

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN SUB ESTACIONES DE
ALTA TENSIÓN**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

**PRESENTADO POR:
FERNANDO VÍCTOR MEJIA MEDINA**

**PROMOCIÓN
1987-I
LIMA-PERÚ
2003**

Sea mi eterno agradecimiento a mi esposa por
su amor y apoyo incondicional,
A mis hijos por su amor y comprensión,
A mi familia por su lucha constante de mejorar
nuestra calidad de vida.

COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN SUBESTACIONES DE ALTA TENSIÓN

SUMARIO

Durante la operación de las sub estaciones de alta tensión se presentan sobretensiones que pueden ocasionar problemas como la salida de servicio de la sub estación y/o el deterioro y la destrucción de los equipos que las componen. Estas sobretensiones pueden originarse en la misma sub estación, como por ejemplo por maniobras o fallas, o pueden provenir de fuentes externas como es el caso de las descargas atmosféricas.

Para minimizar la ocurrencia de los problemas mencionados, el presente estudio describe el procedimiento para efectuar cálculos de coordinación de aislamiento, recomendado por la Comisión Electrotécnica Internacional en la última versión de las Normas de "Coordinación de Aislamiento" IEC 60071-1, 7ma edición, 1993-11 e IEC 60071-2, 3ra edición, 1996-12. Este procedimiento consta de cinco (5) pasos bien definidos:

Paso 1: Determinación de las sobretensiones representativas (U_{rp})

Paso 2: Determinación de las tensiones soportadas de coordinación (U_{cw})

Paso 3: Determinación de las tensiones soportadas especificadas (U_{rw})

Paso 4: Conversión hacia las tensiones soportadas normalizadas para la gama I.

Paso 5: Selección de los valores de tensiones soportadas normalizadas.

Los resultados que se obtienen proporcionan un conjunto de tensiones soportadas normalizadas para el aislamiento interno y/o externo, fase – fase y fase – tierra, que deben tener los equipos que componen la sub estación. La experiencia en nuestro país ha mostrado que éstos resultados son satisfactorios cuando se usan materiales que ya han probado su eficacia tales como la porcelana, vidrio, gas SF6, etc.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I:	
COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO	2
1.1 Descripción de las subestaciones de alta tensión	2
1.2 Fundamento teórico y normas utilizadas	4
1.2.1 Normas utilizadas	8
1.2.2 Tipos de solicitaciones de tensión	9
1.2.3 Protección contra las sobretensiones de origen atmosférico	16
1.2.4 Niveles de aislamiento recomendado por IEC	18
1.2.5 Distancias de separación entre elementos de una instalación	18
CAPITULO II:	
CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS PARA SELECCIÓN DE EQUIPOS	26
2.1 Selección del nivel de aislamiento en subestaciones	26
2.2 Factores de seguridad (K_s)	39
2.3 Corrección atmosférica	40
2.4 Consideraciones especiales para subestaciones	42
CAPITULO III:	
EJEMPLO DE APLICACIÓN NUMÉRICA PARA UNA RED DE LA GAMA I (230kV)	45

3.1	Ejemplos de aplicación	45
3.1.1	Primera parte: ausencia de condiciones particulares (sin maniobras de condensadores).	47
3.1.2	Segunda parte: Influencia, sobre la subestación 1, de maniobras de condensadores ubicados en la subestación 2	63
3.1.3	Organigramas relativos a la primera y segunda parte del ejemplo	69
3.2	Evaluación económica	73
3.3	Software EMTP o ATP para coordinación de aislamiento	78
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
	ANEXOS	86
	ANEXO A: Lista de símbolos y definiciones usadas.	87
	ANEXO B Líneas de fuga recomendadas, según IEC-60071-2.	88
	ANEXO C Distancia máxima de protección de los pararrayos.	89
	BIBLIOGRAFÍA	91

INTRODUCCIÓN

Este estudio esta limitado a mostrar las consideraciones que se deben tener en cuenta para el diseño de la Coordinación del Aislamiento en subestaciones de alta tensión alterna trifásica de la gama I, según la Comisión Electrotécnica Internacional ($1\text{kV} < U_m \leq 245\text{kV}$). Las tensiones de la gama II ($U_m > 245\text{kV}$) son tratadas como un tópico complementario y todo el desarrollo del estudio esta basado en las recomendaciones de las Normas IEC 60071-1, 7ma edición, 1993-11 e IEC 60071-2, 3ra edición, 1996-12.

El diseño de la coordinación del aislamiento definirá las tensiones soportadas para el aislamiento fase-tierra, el aislamiento entre fases y el aislamiento longitudinal del material e instalaciones de las redes eléctricas de tensión alterna trifásica de la gama I.

Las consideraciones para la seguridad de las personas y los valores de tensiones soportadas de las Líneas de Transmisión, no se toman en cuenta aquí y son parte de las recomendaciones de sus normas específicas.

CAPITULO I COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) define la coordinación de aislamiento como sigue:

“Selección de la rigidez dieléctrica de los materiales, en función de las tensiones que pueden aparecer en la red a la cual estos materiales están destinados y teniendo en cuenta las condiciones ambientales y las características de los dispositivos de protección disponibles.”

Prácticamente no existen dos redes iguales ni constructivamente, ni eléctricamente ni con las mismas condiciones ambientales, por lo que, estrictamente hablando, cada subestación producirá diferentes niveles de solicitaciones de tensión que tendrán influencia en los niveles de aislamiento de los equipos que conforman la subestación.

1.1 Descripción de las subestaciones de alta tensión

Las subestaciones de alta tensión son parte integrante de un sistema eléctrico, el cual está conformado principalmente por Centrales de Generación, Líneas de Transmisión, subestaciones, redes de distribución y cargas; y tiene como objetivo fundamental el de proporcionar los medios físicos para transformar tensiones y derivar circuitos de potencia o de distribución.

Los principales componentes que pueden conformar una subestación de alta tensión son:

- Transformadores de potencia
- Interruptores de potencia
- Seccionadores de barras
- Seccionadores de línea
- Seccionadores de puesta a tierra
- Transformadores de medida de tensión y/o corriente
- Pararrayos - Contadores de descargas
- Aisladores
- Trampas de onda
- Reactores
- Capacitores
- Sistema de barras
- Cables de guarda
- Sistema de puesta a tierra
- Estructuras soporte de equipos
- Pórticos
- Cercos de protección
- Sistema de Protección, Mando, Medición, Supervisión, Señalización y alarmas
- Sistema de comunicaciones por radio, teléfono, etc.
- Sistema Automático de Control y Adquisición de Datos (SCADA)
- Servicios auxiliares en Corriente Alterna y Corriente Continua

La disposición física de cada uno de los componentes mencionados, su interconexión y las condiciones ambientales que la rodean, crearán subestaciones con características de funcionamiento unas diferentes de otras, desde el punto de vista de coordinación del aislamiento, debido además a que las características dieléctricas de cada material eléctrico son el resultado de procesos aleatorios en la fabricación y en los cambios de presión, temperatura, densidad, polución del medio ambiente circundante.

Las subestaciones tienen una especial importancia en la confiabilidad del sistema eléctrico debido a que es aquí donde se ubican los equipos de maniobra, transformación, compensación, medición, protección, control, etc. y por lo tanto al definir su grado de confiabilidad estaremos definiendo en parte la calidad del servicio del suministro eléctrico.

1.2 Fundamento teórico y normas utilizadas

Los fundamentos teóricos del presente estudio corresponden a los utilizados por la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) en la elaboración de las Normas Internacionales sobre Coordinación de Aislamiento y sobre otros temas relacionados. Estas Normas Internacionales se enumeran más abajo.

Las principales teorías usadas son:

- Teoría de Campos electromagnéticos.
- Propagación y radiación electromagnética: Para sobre tensiones que viajan a través de los conductores eléctricos, forma y duración de las ondas, etc.

- Electrostática (Ley de Coulomb): Campos eléctricos, Potencial, carga eléctrica, etc.
- Teoría de circuitos eléctricos en régimen permanente y en régimen transitorio: Modelación de Líneas de Transmisión, Redes eléctricas y equipos eléctricos; en circuitos equivalentes para régimen permanente y para régimen transitorio.
- Teoría de la física de estado sólido: Selección de los materiales adecuados para uso como aislantes eléctricos para soportar las solicitaciones de tensión, de cortocircuito, esfuerzos mecánicos y otras condiciones de operación tales como altitud sobre el nivel del mar, contaminación, ataque de agentes químicos, temperatura, etc.
- Teoría de Probabilidades: Probabilidad que ocurra una sobretensión de un valor esperado, Probabilidad de Descarga Disruptiva del Aislamiento Autorregenerable, Probabilidad de asimetría severa de la distribución estadística de las sobretensiones. Aplicación de Factores de Coordinación determinísticos. Se usa la Distribución de Probabilidad Acumulativa de Weibull modificada y la Distribución de Probabilidad Acumulativa de Gauss.

También debemos mencionar el uso de Métodos Estadísticos (Métodos de Monte Carlo) para la adopción de las Tensiones de Coordinación de Aislamiento. El Método Estadístico se usa para calcular el Riego de Fallo

del Aislamiento, en función de la Densidad de Probabilidad de Ocurrencia de Sobretensiones de valor U , y la Probabilidad de Contorneo del Aislamiento bajo un Impulso de Tensión de valor U . Previamente se debe establecer un Riesgo de Fallo Aceptable.

En forma complementaria, se cita a continuación algunas definiciones de la Norma IEC-60071-1, que consideramos importantes mencionar:

Aislamiento externo: Son las distancias en el aire atmosférico y en las superficies de los aislamientos sólidos de un material en contacto con la atmósfera, que se someten a los esfuerzos dieléctricos y a la influencia de las condiciones ambientales u otros agentes externos tales como polución, humedad, insectos, etc. El aislamiento externo puede ser “protegido” o “expuesto” según que haya sido diseñado para utilizarse en el interior o en el exterior de recintos cerrados.

Aislamiento interno: Esta formado por elementos internos del aislamiento de un material, en el que las condiciones ambientales u otros agentes externos no tienen influencia. Estos elementos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos.

Aislamiento autorregenerable: Es el aislamiento que recupera íntegramente sus propiedades aislantes, después de haber estado sometido a una descarga disruptiva provocada por una sobretensión y/o tensión de ensayo. Las descargas disruptivas durante el funcionamiento pueden conducir a un aislamiento autorregenerable o no autorregenerable.

Aislamiento no autorregenerable: Es el aislamiento que pierde sus propiedades aislantes o no las recupera íntegramente, después de haber estado sometido a una descarga disruptiva de sobretensión y/o tensión de ensayo.

Borne de la configuración del aislamiento: Es uno de los dos electrodos entre los cuales puede aplicarse una tensión al aislamiento. Los tipos de borne son:

a) Borne de fase, entre él y el neutro se aplica en funcionamiento la tensión fase-neutro de la red.

b) Borne de neutro, que representa, o está conectado al punto neutro de la red (borne de neutro del transformador, etc.)

c) Borne de tierra, siempre conectado directamente a tierra en funcionamiento (cuba del transformador, zócalo de seccionador, estructura de poste, placa de conexión a tierra, etc.)

Configuración del aislamiento: Configuración geométrica completa del aislamiento en funcionamiento que comprende el aislamiento y todos sus bornes. Incluye todos los elementos (aislantes y conductores) que influyen en su comportamiento dieléctrico. Se distinguen las siguientes configuraciones del aislamiento:

-**Trifásica:** compuesto por tres bornes de fase, un borne de neutro y un borne de tierra;

-**Fase-Tierra:** es una configuración trifásica en la que no se toma en cuenta dos bornes de fases, excepto en casos especiales, en la cual el borne de neutro se conecta a tierra;

-Entre fases: es una configuración trifásica en la que no se considera un borne de fase. En algunos casos los bornes de neutro y tierra tampoco son considerados;

-Longitudinal: considerando dos bornes de una misma fase y un borne de tierra, de una red trifásica. Los dos bornes de la misma fase están separadas temporalmente en dos partes independientes bajo tensión (aparatos de maniobra abiertos). Los cuatro bornes de las otras dos fases no se toman en cuenta o se conectan a tierra y en algunos casos uno de los dos bornes considerados se conecta a tierra.

1.2.1 Normas utilizadas:

IEC 60071-1, Séptima edición, 1993-11; Parte 1: Definiciones, principios y reglas.

IEC 60071-2, Tercera edición, 1996-12; Parte 2: Guía de aplicación.

IEC 60056: 1987 – Interruptores automáticos de corriente alterna para alta tensión.

IEC 60060-1: 1989 – Ensayos de alta tensión. Parte 1: Definiciones y prescripciones generales relativas a los ensayos.

IEC 60099-1: 1991 – Pararrayos. Parte 1: Pararrayos de resistencia variable con explosores para redes de corriente alterna.

IEC 60099-4: 1991 – Pararrayos. Parte 4: Pararrayos de óxido metálico sin explosores para sistema de corriente alterna.

IEC 60099-5: 1996 – Pararrayos. Parte 5: Recomendaciones para la selección y utilización. Sección 1: Generalidades.

IEC 60505: 1975 – Guía para la evaluación y la identificación de los sistemas de aislamiento del material eléctrico.

IEC 60507: 1991 – Ensayo de contaminación artificial de aisladores para alta tensión, destinados a redes de corriente alterna.

IEC 60721-2-3: 1987 – Clasificación de las condiciones ambientales. Parte 2: Condiciones ambientales presentes en la naturaleza. Presión atmosférica.

IEC 60815: 1986 – Guía para la selección de aisladores con respecto a condiciones de contaminación.

1.2.2 Tipos de solicitaciones de tensión

Para los efectos de los estudios de coordinación de aislamiento, la Comisión Electrotécnica Internacional a definido las siguientes tensiones normalizadas:

- Tensión normalizada de corta duración a frecuencia industrial: Es una tensión sinusoidal de frecuencia comprendida entre 48Hz y 62Hz y de duración igual a 60 s.
- Tensión normalizada de impulso tipo maniobra: Es una tensión de impulso que tiene un tiempo hasta la cresta de 250us y un tiempo hasta la mitad del valor de 2500us.
- Tensión normalizada de impulso tipo rayo: Es una tensión de impulso que tenga un tiempo de de frente de 1.2us y un tiempo hasta la mitad del valor de 50us.
- Tensión normalizada de impulso tipo maniobra combinada: es una tensión de impulso combinada que tenga dos componentes de

valores de cresta iguales y de polaridades opuestas. La componente positiva es una tensión de impulso de maniobra normalizada y la componente negativa es una tensión de impulso de maniobra cuyos tiempos hasta la cresta y hasta la mitad del valor no son inferiores a los de la componente positiva.

Según su forma y duración, las tensiones y sobretensiones se distribuyen en cuatro categorías (Ver Tabla 1.1).

a) Tensión permanente (a frecuencia industrial):

Es la tensión a la frecuencia de la red (50Hz o 60Hz), a la cual se le considera que tiene un valor eficaz constante dentro de un período de tiempo mayor o igual a 3600 s, aplicada a cualquier par de bornes de una configuración de aislamiento.

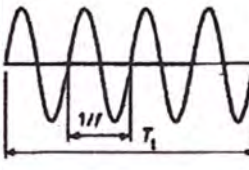
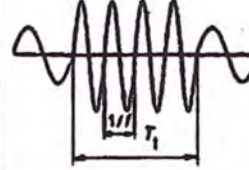
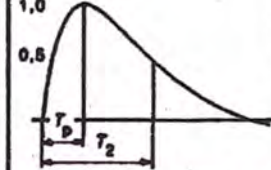
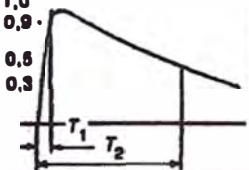
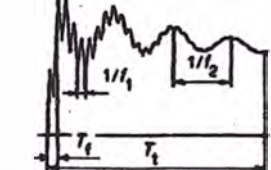
b) Sobretensión temporal

Es la sobretensión a frecuencia industrial ($10\text{Hz} < f < 500\text{Hz}$) que tiene una duración mayor o igual a 0.03 s pero menor o igual a 3600 s. Esta sobretensión puede ser no amortiguada o amortiguada débilmente y su frecuencia puede ser algunas veces inferior o superior a la frecuencia industrial.

Las principales causas por las que se presentan estos tipos de sobretensiones son:

- Falla fase-tierra; que producen sobretensiones en las otras dos fases.

La magnitud de las sobretensiones depende del tipo de puesta a tierra del neutro de la red eléctrica y del lugar donde se produce la falla.

Clase	Baja frecuencia		Transitoria		
	Permanente	Temporal	De frente lento	De frente rápido	De frente muy rápido
Forma de tensión					
Rango de formas de tensión	$f = 50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3 \text{ 600 s} \geq T_1 \geq 0,03 \text{ s}$	$5 \text{ 000 } \mu\text{s} \geq T_p > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada de tensión	$f = 50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ T_1^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Ensayo de tensión soportada normalizada	*	Ensayo de corta duración a frecuencia industrial	Ensayo de impulsos tipo maniobra	Ensayo de impulsos tipo rayo	*

* A especificar por el comité de producto concerniente.

Tabla 1.1 Clases y formas de solicitaciones de tensión y de sobretensión

(Tomada de la Norma IEC 60071-1, Tabla 1)

- Pérdidas de carga. La magnitud de las sobretensiones depende de la magnitud de la carga desconectada, de la configuración de la red después de la desconexión, de la longitud de la línea, potencia de cortocircuito de la red, velocidad y regulación de tensión de los generadores y otras características de las fuentes de energía.
- Resonancia y ferresonancia. Se pueden producir cuando se conectan o cuando se desconectan cargas de los circuitos que tienen alta capacitancia o inductancia con características no lineales.
- Sobretensiones longitudinales durante la sincronización. La magnitud depende del momento en que se pone en paralelo las fuentes y si en ese momento se produce una falla a tierra.
- Combinaciones de causas de sobretensiones temporales. Se puede producir mas de una de las causas mencionadas anteriormente. Se debe tener en cuenta en el diseño de los equipos, solo si existe una alta probabilidad que ocurran fallas simultáneas.
- Falla simultánea de fase-tierra y pérdidas de carga. Se puede producir cuando durante una falla fase-tierra en la línea, ocurra la desconexión de la carga en el extremo mas alejado de la línea; cercana a la carga.
- Otras combinaciones de fallas simultáneas son los fenómenos de resonancia y ferresonancia, los que se evitan durante el diseño de la línea y por lo tanto su combinación con otras fallas es muy poco probable, pero existen algunos tipos de líneas que no permiten un diseño adecuado para evitar resonancias, por lo que en estos casos se deben llevar a cabo estudios mas detallados.

Las sobretensiones temporales pueden limitarse como sigue:

- Sobretensiones por fallas a tierra: Debido a que dependen de los parámetros del sistema eléctrico, se deben limitar mediante la selección adecuada de dichos parámetros, durante el diseño del sistema. Estas sobretensiones se presentan en sistemas con neutro aislado.

En el caso de sistemas con neutro a tierra y que por algún motivo se requiere la puesta a tierra del sistema, se puede resolver el problema conectando un seccionador a tierra o instalando pararrayos de neutro, previamente seleccionados para este fin.

