrico con varias capas dieléctricas

Veamos el caso de un capacitor cilíndrico con varias capas dieléctricas cuyas armaduras tienen respectivamente un radio interno r y externo R , siendo ψ el flujo dieléctrico que pasa de una armadura a otra y que es el mismo que atraviesa todos los estrados dieléctricos.

Por unidad de longitud, suficientemente alejado de los bordes se tiene que

$$\psi = D_r \times 2\pi r = \varepsilon \times E_r \times 2\pi r$$

$$E_r = \frac{\psi}{2\pi\varepsilon r}$$

La tensión aplicada resulta

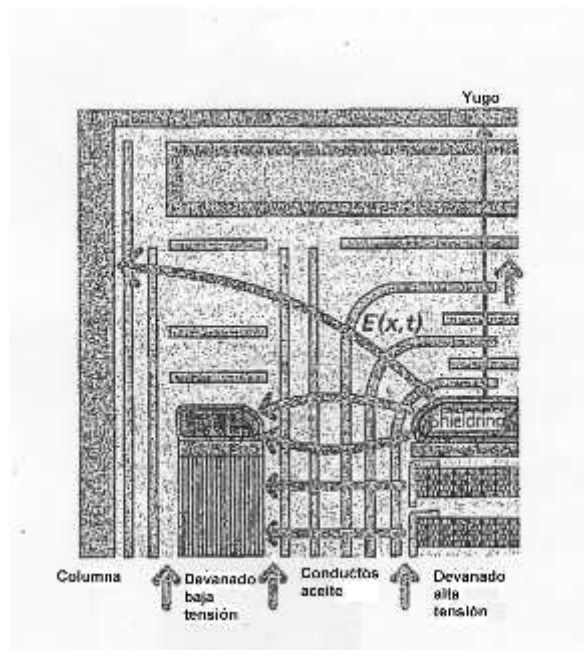
$$U = \int_r^R E_r dr = \frac{\psi}{2\pi\epsilon} \int_r^R \frac{dr}{r} = \frac{\psi}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R}{r}$$

$$\psi = \frac{2\pi\epsilon U}{\ln \frac{R}{r}}$$

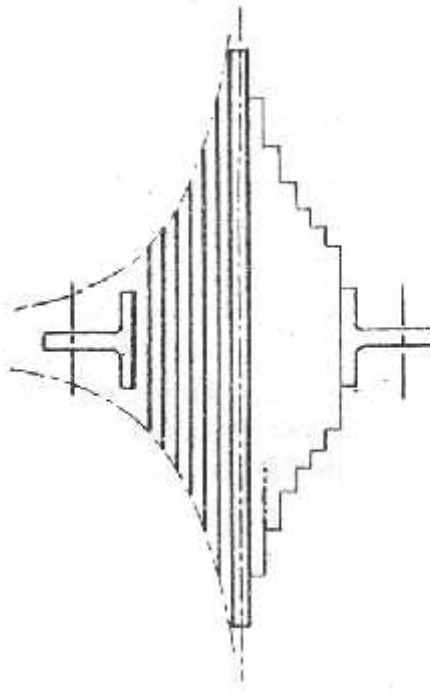
Finalmente para un radio r_i cualquiera el gradiente resulta

$$E_{r_i} = \frac{U}{r_i \ln \frac{R}{r}}$$

El gradiente en cada punto del campo es por lo tanto inversamente proporcional a la distancia del punto al eje del capacitor y su diagrama es una hipérbola como corresponde al ejemplo de la [figura a5.6-1](#).



Otro caso que se lo puede estudiar como un capacitor cilíndrico es el aislador pasante de alta tensión de un transformador [figura a5.6-3](#), donde se puede observar que el electrodo externo es menos largo que el interno, donde para obtener una mejor distribución del gradiente se interponen en la masa aislante delgadas capas metálicas.



En este caso se tiene aproximadamente

$$\psi = \varepsilon E_r \times 2\pi \times r h_r = \text{constante}$$

Siendo h_r la altura de la lámina metálica interpuesta en correspondencia al radio r . Si se quiere que el gradiente E_r se mantenga constante, h_r debe variar inversamente proporcional al radio r , es decir los bordes de la armadura se deben encontrar sucesivamente sobre los puntos de una hipérbola equilátera.

Método de cálculo de un capacitor plano

Son datos los espesores d_i , las constantes dieléctricas e_i , la tensión aplicada U

Se determina $D = U / \text{sumatoria } (d_i / e_i)$

Se miden las distancias desde una de las placas, x y se avanza dx

Se puede representar en función de x

El campo $E_x = D / e_x$

También se determina $U_x = U(x-dx) - E_x \cdot dx$ que se repite a lo largo de x

Método de cálculo capacitor cilíndrico

Lo mismo se hace para el capacitor cilíndrico, para este además se debe conocer el radio interno R_0

Se determina $D_r = y / (2 \cdot p \cdot r)$

Donde r inicia a partir de R_0 , se considera que

$$U = (y / (2 \cdot p)) \int (dr / (e_r \cdot r))$$

Como la integral es discontinua por los saltos de e_r se deben sumar las integrales entre discontinuidades sucesivas, obteniéndose el valor de D_0

$$D_0 = y / (2 \cdot p \cdot r_0)$$

$$U = (y / (2 \cdot p)) \sum ((1 / e_r) \cdot \ln (r_{\text{mayor}} / r_{\text{menor}}))$$

$$U = D_0 \cdot r_0 \sum ((1 / e_r) \cdot \ln (r_{\text{mayor}} / r_{\text{menor}}))$$

Se miden las distancias desde R_0 y se avanza dr

Se puede representar en función de r

$$\text{El campo } E_r = D_r / e_r = D_0 \cdot R_0 / (r \cdot e_r)$$

También se determina $U_r = U(r-dr) - E_r \cdot dr$ que se repite a lo largo de r

Este método se ha volcado en una planilla excel ([bajar planilla atr5-6.zip](#)), que representa las variaciones de E y de U en función de la coordenada geométrica para un capacitor plano, y para uno cilíndrico con capas de distinta constante dieléctrica.

