

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **APLICACIÓN DE LA NORMA IEC 60071 EN EL ESTUDIO DE COORDINACION DE AISLAMIENTO EN SUBESTACIONES ELECTRICAS DE ALTA TENSION**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO ELÉCTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

JOSE LUIS ZAMORA ESTELA

**PROMOCIÓN  
2002- II**

**LIMA – PERÚ  
2010**

**APLICACIÓN DE LA NORMA IEC 60071 EN EL ESTUDIO  
DE COORDINACION DE AISLAMIENTO EN  
SUBESTACIONES ELECTRICAS DE ALTA TENSION**

Agradezco infinitamente a mis padres y a Dios, ya que ellos estuvieron desde un principio apoyándome en todo momento en esta parte de la vida, a la Universidad y a todas las personas que me apoyaron.

## SUMARIO

El presente informe de suficiencia trata de la aplicación de la norma IEC 60071 para la correcta elección del nivel de aislamiento de los equipos de una subestación eléctrica.

Dicho nivel de aislamiento se selecciona con un correcto estudio de Coordinación de Aislamiento, para tal fin en este trabajo se quiere dar una guía de cómo se calcula estos valores de aislamiento basados en algunos métodos de cálculo y criterios de experiencia según la guía de la norma respectiva.

La importancia de seleccionar un correcto aislamiento es la protección ante fenómenos naturales y eléctricos que pueden ocasionarse en instalaciones eléctricas, tales como subestaciones, líneas de transmisión, etc.

Para evitar los problemas que pueden causar ese tipo de incidentes, los sistemas eléctricos deben diseñarse para resistir tanto los fenómenos naturales relacionados con la meteorología, el viento, la lluvia, los rayos, etc., así como los propios de los sistemas eléctricos, las maniobras de sus elementos, cortocircuitos, etc., que son fenómenos que pueden ocurrir.

Por otra parte la sociedad requiere disponer de un suministro de electricidad continuo, seguro y de calidad. Hoy en día las estrategias del mantenimiento están encaminadas a garantizar la disponibilidad y eficacia requerida de las unidades, equipos e instalaciones, asegurando la duración de su vida útil y minimizando los costos de mantenimiento, dentro del marco de la seguridad y el medio ambiente.

## INDICE

<b>PROLOGO</b>	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>ANTECEDENTES</b>	
1.1 Introducción	2
1.2 Objetivo	3
1.3 Alcance	3
1.4 Justificación del Tema	3
<b>CAPITULO II</b>	
<b>SOBRETENSIONES EN REDES ELECTRICAS</b>	
2.1 Introducción	4
2.2 Naturaleza y Clasificación de las Sobretensiones	5
2.2.1 Tensiones Continuas	6
2.2.2 Sobretensiones Temporales	6
2.2.3 Sobretensiones de Frente Lento	10
2.2.4 Sobretensiones de Frente Rápido	14
2.2.5 Sobretensiones de Frente muy Rápido	16
<b>CAPITULO III</b>	
<b>PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES - PARARRAYOS</b>	
3.1 Introducción	18
3.2 Clases de Pararrayos	19
3.2.1 Pararrayos de carburo de silicio (SiC) con explosores	20
3.2.2 Pararrayos de oxido de zinc (ZnO) sin explosores	21
3.3 Características de los Pararrayos	22
3.3.1 Tensión nominal o asignada: $U_r$	22
3.3.2 Tensión de funcionamiento continuo: $U_c$	23
3.3.3 Capacidad para soportar sobretensiones temporales: $TOV_c$	23
3.3.4 Corriente nominal de descarga: $I_n$	24

3.3.5	Clase de descarga de línea	24
3.3.6	Tensión residual o de descarga	26
3.3.7	Clase del limitador de presión	27
3.3.8	Línea de fuga	28
3.3.9	Dispositivo de desconexión	28
3.3.10	Frecuencia asignada	29
3.4	Criterios de Selección de Pararrayos	29
3.4.1	Elección de la corriente nominal y la clase de descarga de línea	30
3.4.2	Criterio de elección de la tensión de funcionamiento continuo ( $U_c$ )	30
3.4.3	Criterio de elección de las sobretensiones temporales ( $TOV_c$ )	30
3.4.4	Elección de la línea de fuga	32
3.4.5	Margen de protección a impulsos tipo rayo	32
3.4.6	Margen de protección a impulsos tipo maniobra	32

## **CAPITULO IV**

### **CRITERIOS Y METODOLOGIA EMPLEADA SEGÚN NORMA IEC 60071**

4.1	Introducción	34
4.2	Metodología de Coordinación de Aislamiento	34
4.2.1	Método Determinista o Convencional	35
4.2.2	Método Estadístico	36
4.3	Determinación de las Tensiones Representativas ( $U_{rp}$ )	37
4.3.1	Tensiones permanentes	37
4.3.2	Sobretensiones Temporales	37
4.3.3	Sobretensiones de Frente Lento	37
4.4	Determinación de las Tensiones Soportadas de Coordinación ( $U_{cw}$ )	40
4.4.1	Tensión soportada de coordinación permanente	40
4.4.2	Tensión soportada de coordinación temporal	40
4.4.3	Tensión soportada de coordinación de frente lento	40
4.4.4	Tensión soportada de coordinación de frente rápido	41
4.5	Determinación de las Tensiones Soportadas Requeridas ( $U_{rw}$ )	42
4.5.1	Corrección por altitud	43
4.5.2	Factor de Seguridad	44
4.6	Determinación de las Tensiones Soportadas Normalizadas ( $U_w$ )	45
4.6.1	Factor de conversión para Rango I	45