- Cambios súbitos de carga o pérdida de carga: Pueden limitarse usando reactancias “shunt”, condensadores en serie o compensadores estáticos.
- Resonancia y ferresonancia: Se pueden limitar cambiando la frecuencia de sintonización del sistema a través de la variación de la configuración de la red o mediante resistencias de amortiguamiento.

Para las sobretensiones temporales no es usual la aplicación de los pararrayos, con excepción de sobretensiones temporales por resonancia; en cuyo caso los pararrayos pueden limitar e impedir estas sobretensiones pero es necesario efectuar estudios detallados para determinar los esfuerzos térmicos que se producirán en los pararrayos a fin de evitar su deterioro.

c) Sobretensión transitoria

Son las sobretensiones de corta duración que no sobrepasan de algunos milisegundos, oscilatoria o no, generalmente fuertemente

amortiguada. Estas sobretensiones pueden ser inmediatamente seguidas por sobretensiones temporales, las cuales se consideran como acontecimientos separados. Se dividen en los siguientes tipos (ver Tabla 1.1).

c.1) Sobretensión de frente lento:

Generalmente es unidireccional, con una duración T_p hasta el valor de cresta, donde $20\mu s < T_p \leq 5000\mu s$ y de duración de cola $T_2 \leq 20\mu s$.

Lo más frecuente es que se produzcan al energizar las líneas y durante el reenganche, en las fallas y su eliminación, pérdidas de carga, maniobra de corrientes capacitivas o inductivas descargas de rayos distantes a los conductores de líneas aéreas.

El método más frecuente para limitar las sobretensiones de frente lento debido a maniobras es usando resistencias de preinserción en los interruptores de línea. También se puede limitar estas sobretensiones controlando el momento en que se produce la maniobra, colocando varistores en las cámaras de interrupción.

Los pararrayos de óxidos metálicos sin explosores y los pararrayos con explosor especialmente diseñados, también son adecuados para proteger sistemas con sobretensiones temporales moderadas y contra sobretensiones de frente lento. Los pararrayos de resistencia de tipo no lineal con explosores operan, únicamente en casos extremos, contra sobretensiones de frente lento ; debido al encebamiento de los explosores en serie. Siempre se debe tener en cuenta la cantidad de energía que debe disipar el pararrayos.

c.2) Sobretensión de frente rápido:

Generalmente es unidireccional, con una duración T_1 hasta el valor de cresta, donde $0.1\mu s < T_1 \leq 20\mu s$ y de duración de cola $T_2 \leq 300\mu s$.

Se producen debido a descargas atmosféricas que caen directamente sobre la línea aérea o cercanas a ella y a cebados inversos.

Los efectos sobre las subestaciones depende del comportamiento de las líneas conectadas a ella, de la configuración y tamaño de la subestación y del valor de la tensión instantánea de la subestación en el momento de la descarga atmosférica.

La limitación de las sobretensiones en líneas aéreas exige hacer un diseño adecuado del apantallamiento del cable de tierra (para descargas directas de rayo a los conductores) y de la impedancia de puesta a tierra de apoyo de las torres y/o aumento del aislamiento (para los cebados inversos).

c.3) Sobretensión de frente muy rápido:

Generalmente es unidireccional, con una duración T_f hasta el valor de cresta, donde $T_f \leq 0.1\mu s$ y de duración total $< 3ms$ y con oscilaciones superpuestas de frecuencia $30kHz < f < 100MHz$.

Se producen debido a maniobras de Seccionadores o en defectos internos de los equipos con aislamiento en gas SF₆ GIS (Gas Insulated Switchgear) debido al rápido cebado de los electrodos en gas y la poca atenuación a la propagación de frentes dentro del GIS. Las amplitudes de estas sobretensiones se atenúan muy rápidamente al salir del GIS en zonas como el pasatapas. Este tipo de sobretensiones también pueden

ocurrir en transformadores de media tensión de tipo seco con conexiones cortas a los equipos de maniobra.

Para los casos en que las oscilaciones de sobretensión muestran frecuencias en el rango de 0.2MHz a 2MHz y amplitudes hasta 1.5 veces la tensión de cebado, es posible efectuar la protección mediante pararrayos; sin embargo el contenido de frecuencias de las sobretensiones pueden causar grandes esfuerzos en los arrollamientos de los transformadores, debido a resonancias parciales.

En este caso no existen disponibles los métodos para establecer las tensiones representativas pero se espera que las sobretensiones de frente muy rápido no tengan influencia en la selección de las tensiones soportadas asignadas.

1.2.3 Protección contra las sobretensiones de origen atmosférico.

Las descargas atmosféricas producen sobretensiones de frente rápido y pueden afectar directamente a las subestaciones o a las líneas de transmisión.

a) Por descargas directas del rayo en la subestación

Las características de las sobretensiones de origen atmosférico, sobre las subestaciones, dependen de los siguientes factores:

- El comportamiento de cada una las líneas aéreas conectadas a la Subestación.
- La configuración de la subestación, tamaño y en particular, el número de líneas conectadas a ella.

- El valor instantáneo de la tensión de servicio, en el momento de la descarga.

Usualmente las sobretensiones de origen atmosférico son demasiado elevadas para usarlas en la definición de la coordinación del aislamiento, salvo en algunos casos, como en las subestaciones conectadas con cables, donde los cables proporcionan una autoprotección debido a su baja impedancia de onda característica.

Los cables de guarda proporcionan una protección contra caídas directas de rayos.

Los pararrayos proporcionan una protección contra las sobretensiones y actualmente han desplazado a los explosores en la mayoría de las aplicaciones. Los pararrayos actualmente están contruidos de Oxido de Zinc, que tienen una característica no lineal de su resistencia Fase-Tierra.

Es necesario ejecutar una buena puesta a tierra de los equipos y componentes de la subestación, para contribuir a mejorar el sistema de protección contra sobretensiones.

- b)** Por descargas directas del rayo en la línea de transmisión.

La protección se puede efectuar mediante la instalación de cables de guarda, cadenas de aisladores de longitud adecuada, explosores, pararrayos, buenas conexiones de puesta a tierra en varios puntos de la línea.

1.2.4 Niveles de aislamiento recomendados por IEC.

La IEC ha normalizado los niveles de aislamiento asignado , mediante las tensiones soportadas normalizadas, asociadas a la tensión mas elevada para el material U_m . Ver Tablas 1.2 y 1.3.

Para tener un criterio de comportamiento del aislamiento de una red, se usa una tasa de fallos aceptable (R_a) que se puede expresar en número de defectos por año, número de años entre defectos, riesgo de defecto, etc. Los fallos en distintos puntos de una red pueden tener diferentes consecuencias y por lo tanto una misma red puede tener diferentes tasas de fallos aceptables para sus diferentes puntos. Por ejemplo, en sistema en malla, un fallo permanente de línea o un recierre fallido debido a ondas de frente lento, no son tan severos como un fallo en barras o los fallos correspondientes en una red radial.

Algunos ejemplos de tasas de fallos aceptables, determinados sobre una base estadística, son:

- Para los aparatos, R_a debido a sobretensiones: 0.001/año a 0.004/año, dependiendo de los tiempos de reparación.
- Para líneas aéreas, R_a debido a sobretensiones atmosféricas: 0.1/100km/año a 20/100km/año (el número mayor corresponde a líneas de distribución).
- R_a debido a sobretensiones de maniobra: 0.01 a 0.001 por maniobra.

1.2.5 Distancias de separación entre elementos de una instalación

Debido a que las subestaciones no pueden ensayarse como un conjunto, la IEC ha determinado distancias mínimas en el aire para

diferentes configuraciones de electrodos. Estas distancias son conservadoras teniendo en cuenta la experiencia práctica, la economía y las dimensiones del equipo real en el rango de distancias en el aire inferiores a 1m.

Estas distancias pretenden satisfacer los requisitos de coordinación y no los requisitos de seguridad, los cuales pueden ser más exigentes y pueden dar lugar a distancias en el aire substancialmente mayores.

Las distancias mínimas normalizadas se muestran en las tablas 1.4, 1.5 y 1.6 y son de aplicación general.

Tabla 1.4

Relaciona las distancias mínimas en el aire con las tensiones soportadas a impulsos tipo rayo normalizados para configuraciones de electrodo tipo punta-estructura e incluso, para la gama II, para configuraciones tipo conductor-estructura. Las distancias son aplicables para distancias entre fase y tierra y entre fases.

Tabla 1.5

Relaciona las distancias mínimas en el aire con las tensiones soportadas a impulso tipo maniobra entre fase y tierra normalizadas para configuraciones de electrodo del tipo conductor-estructura y punta-estructura. La configuración conductor –estructura es la mas usada.

Tabla 1.6

Relaciona Las distancias mínimas en el aire con las tensiones soportadas a impulso tipo maniobra entre fases normalizadas para configuraciones de electrodo del tipo conductor-conductor y punta-

conductor. La configuración asimétrica punta-conductor es la configuración más desfavorable que normalmente se encuentra en servicio. La configuración conductor-conductor cubre todas las configuraciones simétricas con formas de electrodo similares en las dos fases.

Las distancias en el aire, en servicio, se determinan de acuerdo con las siguientes reglas y son válidos para las altitudes que se han considerado en la determinación de las tensiones soportadas requeridas:

Gama I:

Las distancias en el aire entre fase y tierra y entre fases se determinan por medio de la tabla 1.4 a partir de la tensión soportada a impulsos tipo rayo asignada. La tensión soportada de corta duración a frecuencia industrial normalizada puede despreciarse cuando la relación entre la tensión soportada normalizada a impulsos tipo rayo y la tensión normalizada de corta duración a frecuencia industrial es mayor que 1.7

Gama II

La distancia en el aire entre fase y tierra es la mayor de las dos distancias en el aire determinadas, para la configuración punta-estructura, a partir de la tabla 1.4 en función de la tensión soportada a impulsos tipo rayo normalizada y a partir de la tabla 1.5 en función de la tensión soportada a impulsos tipo maniobra normalizada respectivamente.

La distancia en el aire entre fases es la mayor de las dos distancias en el aire determinadas, para la configuración punta-estructura, a partir de la tabla 1.4 en función a la tensión soportada a impulsos tipo rayo

normalizada y a partir de la tabla 1.6 en función de la tensión soportada a impulsos tipo maniobra normalizada respectivamente.

En la Gama II, Las distancias en el aire necesarias para que el aislamiento longitudinal pueda soportar la tensión soportada a impulsos tipo rayo normalizada puede obtenerse añadiendo a la tensión soportada a impulso tipo rayo normalizada, 0.7 veces el valor de cresta de la tensión máxima de servicio entre fase y tierra y dividiendo la suma por 500kV/m.

Las distancias en el aire necesarias en la gama II para que el aislamiento longitudinal pueda soportar la tensión soportada a impulsos tipo maniobra normalizada son menores que los valores correspondientes entre fases. Estas distancias en el aire existen usualmente solo en aparatos sometidos a ensayos de tipo y por lo tanto la IEC no da valores mínimos.

Tensión mas elevada para el material Um kV (Valor eficaz)	Tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia industrial kV (valor eficaz)	Tensión soportada normalizada a los impulsos tipo rayo kV (valor de cresta)
3.6	10	20 40
7.2	20	40 60
12	28	60 75 95
17.5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52	95	250
72.5	140	325
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050

Nota: Si los valores entre paréntesis son insuficientes para probar que las tensiones soportadas especificadas entre fases se cumplen, se requieren ensayos complementarios de tensiones soportadas entre fases.

**Tabla 1.2 Niveles de Aislamiento normalizados para la gama I
(1kV < Um ≤ 245kV)**

(Los datos se han tomado de la Norma IEC 60071-1, Tabla 2)

Tensión mas elevada para el material Um kV (valor eficaz)	Tensión soportada normalizada a los impulsos tipo maniobra			Tensión soportada normalizada a los impulsos tipo rayo kV (valor de cresta)
	Aislamiento Longitudinal (nota 1) kV (valor cresta)	Fase – tierra kV (valor cresta)	Entre fases (relación al valor de cresta fase – tierra)	
300	750	750	1.5	850 950
	750	850	1.5	950 1050
362	850	850	1.5	950 1050
	850	950	1.5	1050 1175
420	850	850	1.6	1050 1175
	950	950	1.5	1175 1300
	950	1050	1.5	1300 1425
525	950	950	1.7	1175 1300
	950	1050	1.6	1300 1425
	950	1175	1.5	1425 1550
765	1175	1300	1.7	1675 1800
	1175	1425	1.7	1800 1950
	1175	1550	1.6	1950 2100

Nota 1: Valor de la componente de impulso del ensayo combinado aplicable.
Nota 2: La introducción de Um=550kV (en lugar de 525kV), de 800kV (en lugar de 765kV), de 1200kV, de un valor ente 765kV y 1200kV y las tensiones soportadas normalizadas asociadas está en estudio.

Tabla 1.3 Niveles de aislamiento normalizados para la gama II (Um > 245kV)

(Los datos se han tomado de la norma IEC 60071-1, Tabla 3)

Tensión soportada a impulso tipo rayo normalizada kV	Distancia en el aire mínima mm	
	Punta - estructura	Conductor – estructura
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
250	480	
325	630	
450	900	
550	1100	
650	1300	
750	1500	
850	1700	1600
950	1900	1700
1050	2100	1900
1175	2350	2200
1300	2600	2400
1425	2850	2600
1550	3100	2900
1675	3350	3100
1800	3600	3300
1950	3900	3600
2100	4200	3900

Nota: El impulso tipo rayo normalizado es aplicable a los aislamientos fase-fase y fase tierra. Para los aislamientos fase-tierra, la distancia en el aire mínima para las configuraciones conductor-estructura y punta-estructura es aplicable. Para los aislamientos fase-fase, la distancia en el aire mínima para la configuración punta-estructura es aplicable.

Tabla 1.4 Correlación entre las tensiones soportadas a impulso tipo rayo normalizadas y las distancias en el aire mínimas
(Los datos se han tomado de la norma IEC 60071-2, Tabla A.1)

Tensión soportada a impulso de maniobra normalizada (kV)	Distancia en el aire mínima fase – tierra (mm)	
	Conductor - estructura	Punta – estructura
750	1600	1900
850	1800	2400
950	2200	2900
1050	2600	3400
1175	3100	4100
1300	3600	4800
1425	4200	5600
1550	4900	6400

Tabla 1.5 Correlación entre las tensiones soportadas a impulso tipo maniobra y las distancias en el aire mínimas fase-tierra
(Datos tomados de la norma IEC 60071-2, Tabla A.2)

Tensión soportada a impulso de maniobra normalizada (kV)			Distancia en el aire mínima entre fases (mm)	
Fase – Tierra	Valor Fase-Fase Valor Fase-Tierra	Fase – Fase	Conductor-conductor paralelos	Punta-conductor
750	1.5	1125	2300	2600
850	1.5	1275	2600	3100
850	1.6	1360	2900	3400
950	1.5	1425	3100	3600
950	1.7	1615	3700	4300
1050	1.5	1575	3600	4200
1050	1.6	1680	3900	4600
1175	1.5	1763	4200	5000
1300	1.7	2210	6100	7400
1425	1.7	2423	7200	9000
1550	1.6	2480	7600	9400

Tabla 1.6 Correlación entre las tensiones soportadas a impulso tipo maniobra y las distancias en el aire mínimas entre fases
(Datos tomados de la norma IEC 60071-2, Tabla A.3)

Aislamiento	Tensión soportada a frecuencia industrial de corta duración (1)	Tensión soportada a impulso tipo rayo
Aislamiento externo: - distancias en el aire y aisladores limpios, en seco: - fase-tierra - fase-fase - aisladores limpios, bajo lluvia	$0.6 + Urw/8,500$ $0.6 + Urw/12,700$ 0.6	$1.05 + Urw/6,000$ $1.05 + Urw/9,000$ 1.3
Aislamiento interno: - GIS - Aislamiento sumergido en un líquido - Aislamiento sólido	0.7 0.5 0.5	1.25 1.10 1.00

NOTA: Urw es la tensión soportada a impulso tipo maniobra especificada, en kV.
(1) Los factores de conversión de ensayo incluyen un factor de $1/\sqrt{2}$ para convertir los valores de cresta en valores eficaces.

Tabla 1.7 Factores de conversión de ensayo para la gama I para convertir las tensiones soportadas a impulso maniobra especificadas en tensiones soportadas a impulso tipo rayo y a frecuencia industrial de corta duración
(Datos tomados de la norma IEC 60071-2, Tabla 2)

CAPITULO II

CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS PARA SELECCIÓN DE EQUIPOS

2.1 Selección del nivel del aislamiento en subestaciones

La IEC ha determinado un procedimiento para efectuar la coordinación de aislamiento, el cual consiste en elegir un conjunto de tensiones soportadas normalizadas que caracteriza el aislamiento del material aislante que se aplica en equipamientos eléctricos. Puede ser necesario, en algunos casos, la reconsideración de algunos datos de entrada y la repetición de una parte de este procedimiento; para optimizar los resultados.

La figura 2.1 esquematiza dicho procedimiento y a continuación describiremos las etapas de selección determinadas por la IEC:

Paso 1: Determinación de las sobretensiones representativas (U_{rp})

Las sobretensiones representativas son aquellas que se supone que producen el mismo efecto dieléctrico en el aislamiento que las sobretensiones de una categoría dada y de diversos orígenes que aparecen durante el funcionamiento. Están constituidas por tensiones que tienen la forma normalizada de la categoría en cuestión y pueden definirse por un valor, un conjunto de valores o una distribución estadística de los valores que caracterizan las condiciones de funcionamiento.

Esta misma definición se aplica también a la tensión permanente a frecuencia industrial que representa el efecto de la tensión de

funcionamiento sobre el aislamiento.

Las tensiones y sobretensiones que someten a esfuerzos a los aislamientos deben determinarse en amplitud, forma y duración, mediante un análisis de la red eléctrica que incluye la elección y la localización de los dispositivos de limitación de las sobretensiones.

Para cada categoría de sobretensión, el análisis debe permitir determinar una sobretensión representativa que tenga en cuenta las características del aislamiento.

La sobretensión representativa puede determinarse por:

un **valor máximo estimado**, o

un **conjunto de valores de cresta**, o

Una **distribución estadística** completa de valores de cresta, en cuyo caso podría ser necesario tomar en consideración las características complementarias a las formas de sobretensión.