7. Análisis de las exigencias reales a que se hallan sometidos los dieléctricos.

Problema 7.1

Seleccionar descargadores de óxido de cinc para un sistema eléctrico de 69 kV, que esta alimentado por líneas aéreas que llegan desde una fuente relativamente lejana (a los fines de este estudio).

Se han calculado las corrientes de falla a tierra (cortocircuitos monofásicos) en distintas condiciones de la red. Obteniéndose los resultados siguientes:

Caso A – tensiones en las fases sanas mínimo 57.2 kV máximo 65.3 kV

Caso B – tensiones en las fases sanas mínimo 59.42 kV máximo 61.3 kV

Caso C – tensiones en las fases sanas mínimo 58.6 kV máximo 58.8 kV

La corriente total de falla a tierra supera los 1000 A y el sistema esta puesto a tierra a través de reactores zig-zag.

Metodología

En la selección de los descargadores se siguen los pasos indicados en la guía ABB SESWG/A 2300E Technical Information Selection guide for ABB HV surge arresters.

Paso 1 – Obtención de los parámetros del sistema

Obtención de la mayor tensión estimada del sistema U_m

(Definición: Tensión máxima del sistema U_m es la mayor tensión eficaz fase fase que se presenta bajo condiciones normales de operación en cualquier tiempo y punto del sistema)

Se puede estimar en $1,05 \cdot 69 \text{ kV} = 72,45 \text{ kV} = \text{aprox. } 72,5 \text{ kV}$

Condiciones de falla a tierra

En la memoria de cálculo de cortocircuito, se han estudiado cortocircuitos monofásicos en distintas condiciones de la red.

Estos valores determinan la tensión TOV Sobretensión temporaria, que ocurre en las fases sanas cuando hay fallas a tierra, en el caso examinado es:

Tensión máxima 65,3 kV.

También puede presentarse durante fenómenos de ferresonancia, o en rechazos de carga, que son situaciones no previsible en el sistema en estudio.

El factor de puesta a tierra se determina a partir de este último valor

$$k_e = \frac{65,3}{\frac{69}{\sqrt{3}}} = 1,64$$

Como este valor supera el límite de 1,4 a los fines de las sobretensiones el sistema que se analiza se considera aislado de tierra

La duración de la sobretensión depende del tiempo de eliminación de la falla que se considera en sistemas puestos a tierra directamente menor de 10 segundos, en sistemas aislados puede superar 2 horas, y entonces la tensión TOV es la compuesta.

En el caso en estudio la corriente total de falla a tierra supera los 1000 A por lo que su duración debe limitarse al valor previsto de los dispositivos de puesta a tierra (en el caso en examen reactores zig-zag) que es de menos de 10 segundos.

Paso 2 – Control de condiciones de servicio anormales

Temperaturas fuera del rango – 40 a + 45 °C.; frecuencias fuera del rango 15 – 62 Hz; fuentes de calor próximas a los descargadores.

Se considera que no se presentan condiciones de este tipo.

Paso 3 – Control de otras causas de ocurrencia de TOV

Se considera que no se presentan condiciones fuera de las indicadas en paso 1.

Paso 4 – Seleccionar la tensión de operación continua

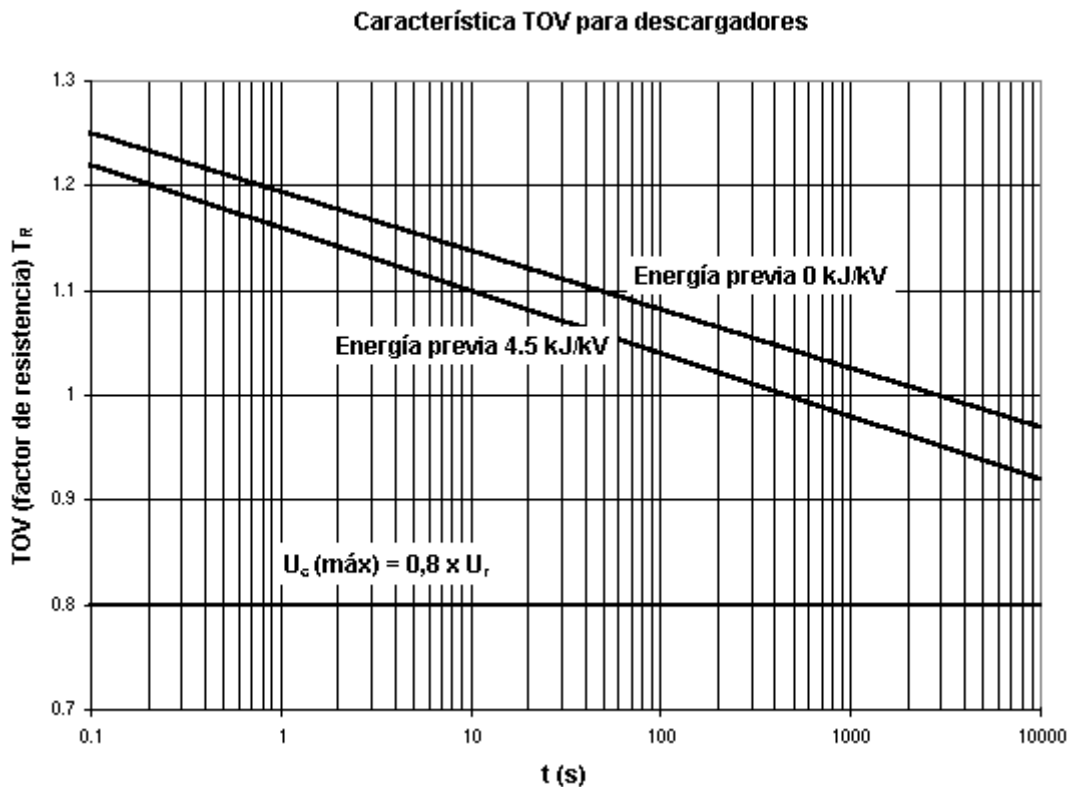
La tensión de operación continua U_c es la designada como permisible en valor eficaz a frecuencia industrial que puede ser aplicada continuamente (permanentemente) en bornes del descargador.