4.6.2	Factor de conversión para Rango II	45
4.7	Selección de los Niveles de Aislamiento Normalizados	46

## **CAPITULO V**

### **CALCULOS Y APLICACIONES**

5.1	Ecuaciones a emplear para determinar las tensiones	47
5.1.1	Determinación de las Sobretensiones Representativas ( $U_{rp}$ )	47
5.1.2	Determinación de las Tensiones de Soportabilidad para Coordinación ( $U_{cw}$ )	49
5.1.3	Determinación de las Tensiones de Soportabilidad Requeridas ( $U_{rw}$ )	51
5.1.4	Conversión a Tensiones de Soportabilidad Normalizadas ( $U_w$ )	53
5.1.5	Selección de las Tensiones de Soportabilidad Normalizadas	54
5.2	Aplicaciones	55
5.3	Calculo de Nivel de Aislamiento en S.E. 220 kV (Caso SE Chilca-REP)	55
5.4	Calculo de Nivel de Aislamiento en S.E. 138 kV (Caso SE Bayovar-VALE)	59
5.5	Calculo de Nivel de Aislamiento en S.E. 60 kV (Caso SE Santa Rosa-REP)	64

<b>CONCLUSIONES</b>	69
---------------------	----

<b>ANEXOS</b>	71
---------------	----

<b>BIBLIOGRAFIA</b>	85
---------------------	----

## **PROLOGO**

Los equipos y las instalaciones eléctricas están sometidos a sobretensiones que pueden afectar su aislamiento y provocar una falla o una avería. Las sobretensiones en una red eléctrica se originan como consecuencia de una falla, una maniobra o una descarga atmosférica. Su estudio es fundamental para determinar tanto el nivel de aislamiento que se debe seleccionar para los distintos componentes de un sistema como los medios o dispositivos de protección que es necesario instalar.

Este informe mostrará los pasos a seguir para realizar los respectivos cálculos de estas sobretensiones a través de métodos de cálculo y los respectivos dispositivos de protección para contrarrestar las sobretensiones, se utilizó la guía que figura en la norma de coordinación de aislamiento IEC 60071.

En el capítulo I se hará una breve presentación del tema, así como el objetivo y el alcance del informe.

En el capítulo II se menciona los tipos de sobretensiones que pueden existir en la red eléctrica, tales como: tensiones continuas, sobretensiones temporales, sobretensiones de frente lento, etc.

En el capítulo III se desarrollará el tema de protección contra sobretensiones a través de pararrayos, clases de pararrayos, sus características y su selección.

En el capítulo IV se desarrollará los métodos de cálculo recomendados por la norma IEC 60071 para la coordinación de aislamiento.

En el capítulo V se harán algunos ejemplos de cálculo del nivel de aislamiento en subestaciones eléctricas de alta tensión.

Y finalmente se realizarán las conclusiones que se obtienen de los temas tratados en este informe.

# **CAPITULO I**

## **ANTECEDENTES**

### **1.1 Introducción**

Las redes eléctricas están sometidas a fenómenos de origen interno y externo que pueden dañar el aislamiento, es tarea fundamental de la coordinación de aislamiento el proceso de selección del aislamiento para contrarrestar estos fenómenos.

Antes de 1920 el dimensionamiento de los aislamientos se realizaba de una forma puramente empírica, exigiendo a los materiales que soportaran una tensión a frecuencia industrial de un valor igual al producto de la tensión de servicio por un cierto coeficiente de seguridad elegido según la experiencia en instalaciones anteriores.

La aparición de redes con tensión nominal superior a 100kV, exigió un mayor estudio y enfoque del problema, por lo que se incorporó los ensayos de impulso al comprobarse que los aislamientos no podían clasificarse solamente por su capacidad para soportar los fenómenos a frecuencia industrial y se clasificaron los aislamientos de los diversos equipos de una instalación, de tal manera que sus tensiones soportadas compartan riesgos de falla diferentes, según la importancia y costo de cada equipo.

En la actualidad se dispone de medios técnicos más sofisticados cuyo empleo permite una mejor determinación de las sobretensiones que puedan aparecer en las instalaciones.

El estudio de sobretensiones y la selección de aislamientos y dispositivos de protección es el objetivo de lo que se conoce como Coordinación de Aislamiento. Existen varias formas de definir este concepto. Una primera aproximación define a la Coordinación de Aislamiento como la selección de la tensión soportada de los distintos equipos. Puesto que el comportamiento de cualquier aislamiento depende del tipo de fenómeno al que es sometido, la definición según la norma IEC-60071-1: “La Coordinación de Aislamiento es la selección de la rigidez dieléctrica de los equipos en relación con las tensiones que pueden aparecer en el sistema en el cual se hallan instalados, teniendo en cuenta las condiciones ambientales de servicio y las características de los dispositivos de protección disponibles

## **1.2 Objetivo**

Seleccionar los niveles de aislamiento de los equipos de patio de una subestación eléctrica y los márgenes de protección existentes, para garantizar una operación segura y confiable de los equipos.

## **1.3 Alcance**

El presente informe tiene como alcance la elección del nivel de aislamiento adecuado para los equipos de una subestación eléctrica, a través de cálculos hechos en un estudio de coordinación de aislamiento basado en la norma IEC 60071, para los niveles de 60kV, 138kV y 220kV.