En el caso de haber elegido caracterizar a la sobretensión representativa mediante un **valor máximo estimado**, la sobretensión representativa de las diferentes categorías debe ser:

Para la **tensión permanente a frecuencia industrial**: Una tensión a frecuencia industrial de valor eficaz igual a la tensión máxima de la red y de duración que corresponda a la vida del material;

Para la **sobretensión temporal**: Una tensión normalizada de corta duración a frecuencia industrial de valor eficaz igual al valor máximo estimado de las sobretensiones temporales, dividido por $\sqrt{2}$;

Para la **sobretensión de frente lento**: Una tensión normalizada de

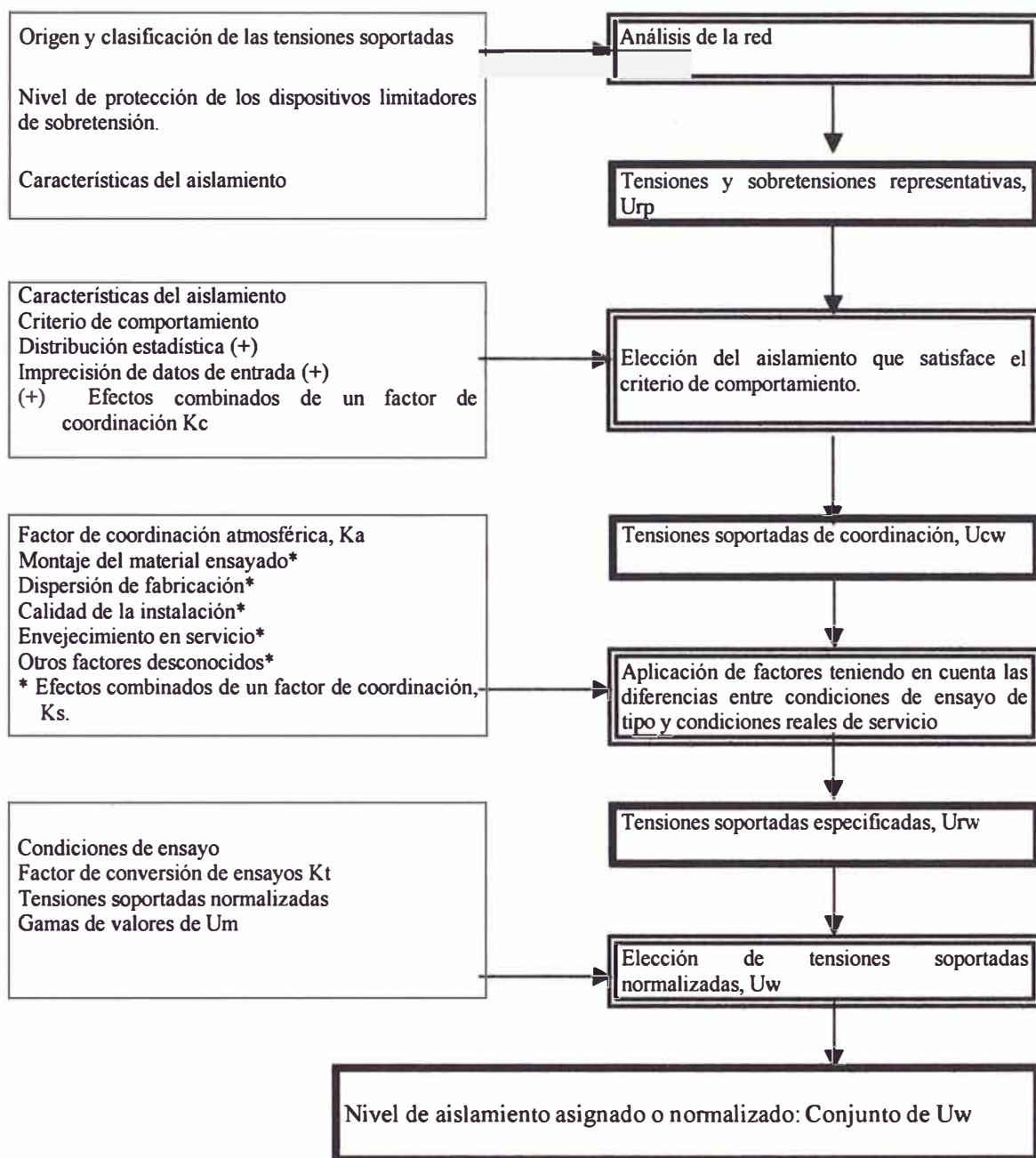
impulso de maniobra de valor de cresta igual al valor de cresta máximo estimado de sobretensiones de frente lento;

Para la **sobretensión de frente rápido**: Una tensión normalizada de impulso tipo rayo de valor de cresta igual al valor de cresta máximo estimado de las sobretensiones de frente rápido;

Para la **sobretensión de frente muy rápido**: Para esta categoría de sobretensión, las características de sobretensión son especificadas por los comités encargados de cada material;

Para la **sobretensión entre fases de frente lento**: Una tensión normalizada de impulso tipo maniobra combinada de valor de cresta igual al valor de cresta máximo previsto de las sobretensiones entre fases de frente lento. En este caso es útil tener en consideración la relación real α , en funcionamiento, del valor de cresta de la componente negativa U^- ; al valor de cresta $U^+ + U^-$ de la sobretensión máxima prevista entre fases: $\alpha = U^- / (U^+ + U^-)$.

Para la **sobretensión longitudinal de frente lento (o de frente rápido)**: Una tensión combinada compuesta de una tensión normalizada de impulso tipo maniobra (o de impulso tipo rayo) y de una tensión de frecuencia industrial, cada una de valor de cresta igual a los dos valores de cresta máximos previstos correspondientes y en el que el instante que corresponde a la cresta de la tensión de impulso coincide con el de la cresta de la tensión de frecuencia industrial de polaridad opuesta.

**Leyenda**

- Rectángulos que indican los datos a tener en cuenta
 Rectángulos que indican las acciones a efectuar
 Rectángulos que indican los resultados obtenidos

Figura 2.1 Organigrama de determinación de los niveles de aislamiento asignados y normalizados.

(Los datos se han tomado de la norma IEC 60071-1, figura 1)

Paso 2: Determinación de las tensiones soportadas de coordinación (U_{cw}):

Para cada categoría de tensión es el valor de la tensión soportada de la configuración del aislamiento, en las condiciones reales de funcionamiento, que satisface el criterio de comportamiento.

Este paso consiste en determinar los valores mínimos de las tensiones soportadas del aislamiento que satisfacen el criterio de comportamiento cuando el aislamiento se somete a las sobretensiones representativas en las condiciones de funcionamiento.

Las tensiones soportadas de coordinación del aislamiento tienen la forma de sobretensiones representativas de la categoría considerada y sus valores se obtienen multiplicando los valores de las sobretensiones representativas por un factor de coordinación. El valor del factor de coordinación depende del grado de precisión de la evaluación de las sobretensiones representativas y de una estimación empírica o estadística de la distribución de las sobretensiones y de las características del aislamiento.

Las tensiones soportadas de coordinación pueden determinarse como **tensiones soportadas previstas convencionales (método determinista)** o como **tensiones soportadas estadísticas (método estadístico)**. El método influye sobre el valor del factor de coordinación.

Se puede determinar directamente las tensiones soportadas de coordinación estadísticas, sin tener que pasar por las etapas intermedias de determinación de las sobretensiones representativas, mediante la simulación

de los fenómenos de sobretensión combinado con la evaluación simultánea del riesgo de defecto, utilizando las características adecuadas del aislamiento.

Método determinista

Se aplica normalmente cuando no se dispone de información que provengan de pruebas, de las posibles tasas de fallo que pueden esperarse del equipo en servicio.

Cuando el aislamiento se caracteriza por su tensión soportada convencional prevista ($P_w=100\%$), lo cual significa que no se tolera ni una sola descarga disruptiva, el valor de soportabilidad se selecciona igual a la tensión soportada de coordinación, obtenida multiplicando la sobretensión representativa (máximo previsto) por un factor de coordinación K_c , que tiene en cuenta los efectos de las incertidumbres en la hipótesis para estos dos valores (la tensión soportada prevista y la sobretensión representativa);

Cuando el aislamiento se caracteriza por la tensión soportada estadística ($P_w=90\%$), tal como se hace para el aislamiento externo, K_c debe tener en cuenta también la diferencia entre esta tensión y la tensión soportada prevista. En este caso, es aceptable la ocurrencia de una cantidad de descargas disruptivas, correspondiente a una probabilidad de resistencia especificada (explicada en la Norma IEC 60060-1: Ensayos de Alta Tensión).

Con este método no se hace referencia a las tasas de fallo posibles del equipo en servicio. Ejemplos típicos de aplicación son:

Coordinación de aislamientos internos contra sobretensiones de frente lento, cuando el aislamiento está protegido por pararrayos.

Protección con pararrayos contra sobretensiones causadas por rayo, en equipos conectados a líneas aéreas, para los que se dispone de experiencia en equipos similares.

Método estadístico

Se basa en la frecuencia de ocurrencia de sobretensiones debidas a un origen específico, en la distribución de probabilidad de sobretensión relativa a este origen y la probabilidad de descarga del aislamiento. El riesgo de fallo también puede ser determinado combinando sobretensión y cálculos de probabilidad de descarga simultáneamente, descarga por descarga, tomando en consideración la naturaleza estadística de las sobretensiones y descargas por procedimientos adecuados, por ejemplo empleando los métodos de Monte Carlo.

Por repetición de los cálculos para distintos tipos de aislamientos y para diferentes estados de la red, puede obtenerse la proporción de fallos totales (tasa de indisponibilidad) del sistema debido a los fallos del aislamiento.

Por tanto, la aplicación de la coordinación estadística del aislamiento aporta la posibilidad de estimar directamente la frecuencia de fallo como función de los factores seleccionados en el diseño del sistema. Incluso, la optimización del aislamiento sería posible, si los costes de los cortes pudieran relacionarse con los distintos tipos de fallos, lo cual es muy difícil en la práctica debido a la dificultad de evaluar los daños a las instalaciones

en los distintos estados operativos de la red y de evaluar las pérdidas económicas por energía dejada de suministrar. Como consecuencia de esto, usualmente es mejor sobredimensionar ligeramente el aislamiento del sistema, en lugar de optimizarlo. El diseño del aislamiento del sistema está basado en la comparación de riesgos, correspondiente a las diferentes alternativas de diseño.

Paso 3: Determinación de las tensiones soportadas especificadas (U_{rw})

Este paso consiste en convertir las tensiones soportadas de coordinación (U_{cw}) vistas en el paso anterior, en condiciones de ensayo normalizadas adecuadas. Esto se hace multiplicando las tensiones U_{cw} por factores que compensen las diferencias entre las condiciones reales de servicio del aislamiento y las de los ensayos de tensiones soportadas normalizadas.

Los factores que se aplican deben compensar:

Las diferencias en el montaje del material;

La dispersión en la calidad de fabricación;

La calidad de la instalación;

El envejecimiento del aislamiento durante la vida esperada;

Otras influencias desconocidas.

Debido a que estos factores no se pueden evaluar en forma independiente unas de otras, se adopta un factor sobre la base de la experiencia.

En el caso del aislamiento externo debe aplicarse un factor adicional para tener en cuenta las diferencias entre las condiciones ambientales

normalizadas de referencia y las esperadas en funcionamiento.

Las condiciones atmosféricas normalizadas de referencia son:

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

presión $b_0 = 101.3\text{kPa}$ (1013 mbar); (hasta 1000msnm)

humedad absoluta $h_{a0} = 11 \text{ g/m}^3$

Paso 4: Elección del nivel de aislamiento asignado.

Esta elección consiste en seleccionar el conjunto de tensiones soportadas normalizadas (U_w) del aislamiento más económico, suficientes para demostrar que se satisfacen todas las tensiones soportadas especificadas.

La tensión soportada permanente del aislamiento a frecuencia industrial, del material, que es la tensión mas elevada del material; se elige como la tensión más próxima al valor normalizado de U_m igual o superior a la tensión soportada **permanente a frecuencia industrial** especificada.

La normalización de los ensayos, así como la elección de las tensiones de ensayo adecuadas, para demostrar la conformidad a U_m de cada tipo de material, son efectuadas por los comités encargados de dichos materiales (por ejemplo, ensayos de polución o ensayos de la tensión de aparición de descargas parciales).

Las tensiones soportadas para demostrar que se satisfacen las tensiones soportadas especificadas **temporales, de frente lento y de frente rápido**, para el aislamiento **fase-tierra**, el aislamiento **entre fases** y el aislamiento **longitudinal**, pueden elegirse de **la misma forma** que la tensión soportada especificada, o de **forma diferente** teniendo en cuenta, para esta

última elección, las características intrínsecas del aislamiento.

El valor de la tensión soportada se elige de entre las tensiones soportadas normalizadas de las dos listas siguientes, como el valor más próximo igual o superior a:

La tensión soportada especificada, en el caso que se elija la **misma forma**;

La tensión soportada especificada multiplicada por el factor de conversión de ensayo adecuado, en los casos en que se elige una **forma diferente**.

Esto puede permitir la adopción de una sola tensión soportada normalizada para demostrar la conformidad a más de una tensión soportada especificada, dando así la posibilidad de reducir el número de tensiones soportadas normalizadas que conducen a definir un nivel de aislamiento asignado.

La elección de la tensión soportada normalizada para demostrar la conformidad con la tensión soportada especificada de **frente muy rápido** debe ser estudiado por los comités encargados de cada tipo de material.

Lista de tensiones soportadas normalizadas de corta duración a frecuencia industrial.

(valores expresados en kV, en valor eficaz)

10	20	28	38	50	70	95	140
185	230	275	325	360	395	460	510
570	630	680					

Lista de tensiones soportadas a los impulsos normalizados

(valores expresados en kV, en valores pico)

20	40	60	75	95	125	145	170
250	325	450	550	650	750	850	950
1 050	1 175	1 300	1 425	1 550	1 675	1 800	1 950
2 100	2 250	2 400					

Paso 5: Elección de los niveles de aislamiento normalizados

Las tensiones soportadas normalizadas se asocian a la tensión mas elevada para el material, de acuerdo con la tabla 1.2 para la gama I y la tabla 1.3 para la gama II presentadas en 1.2.4 del presente trabajo. Las asociaciones obtenidas relacionando las tensiones soportadas normalizadas de todas las columnas sin cruzar las líneas horizontales marcadas se definen estando normalizados los niveles de aislamiento.

Adicionalmente IEC ha normalizado las siguientes asociaciones para el aislamiento entre fases y el aislamiento longitudinal:

Para el aislamiento entre fases, gama I, las tensiones soportadas normalizadas de corta duración a frecuencia industrial y a los impulsos tipo rayo entre fases son iguales a las tensiones soportadas fase-tierra correspondientes (tabla 1.2). No obstante, los valores entre paréntesis pueden ser insuficientes para demostrar que las tensiones soportadas especificadas son satisfactorias y pueden ser necesarios ensayos complementarios de tensión soportada entre fases.

Para el aislamiento entre fases, gama II, la tensión soportada

normalizada a los impulsos tipo rayo entre fases es igual a la tensión soportada normalizada a los impulsos tipo rayo fase-tierra.

Para el aislamiento longitudinal, gama I, las tensiones soportadas normalizadas de corta duración a frecuencia industrial y a los impulsos tipo rayo son iguales a las tensiones soportadas fase-tierra correspondientes (tabla 1.2).

Para el aislamiento longitudinal, gama II, la componente normalizada de impulso tipo maniobra de la tensión soportada combinada se da en la tabla 1.3, mientras que el valor pico de la componente a frecuencia industrial de polaridad opuesta es igual a $U_m \times (\sqrt{2}/\sqrt{3})$, y la componente normalizada de impulso tipo rayo de la tensión soportada combinada es igual a la tensión soportada fase-tierra correspondiente (tabla 1.3), mientras que el valor pico de la componente a frecuencia industrial de polaridad opuesta es igual a $0.7 \times U_m \times (\sqrt{2}/\sqrt{3})$.

Para la mayor parte de las tensiones mas elevadas para el material, está prevista mas de una asociación preferente a fin de permitir aplicar diferentes criterios de comportamiento o diferentes valores de sobretensiones.

Para las asociaciones preferentes, solamente son suficientes dos tensiones soportadas normalizadas para definir el nivel de aislamiento normalizado del material:

Para los materiales de la **gama I**:

- a) tensión soportada normalizada a los impulsos tipo rayo, y
- b) Tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia

industrial.

para los materiales de la **gama II**:

- a) tensión soportada normalizada a **los impulsos tipo maniobra**, y
- b) Tensión soportada normalizada a **los impulsos tipo rayo**.

Si se justifica técnica y económicamente, pueden adoptarse otras asociaciones. Pero en cada caso deben seguirse las recomendaciones de los pasos 1 al 5 indicados anteriormente. Por lo tanto, el nivel de aislamiento asignado se designará como el conjunto resultante de las tensiones soportadas normalizadas. Los siguientes dos ejemplos particulares muestran la posibilidad de elegir una asociación de tensiones diferente a las asociaciones dadas en las tablas 1.2 y 1.3:

Para el aislamiento externo, para los valores de U_m superiores de la gama I, puede ser más económico especificar una tensión soportada normalizada a los impulsos de maniobra en lugar de una tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia industrial.

Para el aislamiento interno de la gama II, las sobretensiones temporales elevadas pueden requerir la especificación de una tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia industrial.

Contaminación

Cuando existe contaminación en las zonas donde se ubican los equipos, la respuesta del aislamiento externo a las tensiones a frecuencia industrial, cobra especial importancia y puede convertirse en la razón principal para diseñar el aislamiento externo. El contorno del aislamiento ocurre generalmente cuando la superficie esta contaminada y se humedece

debido a llovizna, nieve, rocío o niebla que no tienen un efecto de lavado significativo.

IEC ha especificado cuatro niveles cualitativos de contaminación, que se muestran y describen en la tabla B.1 mostrada en el anexo B del presente trabajo, la cual se aplica solo a aislamientos de vidrio o porcelana y no cubre algunas condiciones ambientales tales como nieve y hielo bajo fuerte contaminación, lluvia intensa, zonas áridas. Las líneas de fuga aquí especificadas se refieren mas al diseño del aislamiento que a su coordinación de aislamiento. Queda al criterio de los comités de producto, definir las exigencias de ensayo a fin de verificar la soportabilidad de los aisladores en condiciones de contaminación.

Nivel I: Ligeramente (16 mm/kV)

Nivel II: Medio (20 mm/kV)

Nivel III: Fuerte (25 mm/kV)

Nivel IV: Muy fuerte (31 mm/kV)

2.2 Factores de seguridad (K_s)

Existen varios factores y modos de funcionamiento que influyen sobre los aislamientos eléctricos, los cuales corresponden a las siguientes sollicitaciones de servicio:

solicitudes térmicas;

solicitudes eléctricas;

solicitudes ambientales;

solicitudes mecánicas;

Los pesos de los mencionados factores de influencia pueden variar para cada tipo de equipo y compensan:

Las diferencias en el montaje de los equipos;

La dispersión de la calidad del producto;

La calidad de la instalación;

El envejecimiento del aislamiento durante la vida útil prevista;

Otros factores desconocidos.

Mayor información se puede ver en la norma IEC 60505, Anexo B, donde se indican los principales factores de influencia y modos de funcionamiento asociados a los aislamientos eléctricos.

En caso que los comités de producto afectados no especifiquen otra cosa, IEC recomienda aplicar los siguientes factores de seguridad:

Para el aislamiento interno $K_s = 1.15$;

para el aislamiento externo $K_s = 1.05$

Para el caso de las instalaciones encapsuladas en gas SF₆ (GIS), se pueden aplicar factores de seguridad más elevados. En estos casos se pueden considerar ensayos "in situ".

2.3 Corrección atmosférica

IEC considera que las condiciones atmosféricas del aire no influyen en las propiedades del aislamiento interno.

Las reglas para la corrección atmosférica para las tensiones soportadas del aislamiento externo se encuentran especificadas en la norma IEC 60060-1. Estas reglas se basan en medidas a altitudes de hasta 2000m y su aplicación a altitudes mayores se debe hacer con precaución.