$$U_c = \frac{U_m}{\sqrt{3}} = \frac{72,5}{\sqrt{3}} = 41,91 \text{ kV}$$

Paso 5 – Seleccionar la capacidad conveniente TOV

La [figura a7.1-1](#) muestra la capacidad TOV expresada en múltiplos de U_r función de T_r que para 10 segundos es 1,1 con energía previa y 1,14 sin energía previa (este valor depende de marca y modelo de descargador, lo que debe confirmarse una vez adoptado el descargador).

Luego se inicia la selección del descargador:



Selección basándose en la tensión preliminar

$$U_{r0} = \frac{U_c}{0,8} = \frac{42 \text{ kV}}{0,8} = 52,5 \text{ kV}$$

Determinación de TOV basándose en la amplitud y duración de la falla

$$TOV_e = \frac{k_e \times U_m}{\sqrt{3}} = \frac{1,64 \times 72,5}{\sqrt{3}} = 68,73 \text{ kV}$$

Para sistemas efectivamente aislados se adopta $k_e = 1,73$

$$TOV_e = \frac{k_e \times U_m}{\sqrt{3}} = \frac{1,73 \times 72,5}{\sqrt{3}} = 72,5 \text{ kV}$$

Consideración de energía absorbida previa

$$U_{re} = TOV_e / T_r = 68,73 \text{ kV} / 1,1 = 62,48 \text{ kV} \text{ para 10 segundos, con energía previa}$$

Selección del valor final

Se selecciona el mayor valor entre U_{ro} y U_{re}

$U_r \geq 62,5 \text{ kV}$ debiendo adoptarse el valor normalizado 66 kV

Valores adoptados

Aplicación, protección de transformadores y equipamiento en sistemas con sobretensiones atmosféricas y de maniobra.

Los requerimientos de capacidad de energía, contaminación, son moderados

Frecuencia	60 Hz
Tensión del sistema	72,5 kV
Tensión nominal	69 kV
Corriente nominal de descarga	10 kA _{cresta}
Descarga de corriente soportada:	
alta corriente	4/10 m s 100 kA _{cresta}
baja corriente	2000 m s 550 A _{cresta}
Capacidad de energía descarga de línea	2 impulsos 5,1 kJ/kV (U_r)
Prueba de energía nominal	3,6 kJ/kV (U_r)

Datos garantizados:

U_r kV _{rms}	66
U_c kV _{rms}	53
MCOV kV _{rms}	53
TOV capability 1 sec kV _{rms}	76
10 s kV _{rms}	73
U_{res} 30 /60 m s 500 A kV _{cresta}	137
1 kA kV _{cresta}	142
8 / 20 m s 5 kA kV _{cresta}	165
10 kA kV _{cresta}	176
20 kA kV _{cresta}	196
Distancia de fuga (creepage distance) mm	$1660 = 22,9 \cdot 72,5 > 20 \cdot 72,5$
	(medium pollution)
Aislación externa	(valores de ensayo con aislador vacío)
LIWL (Lightning Impulse Wave Level) 1,2 / 50 kV _{cresta}	350
60 Hz bajo lluvia (10 s) kV _{rms}	170

Los niveles de polución están clasificados en la norma IEC 815, se indican a continuación para cada nivel los valores mínimos de distancia de fuga:

Nivel de polución	Distancia de fuga (mm/kV U_m)
Ligera (L)	16
Mediana (M)	20
Alta (H)	25
Muy alta (V)	31

Problema 7.2

[Propagación de sobretensiones](#) debidas a descargas atmosféricas en líneas eléctricas.

8. Especificaciones de ensayos en alta tensión.

Problema 8.1

Para un sistema de 500 kV se desean establecer las distancias de aislación que deben ser utilizados en el diseño de una instalación.