## **1.4 Justificación del Tema**

La coordinación de aislamiento tiene como fin la determinación de los niveles de aislamiento necesarios en los equipos de una instalación eléctrica, de manera que estos equipos puedan soportar los fenómenos naturales y fenómenos propios del sistema eléctrico a los que serán sometidos, tanto en servicio normal como en presencia de las sobretensiones que se puedan originar en la red eléctrica.

El problema se presenta cuando no se escoge un adecuado nivel de aislamiento, esto dará origen a que las sobretensiones puedan dañar el aislamiento de los equipos y pueden provocar la interrupción del servicio y esto ocasionará pérdidas económicas.

Ante este problema, se reunió en este informe el método de la norma IEC 60071 para coordinación de aislamiento, además de dar unas recomendaciones y conclusiones y poder así seleccionar un adecuado nivel de aislamiento (BIL), para que los equipos operen y funcionen de la mejor manera, garantizando una operación segura y confiable ante las sobretensiones producidas en la red eléctrica

Para tal fin en el capítulo final se aplica el método de la norma IEC 60071 para tres casos prácticos de subestaciones eléctricas en 220kV, 138kV y 60kV, donde se escogen los valores normalizados de acuerdo a tablas de la norma para tal fin.

## **CAPITULO II**

### **SOBRETENSIONES EN REDES ELECTRICAS**

#### **2.1 Introducción**

Una subestación eléctrica esta sujeta a eventos tales como: descargas atmosféricas, propagación de ondas de sobretensión y fallas en el sistema, los cuales pueden provocar flameos o fallas de aislamiento, ocasionando daños en los equipos o incluso la salida de servicio de la subestación. Con el propósito de adquirir protección ante tales eventos y sus consecuencias, es necesario definir las sobretensiones que puedan causarlos y los elementos de protección ante tales sobretensiones para así poder establecer los niveles de aislamiento adecuados para cada equipo, esto es hacer un estudio de coordinación de aislamiento.

En los sistemas eléctricos se presentan sobretensiones, por lo que el aislamiento debe ser elegido técnica y económicamente, por la parte técnica debe ser dimensionado para soportar las sobretensiones que efectivamente se presentaran, evitando disturbios frecuentes durante la operación; y por la parte económica no se debe caer en costos excesivos con un sobredimensionamiento del nivel de aislamiento ya que estos equipos tendrán un costo mas elevado. La coordinación de aislamiento permite entonces realizar el mejor ajuste técnico-económico de los equipos de una subestación eléctrica a través de una buena elección del nivel de aislamiento, dando mayor seguridad ante posibles sobretensiones durante la operación del sistema ó la operación de la subestación y por tanto no llevaría a fallas y la subestación estará segura así como el personal que laboran dentro de ella.

Debido a que una sobretensión tiene carácter aleatorio y variable en el tiempo es difícil de caracterizar, por lo que sus parámetros tales como: duración, amplitud y efectos en el sistema son solo una aproximación estadística. Los riesgos que una subestación presenta desde el punto de vista del aislamiento son, por ejemplo: mal funcionamiento de los equipos por desgaste ó destrucción del material aislante, y una consecuencia puede ser la no continuidad del servicio eléctrico.

Un estudio completo de sobretensiones debe tener como objetivos:

- Establecer el origen y el tipo de sobretensiones que se presentan en el sistema a ser analizado, para una selección adecuada de los aislamientos y de los medios de protección,
- Determinar la distribución estadística de aquellas sobretensiones que serian empleadas en la selección de los aislamientos.

En los siguientes apartados se presenta una clasificación de las sobretensiones atendiendo a las causas y las características más importantes de cada tipo.

## **2.2 Naturaleza y Clasificación de las Sobretensiones**

Existen muchas causas por las que se pueden originar sobretensiones en una red eléctrica, por esta razón su estudio se realiza de acuerdo a su origen, y a la forma de onda y tiempo de duración. Conforme a estos criterios, se puede hacer dos clasificaciones de las sobretensiones:

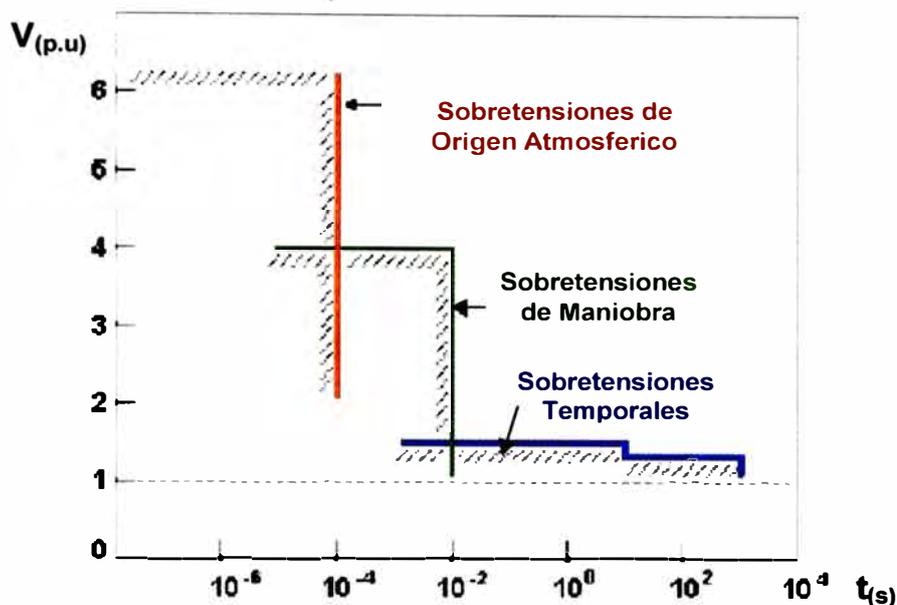
Una clasificación de las sobretensiones según un texto de la materia [5] se basa en el origen, esta es una clasificación que no esta normada pero da una idea de cómo se puede clasificarlas conociendo el origen de la causa que las provocan, que pueden ser interna o externa a la red. Las sobretensiones de origen externo, es decir debidas a causas ajenas al sistema, son originadas principalmente por el impacto de un rayo y son conocidas también como sobretensiones atmosféricas. Las sobretensiones de origen interno son causadas en el propio sistema y se dividen en sobretensiones temporales y de maniobra.