Adicionalmente se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

a) Para distancias en el aire y aislamientos limpios, debe aplicarse la corrección a las tensiones soportadas a impulso tipo rayo y tipo maniobra. Para aisladores que requieren un ensayo de contaminación, también es necesario una corrección de la tensión soportada de larga duración a frecuencia industrial.

b) Para la determinación del factor de corrección atmosférico aplicable, puede considerarse que los factores de corrección por temperatura y por la humedad ambiente, tienden a anularse mutuamente; por lo tanto, a los efectos de coordinación del aislamiento, solo es necesario tener en cuenta la presión atmosférica correspondiente a la altitud del lugar para los aislamientos en seco y bajo lluvia.

Estas consideraciones no son aplicables en aisladores cuya distancia entre campanas sea muy pequeña y que las campanas puedan ser unidas por la lluvia

Factor de corrección por altitud (K_a)

Se basa en la variación de la presión atmosférica en función a la altitud (norma IEC 60721-2-3) y se puede calcular como:

$$K_a = e^{m \left(\frac{H}{8150} \right)} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

H: Altitud sobre el nivel del mar (metros)

m=1 para las tensiones soportadas de coordinación a impulsos tipo rayo;

m= valor obtenido de la figura 2.2 para las tensiones soportadas de coordinación a impulsos tipo maniobra;

m=1 para tensiones soportadas a frecuencia industrial de corta duración de

las distancias en el aire y de aisladores limpios.

El valor de m depende de varios parámetros. Los valores dados en la figura 2.2. son conservadores.

Para aisladores contaminados, el valor de m está en estudio. En este caso los valores de m pueden variar entre 0.5 para los aisladores normales y 0.8 para los coordinados, para los ensayos de larga duración y si es necesario para los de tensión soportada a frecuencia industrial de corta duración.

2.4 Consideraciones especiales para subestaciones

Tomando como referencia el diagrama unifilar de la figura 3.1, describimos las solicitaciones de tensión que pueden producirse en las subestaciones:

- a) **Tensión de servicio:** Se suponen igual a la tensión más elevada de la red. Todos los elementos de la subestación están sometidas a las mismas solicitaciones.
- b) **Sobretensión temporal:** Los defectos a tierra del lado de la carga generan una solicitación idéntica sobre todos los elementos de una fase de la subestación.

En una subestación pueden aparecer sobretensiones por pérdida de carga debido principalmente a un defecto en otra subestación distante (subestación 2 del diagrama unifilar). Según el sistema de protección, todos los elementos o los que están situados entre el interruptor automático cb_2 y el transformador, estarán sometidos a solicitaciones. En caso de defecto en la propia subestación 1, solo los elementos situados entre el interruptor cb_1 y

Corrección de altitud: El factor de corrección K_a se basa en la variación de la presión atmosférica en función de la altitud, tal como se indica en la Norma CEI 60721-2-3.

El factor de corrección puede calcularse con la fórmula: $K_a = e^{m(H/8150)}$

H = Altitud sobre el nivel del mar, en metros

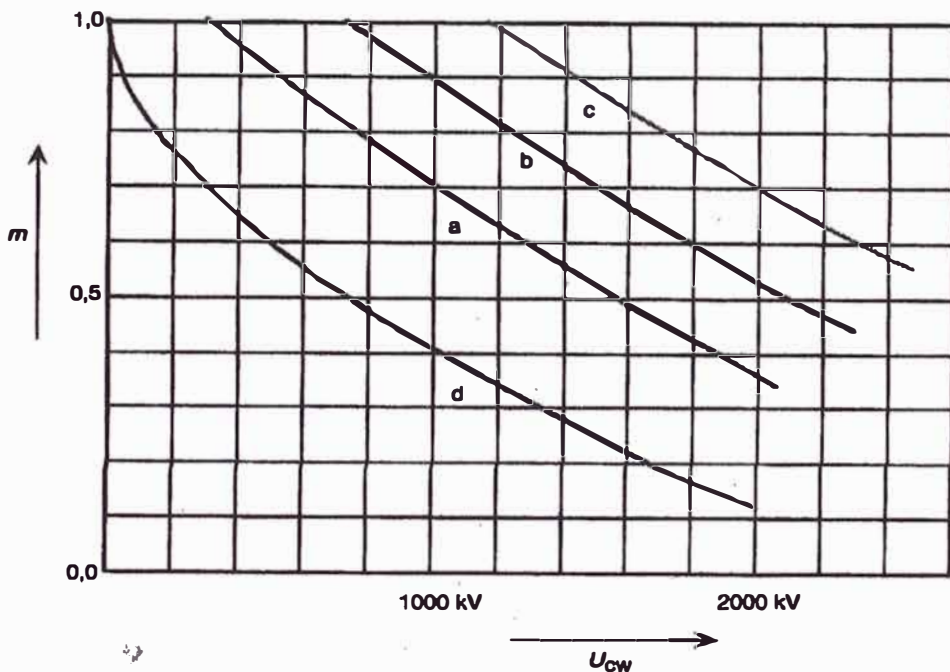
$m = 1.0$ para las tensiones soportadas de coordinación a impulso tipo rayo;

$m =$ de acuerdo con las curvas a, b, c ó d para las tensiones soportadas de coordinación a impulsos tipo maniobra;

$m = 1.0$ para tensiones soportadas a frecuencia industrial de corta duración de las distancias en el aire y de aisladores limpios.

NOTA: El exponente m depende de varios parámetros incluyendo la distancia mínima de descarga que generalmente se desconoce en la fase de especificación. Sin embargo, a los efectos de coordinación de aislamiento, para la corrección de las tensiones soportadas de coordinación a impulso tipo maniobra pueden utilizarse las estimaciones conservadoras de m dadas en ésta figura. La determinación del exponente m se basa en la Norma CEI 60060-1 en la que los valores dados se han obtenido a partir de medidas efectuadas a altitudes de hasta 2000 m. Además se han utilizado valores conservadores del factor de intervalo para todos los tipos de aislamiento.

Para aisladores contaminados, el valor del exponente m está en estudio. Para los ensayos de larga duración y, si es necesario, para los de tensión soportada a frecuencia industrial de corta duración de aisladores contaminados, m puede variar desde 0,5 para los aisladores normales hasta 0,8 para los antiniebla.



a) aislamiento fase – tierra

b) aislamiento longitudinal

c) aislamiento entre fases

d) intervalo en el aire punta – plano (intervalo de referencia)

El valor de las tensiones constituidas por dos componentes es la suma de los valores de las componentes.

(Los datos se han tomado de la norma IEC 60071-2, figura 9)

Figura 2.2 Relación entre el exponente “m” y la tensión soportada de coordinación a impulso tipo maniobra

el transformador estarán sometidos a sobretensiones por pérdida de la carga.

Si el transformador está conectado a un generador, pueden aparecer sobretensiones longitudinales en el interruptor cb1 durante la sincronización. Cuando la barra B2 está conectada a redes distintas, el aislamiento longitudinal de los seccionadores de la barra puede quedar sometido a la tensión de servicio en la barra B2 y a la sobretensión por pérdida de carga en la barra B1, ambas en oposición de fase.

c) Sobretensiones de frente lento: las sobretensiones debidas a la conexión y reenganche de líneas solo pueden presentar las amplitudes elevadas del extremo receptor entre la entrada de la línea y el interruptor cb2. El resto de la subestación está sometido a las sobretensiones del extremo emisor.

En todos los elementos de la subestación pueden presentarse sobretensiones debidas a los defectos y a su eliminación.

d) Sobretensiones de frente rápido: todos los elementos de la subestación pueden ser sometidos a sobretensiones de rayo, con amplitudes distintas dependientes de la distancia al pararrayos.

Solo pueden aparecer sobretensiones de maniobra de frente rápido en las partes conectadas de la subestación (por ejemplo las barras B2) o en uno de los interruptores cuando son conectados por uno de los seccionadores de barra.

CAPITULO III

EJEMPLO DE APLICACIÓN NUMÉRICA PARA UNA RED DE LA GAMA I (230kV)

3.1 Ejemplos de aplicación

El procedimiento de cálculo se aplicará a la Subestación N° 1 de la red eléctrica mostrada en el diagrama unifilar de la figura 3.1, tomada de la norma IEC 60071-1, suponiendo que es una subestación nueva.

La tabla 1.2, mostrada en 1.2.4, especifica las diferentes posibilidades de combinaciones de tensiones normalizadas soportadas de corta duración a frecuencia industrial y a impulso tipo rayo. Los procedimientos de cálculo están orientados a escoger un conjunto de estas tensiones soportadas normalizadas para obtener una adecuada coordinación del aislamiento en la subestación N° 1 aplicable entre fases y fase-tierra.

En la primera parte del ejemplo se evaluarán las tensiones soportadas especificadas para las sobretensiones de frente lento (maniobra) y luego se las convertirá en tensiones equivalentes soportadas a frecuencia industrial y a impulso de frente rápido (rayo).

En la segunda parte de este ejemplo se considerará la influencia de maniobra de condensadores en la subestación N° 2. En la primera parte no se tomará en cuenta esta influencia; de esta manera se podrá observar la fuerte influencia que pueden tener las maniobras de condensadores o los

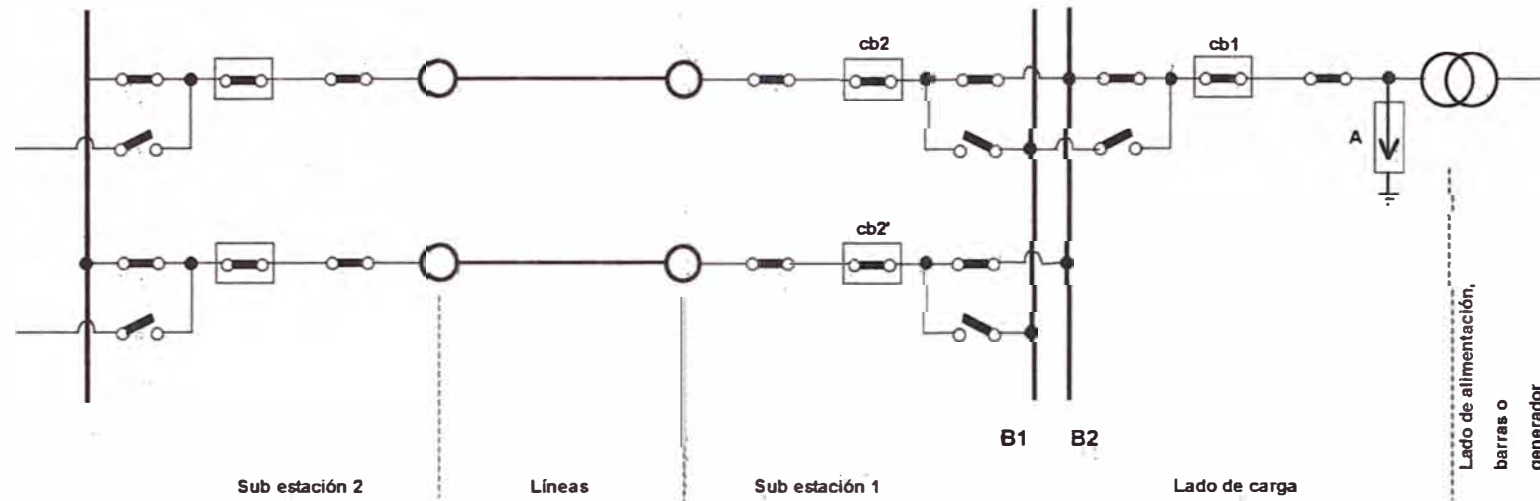


Figura 3.1 Diagrama unifilar 230kV utilizada para la localización de sobretensiones en la subestación 1

esfuerzos de cualquier otra procedencia.

En una tercera parte del ejemplo se mostrarán los organigramas que resumen los resultados intermedios y finales del proceso de cálculo.

Condiciones iniciales consideradas:

Tensión mas elevada de la red:	$U_s = 245\text{kV}$;
Nivel de contaminación:	Fuerte (ver Anexo B, tabla B.1)
Altitud de servicio:	$H = 1000\text{m}$

3.1.1 Primera parte: ausencia de condiciones particulares (sin maniobras de condensadores).

a) Paso 1: Determinación de las sobretensiones representativas (valores de U_{rp})

a.1) Tensión a frecuencia industrial.

Dado que la tensión de servicio es 230kV, la tensión máxima de servicio continuo de la red es de $U_s=245\text{kV}$ rms fase-fase y está diseñada para operar con este límite. De aquí se deduce que la tensión mas elevada para el material de un equipo debe ser menor a 245kV (debe ser mayor o igual a U_s).

El nivel de contaminación III (fuerte) se ha definido considerando que la subestación estará ubicada en una zona donde existe una importante carretera con sal esparcida en época de invierno. Por esta causa, las condiciones exigidas para el aislamiento externo se obtendrán especificando un ensayo de contaminación artificial de nivel III. Por tanto, considerando que el material aislante será porcelana o vidrio, se recomienda que la línea de fuga sea mayor o igual a 25mm/kV.

a.2) Sobretensiones temporales

Sobretensiones por fallos a tierra: Producen sobretensiones fase-tierra. Teniendo en cuenta las características de puesta a tierra del neutro, se ha establecido que el factor de falta a tierra es $k=1.5$ (en general, este valor es inusual para redes de 230kV). (Normalmente este valor no es mayor de 1.3), por lo tanto la sobretensión representativa fase-tierra correspondiente es $U_{rp} = 1.5 \times 245 \text{ kV} / \sqrt{3} = 212 \text{ kV}$

Sobretensiones por pérdida de carga: Producen sobretensiones fase-fase y fase-tierra. El análisis y estudio de la red han mostrado que la sobrevelocidad del generador y la regulación se combinan para producir sobretensiones de hasta 1.4 p.u. en la subestación N° 1 (este también es un valor bastante alto, pero para efectos del presente Informe, es adecuado), por lo tanto las sobretensiones representativas fase-tierra y fase-fase son $198 \text{ kV} = 1.4 \times 245 \text{ kV} / \sqrt{3}$ y $343 \text{ kV} = 1.4 \times 245 \text{ kV}$ respectivamente.

En este caso no se puede producir una sobretensión por combinación de faltas a tierra y pérdidas simultánea de carga debido a que después de la pérdida de carga, cambia la configuración de la red al abrirse los interruptores automáticos de la subestación 1, desconectando la línea y por lo tanto el factor de defecto a tierra de la subestación 1 es inferior a 1 (con el transformador elevador del alternador triángulo/estrella con neutro a tierra).

De los cálculos anteriores, los valores mas elevados de las sobretensiones representativas, considerando todas las causas posibles son:

fase-tierra: $U_{rp} = 212 \text{ kV}$

fase-fase: $U_{rp}=343$ kV

a.3) Sobretensiones de frente lento

Sobretensiones por rayos alejados de la subestación 1: En esta red, los estudios han demostrado que estas sobretensiones no constituyen un problema.

Sobretensiones por defectos a tierra: No se consideran por no ser un sistema aterrado mediante bobina de compensación.

Para determinar las sobretensiones representativas, puede ser necesario, en caso de conexión o recierre, diferenciar entre el equipo ubicado en la entrada de la línea y el equipo que puede estar ya sea en las condiciones de la extremidad alejada de línea abierta (subestación 1), ya sea en la extremidad cercana del lado de alimentación (subestación 2). Según el caso, estos equipos estarán sometidos a esfuerzos diferentes.

Sobretensiones particulares que afectan al equipo situado en la línea de entrada (subestación 1): Usando el método de valor pico por fase (ver Anexo D de la norma IEC 60071-2) se determina que el reenganche de líneas en la subestación 2 se puede traducir en sobretensiones al 2% (ue_2) en la subestación 1, en la extremidad abierta, del orden de $ue_2=3.0$ p.u. y $up_2=4.5$ p.u. Las sobretensiones representativas para el equipo de extremidad de línea, en ausencia de pararrayos, son los valores de truncamiento de las distribuciones de sobretensiones. Como se indica en el anexo D referido,

$$u_{et} = 1.25ue_2 - 0.25 \quad \rightarrow \quad u_{et} = 700 \text{ kV};$$

$$u_{pt} = 1.25up_2 - 0.43 \quad \rightarrow \quad u_{pt} = 1039 \text{ kV}.$$

Sobretensiones que afectan a todos los equipos (subestación 1): Todos los equipos ubicados en la subestación 1 están sometidos a las sobretensiones de frente lento debidos a la conexión y al recierre local. No obstante, las sobretensiones en la subestación donde tiene lugar la maniobra son muy inferiores a la de la subestación alejada. Para la subestación 1, los estudios de la red dan $ue_2=1.9p.u.$ y $up_2=2.9p.u.$ Los valores correspondientes obtenidos son $U_{et}=425\text{ kV}$ y $U_{pt}=639\text{ kV}$.

Pararrayos en entrada de línea (en la subestación 1): Para controlar las sobretensiones severas que pueden venir del recierre en la otra extremidad, se instalan pararrayos de óxido metálico (idénticos a los previstos para la protección de los transformadores) en la entrada de la línea. Las características de protección de los pararrayos son aquellas que pueden soportar el peor ciclo alcanzado de sobretensión temporal en amplitud y duración, como sigue:

nivel de protección a impulso tipo maniobra: $U_{ps}=410\text{ kV}$;

nivel de protección a impulso tipo rayo: $U_{pl}=500\text{ kV}$.

Con el uso del pararrayos las sobretensiones representativas de frente lento pueden ser directamente dadas por U_{ps} (fase-tierra) o $2U_{ps}$ (fase-fase) si estos valores de protección son inferiores a las correspondientes solicitaciones máximas de sobretensión de frente lento (valores U_{et} y U_{pt}). Este es el caso para cualquier solicitud, excepto para el equipo instalado entre fases en entrada de línea, de modo que las sobretensiones representativas de frente lento son las siguientes:

Fase-Tierra: $U_{rp}=410\text{ kV}$ para cualquier equipo;

Fase-Fase:

Urp=820kV para el equipo en entrada de línea;

Urp=639kV para cualquier otro equipo.

a.4) Sobretensiones de frente rápido

En este ejemplo solo se consideran las sobretensiones de frente rápido debidas al rayo. Usaremos una aproximación estadística simplificada que conducirá directamente a la tensión soportada de coordinación, que no necesita evaluar una tensión representativa. Esta aproximación se tratará en la segunda etapa del presente ejemplo.

b) Paso 2: Determinación de las tensiones soportadas de coordinación (valores de Ucw)

De acuerdo con el capítulo 3 de la norma IEC 60071-2, deben aplicarse diferentes factores a los valores de sobretensiones representativos determinados anteriormente. Estos factores, que pueden variar en función de la forma de las sobretensiones, integran el criterio de cumplimiento elegido (la tasa de defecto aceptable desde el punto de vista económico u operacional) y las imprecisiones de los datos de entrada (por ejemplo las características de los pararrayos).

b.1) Sobretensiones temporales: para esta clase de sobretensiones, la tensión soportada de coordinación es igual a la sobretensión temporal representativa, es decir el factor de coordinación es igual a 1, como sigue:

Fase-Tierra: $U_{cw}=U_{rp}=212\text{kV}$

Fase-Fase: $U_{cw}=U_{rp}=343\text{kV}$

b.2) Sobretensiones de frente lento: Usaremos la aproximación determinista.