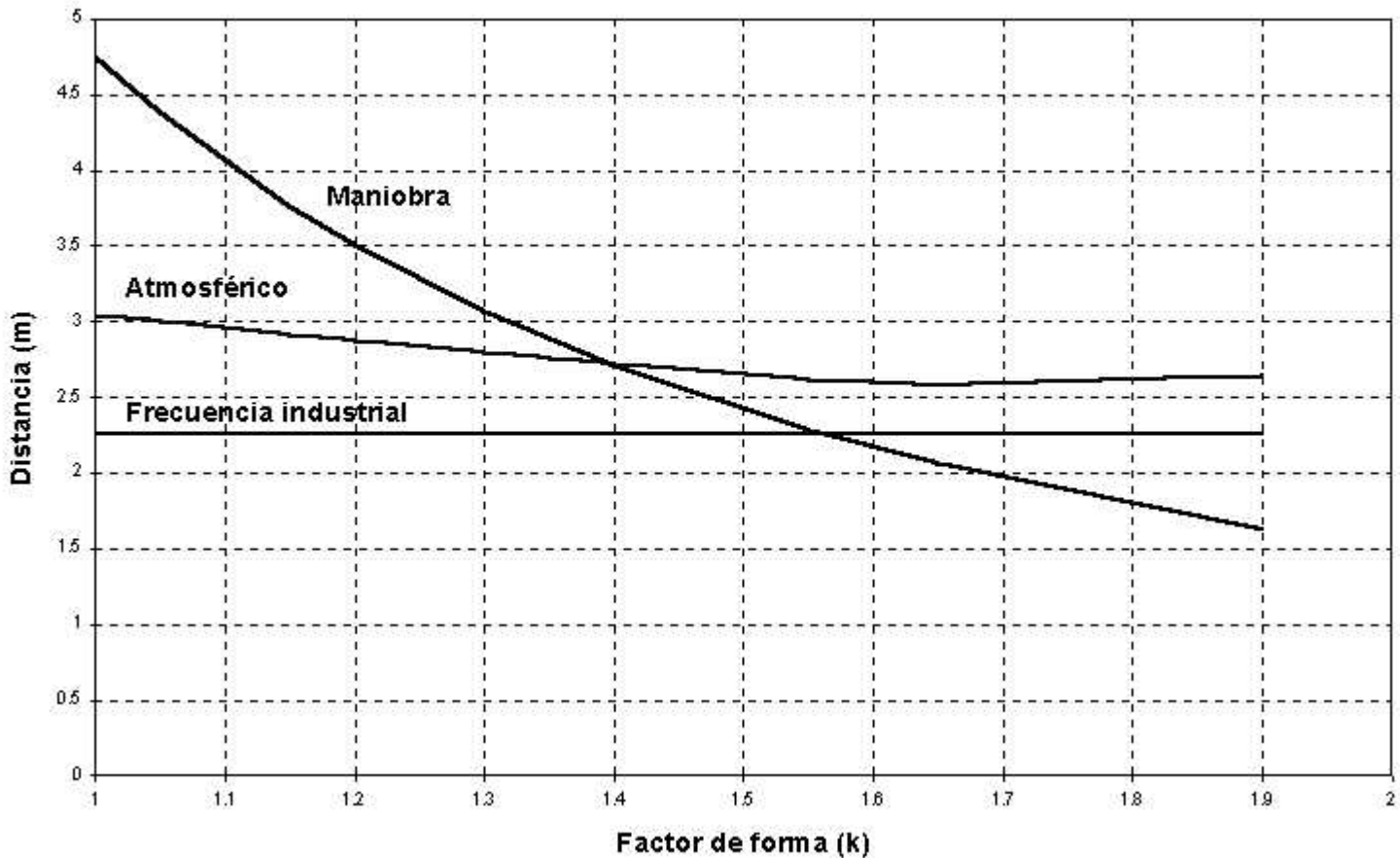
Las tensiones de ensayo para la coordinación de la aislación de acuerdo a IEC se pueden obtener con M-ENSAYO (ejecutable dentro de WPROCALC), son:

tensión industrial	ensayo	680 kV _{rms}
tensión maniobra	ensayo de	1175 kV _{cresta}
tensión atmosférico	ensayo	1500 kV _{cresta}
Tensión - fase	ensayo fase	1800 kV _{cresta}

La distancia que soporta la tensión de 680 kV_{rms} se obtiene fijando el gradiente de 300 kV/m, lo que da 2,267 m.

Las distancias de maniobra y atmosféricas se determinan con funciones que dependen de la forma de los electrodos, estas distancias se deben determinar para una probabilidad de soportar el ensayo de 90% (10% probabilidad de descarga). Este cálculo es desarrollado por el programa M-FORMA (ejecutable dentro de WPROCALC), la gráfica de los resultados se puede ver en la [figura a8.1-1](#).

Distancias de aislación para 500 kV



Se observa que si no hubiera solicitación atmosférica, es decir sólo de maniobra, para factor de forma entre 1.6 y 2 el dimensionamiento está impuesto por la solicitación a frecuencia industrial, por debajo de 1.6 por la solicitación de maniobra.

Si además hay solicitación atmosférica entonces entre 1.4 y 2 se dimensiona por solicitación atmosférica, debajo de 1.4 en cambio por solicitación de maniobra.

Valores bajos del coeficiente k obligan a aumentar las distancias, en consecuencia se destaca que debe hacerse cierto esfuerzo para mejorar las formas, y evitar diseños que impliquen factores menores de 1.3 - 1.4.