Las sobretensiones de maniobra son causadas por operaciones de cierre y apertura de interruptores o seccionadores, lo que en general provoca un proceso transitorio que puede terminar originando no solo sobretensiones sino también sobreintensidades.

En la Fig. 2.1 se observa esta clasificación de sobretensiones, así como la duración  $t_{(s)}$  y el orden de magnitud  $V_{(p,u)}$  que puede alcanzar el valor de cresta.

La otra clasificación y más completa de las sobretensiones según la norma IEC 60071 se basa en la forma de onda y tiempo de duración normalizada, así tenemos la siguiente clasificación:

- Tensiones continuas
- Sobretensiones Temporales
- Sobretensiones de Frente lento
- Sobretensiones de Frente Rápido
- Sobretensiones de Frente muy Rápido



**Fig. 2.1** Clasificación de Sobretensiones

A continuación se hace una descripción de las sobretensiones en función de su tiempo de duración y forma de onda, en la que se incluye y analiza la naturaleza y origen, en el Anexo A se muestra un resumen de las sobretensiones mencionadas.

### 2.2.1 Tensiones Continuas

Son tensiones que se originan bajo condiciones normales de operación, su frecuencia es igual o próxima a la frecuencia de operación del sistema (50 o 60 Hz) y al ser permanentes su duración puede ser el tiempo de vida del equipo.

En la práctica la tensión a frecuencia industrial puede variar en el tiempo y ser diferente de un punto a otro del sistema., sin embargo para propósitos de diseño y coordinación de aislamiento, la tensión representativa a frecuencia industrial será considerada como constante e igual a la tensión máxima del sistema ( $U_s$ ), que a su vez en niveles de alta tensión corresponde a la tensión máxima de los equipos ( $U_m$ ).

### 2.2.2 Sobretensiones Temporales

Son sobretensiones de larga duración (desde 20ms hasta varios segundos), poco amortiguadas y de frecuencia igual o similar a la de operación. Para propósitos de la coordinación de aislamiento, se considera que la sobretensión temporal representativa tiene la forma de la tensión normalizada a frecuencia industrial de corta duración (50 o 60 Hz, 60s).

Las sobretensiones temporales son caracterizadas por su amplitud, su forma de onda y su duración. Todos los parámetros dependen del origen de las sobretensiones y sus

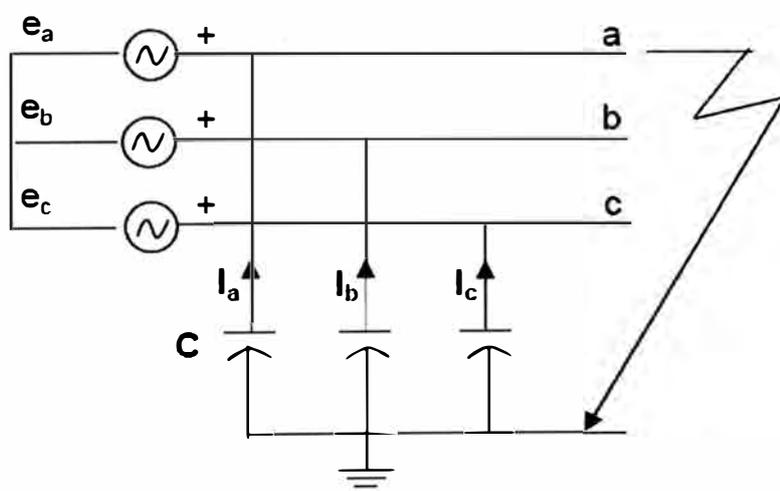
amplitudes y sus formas de onda pueden cambiar inclusive, mientras exista la sobretensión.

Estas sobretensiones suelen ser de origen interno y pueden ser causadas por fallas a tierra, pérdidas de carga, resonancias armónicas, ferorresonancias o por una combinación de dos o más de estas causas. A continuación se expone varias causas y fenómenos que provocan este tipo de sobretensiones.

#### a) Fallas a tierra:

Son una de las causas mas frecuentes de sobretensiones temporales. Cuando se produce una falla con contacto de una o dos fases a tierra, se origina inicialmente un transitorio que da como resultado una sobretensión a una frecuencia distinta a la de operación del sistema.

Para el estudio de las sobretensiones temporales causadas por fallas, en general es suficiente tratar solo el caso de falla monofásica, pues es el que produce normalmente mayores sobretensiones. Una falla monofásica a tierra origina sobretensiones fase-tierra en las fases sanas, pero no origina sobretensiones temporales entre fases o a través del aislamiento longitudinal. La Fig.2.2 muestra un ejemplo de falla a tierra en una red con el neutro aislado.



**Fig. 2.2** Cortocircuito fase-tierra en una red con neutro aislado

La amplitud de las sobretensiones generadas depende de la conexión a tierra del neutro en el sistema y de la ubicación de la falla, es así que en sistemas con el neutro conectado a tierra las amplitudes de las sobretensiones son menores.