Con esta aproximación es necesario considerar que el límite de sobretensiones mediante pararrayos deforma la distribución de sobretensiones, lo que crea una deformidad considerable en la distribución de sobretensiones en torno al nivel de protección del pararrayos. Así, pequeñas imprecisiones en cuanto a las características de protección del pararrayos o a la rigidez del equipo pueden traducirse en un incremento anormalmente elevado de la tasa de fallos. Las figuras 3.2 Y 3.3, tomados de la norma IEC 60071-2, tienen en cuenta este efecto aplicando al nivel de protección del pararrayos un factor de coordinación determinista K_{cd} para obtener el valor de U_{cw} .

Para el equipo en entrada de línea:

$$\text{Fase-Tierra: } U_{ps}/U_{e2}=410/600=0.68 \rightarrow K_{cd}=1.10$$

$$\text{Fase-Fase: } 2U_{ps}/U_{p2}=820/900=0.91 \rightarrow K_{cd}=1.00$$

Para todos los otros equipos:

$$\text{Fase-Tierra: } U_{ps}/U_{e2}=410/380=1.08 \rightarrow K_{cd}=1.03$$

$$\text{Fase-Fase: } 2U_{ps}/U_{p2}=820/580=1.41 \rightarrow K_{cd}=1.00$$

Los valores de tensiones soportadas que resultan son $K_{cd} \times U_{rp}$:

Para el equipo en entrada de línea:

$$\text{Fase-Tierra: } U_{cw}=1.1 \times 410 \rightarrow U_{cw}=451 \text{ kV};$$

$$\text{Fase-Fase: } U_{cw}=1.0 \times 820 \rightarrow U_{cw}=820 \text{ kV}$$

Para todos los demás equipos:

$$\text{Fase-Tierra: } U_{cw}=1.03 \times 410 \rightarrow U_{cw}=422 \text{ kV};$$

$$\text{Fase-Fase: } U_{cw}=1.0 \times 639 \rightarrow U_{cw}=639 \text{ kV}$$

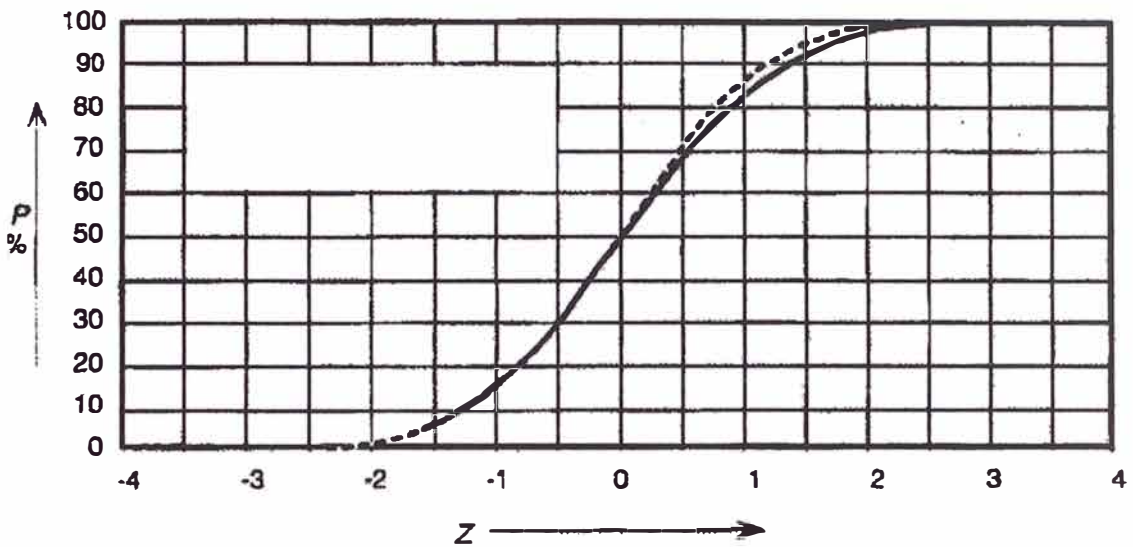
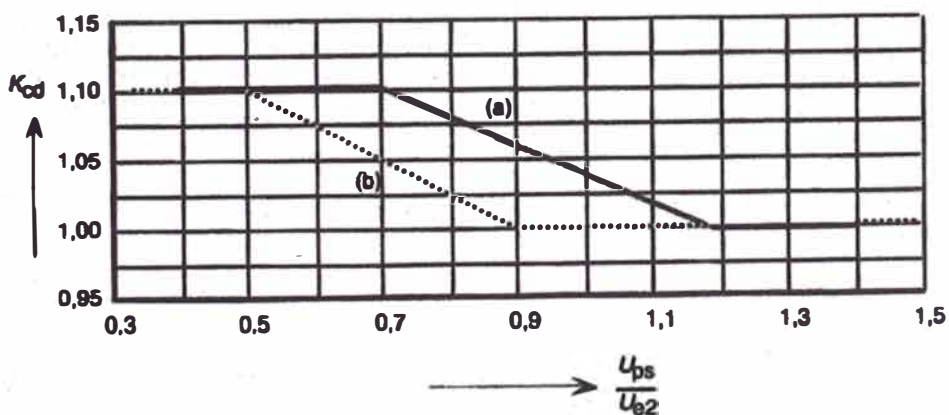


Figura 3.2 Probabilidad de descarga disruptiva del aislamiento autorregenerable, representado en escala lineal

Para equipo protegido por pararrayos, la sobretensión máxima prevista es igual al nivel de protección a impulso tipo maniobra U_{ps} del pararrayos. Sin embargo, en tales casos, puede tener lugar una asimetría severa de la distribución estadística de las sobretensiones. Esta asimetría es tanto más pronunciada cuanto menor es el nivel de protección comparado con las amplitudes de las sobretensiones de frente lento previstas, de modo que pequeñas variaciones de la soportabilidad del aislamiento (o en el valor del nivel de protección del pararrayos) pueden tener un gran impacto en el riesgo de fallo. Para cubrir este efecto, se propone evaluar el factor de coordinación determinista K_{cd} dependiendo de la relación entre el nivel de protección a impulso tipo maniobra del pararrayos U_{ps} y el valor 2% de las sobretensiones previstas fase – tierra U_{62} ; dado en la siguiente figura, donde:

- factor de coordinación aplicado al nivel de protección del pararrayos, para obtener la tensión soportada de coordinación fase-tierra (también aplicable al aislamiento longitudinal)
- factor de coordinación aplicado al doble del nivel de protección del pararrayos, para obtener la tensión soportada de coordinación fase-fase.



- - - - - Función de Weibul
 _____ Función de Gauss

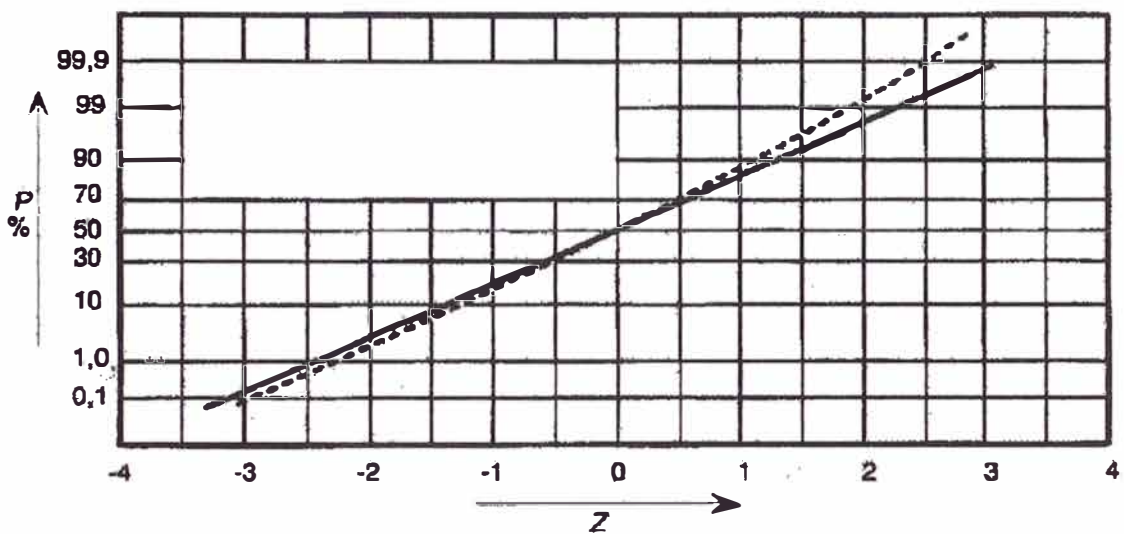


Figura 3.3 Probabilidad de descarga disruptiva del aislamiento autorregenerable, representado en escala gausseana.

b.3) Sobretensiones de frente rápido: Usaremos una aproximación estadística simplificada (ver anexo F de la norma IEC 60071-2). Aquí el factor a aplicar a U_{rp} se basa en la experiencia con una construcción particular de línea y en el efecto calculado de la distancia entre el pararrayos y el equipo a proteger.

Se determina la longitud L_a de la línea aérea con una tasa de defecto

igual a la aceptable R_a . Después, teniendo en cuenta la distancia de separación L del pararrayos, del número de líneas n que llega a la subestación y el vano L_{sp} , se calcula el nivel de protección efectivo del pararrayos, que es el valor buscado U_{cw} .

Para este ejemplo escogemos varios pararrayos con un nivel de protección a impulso tipo rayo de 500kV y los situamos en diferentes lugares (entrada de la línea y cerca de los transformadores). La distancia máxima de separación para el aislamiento interno es de 30 m, para el aislamiento externo es de 60m (Ver Anexo N° C relativo al cálculo de la distancia máxima de protección de los pararrayos). Se conectan a la estación dos líneas sobre torres de acero, caracterizadas por $A=4500$ (ver tabla F.2 de la IEC 60071-2) y con un vano de 300m. Las prestaciones obtenidas en relación al rayo de estas líneas es de un defecto por 100km y por año. Para el equipo a instalar en la subestación 1, se define una tasa de defecto aceptable de 1 en 400 años.

Usando la ecuación 3.1 (ecuación F.18 del anexo F de la IEC 60071-2), hallamos primero un valor de $L_a=0.25$ km. Con este valor y de los otros parámetros entramos en la ecuación 3.2 (ecuación F.19 de la IEC 60071-2) y obtenemos la tensión soportada de coordinación:

$$L_a = R_a/R_{km} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} * \frac{L}{L_{sp} + L_a} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

- para el aislamiento interno:

$$U_{cw} = 500 + [(4500/2) \times 30 / (300 + 250)] \rightarrow U_{cw} = 622 \text{ kV};$$

- para el aislamiento externo:

$$U_{cw}=500+[(4500/2)\times 60/(300+250)] \rightarrow U_{cw}=745 \text{ kV.}$$

Las sobretensiones de frente rápido afectan a los aislamientos fase-fase y fase-tierra de la misma forma.

c) Paso 3: Determinación de las tensiones soportadas especificadas (valores de U_{rw})

Las tensiones soportadas especificadas se obtienen aplicando a las tensiones soportadas de coordinación dos factores de corrección: el factor k_a que tiene en cuenta la altura de instalación y el factor de seguridad k_s .

c.1) Factor de seguridad: Los valores recomendados, por IEC, de los factores de seguridad K_s son:

para el aislamiento interno: $K_s=1.15$

para el aislamiento externo: $K_s=1.05$

c.2) Factor de corrección atmosférica: El factor de corrección de altura K_a se aplica solo al aislamiento externo y su valor depende de la forma de la sobretensión, expresada en el valor de m de la ecuación de K_a .

Para la tensión soportada a frecuencia industrial, son necesarios ensayos de corta duración sobre los aisladores contaminados (aisladores normales) y podemos asumir $m=0.5$, según IEC.

Para la tensión soportada a impulso tipo maniobra el valor de m es una función de la tensión soportada de coordinación, de acuerdo con la figura 2.2 mostrada en 2.3 del presente trabajo, por lo tanto obtenemos los valores:

Fase-Tierra: $U_{cw}=451 \text{ kV} \rightarrow m=0.94$

Fase-Fase: $U_{cw}=820 \text{ kV} \rightarrow m=1.00$

para la tensión soportada a impulso tipo rayo $\rightarrow m=1.00$

Los valores correspondientes de K_a , para una altitud de $H=1000\text{m}$, son:

para la tensión soportada a frecuencia industrial: $K_a=1.063$

Fase-Fase y Fase-Tierra.

para la tensión soportada a impulso tipo maniobra:

Fase-Tierra: $K_a=1.122$

Fase-Fase: $K_a=1.130$

para la tensión soportada a impulso tipo rayo: $K_a=1.130$

Fase-Fase y Fase-Tierra.

c.3) Tensiones soportadas especificadas: Los valores de las tensiones soportadas especificadas se deducen de $U_{rw}=U_{cw} \times K_s \times K_a$ con los valores de U_{cw} hallados en el paso 2 y los valores de K_s y K_a hallados en el paso 3.

Para las sobretensiones temporales:

aislamiento externo:

Fase-Tierra $\rightarrow U_{rw}=212 \times 1.05 \times 1.063 \rightarrow U_{rw}=237\text{kV}$

Fase-Fase $\rightarrow U_{rw}=343 \times 1.05 \times 1.063 \rightarrow U_{rw}=383\text{kV}$

Aislamiento interno:

Fase-Tierra $\rightarrow U_{rw}=212 \times 1.15 \rightarrow U_{rw}=243\text{kV}$

Fase-Fase $\rightarrow U_{rw}=343 \times 1.15 \rightarrow U_{rw}=395\text{kV}$

Para las sobretensiones de frente lento:

Para los equipos de entrada de línea:

aislamiento externo:

Fase-Tierra $\rightarrow U_{rw}=451 \times 1.05 \times 1.122 \rightarrow U_{rw}=531\text{kV}$

Fase-Fase $\rightarrow U_{rw}=820 \times 1.05 \times 1.13 \rightarrow U_{rw}=973\text{kV}$

Para los otros equipos:

aislamiento externo:

Fase-Tierra → $U_{rw}=422 \times 1.05 \times 1.122$ → $U_{rw}=497\text{kV}$

Fase-Fase → $U_{rw}=639 \times 1.05 \times 1.13$ → $U_{rw}=758\text{kV}$

Aislamiento interno:

Fase-Tierra → $U_{rw}=422 \times 1.15$ → $U_{rw}=485\text{kV}$

Fase-Fase → $U_{rw}=639 \times 1.15$ → $U_{rw}=735\text{kV}$

Para las sobretensiones de frente rápido:

aislamiento externo:

Fase-Tierra → $U_{rw}=745 \times 1.05 \times 1.13$ → $U_{rw}=884\text{kV}$

Fase-Fase → $U_{rw}=745 \times 1.05 \times 1.13$ → $U_{rw}=884\text{kV}$

Aislamiento interno:

Fase-Tierra → $U_{rw}=622 \times 1.15$ → $U_{rw}=715\text{kV}$

Fase-Fase → $U_{rw}=622 \times 1.15$ → $U_{rw}=715\text{kV}$

d) Paso 4: Conversión hacia las tensiones soportadas normalizadas para la gama I.

En la gama I, el nivel de aislamiento está normalmente descrito por un conjunto de dos valores como se indica en la Tabla 1.2, mostrada en 1.2.4 del presente trabajo: una tensión soportada de corta duración a frecuencia industrial y una tensión soportada a impulso tipo rayo. La tabla 1.7 da el factor de conversión de ensayo a aplicar a la tensión soportada especificada para las sobretensiones de frente lento, para obtener dicho conjunto de valores equivalentes.

d.1) Conversión hacia la tensión soportada de corta duración a frecuencia industrial (SDW):

Para los equipos de entrada de línea:

Aislamiento externo:

$$\text{Fase-Tierra: } \rightarrow \text{ SDW}=531 \times (0.6 + 531/8500) = 352 \text{ kV}$$

$$\text{Fase-Fase: } \rightarrow \text{ SDW}=973 \times (0.6 + 973/12700) = 658 \text{ kV}$$

Para los otros equipos:

Aislamiento externo:

$$\text{Fase-Tierra: } \rightarrow \text{ SDW}=497 \times (0.6 + 497/8500) = 327 \text{ kV}$$

$$\text{Fase-Fase: } \rightarrow \text{ SDW}=758 \times (0.6 + 758/12700) = 500 \text{ kV}$$

Aislamiento interno:

$$\text{Fase-Tierra: } \rightarrow \text{ SDW}=485 \times 0.5 = 243 \text{ kV}$$

$$\text{Fase-Fase: } \rightarrow \text{ SDW}=735 \times 0.5 = 367 \text{ kV}$$

d.2) Conversión hacia la tensión soportada a impulso tipo rayo (LIW):

Para los equipos de entrada de línea:

Aislamiento externo:

$$\text{Fase-Tierra: } \rightarrow \text{ LIW}=531 \times 1.30 = 690 \text{ kV}$$

$$\text{Fase-Fase: } \rightarrow \text{ LIW}=973 \times (1.05 + 973/9000) = 1127 \text{ kV}$$

Para los otros equipos:

Aislamiento externo:

$$\text{Fase-Tierra: } \rightarrow \text{ LIW}=497 \times 1.30 = 646 \text{ kV}$$

$$\text{Fase-Fase: } \rightarrow \text{ LIW}=758 \times (1.05 + 758/9000) = 860 \text{ kV}$$

Aislamiento interno:

Fase-Tierra: → LIW=485x1.10 =534kV
 Fase-Fase: → LIW=735x1.10 =808kV

e) Paso 5: Selección de valores de tensiones soportadas normalizadas.

La Tabla 3.1 resume los valores $U_{rw}(s)$ de las tensiones soportadas mínimas especificadas obtenidas por los estudios de red (resultados del paso 3). Estos valores son los valores mínimos en los ensayos para verificar la tensión soportada a frecuencia industrial de corta duración a impulso tipo maniobra y a impulso tipo rayo. En la gama I la tensión soportada especificada a impulso tipo maniobra esta normalmente cubierta, ya sea por el ensayo normalizado de corta duración de frecuencia industrial, o bien por el ensayo normalizado a impulso tipo rayo. En la tabla 3.1, los valores obtenidos después de esta conversión están indicados como $U_{rw}(c)$ (resultados del paso 4). En este ejemplo, los valores se consideran convertidos para un ensayo a impulso tipo rayo mientras que los valores convertidos para un ensayo de corta duración a frecuencia industrial no son considerados. Esto se debe a que los valores convertidos para un ensayo a impulso tipo rayo son los más críticos y al elegirlos, quedan también elegidos los valores de ensayo de corta duración a frecuencia industrial recomendados por la Tabla 1.2 y, por lo tanto, cubrimos todas las exigencias de niveles de aislamiento de la red.

Tabla 3.1 Resumen de las tensiones soportadas especificadas mínimas para este ejemplo, sin maniobra de condensadores en la subestación 2

Valores de Urw: - en kV rms para corta duración a frecuencia industrial - en kV cresta, para los impulsos tipo rayo y tipo maniobra.		Aislamiento externo				Aislamiento interno	
		Equipos en entrada de línea		Otros equipos			
		Urw(s)	Urw(c)	Urw(s)	Urw(c)	Urw(s)	Urw(c)
Corta duración a frecuencia industrial	Fase – tierra	237	352	237	327	243	243
	Fase – fase	383	658	383	500	395	367
Impulso tipo maniobra	Fase – tierra	531		497	---	485	---
	Fase – fase	973	---	758	---	735	---
Impulso tipo rayo	Fase – tierra	884	690	884	646	715	534
	Fase – fase	884	1127	884	860	715	808

Las tensiones normalizadas para ensayos de corta duración a frecuencia industrial y a impulso tipo rayo, deben elegirse teniendo en cuenta los resultados indicados en negrita en la tabla 3.1 (valor más alto de las tensiones especificadas mínimas Urw(s) o valor convertido Urw(c)) y los valores de las tensiones soportadas normalizadas propuestos por la IEC 60071-1 (ver paso 4 de 2.1). Normalmente, los valores de las tensiones especificadas se eligen de forma que corresponda a un nivel de aislamiento definido en la tabla 1.2 de la misma norma.