Las formas de los electrodos se definen con factores que se llaman de espacio (gap factor) propuestos en un estudio de CIGRE, y que pueden verse en el Capítulo 8. "Distancias eléctricas" figuras de los puntos 8.3 y 8.4, del "CURSO DE DISEÑO DE ESTACIONES ELECTRICAS" que se encuentra entre los LIBROS INTERACTIVOS a los que se accede desde la página: <http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot>.

Problema 8.2

Los diversos ambientes contaminantes se clasifican de acuerdo con los siguientes parámetros:

Depósito de contaminación salina equivalente a un depósito de cloruro de sodio (mgr/cm^2) en función del tipo de aislador soporte o suspensión.

Distancia de la costa oceánica (km) en función de que la velocidad del viento sea $> 10 \text{ m/s}$ o $< 10 \text{ m/s}$.

Cercanía de áreas industriales (lejos, cerca, dentro, contacto directo con niebla marina).

en función de los cuales las normas establecen distintos niveles de contaminación (libre de contaminación, insignificante, leve, moderado, considerable y especial), fijando para cada una de ellas una distancia de fuga mínima recomendada en (cm/kV).

Para un grado de contaminación moderado para el cual la distancia de fuga recomendada es de 3 (cm/kV) , se desea determinar la longitud de fuga mínima requerida por una aislador soporte de porcelana cuya tensión de trabajo es 13800 V con un factor de sobretensión de 1,3.

Problema 8.3

La presión y la temperatura de un gas son factores determinantes de su comportamiento dieléctrico. Con la presión se incrementa la densidad, con la temperatura disminuye.

La siguiente relación permite calcular la densidad en función de la presión y la temperatura:

$$\delta_{(p,T)} = \frac{0,289 \times p(\text{mbar})}{273 + T(^{\circ}\text{C})}$$

Siendo la rigidez dieléctrica para el SF₆ = 89 kV/cm en condiciones normales (20 °C y 1013 mbar), determinar su rigidez a 40 °C y 3 bar.

Técnica de la Alta Tensión - Preguntas de examen:

Capítulo 1

¿A que se denomina tensión nominal de un sistema trifásico, y que se entiende por tensión máxima de un sistema?

¿Cómo se clasifican los sistemas eléctricos y de que depende?

Qué diferencia hay entre una estación eléctrica y una cámara.

En que casos se utilizan centrales de turbogás y de que manera puede mejorarse su rendimiento.

Como se pueden alimentar los servicios auxiliares de una central eléctrica.

Cuales son los distintos campos que constituyen una estación eléctrica.

Describe algunos de los componentes que se tienen al observar una estación eléctrica.

Mencione algunos de los equipos de potencia que se encuentran en una estación eléctrica.

Describa básicamente las funciones de un interruptor y cuales son los medios de interrupción utilizados.

¿A que están destinados los transformadores de medición, y cómo se los clasifica?

¿Cuál es la función de los descargadores y que magnitudes limitan?

¿Para que se utilizan los aisladores y como se los denomina según su función?

Los transformadores de potencia se pueden dividir según su aislamiento en dos grupos; Describa cuales son las características principales de cada grupo.

¿Qué se entiende por compensación y que importancia se le asigna?

Explicar la razón que justifica utilizar tensiones elevadas en la electrotecnia de potencia, y de que depende la tensión más económica de una línea.

Capítulo 2

¿Por qué se utiliza la corriente continua en los grandes sistemas de transmisión?

¿Qué inconveniente presentaría una interconexión con cable aislado (submarino) si se realizase con corriente alterna?

Si se compara realizar una transmisión en corriente alterna con otra en continua, explicar con hipótesis simplificadoras cual resultaría más conveniente.

¿Qué ventajas presenta en la transmisión ferroviaria la utilización de alta tensión continua?

Capítulo 3

Las sobretensiones pueden clasificarse según el tiempo de duración y el grado de amortiguamiento en sobretensiones de tipo atmosférico, sobretensiones de

tipo de maniobra y sobretensiones temporarias. Explicar cual es la diferencia entre ellas.

Explicar como se clasifican las sobretensiones en función del tiempo de duración y el grado de amortiguamiento.

Cuales son las causas de las sobretensiones de maniobra, que caracterizan las sobretensiones temporarias y con que están asociadas.

Explicar que ocurre cuando una onda viajera alcanza un punto de discontinuidad de impedancia de una línea.

Explicar que incidencia tiene en la amplitud de una sobretensión el grado de puesta a tierra del neutro de un sistema.

Que importancia le adjudica en el campo industrial a la "normalización" y "unificación".

Mencione algún organismo nacional o internacional de normalización en el campo electrotécnico.

La amplitud de la corriente de descarga normalmente es inferior a 40 kA.

Explicar cual es la relación entre esta onda de corriente y la onda de tensión.

Explicar que ocurre si la amplitud de la sobretensión es menor de la que provocaría un arco eléctrico en la cadena de aisladores, y análogamente que ocurre si la sobretensión provoca el arco en la cadena.

Que se entiende por aislamiento autoregenerativo y no regenerativo. Dar ejemplos.

Que se entiende por coordinación del aislamiento y cual es su principal objetivo.

En la mayor parte de los casos los fenómenos de resonancia se presentan a continuación de fallas, y en particular con la interrupción de los conductores.

Explicar que ocurre cuando se interrumpe la línea de alimentación de un transformador en vacío.

Capítulo 4

Que influencia tiene la tierra al determinar el campo eléctrico alrededor de un objeto cuando se realiza un ensayo en una sala de pruebas que tiene paredes, techo y piso metálicos.