Para determinar el valor de este tipo de sobretensiones se define el factor de falla a tierra ( $k$ ), como la relación entre la tensión máxima entre fase y tierra en una fase sana durante una falla a tierra y la tensión entre fase y tierra en el punto de falla pero en

ausencia de falla. El factor de falla a tierra depende a su vez de las características del sistema y sobretodo del tipo de conexión a tierra del neutro. En la Tabla N° 2.1 se presenta valores representativos de este factor en función de la puesta a tierra en la red donde se origina la falla.

En sistemas de configuración normal, la amplitud de la sobretensión representativa se debe suponer igual a su valor máximo.

#### **b) Pérdidas de carga:**

La desconexión brusca de cargas importantes puede ser producida por una operación de disparo de los interruptores, por errores humanos, o por condiciones de sobretensiones. La consecuencia de una pérdida de carga es un aumento en las tensiones de la red, debido a una menor caída de tensión en las impedancias de los equipos involucrados. Una pérdida de carga puede dar lugar a sobretensiones tanto entre fases y tierra como longitudinales.

**Tabla N° 2.1** Valores representativos del factor de falla a tierra

<b>Conexión del neutro</b>	<b>k</b>
Neutro rígido a tierra	1,4
Neutro no rígido a tierra	1,7
Neutro aislado	1,9

Las sobretensiones temporales causadas por una pérdida de carga dependen de la carga desconectada, de la configuración de la red después de la desconexión y de las características de las fuentes de generación tales como potencia de cortocircuito de la subestación, velocidad y regulación de tensión de los generadores, etc.

El incremento de tensión fase –tierra de las tres fases es idéntico, y por tanto, las mismas sobretensiones relativas ocurren entre fase y tierra, y entre fases. Este aumento puede ser especialmente importante en el caso de rechazo de carga en el extremo remoto de una línea larga (efecto Ferranti) y puede afectar principalmente los equipos de la subestación conectados en el lado de la fuente en el extremo remoto del interruptor abierto.

En base a experiencias en aplicaciones prácticas, se han definido varios valores para las sobretensiones temporales debido a rechazos de carga, tales como:

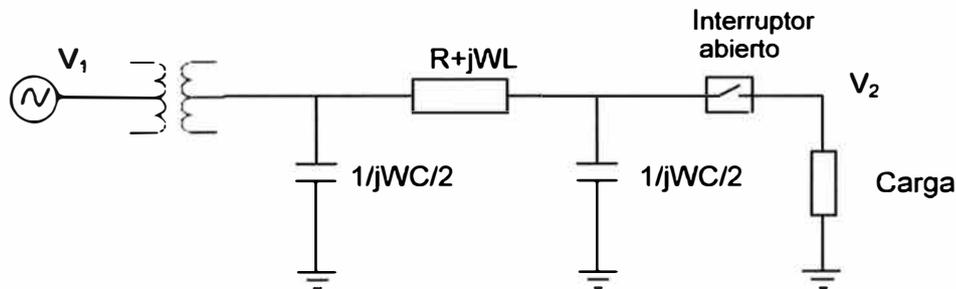
- En caso de un rechazo de carga total en sistemas moderadamente grandes las sobretensiones fase a tierra son usualmente menores a 1,2 p.u., mientras que la duración de la sobretensión dependerá de la operación del equipo de control de tensión y puede llegar a varios minutos.

- En sistemas grandes, después de un rechazo de carga total, las sobretensiones de fase a tierra pueden alcanzar valores de 1,5 p.u. o aun más cuando hay efecto Ferranti o resonancia, su duración puede ser del orden de varios segundos.

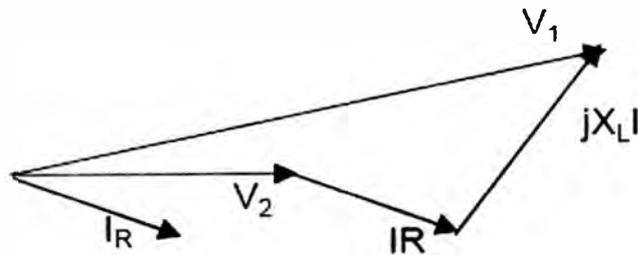
En las figuras 2.3, 2.4 y 2.5 se muestra un ejemplo acerca del incremento de tensión en el extremo sin carga de una línea de transmisión.

### c) Resonancia y Ferrorresonancia:

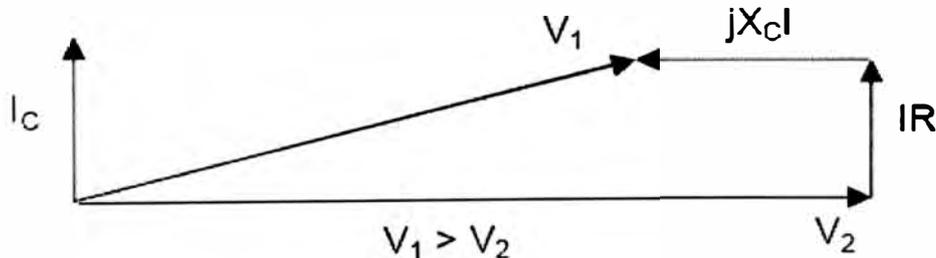
Se pueden producir sobretensiones temporales por resonancia cuando se conectan o desconectan cargas en circuitos que incorporan elementos capacitivos (líneas, cables, líneas compensadas en serie) ó elementos inductivos (transformadores, bobinas de reactancia paralelo) que tienen características de magnetización no lineales.