Los valores normalizados de 395kV (para corta duración a frecuencia industrial) y de 950kV (para el impulso tipo rayo) corresponden a un nivel de aislamiento de una red con $U_m=245\text{kV}$. Estos valores cubren todos los

aislamientos, fase-tierra y fase-fase, **excepto los valores de aislamiento externo fase-fase en entrada de línea**, para el cual es necesario un valor mínimo soportado de 1127kV. No obstante, dado que en este ejemplo no hay equipo trifásico instalado en entrada de línea, antes que prever un ensayo, es suficiente especificar una distancia de aislamiento fase-fase. De acuerdo con la Tabla 1.4, mostrada en 1.2.5, sería necesario una distancia de 2.35m entre fases para el equipo en entrada de línea, lo que corresponde a una tensión soportada a impulso tipo rayo normalizada de 1175kV (inmediato superior a 1127kV). Es necesario una distancia de aislamiento mínima fase-tierra y fase-fase de 1.9m para todos los otros aislamientos que no estén situados en entrada de línea. Estas distancias solo se basan en prescripciones de coordinación de aislamiento.

Es preciso destacar que para el aislamiento externo fase-tierra, el alto valor especificado para el ensayo de corta duración a frecuencia industrial (395kV) está bastante encima del valor mínimo requerido por las sobretensiones temporales especificadas (237kV). No obstante, el valor de 395kV corresponde al valor de aislamiento normalizado que tiene una tensión soportada especificada a impulso tipo rayo de 950kV. Haciendo una mayor precisión en los estudios se podría llegar a reducir en un nivel las condiciones relativas al aislamiento externo fase tierra (360kV/850kV).

Para el aislamiento interno, la elección del mismo nivel de aislamiento normalizado que para el aislamiento externo podría considerarse que conduce a un margen demasiado elevado en relación a la tensión soportada especificada a impulso tipo rayo (715kV fase-tierra y 808kV fase-fase). Son

posibles otras selecciones, considerando el aspecto económico (ver 4.9 de la norma IEC 60071-1): especificación de una tensión soportada a impulso tipo rayo de 850kV fase-fase y fase-tierra; o 750kV fase-tierra con un ensayo especial entre fases a 850kV. No obstante debe conservarse el ensayo de corta duración de frecuencia industrial con un valor mínimo de 395kV. Estas posibilidades, aunque son aceptables, conducirían en definitiva a un nivel de aislamiento especificado no correspondiente a un nivel de aislamiento normalizado, de acuerdo con la norma IEC 60071-1.

3.1.2 Segunda parte: Influencia, sobre la subestación 1, de maniobras de condensadores ubicados en la subestación 2.

En esta segunda parte del ejemplo se considera la posibilidad adicional de presencia de sobretensiones de frente lento, en la subestación 1, originadas por la maniobra de un banco de condensadores ubicado en la subestación 2 (subestación alejada). Todos los demás esfuerzos considerados en la primera parte del ejemplo, están presentes con su mismo nivel, considerando la misma disposición de pararrayos en la subestación 1.

Los estudios de red muestran que todos los equipos de la subestación 1 (incluidos los equipos de entrada de línea en posición cerrada en las condiciones de servicio normales) están sometidos a sobretensiones severas en el momento de la puesta en servicio de los bancos de condensadores en la subestación 2. Estas sobretensiones se propagan y, a causa del fenómeno de amplificación (resonancia a ciertas frecuencias), alcanzan las siguientes amplitudes máximas en la subestación 1:

Fase-Tierra: $U_{e2}=500\text{kV}$; $U_{et}=575\text{kV}$.

Fase-Fase: $U_{p2}=750\text{kV}$; $U_{pt}=852\text{kV}$

Para los equipos de la extremidad de la línea abierta, las sobretensiones de frente lento mas elevadas son aquellas que resultan del recierre de la línea descrita en la primera parte del ejemplo. Sin embargo, para todos los otros equipos, las sobretensiones de frente lento determinantes en el proceso de coordinación del aislamiento están relacionadas con la maniobra del banco de condensadores en la subestación 2. Son superiores a las sobretensiones debidas a la conexión o recierre de línea (descritas en la primera parte). De ahora en adelante, solo nos interesa este tipo de tensión (nuevas sobretensiones de frente lento) por lo que las conclusiones para los otros tipos de tensiones (sobretensiones temporales y de frente rápido) son las mismas que en la primera parte.

Los valores de sobretensiones de frente lento representativas están ahora controladas por las características de protección de los pararrayos ya que $U_{ps} < U_{et}$ y $2U_{ps} < U_{pt}$. Estos valores son:

Fase-Tierra: $U_{rp}=410\text{kV}$;

Fase-Fase: $U_{rp}=820\text{kV}$

Para obtener la tensión soportada de coordinación de frente lento, se aplica un factor de corrección estadístico K_{cd} a los valores de U_{rp} siguiendo el mismo procedimiento que en la primera parte del ejemplo:

Fase-tierra: $\rightarrow U_{ps}/U_{e2}=410/500=0.82$, $\rightarrow K_{cd}=1.10 \rightarrow U_{cw}=451\text{kV}$;

Fase-fase: $\rightarrow 2U_{ps}/U_{p2}=820/750=1.09$, $\rightarrow K_{cd}=1.00 \rightarrow U_{cw}=820\text{kV}$;

Los factores de seguridad K_s y el factor de corrección atmosférico K_a

conservan aproximadamente los mismos valores que en la primera parte. Los valores de las tensiones soportadas especificadas U_{rw} resultantes son los siguientes:

Aislamiento externo (iguales que para los equipos de entrada de línea de la primera parte):

$$\text{Fase-Tierra: } \rightarrow U_{rw}=451 \times 1.05 \times 1.122 \rightarrow U_{rw}=531 \text{ kV};$$

$$\text{Fase-Fase: } \rightarrow U_{rw}=820 \times 1.05 \times 1.13 \rightarrow U_{rw}=973 \text{ kV};$$

Aislamiento interno (mas altos que en la primera parte):

$$\text{Fase-Tierra: } \rightarrow U_{rw}=451 \times 1.15 \rightarrow U_{rw}=518 \text{ kV};$$

$$\text{Fase-Fase: } \rightarrow U_{rw}=820 \times 1.15 \rightarrow U_{rw}=943 \text{ kV};$$

Los valores de las tensiones soportadas especificadas para las sobretensiones de frente lento se convierten en tensión soportada de corta duración a frecuencia industrial y a impulso tipo rayo, de la misma manera que en la primera parte.

Esta conversión a la tensión soportada de corta duración a frecuencia industrial (SDW) da como resultados:

Aislamiento externo:

$$\text{Fase-Tierra: } \rightarrow \text{SDW}=531 \times (0.6 + 531/8500) = 352 \text{ kV}$$

$$\text{Fase-Fase: } \rightarrow \text{SDW}=973 \times (0.6 + 973/12700) = 658 \text{ kV}$$

Aislamiento interno:

$$\text{Fase-Tierra: } \rightarrow \text{SDW}=518 \times 0.5 = 259 \text{ kV}$$

$$\text{Fase-Fase: } \rightarrow \text{SDW}=943 \times 0.5 = 472 \text{ kV}$$

La conversión hacia la tensión soportada a impulso tipo rayo (LIW) da como resultados:

Aislamiento externo:

- Fase-Tierra: → $LIW=531 \times 1.30 = 690kV$

- Fase-Fase: → $LIW=973 \times (1.05 + 973/9000) = 1127kV$

Aislamiento interno:

- Fase-Tierra: → $LIW=518 \times 1.10 = 570kV$

- Fase-Fase: → $LIW=943 \times 1.10 = 1037kV$

Tabla 3.2 Resumen de las tensiones soportadas especificadas mínimas para este ejemplo, con maniobra de condensadores en la subestación 2

Valores de Urw: - en kV rms para corta duración a frecuencia industrial - en kV cresta, para los impulsos tipo rayo y tipo maniobra.		Aislamiento externo				Aislamiento interno	
		Equipos en entrada de línea		Otros equipos			
		Urw(s)	Urw(c)	Urw(s)	Urw(c)	Urw(s)	Urw(c)
Corta duración a frecuencia industrial	Fase – tierra	237	352	237	352	243	259
	Fase – fase	383	658	383	658	395	472
Impulso tipo maniobra	Fase – tierra	531	---	531	---	518	---
	Fase – fase	973	---	973	---	943	---
Impulso tipo rayo	Fase – tierra	884	690	884	690	715	570
	Fase – fase	884	1127	884	1127	715	1037

La tabla 3.2 mostrada da los valores de tensión soportada (o de ensayo) mínimos necesarios para tener en cuenta los diferentes esfuerzos de sobretensión relativos a esta segunda parte del ejemplo. Los valores

mínimos especificados para el ensayo de corta duración a frecuencia industrial y el ensayo de impulso tipo rayo están especificados en negrita.

Con respecto al aislamiento interno, la comparación de las tablas 3.1 y 3.2 muestran el impacto de las sobretensiones de frente lento debidas a las maniobras del banco de condensadores en la subestación 2, principalmente en las exigencias relativas a impulso tipo maniobra entre fases y en los valores mínimos de ensayo equivalentes que resultan.

Para el aislamiento, interno puede elegirse entonces, un nivel de aislamiento normalizado, aplicable al aislamiento fase-fase y al aislamiento fase-tierra, de 460kV/1050kV, correspondiente a $U_m=245kV$. Esto corresponde a un nivel de aislamiento normalizado más elevado que para la primera parte, que es originado por maniobras en el banco de condensadores en la subestación alejada N° 2. Podrían considerarse niveles de aislamiento fase-tierra menores (como se discute en la primera parte del ejemplo) pero, en cualquier caso, sería necesario un ensayo especial fase-fase a 1050kV.

Para el aislamiento externo, incluido el aislamiento longitudinal, se usa aquí el mismo nivel de aislamiento normalizado que el definido en la primera parte (395kV/950kV), no requiriéndose ningún ensayo fase-fase, siempre que se adopte una distancia de aislamiento entre fase mayor o igual a 2.35m (correspondiente a una tensión soportada a impulso tipo rayo normalizada de 1175kV) para todos los equipos externos y no únicamente para aquellos situados en la entrada de línea como en la primera parte del ejemplo.

3.1.3 Organigramas relativos a la primera y segunda parte del ejemplo

Los siguientes organigramas de las figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 muestran el procedimiento de coordinación del aislamiento y los resultados obtenidos en los pasos 1 al 5 mostrados en 3.1.1 y 3.1.2 del presente trabajo. Los organigramas incluyen los resultados obtenidos sin y con influencia, sobre la subestación 1, de maniobras de un banco de condensadores ubicado en la subestación 2.

Es necesario poner en relieve que este ejemplo no considera ningún medio de reducción de las sobretensiones de frente lento severas debidas a las maniobras de condensadores. Podrían considerarse algunas medidas para esto, tales como la utilización de resistencias de cierre en la subestación 2, a fin de obtener una reducción sustancial de las tensiones de frente lento y en consecuencia, una reducción de los niveles de tensión soportada a seleccionar. Esto implica estudios de redes complementarios considerando la presencia de medios de limitación, y, sobre la base de nuevos valores de tensiones representativas obtenidas, rehacer el procedimiento de coordinación del aislamiento. En el ejemplo particular aquí mostrado, el uso de estas resistencias de cierre conduciría a una reducción de algunas exigencias (indicadas en el paso 5 del organigrama) como la tensión soportada a impulso tipo rayo entre fases para el aislamiento y las distancias de aislamiento fase-fase para el aislamiento externo.

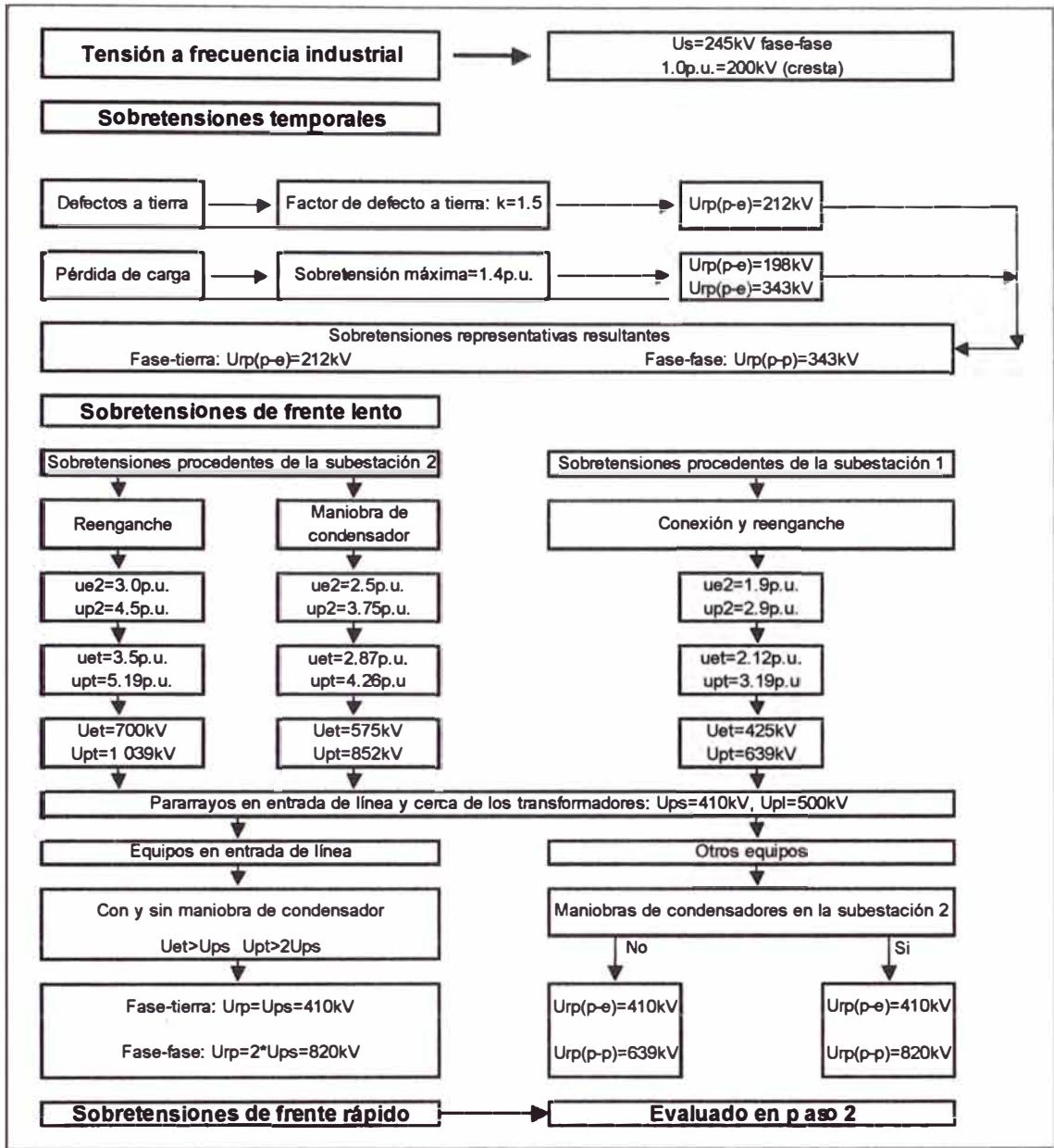


Figura 3.4 Organigrama del paso 1

Determinación de las sobretensiones representativas (Urp)

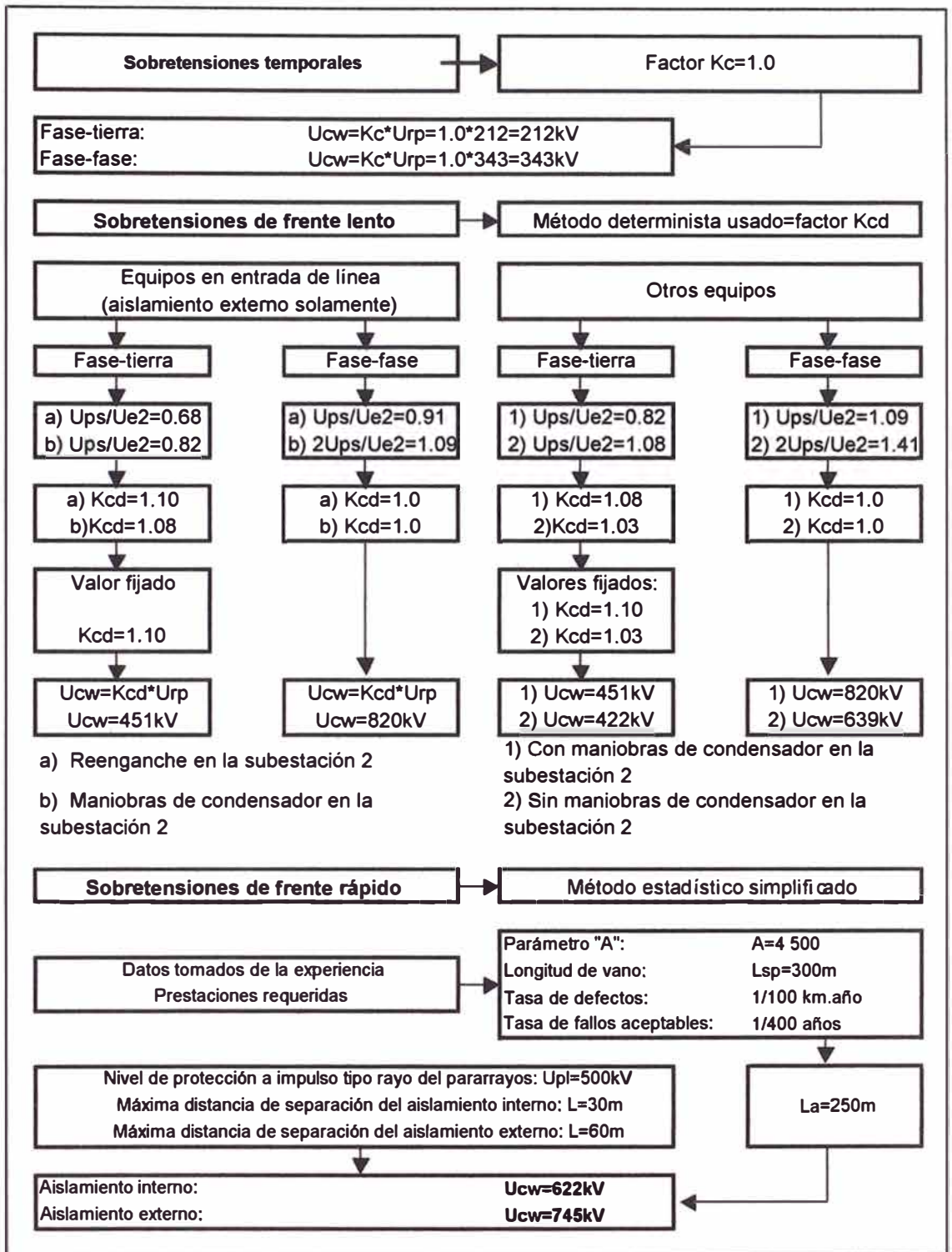


Figura 3.5 Organigrama del paso 2

Determinación de las tensiones soportadas de coordinación (U_{cw})