La tensión a la que aparece el efecto corona se denomina tensión de inicio de corona. Explicar de que depende esta tensión.

Por encima de 300 kV la mayoría de las líneas de transmisión de energía tienen más de un conductor por fase, es decir se habla de conductores de un haz. Explicar porque se adopta esta forma constructiva, y hacer una representación esquemática simple de la distribución del gradiente en una disposición de cuatro subconductores por fase.

En los sistemas de transmisión de energía, todos los subconductores de una misma fase se encuentran equidistantes el uno del otro. Explicar como es el gradiente eléctrico para las tres fases de una línea de 500 kV con disposición horizontal de sus conductores.

Cada uno de los aisladores de la cadena tiene una capacidad propia entre las partes metálicas que constituyen su unión, una capacidad con relación al poste y una capacidad con relación al conductor. Explicar como es la distribución de tensión a lo largo de la cadena.

Para líneas de alta tensión se deben realizar ensayos para verificar la presencia de efecto corona visible en las cadenas de aisladores y su

correspondiente morsetería. También es importante determinar si los niveles de radio interferencia (RIV) no superan los límites fijados.

Estos ensayos pueden realizarse en instalaciones al aire libre o bien en una sala de ensayos que tiene paredes y techo metálicos.

En una instalación de ensayos al aire libre se desea probar el haz de conductores de una línea de 500 kV, la distancia al suelo es de 5 m, el haz es único, no están las fases laterales.

En rigor hay un edificio metálico lateralmente al área de prueba, la distancia al edificio es de 4 m, y el edificio es de gran altura, ¿cómo es el campo considerando la presencia del edificio?

Capítulo 5

En un dieléctrico formado por varias capas, la intensidad de campo en una capa aislante es tanto mayor, cuanto menor es su constante dieléctrica. Explicar con un ejemplo donde se puede presentar esta situación en una máquina eléctrica.

A un cable de energía que tiene pantallas se lo denomina a campo eléctrico radial, análogamente cuando no dispone de ellas se lo denomina a campo eléctrico no radial. Explicar porque estos últimos están sometidos a una sollicitación dieléctrica más desfavorable.

Los aisladores para transformadores y reactores de alta tensión son de tipo capacitivo. Explicar cuales son las ventajas de estos aisladores frente a los no capacitivos.

Que función cumplen los aisladores de soporte y a que tipo de esfuerzos están sometidos.

Que se entiende por descargas parciales, porque se originan, y cuales son los efectos que con el tiempo se presentan en los aislamientos.

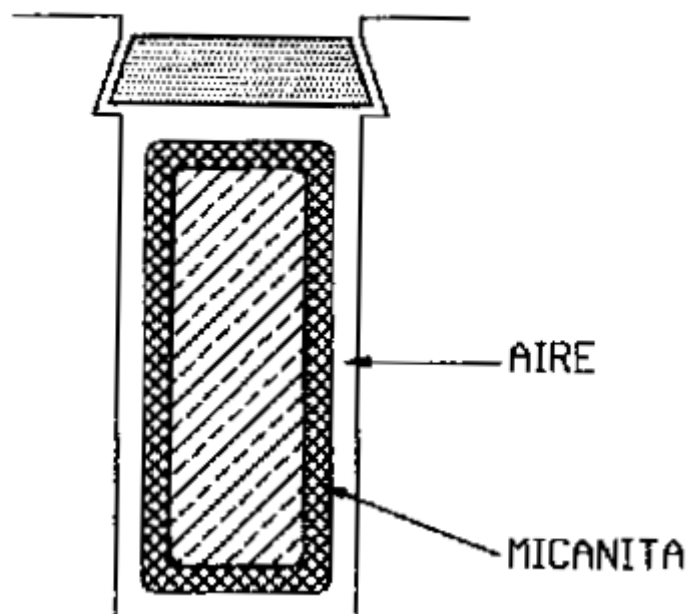
El conductor de un devanado de un alternador alojado en una ranura según muestra la figura, está aislado contra masa con mica cuya constante dieléctrica es $\epsilon_r = 5$ y su espesor es $l_1 = 4$ mm.

Entre la pared de la ranura y el aislante del conductor se tiene un delgado estrato de aire ($\epsilon_r = 1$) cuyo espesor es $l_2 = 0.2$ mm.

Si la tensión contra masa es igual a 7.62 kV se requiere calcular el gradiente en el aire, y hacer un breve comentario acerca de su valor.

Sobre la mica se aplica normalmente una capa de pintura semiconductora (que se comporta como conductora), explicar cual es su efecto y que ventajas se obtienen ([ver figura](#)).