**Fig. 2.3** Rechazo de carga en un sistema radial



**Fig. 2.4** Diagrama fasorial antes de la pérdida de carga



**Fig. 2.5** Diagrama fasorial luego de la pérdida de carga

La ferorresonancia es un fenómeno de resonancia no lineal, es decir cuando se tienen por ejemplo una inductancia variable lo cual ocasionara que se puedan presentar varios puntos de resonancia y por ende una mayor probabilidad de ocurrencia. Este tipo de

fenómeno puede afectar a las redes eléctricas puesto que provoca la presencia de armónicos anormales y sobretensiones transitorias o permanentes que ponen en peligro al material eléctrico

La ferresonancia aparece, principalmente con la conexión o desconexión de transformadores o cargas, aparición o despeje de fallas y trabajos bajo tensión, que son eventos en los que existe la posibilidad de una transición brusca de un estado estable normal (sinusoidal a frecuencia de red) a otro estado estable ferresonante caracterizado por fuertes sobretensiones y por importantes tasas de armónicos peligrosos para los equipos.

Las sobretensiones temporales debido a fenómenos debidas a los fenómenos de resonancia y ferresonancia pueden alcanzar valores extremadamente altos, los cuales deben ser prevenidos o limitados. Por esta razón no deben ser considerados como base para la selección de la tensión asignada de los pararrayos o para el diseño del aislamiento.

Las medidas para limitar sobretensiones temporales debido a resonancia y ferresonancia incluyen el desintonizar al sistema de la frecuencia de resonancia o cambiar la configuración del sistema.

### 2.2.3 Sobretensiones de Frente Lento

Son sobretensiones de naturaleza oscilatoria y de corta duración, con frentes de onda y tiempos de cola que van desde varios cientos de microsegundos hasta varios milisegundos y cuya frecuencia varia entre 2 y 20 kHz. La forma de onda de tensión representativa es el impulso tipo maniobra normalizado (tiempo a la cresta 250  $\mu\text{s}$  y tiempo al valor mitad, medido en la cola, 2500  $\mu\text{s}$ ). La figura 2.6 muestra la forma de onda típica de una sobretension de frente lento.

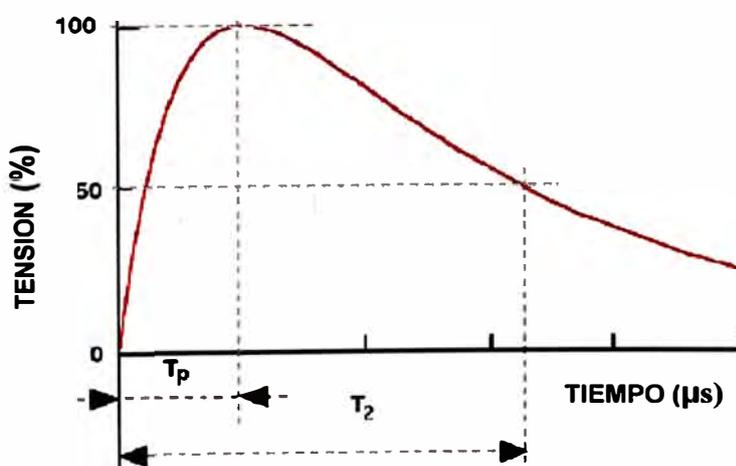


Fig. 2.6 Forma de onda de sobretension de frente lento

Estas sobretensiones son originadas principalmente por la actuación de interruptores de potencia en las subestaciones, aunque también puede ser causada por la aparición de fallas y su eliminación, o por descargas atmosféricas en puntos alejados.

El valor máximo de una sobretensión de frente lento causado por una maniobra de energización depende del instante en el que se realiza esta maniobra. La tensión representativa se caracteriza por una forma de onda de tensión y una amplitud que puede ser, bien un valor de cresta previsto o una distribución de probabilidad de valores de cresta.

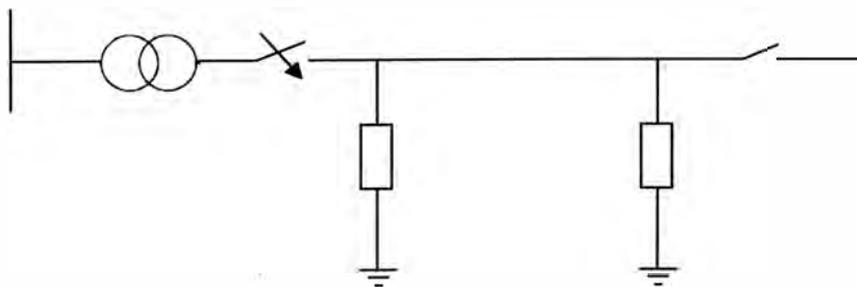
El valor asumido máximo de la sobretensión representativa es igual al valor de truncamiento de las sobretensiones o igual al nivel de protección al impulso de maniobra del pararrayos, cualquiera sea el valor mas bajo.

A continuación se describen algunas de las causas que generan sobretensiones de frente lento, como las originadas por maniobras con líneas o cables, con la aparición y eliminación de fallas y por maniobras con corrientes inductivas y capacitivas.

#### a) Conexión y reenganche de líneas:

El recierre o la energización trifásica de una línea producen sobretensiones de maniobra en las tres fases de la línea. Por lo tanto, cada operación de maniobra produce tres sobretensiones fases-tierra y correspondientemente, tres sobretensiones fase-fase.