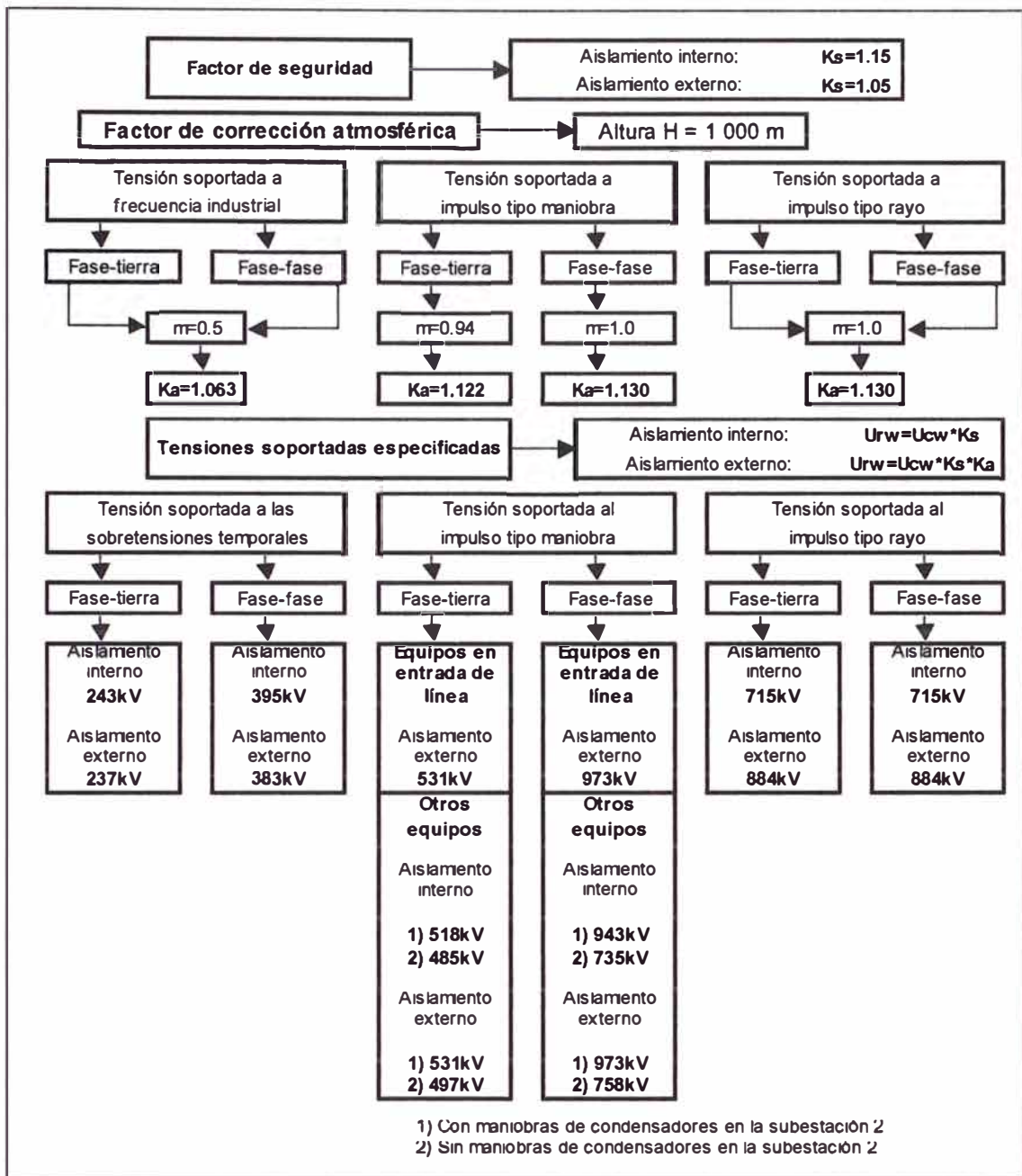


Figura 3.6 Organigrama del paso 3

Determinación de las tensiones soportadas especificadas (U_{rw})

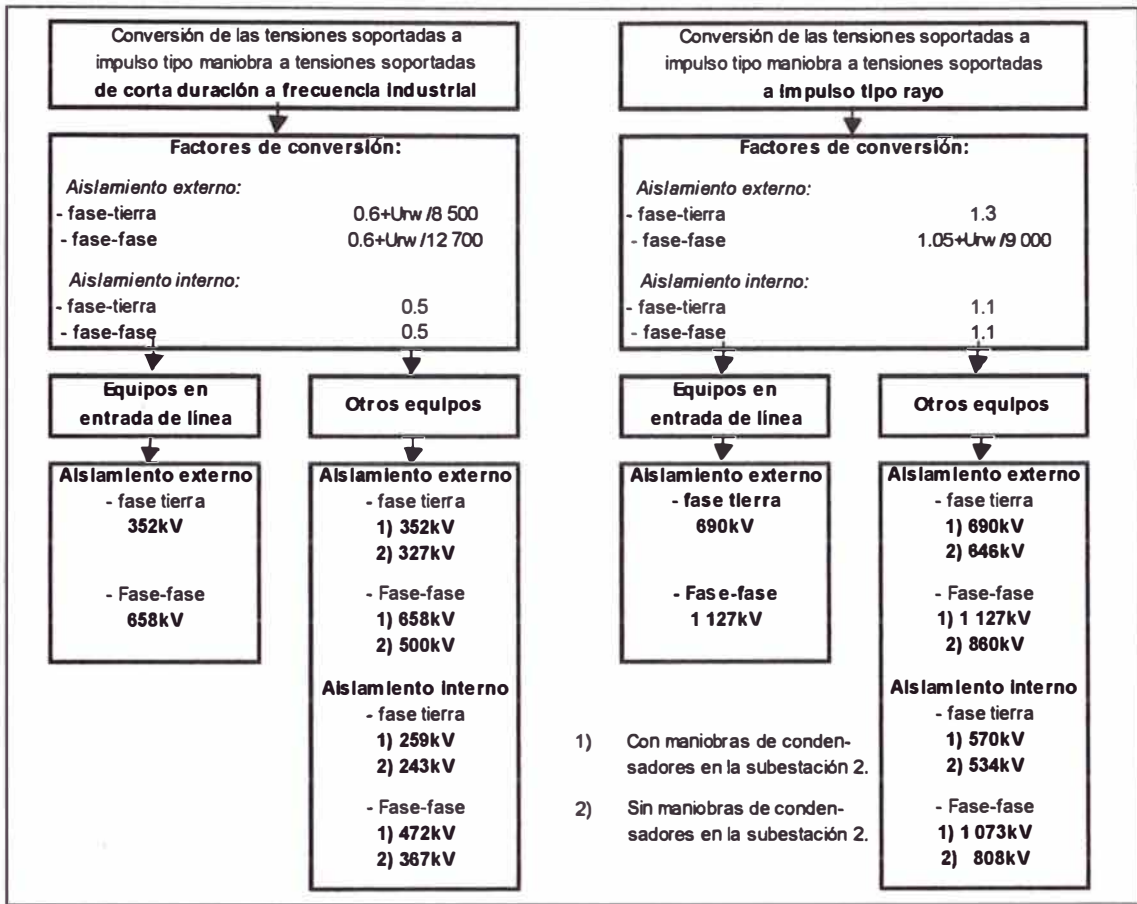


Figura 3.7 Organigrama del paso 4

Conversion hacia las tensiones soportadas normalizadas para la gama I

	Sin maniobras de condensadores en la subestaci3n alejada Para los detalles, v3ase la tabla 3.1	Con maniobras de condensadores en la subestaci3n alejada Para los detalles, v3ase la tabla 3.2
Nivel de aislamiento normalizado:	395kV / 950kV Aplicable a cualquier aislamiento	395kV / 950kV Aislamiento externo 460kV / 1 050kV Aislamiento interno
Aislamiento externo: No se requiere ensayo fase-fase si las distancias son:		
- para equipo en entrada de lnea	2.35m	2.35m
- para los dem3s equipos	1.90m	2.35
Aislamiento interno: M3nimo nivel normalizado a impulsos tipo rayo:		
- fase-tierra	750kV	750kV
- fase-fase	850kV	1 050kV

Figura 3.8 Organigrama del paso 5

Selecci3n de los valores de tensiones soportadas normalizadas

3.2 Evaluación económica

Los precios han sido tomados de las compras que efectuó el Ministerio de Energía y Minas para el Plan de Ampliación de la Frontera Eléctrica, en la Licitación Internacional OSP/PER/349/524 del año 2000. Esta Licitación fue convocada y administrada por la Oficina de Servicios para Proyectos de la Naciones Unidas (UNOPS).

El Nivel Básico de Aislamiento (BIL) corresponde al aislamiento externo de los equipos de Alta tensión.

Precio DDP: Precios en Dólares Americanos de los Estados Unidos, sin aranceles de importación, incluido costos de transporte y seguro internacional y local, inspección previa al embarque, gastos de agente de aduana, viaje de inspección de las pruebas en fábrica por parte del supervisor del Ministerio de Energía y Minas y cualquier otro gasto hasta la entrega en el almacén del Ministerio de Energía y Minas. En el precio también está incluido el suministro de las estructuras soportes de fierro galvanizado para cada uno de los equipos.

Los valores de las tensiones de prueba a frecuencia industrial de corta duración y a los impulsos tipo rayo (BIL) corresponden a las características externas del aislamiento de los equipos. En el Perú es usual seleccionar los equipos de maniobra usando estas características. En caso que la instalación se ubique en altitudes mayores a 1000msnm, se aplica el factor de altitud de servicio.

Todos los equipos que forman parte de los cuadros de precios mostrados, tienen aisladores de porcelana color marrón, con línea de fuga

de 31mm/kV.

En general, los fabricantes producen equipos de alta tensión, con los niveles de aislamiento estándar recomendados por las normas IEC pero para no diversificar demasiado sus productos, ni la de sus proveedores, limitan su producción teniendo en cuenta lo siguiente:

Los equipos con líneas de fuga de 16mm/kV o 20mm/kV los producen bajo pedidos especiales y en cantidades que resulten rentables ya que son equipos que muy pocos usuarios los piden. Son mas usuales los equipos con 25mm/kV y 31mm/kV de línea de fuga.

Para las tensiones de 123, 145, 170 y 245kV de la gama I, prefieren producir con los niveles de Aislamiento mas altos recomendados por IEC. Adicionalmente a los valores recomendados por IEC, fabrican equipos con una tensión nominal de 100kV que, en el Perú, es muy útil para redes con tensión nominal de 60, 66 y 69kV ubicadas en altitudes del orden de 2600m a más. La asociación de valores fabricados, mas frecuentes son:

Um=100kV con 185kVrms y 450kV-BIL de tensiones de prueba.

Um=123kV con 230kVrms y 550kV-BIL de tensiones de prueba.

Um=145kV con 275kVrms y 650kV-BIL de tensiones de prueba

Um=170kV con 325kVrms y 750kV-BIL de tensiones de prueba

Um=245kV con 395kVrms y 950kV-BIL de tensiones de prueba

Um=245kV con 460kVrms y 1050kV-BIL de tensiones de prueba

Para los otros valores de tensiones de prueba, la producción esta limitada a pedidos especiales en cantidades especiales.

Los valores de corriente nominal que se producen frecuentemente son: 800Amp, 1250Amp, 1600Amp, 2000Amp y los valores de capacidad de cortocircuito que se producen frecuentemente son: 25kA, 31.5kA y 40kA. Otros valores se pueden fabricar como pedidos especiales pero normalmente resultan mas costosos.

Interruptores de potencia

Pos	KV max/kA	KV prueba a Frec Ind/1min	BIL kV	Corriente nominal (A)	Línea de fuga mm/kV	Precio DDP US\$
1	100/20	185	450	1200	31	39,465
2	170/31.5	325	750	1200	31	65,407
3	245/31.5	460	1050	2000	31	88,875

Para la tensión de red de 138kV a 1000 msnm le corresponde equipos con $U_m=145kV$ pero para altitudes mayores puede ser necesario usar equipos con $U_m=145kV$ o $U_m=170kV$, dependiendo también del tipo de pararrayos que se use y de los niveles de sobretensión que se espera que se produzcan en la red. En una Licitación del año 1996 el Ministerio de Energía y Minas compró interruptores con $U_m=145kV$ a un precio aproximado DDP de US\$46,200.00, pudiéndose observar aquí la gran diferencia que existe con el interruptor con $U_m=170kV$ y por lo tanto se puede ver que haciendo una selección de equipos basada en un estudio de coordinación de aislamiento, podríamos concluir en que puede ser suficiente usar un equipo con $U_m=145kV$. Por otro lado, se puede observar la gran diferencia de precios que existe entre equipos con $U_m=100kV$, $170kV$ y $245kV$. Esta misma diferencia de precios entre los diferentes escalones de tensión se puede observa en las siguientes tablas de precios.

Seccionadores de barra

Pos	KV max	KV prueba a Frec Ind/1min	BIL kV	Corriente nominal (A)	Línea de fuga mm/kV	Precio DDP US\$
1	100	185	450	800	31	9,142
2	170	325	750	800	31	14,236
3	245	460	1050	1600	31	18,788

Transformadores de tensión capacitivos

Pos	KV max	KV prueba a Frec Ind/1min	BIL kV	Relación de tensión (kV)	Línea de fuga mm/kV	Precio DDP US\$
1	100	185	450	Rel 1	31	7,420
2	170	325	750	Rel 2	31	8,142
3	245	460	1050	Rel 3	31	9,553

Rel. 1: 60:V3 / 0.1:V3 / 0.1:3kV

Rel. 2: 132:V3 / 0.1:V3 / 0.1:3kV

Rel. 3: 220:V3 / 0.1:V3 / 0.1:3kV

Con el fin de estandarizar las características de los equipos el Ministerio de Energía y Minas ha comprado equipos con $U_m=100\text{kV}$ para redes de 60kV hasta altitudes de 4000 msnm, con $U_m=170\text{kV}$ para redes de 138kV hasta altitudes de 2500 msnm y con $U_m=245\text{kV}$ para redes de 138kV para altitudes mayores a 2500 msnm (las altitudes indicadas son valores referenciales, estimados).

Transformadores de corriente

Pos	KV max	KV prueba a Frec Ind/1min	BIL kV	Relación de corriente (A)	Línea de fuga mm/kV	Precio DDP US\$
1	72.5	140	325	1200/5-5-5	31	5,705
2	170	325	750	1200/5-5-5	31	9,419
3	245	460	1050	1200/5-5-5	31	13,835

Pararrayos de Oxido de Zinc, con aislador de porcelana

Pos	KV max	KV prueba a Frec Ind/1min	BIL kV	Corriente de descarga (kA)	Línea de fuga mm/kV	Precio DDP (MEM) US\$
1	60	140	325	10	31	2,752
2	60	185	450	10	31	2,752
3	120	325	750	10	31	3,687
4	198	460	1050	10	31	5,367

Para 60kV, el uso de un pararrayos de 325kV-BIL en lugar de uno 450kV-BIL no provoca ningún ahorro. Esto se debe a que para 325kV-BIL el fabricante ofreció el mismo aislador que para 450kV-BIL.

Debido a que las líneas de 60kV son con neutro aislado, los pararrayos están seleccionados con una tensión nominal de 60kV.

Las redes de 138kV y de 220kV tienen el sistema con neutro a tierra, lo que posibilita seleccionar pararrayos con tensiones nominales inferiores a la tensión de fase y por lo tanto las exigencias de niveles de aislamiento de los equipos son menores a los valores que se necesitarían si los sistemas fueran con neutro aislado.

En el Perú tenemos un sistema en 50kV en la zona de la sierra central

del Perú, el cual es un valor de tensión inusual en el resto del país pero que tiene algunas características interesantes para tener en cuenta, como por ejemplo:

Por lo menos hasta 4000 msnm se pueden usar equipos con $U_m=72.5\text{kV}$ por lo que no es necesario pasar al siguiente escalón de tensión de 100kV o 123kV.

En caso de seleccionar 60kV para la tensión de red, los equipos tendrían que ser seleccionados con $U_m=100\text{kV}$ lo cual significaría torres mas altas, distancias de aislamiento mayores y equipos mas costosos.

Una desventaja puede ser que la línea de 50 kV puede transmitir 17% menos de potencia que una línea de 60 kV, si se usa el mismo conductor. Adicionalmente, la línea de 50 kV no se puede poner en paralelo directamente con el resto de líneas de 60kV y es un sistema que tiene algunos equipos que solo se pueden aplicar para 50kV y no para 60kV.

3.3 Software EMTP o ATP para coordinación de aislamiento

El EMTP/ATP es un programa digital usado para simular transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos polifásicos de potencia, gracias a su gran versatilidad para modelar sistemas. Fue desarrollado a fines de la década del 60 por el Dr. Hermann Dommel, quien lo cedió a la Bonneville Administration Power Administration (BPA). La BPA ha dirigido la distribución gratuita del EMTP/ATP, y ha incluido modelaciones adicionales que ellos mismos han desarrollado y las modelaciones que han desarrollado universidades y otras

empresas.

En todo el mundo existen grupos de usuarios del EMTP/ATP, con licencias para su uso gratuito (otorgadas por la BPA), quienes intercambian información, dan sugerencias, aportan estudios, enseñan a nuevos usuarios y contribuyen al desarrollo constante del EMTP/ATP. Todo esto ha llevado a que actualmente el EMTP/ATP reúne experiencias de mas de cuarenta años en todo el mundo.

Anteriormente el EMTP/ATP solo era posible correrlo en grandes computadoras pero actualmente existe una versión para computadoras personales, posibilitando su acceso a un número mucho mayor de usuarios. Se puede instalar en ambiente Windows y requiere un espacio de por lo menos 20Mb de espacio libre en el disco duro.

Una aplicación del software EMTP (Electro Magnetic Transiet Program) o ATP (Alternative Transiet Program), es la de efectuar diseños que incluyen la **coordinación del aislamiento**, dimensionamiento de los equipos, especificación de los equipos de protección, diseño de los sistemas de control, etc. También se usa para la solución de problemas que tienen que ver con la operación tales como fallas en los sistemas y análisis de los transitorios que normalmente ocurren en la operación del sistema de potencia.

Para efectuar los diseños y la solución de problemas de operación, el EMTP/ATP usa principalmente tres programas para la simulación de los sistemas, que son:

ATPDraw: Es un editor gráfico para Windows que dispone de una

lista muy completa de los componentes para representar un sistema eléctrico en código ATP. El usuario debe especificar los parámetros de cada componente.

TPBIG: Permite hacer simulaciones de procesos transitorios, obtener el régimen permanente sinusoidal de una red lineal, determinar la impedancia de una red en función de la frecuencia (Frequency Scan) y calcular flujos de carga de armónicos (Harmonic Frequency Scan). Además se dispone de varias rutinas auxiliares que tienen como objetivo crear un archivo en código ATP para representar distintos componentes tales como líneas aéreas, cables aislados o transformadores, a partir de la información disponible de estos componentes.