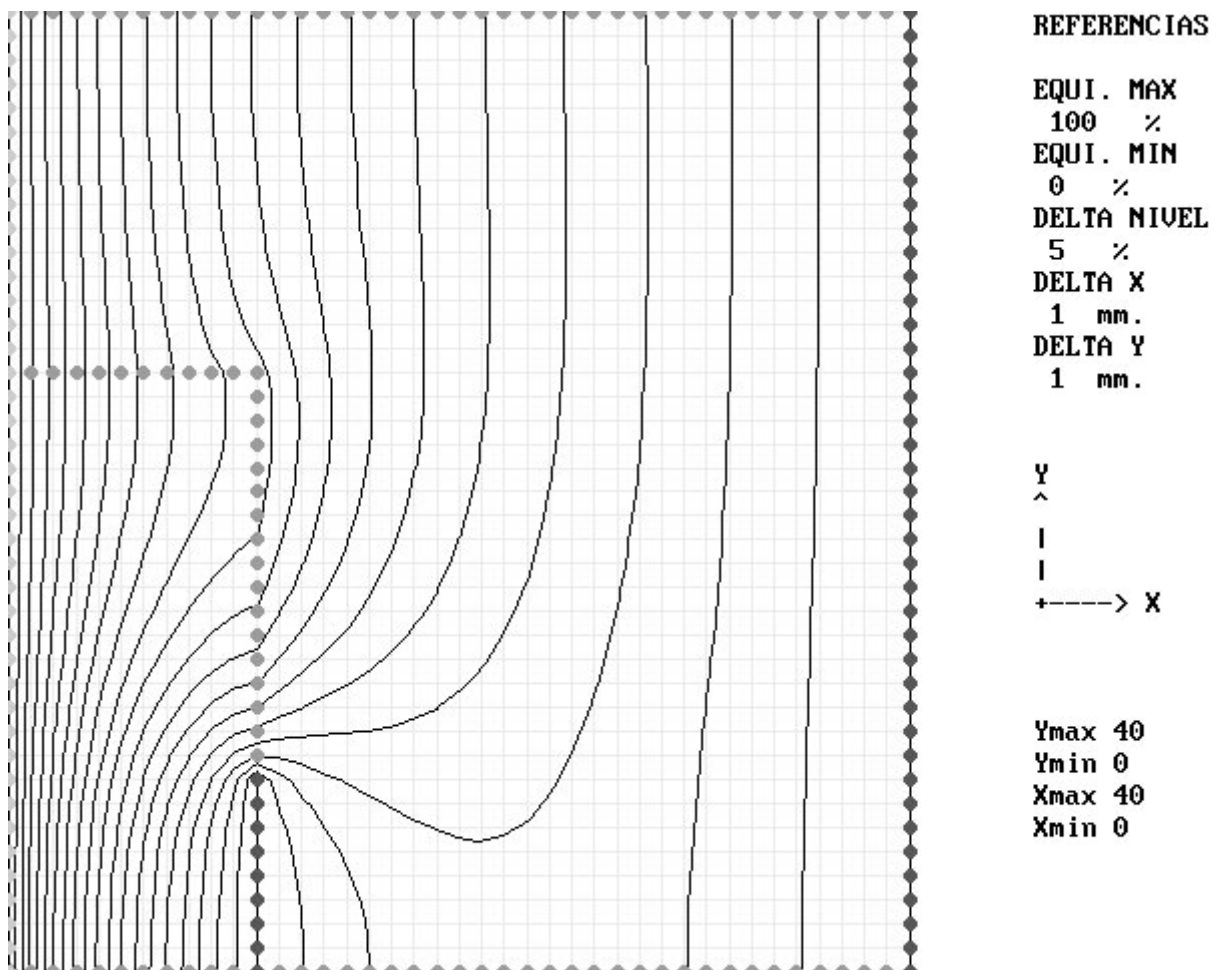
ESQUEMA GRADIENTE DE TENSION AISLANTES ENTRE CONDUCTOR Y RANURA

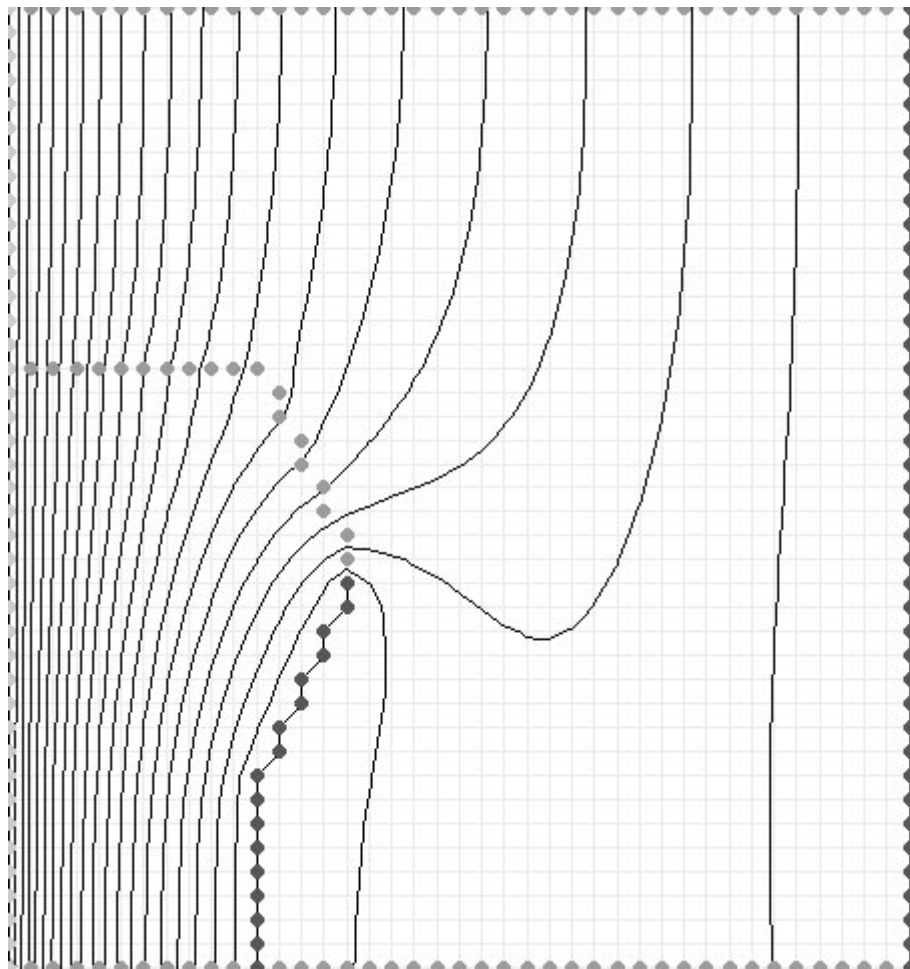


Es fundamental para un buen diseño, estudiar el campo eléctrico para algunas configuraciones interesantes que se presentan en las máquinas y equipos eléctricos de alta tensión.