**Energización o Cierre:** al energizar una línea de transmisión en vacío la sobretensión se origina por la discrepancia de polos en el cierre del interruptor, esto es la no simultaneidad del cierre de sus contactos. Así, luego de haber cerrado la primera fase se generan ondas de tensión en las otras dos fases, producto de su acoplamiento. La figura 2.7 ilustra la maniobra de energización de una línea de transmisión en vacío.

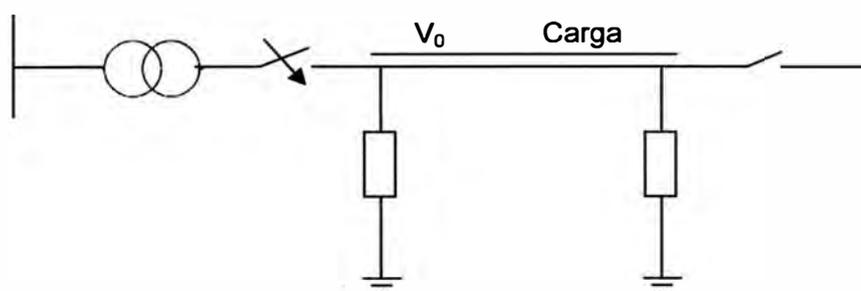


**Fig. 2.7** Energización de una línea en vacío

**Recierre:** el recierre de una línea de transmisión tiene por objeto despejar fallas transitorias, y por lo tanto tiene involucrado los procesos de apertura y cierre de los interruptores de línea. Considerando el caso de que el interruptor tenga que desconectar una línea en vacío, debido a la naturaleza capacitiva del circuito al momento de interrumpir

la corriente por su paso por cero, la tensión estará pasando por su valor máximo, lo cual provoca que las tres fases queden con una tensión aproximadamente igual al valor pico de la tensión fase-tierra de la fuente de alimentación. Por consiguiente, como producto de esta maniobra se genera la denominada “carga atrapada”, que permanecerá en la línea por largos periodos de tiempo, en el orden de minutos. Posterior a la apertura se ejecuta el recierre, que es en donde se pueden generar altas sobretensiones. La figura 2.8 ilustra el recierre de una línea con carga atrapada.

En recierres trifásicos las sobretensiones son mayores debido a la carga atrapada en la línea, mientras que en recierres monofásicos la magnitud de las sobretensiones es incluso menor que las debidas a energización, salvo en casos en los que efectos como resonancia o efecto Ferranti sean muy significativos. Cabe notar que en sistemas de extra alta tensión es común el uso de interruptores con recierre monofásico.



**Fig. 2.8** Recierre (Energización de una línea con carga residual).

### b) Aparición y eliminación de fallas:

Tanto la aparición de una falla como su despeje pueden generar sobretensiones de frente lento. Con la aparición de una falla se produce un cambio en las condiciones de operación al pasar de la tensión de servicio a la sobretensión temporal en las fases sanas, mientras que con la eliminación o despeje de la falla se provoca el retorno desde un valor próximo a cero a la tensión de servicio de la fase con defecto.

Una estimación conservadora de los valores máximos previstos de la sobretensión representativa  $U_{et}$  sería la siguiente:

- Aparición de una falla:

$$U_{et} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (2k - 1) . U_s \quad (2.1)$$

- Eliminación de una falla:

$$U_{et} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} . U_s \quad (2.2)$$

Donde:

$k$  : factor de falla a tierra

$U_{et}$ : sobretensión representativa

$U_s$  : tensión máxima del sistema

En el rango I, las sobretensiones causadas por fallas a tierra deberán ser consideradas para sistemas con neutros de transformadores aislados o con tierra resonante en los cuales el factor de falla a tierra es aproximadamente igual a  $\sqrt{3}$ . Para estos sistemas la coordinación de aislamiento puede estar basada en la sobretensión máxima asumida y no es necesario considerar la probabilidad de ocurrencia de amplitudes de sobretensión.

En el rango II, cuando las sobretensiones debidas a la energización de la línea o re-energización son limitadas a valores por debajo de 2 p.u., las sobretensiones de despeje de falla y falla requieren un cuidadoso examen si ellas no son limitadas al mismo valor.

#### **c) Pérdida de carga:**

Un evento de rechazo de carga involucra dos tipos de sobretensiones. Una sobretensión transitoria que se genera en los primeros ciclos subsecuentes a la apertura del interruptor que desconecta la carga rechazada, y una sobretensión sostenida que aparece posterior al transitorio.

Las sobretensiones de frente lento originadas por una pérdida de carga solo tienen importancia en sistemas del rango II, en los que las sobretensiones de conexión y reenganche están controladas por debajo de 2 p.u.

**d) Maniobras con corrientes inductivas y capacitivas:** La maniobra de corrientes inductivas y capacitivas puede dar lugar a sobretensiones, las cuales pueden requerir atención. En particular, se deben analizar las siguientes maniobras de operación:

- Interrupción de la corriente de arranque de motores
- Interrupción de corrientes inductivas, por ejemplo cuando se interrumpe la corriente de magnetización de un transformador o cuando se desconecta un reactor.
- Maniobra y operación de hornos de arco y sus transformadores, los cuales pueden llevar a cortes de corriente.
- Maniobra de cables sin carga y de bancos de capacitares.
- Interrupción de corrientes por fusible de alta tensión

Los re-encendidos de interruptores debidos a la extinción de corrientes capacitivas (desconexión de líneas sin carga, cables o bancos de capacitores) pueden generar sobretensiones peligrosas y se deben usar interruptores libres de re-encendido.