Las simulación de un proceso transitorio se basa en el método de Dommel, que combina la regla trapezoidal y el método de Bergeron.

TOP: Trabaja en Windows y lee datos en una gran variedad de formatos y los transforma en gráficos de alta calidad para permitir manejar datos con varios tipos de fuentes, visualizar los datos en forma de tablas y gráficos, presentar oscilogramas en varias ventanas simultáneamente, presentar datos seleccionados empleando ventanas y marcos, realizar operaciones matemáticas con los datos leídos con la opción TOPcalc, formatear las variables mostradas en una ventana según sus preferencias, exportar datos en pantalla en una gran variedad de formatos. El TOP puede emplearse para postprocesador gráfico y para realizar tareas como el análisis armónico de Fourier o el cálculo de algunos índices de calidad de servicio como el THD.

Las tareas y aplicaciones que se pueden realizar con el EMTP/ATP se han agrupado principalmente en dos grandes secciones: "Desarrollo de modelos y de librerías de componentes" y "Tipos de estudios".

Desarrollo de modelos:

Varias opciones de EMTP/ATP se pueden emplear para desarrollar módulos personalizados para representar componentes no disponibles en el paquete o para facilitar la representación de otros componentes. Prácticamente es posible efectuar la modelación de cualquier tipo de componente que interviene en un sistema de potencia lineal y no lineal.

Tipos de estudios:

Análisis transitorio; para obtener la respuesta de un sistema a una maniobra o a una excitación externa, como un rayo.

Análisis frecuencial; empleado en el cálculo del régimen inicial en redes lineales o para analizar problemas relacionados con la propagación de armónicos.

Análisis de sensibilidad; usado para determinar la dependencia de una o varias variables de una red en estudio respecto a un parámetro de la misma red.

Análisis estadístico; mediante el método de Monte Carlo, se usa para el cálculo de la densidad de probabilidad que pueden tener ciertas tensiones de maniobra y para el estudio del comportamiento de líneas aéreas frente al rayo o para la predicción estocástica de huecos de tensión.

En el Perú, el Laboratorio de Electrotecnia de la Universidad de Piura es la Coordinadora nacional del software EMTP/ATP.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1 Los estudios de coordinación de aislamiento se deben realizar en varias etapas, de acuerdo con lo establecido por la norma IEC-60071, esquematizadas en 3.1.3 del presente trabajo. Estas etapas permiten seleccionar un conjunto de tensiones soportadas normalizadas para los equipos eléctricos.
- 2 Las tensiones soportadas normalizadas indicadas en la norma IEC-60071 no son invariables y válidas para todos los casos ya que se puede escoger un conjunto diferente de tensiones, según como lo exijan las condiciones particulares de cada subestación.
- 3 Desde 1993 se ha introducido en la Norma IEC-60071 el concepto de aislamiento longitudinal entre bornes de una misma fase de un aparato abierto, recomendaciones para el cálculo de la influencia de la altitud de servicio y del fenómeno de envejecimiento de las instalaciones. También se hace la distinción entre el cálculo del aislamiento externo y del aislamiento interno y se distinguen las tensiones en solo 2 gamas.
- 4 El entorno ambiental, donde se instalarán los equipos eléctricos, influyen fuertemente en la determinación de la coordinación del aislamiento (Altitud sobre el nivel del mar, contaminación ambiental, características del clima). La tabla B.1 del Anexo B y la figura 2.2, del presente trabajo, muestran como evaluarlos, aunque no se pueden

aplicar para todos los materiales y condiciones ambientales.

- 5 Las longitudes de fuga recomendadas por la IEC 60071 (Anexo B, Tabla B.1) solo son aplicables a materiales aislantes de porcelana o vidrio y no contemplan algunas condiciones ambientales como nieve y hielo bajo fuerte contaminación, lluvia intensa, zonas áridas, etc.
- 6 La aplicación de materiales diferentes a la porcelana y vidrio (como materiales aislantes), es regulada por comités especiales a quienes la IEC les ha encargado esta función.
- 7 El aislamiento interno de los equipos eléctricos no se afecta por las condiciones ambientales, a diferencia del aislamiento externo.
- 8 La coordinación del aislamiento debe tener muy en cuenta la configuración de la red y los equipos que lo conforman, incluyendo líneas de transmisión y subestaciones adyacentes, incidiendo en la determinación de las posibilidades que estos generen sobretensiones por maniobras.
- 9 Debido a su importancia en la eficaz operación de las subestaciones, es imprescindible la elaboración de un estudio de coordinación de aislamiento para cada subestación nueva.
- 10 Los pararrayos limitan las sobretensiones solamente a nivel de sus bornes y la onda descrestada conserva su gradiente de tensión (dv/dt) de subida por lo que existe una distancia máxima a partir de la cual ya no es efectiva la protección del pararrayos (los equipos protegidos deben ubicarse a una distancia menor a esta distancia máxima).

- 11 Las sobretensiones tienen un comportamiento aleatorio y por lo tanto no es posible encontrar soluciones absolutas para la coordinación del aislamiento.
- 12 Para las tensiones de la gama I, son más incidentes las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas que las debidas a maniobras, pero esto no implica que las sobretensiones de maniobra no se deban considerar en el análisis del estudio de coordinación de aislamiento.
- 13 Para las tensiones de la gama II son más incidentes las sobretensiones debidas a maniobras pero tampoco deben eliminarse del análisis las debidas a las descargas atmosféricas.
- 14 El estudio de la coordinación del aislamiento intenta encontrar el justo equilibrio entre la fiabilidad de los materiales desde el punto de vista dieléctrico y del costo que esto significa tanto como equipos como de costos derivados de la no operación de los sistemas eléctricos.
- 15 Es conveniente que en nuestro país se elaboren cartas geográficas que indiquen los niveles isocerámicos de las diferentes zonas territoriales.
- 16 Es conveniente efectuar estudios para elaborar programas informáticos que permitan facilitar la elección de las tensiones soportadas normalizadas.
- 17 Es conveniente que exista una entidad encargada de centralizar estudios, experiencias, mediciones, relacionadas con las sobretensiones que se producen en los sistemas eléctricos del Perú, a fin de que sus conclusiones y recomendaciones sean incluidas en las Normas Técnicas Peruanas relativas al uso de la electricidad. Para el

caso podría sugerirse al Colegio de Ingenieros del Perú la formación de un comité técnico.

ANEXOS

ANEXO A

Lista de Símbolos y Definiciones usadas

Símbolo	Unidad	Definición
A	(kV)	parámetro que caracteriza la influencia de la severidad del rayo para el equipo, dependiendo del tipo de línea aérea al que está conectado
a₁	(m)	longitud del puente de conexión del pararrayos a la línea.
a₂	(m)	longitud del puente de conexión del pararrayos a tierra.
a₃	(m)	longitud del conductor de fase entre el pararrayos y el equipo protegido.
a₄	(m)	longitud de la parte activa del pararrayos.
c	(m/μs)	velocidad de la luz.
H	(m)	altitud sobre el nivel del mar.
K_a	(-)	Factor de corrección atmosférico [3.28 de la Norma CEI 60071-1].
K_c	(-)	Factor de coordinación [3.25 de la Norma CEI 60071-1]
K_s	(-)	Factor de seguridad [3.29 de la Norma CEI 60071-1]
K_t	(-)	Factor de conversión de ensayos
K_{cd}	(-)	Factor de coordinación determinista
k	(μs/kV ^m)	Factor de falta (defecto) a tierra 3.15 de la Norma CEI 60071-1
L	(m)	Distancia de separación entre el pararrayos y el equipo protegido.
L_a	(m)	longitud de línea aérea que da lugar a tasa de fallos (cortes) por rayo, es igual a la tasa aceptable (relacionado a Ra)
L_{sp}	(m)	longitud de vano
m	(-)	exponente de la fórmula del factor de corrección atmosférico para la soportabilidad del aislamiento externo.
n	(-)	Número de líneas aéreas que se consideran conectadas a una subestación en la evaluación de la amplitud de ondas incidentes.
P	(%)	probabilidad de descarga de un aislamiento autorregenerable.
P_w	(%)	probabilidad de soportabilidad de un aislamiento autorregenerable.
R₀	(1/a)	tasa de fallo aceptable para un aparato. En líneas de transporte, normalmente se expresa en términos de (1/a)/100km.
R_{km}	(1/(m.a))	tasa de cortes (fallos) por año de una línea aérea para un diseño en el primer kilómetro de salida de una sub estación.
S	(kV/μs)	Pendiente de una onda tipo rayo que incide en una subestación.
T	(μs)	tiempo de propagación de un impulso tipo rayo.
U	(kV)	amplitud de una sobretensión (o de una tensión).
U⁺	(kV)	componente positiva en un ensayo de aislamiento a impulso tipo maniobra fase-fase.
U⁻	(kV)	componente negativa en un ensayo de aislamiento a impulso tipo maniobra fase-fase.
U₀	(kV)	valor de truncamiento de la función de probabilidad de descarga P(U) de un aislamiento autorregenerable: P(U ≤ U ₀) = 0.
U_{crw}	(kV)	tensión soportada de coordinación del equipo (3.24 de la Norma CEI 60071-1)
U₀	(kV)	amplitud de una sobretensión fase-tierra.
U_{e1}	(kV)	valor de truncamiento de la función de distribución F(U ₀) de la sobretensión fase-tierra F(U ≥ U _{e1})=0;
U_{e2}	(kV)	valor de la sobretensión fase-tierra con una probabilidad del 2% de ser aumentada: F(U ≥ U _{e2})=0,02;
U_m	(kV)	tensión más elevada para el material [3.10 de la Norma CEI 60071-1]
U₀	(kV)	amplitud de una sobretensión fase-fase.
U_{p2}	(kV)	valor de la sobretensión fase-fase con una probabilidad del 2% de ser excedida: F(U _p ≥ U _{p2})=0,02;
U_s	(kV)	tensión más elevada de una red [3.9 de la Norma CEI 60071-1]
U_w	(kV)	tensión soportada normalizada.
U_{p1}	(kV)	nivel de protección a impulso tipo rayo de un pararrayos [3.21 de la Norma CEI 60071-1]
U_{p1}	(kV)	nivel de protección a impulso tipo maniobra de un pararrayos [3.21 de la Norma CEI 60071-1].
U_{pt}	(kV)	valor de truncamiento de la función de distribución F(U _p) de la sobretensión fase-fase: F(U _p ≥ U _{pt})=0;
U_{rp}	(kV)	amplitud de la sobretensión representativa [3.19 de la Norma CEI 60071-1]
U_{rw}	(kV)	tensión soportada especificada [3.27 de la Norma CEI 60071-1].
Z	(kV)	desviación típica de la función de probabilidad de descarga P(U) de un aislamiento autorregenerable.
α	(-)	relación entre la componente negativa de un impulso de maniobra y la suma de ambas componentes (negativa + positiva) de una sobretensión entre fases.

ANEXO B

Nivel de contaminación	Tensión soportada normalizada a los impulsos tipo manobra	Linea de fuga específica nominal mínima mm/kV ¹⁾
I Ligero	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas sin industrias y con baja densidad de viviendas equipadas con calefacción - Zonas con baja densidad de industrias o viviendas, pero sometidas a viento o lluvias frecuentes. - Zonas agrícolas ²⁾ - Zonas montañosas <p>Todas estas zonas están situadas al menos de 10km a 20km del mar y no están expuestas a vientos directos desde el mar ³⁾</p>	16
II Medio	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas con industrias que no producen humo especialmente contaminante y/o con densidad media de viviendas equipadas con calefacción. - Zonas con elevada densidad de viviendas y/o industrias pero sujetas a vientos frecuentes y/o lluvia. - Zonas expuestas a vientos desde el mar, pero no muy próximas a la costa (al menos distantes bastantes kilómetros) ³⁾ 	20
III Fuerte	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas con elevada densidad de industrias y suburbio de grandes ciudades con elevada densidad de calefacción generando contaminación. - Zonas cercanas al mar o en cualquier caso, expuestas a vientos relativamente fuertes provenientes del mar ³⁾ 	25
IV Muy fuerte	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas, generalmente de extensión moderada, sometidas a polvos conductores y a humo industrial que produce depósitos conductores particularmente espesos. - Zonas, generalmente de extensión moderada, muy próximas a la costa y expuestas a pulverización salina o a vientos muy fuertes y contaminados desde el mar. - Zonas desérticas, caracterizadas por no tener lluvia durante largos periodos, expuestas a fuertes vientos que transportan arena y sal, y sometidas a condensación regular. 	31
<p>NOTA- Esta tabla deberá aplicarse únicamente a aislamientos de vidrio o porcelana y no cubre algunas condiciones ambientales, tales como nieve y hielo bajo fuerte contaminación, lluvia intensa, zonas áridas, etc.</p> <p>1) De acuerdo con la Norma CEI 60815, línea de fuga mínima de aisladores entre fase y tierra relativas a la tensión mas elevada de la red (fase-fase)</p> <p>2) Empleo de fertilizantes por aspiración o quemado de residuos, puede dar lugar a un mayor nivel de contaminación por dispersión en el viento.</p> <p>3) Las distancias desde la costa marra dependen de la topografía costera y de las extremas condiciones del viento.</p>		

Tabla B.1 Líneas de fuga recomendadas por la norma IEC 60071-2, 1996

ANEXO C Distancia de protección de pararrayos (distancia máxima)

De acuerdo con la Norma IEC 60071-2, párrafo 2.3.4.5, la distancia límite de protección de un pararrayos (a_3) está dada por las siguientes relaciones:

$$U_{rp} = U_{pl} + 2 \cdot S \cdot T \quad (\text{Ecuación C.1})$$

$$T = L / C \quad (\text{Ecuación C.3})$$

De estas 2 ecuaciones se puede deducir lo siguiente:

$$L = c \cdot (U_{rp} - U_{pl}) / (2 \cdot S) \quad (\text{Ecuación C.4})$$

donde: $L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$ (ver ejemplo de aplicación)

Por lo tanto: $a_3 = L - (a_1 + a_2 + a_4)$ (Ecuación C.5)

- Con esta ecuación se puede calcular la distancia máxima de protección que proporciona el pararrayos. Para distancias mayores no se garantiza una protección adecuada.
- Para U_{rp} es frecuente usar los valores de las Tensiones Soportadas Normalizadas a los Impulsos tipo Rayo (BIL) de las Tablas 1.2 y 1.3 del presente trabajo
- Para altitudes mayores a 1000msnm se debe efectuar la corrección de U_{pl}

Donde:

L	(m)	$L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$, según la figura del ejemplo de aplicación siguiente.
a_1	(m)	longitud del puente de conexión del pararrayos a la línea.
a_2	(m)	longitud del puente de conexión del pararrayos a tierra.
a_3	(m)	longitud del conductor de fase entre el pararrayos y el equipo protegido.
a_4	(m)	longitud de la parte activa del pararrayos.
c	(m/ μ s)	velocidad de la luz (300m/ μ S para Líneas).
S	(kV/ μ s)	Pendiente de una onda tipo rayo que incide en una subestación (usualmente 1000kV/ μ s).
U_{pl}	(kV)	nivel de protección a impulso tipo rayo de un pararrayos [3.21 - Norma CEI 60071-1]
U_{rp}	(kV)	amplitud de la sobretensión representativa [3.19 de la Norma CEI 60071-1]

Ejemplo de aplicación del Anexo C:

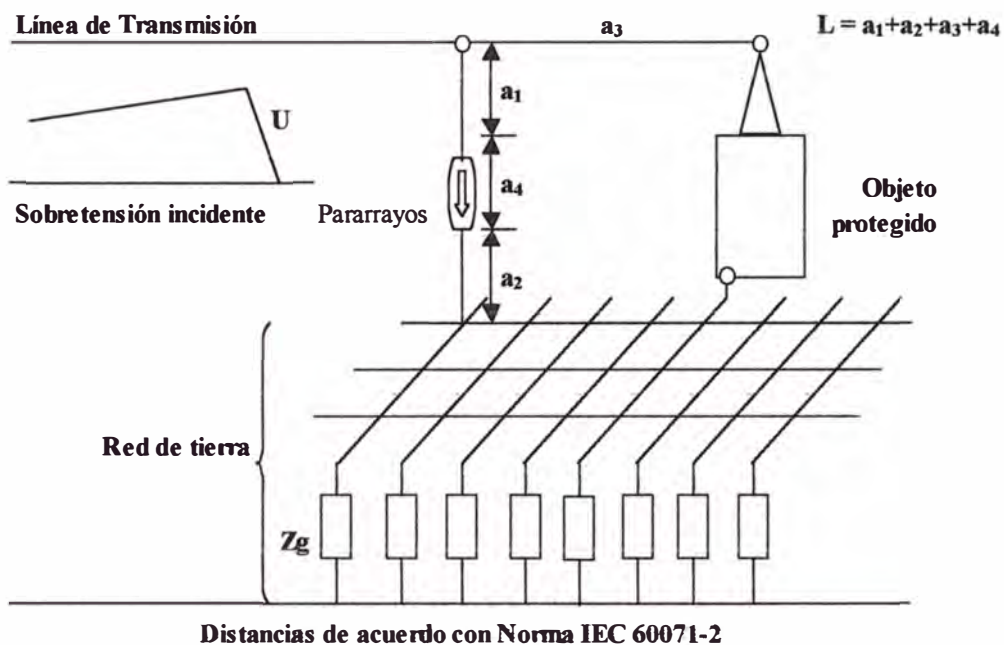
Hallar la máxima distancia de protección entre el pararrayos y los equipos a proteger, para asegurar una protección adecuada, en una sub estación de 220kV; si se conoce que $U_{pl}=500\text{kV} @ 1000\text{ms}$ y que $a_1+a_2+a_4 = 7.5\text{m}$ ($a_3 = ?$)

Solución:

Para U_{rp} usaremos los valores de BIL de la Tabla 2 de la norma IEC 60071-1

Usaremos $S = 1000\text{kV}/\mu\text{s}$, el cual es un valor frecuente y $c = 300\text{m}/\mu\text{s}$.

U_{rp} (kV)	U_{pl} (kV)	L (m)	a_3 (m)
650	500	22.5	15
750	500	37.5	30
850	500	52.5	45
950	500	67.5	60
1050	500	82.5	75



BIBLIOGRAFIA

- [1] Técnicas computacionales en Ingeniería de Alta Tensión
Enrique Harper, Gilberto
Editorial Limusa S.A. de C.V.
Edición 1987
- [2] Sobretensiones y Coordinación de Aislamiento
D. Fulchiron
Schneider Electric
Edición 1994
- [3] Metal-Oxide Surge Arresters Fundamentals
Volker Hinrichsen
SIEMENS
Primera edición
- [4] Reducción del nivel de aislamiento en subestaciones de Alta Tensión
tipo convencional al exterior.
Manuel Damián Moreno
Electroperú S.A.
VIII CONIMERA, 1986
- [5] Norma IEC 60071-1 Edición 1993-11
Coordinación de Aislamiento: Definiciones, principios y reglas

[6] Norma IEC 60071-1 Edición 1993-11

Coordinación de Aislamiento: Definiciones, principios y reglas