Dada la dificultad que implica encarar la resolución de estos problemas con métodos analíticos, se utiliza el programa Potres que resuelve el problema mediante un método numérico.

Por ejemplo, el terminal de un cable de alta tensión es un elemento muy delicado de la instalación, explicar porque el terminal no se realiza simplemente cortando la aislación, como se observa en la [Figura 1](#), utilizándose otras disposiciones como la indicada en la [Figura 2](#).





REFERENCIAS

EQUI. MAX
 100 %
 EQUI. MIN
 0 %
 DELTA NIVEL
 5 %
 DELTA X
 1 mm.
 DELTA Y
 1 mm.

Y
 ^
 |
 |
 +-----> X

Ymax 40
 Ymin 0
 Xmax 40
 Xmin 0

Capítulo 6

Explicar algunas de las funciones de los aislantes líquidos en la construcción de máquinas y aparatos eléctricos, y que incidencia tiene en su rigidez dieléctrica la presencia de factores externos.

En cierta época se construyeron gran cantidad de transformadores y capacitores aislados en PCB (policlorados). Cuales fueron sus ventajas y particularmente inconvenientes que han motivado que su uso haya quedado excluido.

El SF₆ (hexafluoruro de azufre) es un gas que se ha difundido desde los '70 en las aplicaciones eléctricas. Cuales son sus ventajas con respecto al aire.

ç

Capítulo 7

Las sobretensiones tienen una naturaleza intrínsecamente estadística, debido a una serie de variables aleatorias. Enunciar algunas de las variables aleatorias que intervienen en estos fenómenos.

Mencionar algunos de los métodos o dispositivos más utilizados para controlar las sobretensiones.

Que aparatos se utilizan para proteger el material eléctrico contra las sobretensiones transitorias elevadas, y como se los conecta.

Los explosores son dos electrodos en aire con forma adecuada que también realizan cierta protección contra sobretensiones, limitando el valor máximo de la tensión. Cual es la principal diferencia si se compara su actuación con la de un descargador.

Capítulo 8

Describir como se clasifican básicamente los ensayos a que se someten los equipamientos.

Una descarga disruptiva se puede presentar tanto en un dieléctrico sólido como en un dieléctrico líquido o gaseoso. Explicar como se comporta la pérdida de la característica dieléctrica en cada caso.

Que importancia tiene en las características disruptivas la disposición del montaje del objeto ensayado.

Que finalidad tienen los ensayos de polución artificial.

Explicar cuales son las condiciones atmosféricas que tienen incidencia en la descarga disruptiva.

Como se define la onda de impulso atmosférico y como deben interpretarse los valores de tolerancia que fijan las normas.

Como se define la onda de impulso de maniobra y como deben interpretarse los valores de tolerancia que fijan las normas.

Existen dos métodos de coordinación del aislamiento respecto a las sobretensiones transitorias: el determinístico y el estadístico. Cuando se utiliza el primero y en que se basa el segundo.

Si hay descargas corona en un conductor hay necesariamente radiointerferencia (RIV), pero no al revés, es decir, puede haber radiointerferencia sin existir corona. El efecto corona se determina visualmente, para la medición de RIV se utilizan instrumentos de medición. ¿Qué precauciones se deben tomar si estos ensayos de RIV se realizan en una sala de prueba de alta tensión?

Capítulo 9

Básicamente los laboratorios pueden clasificarse en tres tipos: para propósitos generales, industriales y para propósitos específicos. Describa cuales serían las funciones de cada uno de ellos.

Cuales son los ensayos que se realizan en un laboratorio de alta tensión, y describa brevemente que equipamiento se utiliza en cada caso.

Cuales son los tres circuitos básicos en que se puede subdividir físicamente una prueba a impulso.

La transmisión de las señales de bajo nivel tanto de comando como de medición en un laboratorio de alta tensión es muy crítica a causa de las fuertes perturbaciones existentes. Cuales son las principales soluciones adoptadas.

TECNICA DE LA ALTA TENSION

ILUSTRACIONES DE CLASE - ARCHIVOS PPS

[Energia y fuentes de energia](#) definición, fuentes, combustibles fósiles, nuclear, hidraulica, eolica, solar, biomasa, mareomotriz, geotérmica.

[Centrales electricas 1- parte](#) central hidroeléctrica, tomas de agua, casa de maquinas, turbinas, represas, centrales de bombeo - Centrales cólicas, aerogeneradores, topología,

[Centrales electricas 2- parte](#) centrales térmicas, esquema, descripción, relación con el medio ambiente, centrales nucleares, esquema, central solar, esquema.

TECNICA DE LA ALTA

TENSION