Par evitar la presencia de sobretensiones tanto de origen capacitivo como inductivo se deberá seleccionar interruptores adecuados, con el fin de evitar la reignición del arco, que es la peor condición para la generación de sobretensiones de esta naturaleza.

#### 2.2.4 Sobretensiones de Frente Rápido

Son sobretensiones de duración muy corta, varios microsegundos, y llevan asociados picos de tensión varias veces superior al valor máximo de la tensión de operación de la red.

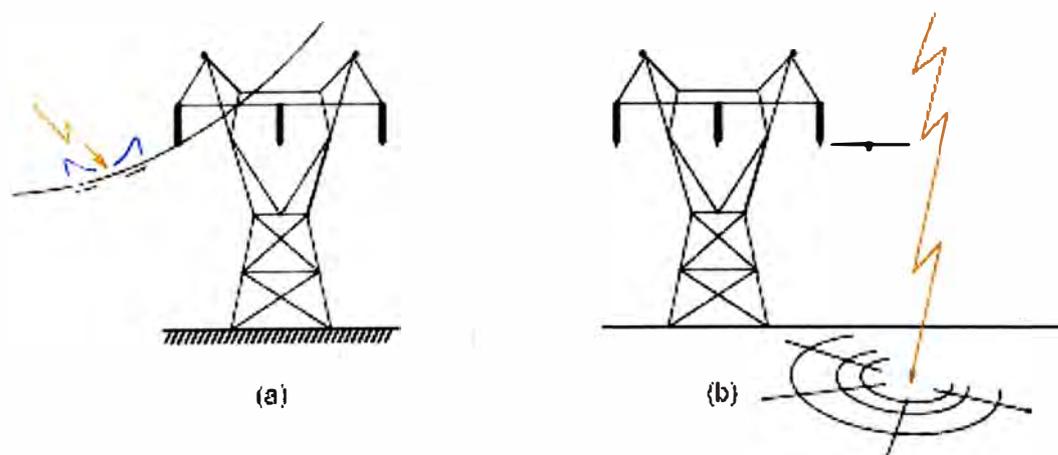
Presenta frentes de onda comprendidos entre 0,1 y 20  $\mu$ s, y tiempos de cola que llegan a los 300  $\mu$ s.

La causa principal y más frecuente de sobretensiones de frente rápido en redes de potencia es el rayo, aunque también se pueden originar como consecuencia de maniobras en las que las distancias entre los equipos y el interruptor son muy cortas.

Las sobretensiones de origen atmosférico pueden ser originadas por el impacto directo de rayos en líneas eléctricas y subestaciones, o inducidas por rayos que impactan en las proximidades de una línea o una subestación.

##### a) Descargas atmosféricas sobre líneas aéreas:

Las sobretensiones atmosféricas son causadas por descargas directas en los conductores de fase o por flameos inversos, o son inducidas por descargas atmosféricas a tierra cerca de la línea. Las sobretensiones atmosféricas inducidas, generalmente causan sobretensiones por debajo de 400 kV en la línea aérea y son, por lo tanto, de importancia únicamente para sistemas con tensión mas baja. La figura 2.9 a) y b) ilustra una descarga atmosférica directa y una inducida.



**Fig. 2.9** a) Descarga atmosférica directa, b) Descarga atmosférica inducida

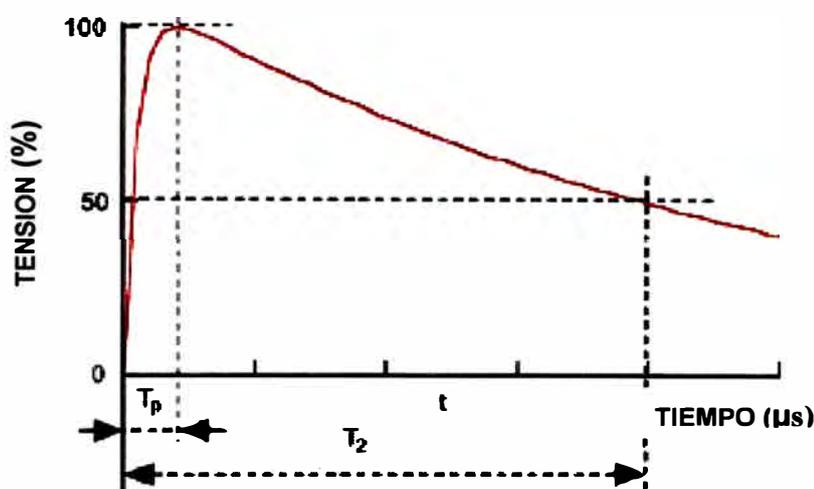
La forma de tensión representativa de la sobretensión atmosférica es el impulso atmosférico estándar (1,2/50  $\mu$ s). La figura 2.10 muestra la forma de onda típica de una

sobretensión de frente rápido.

### b) Descargas atmosféricas sobre subestaciones:

Las sobretensiones atmosféricas en subestaciones y sus valores de ocurrencia dependen de:

- El desempeño ante descargas atmosféricas de las líneas aéreas conectadas a la subestación.
- La disposición de la subestación, dimensiones físicas y en particular el número de líneas conectadas a tierra.
- El valor instantáneo de la tensión de operación (en el momento de la descarga).



**Fig. 2.10** Forma de onda de sobretensión tipo rayo

La severidad de las sobretensiones atmosféricas para los equipos de la subestación esta determinada por la combinación de los tres factores anteriores y se requieren varias etapas para asegurar una adecuada protección. Las amplitudes de la sobretensiones (sin limitación de pararrayos) son usualmente muy altas para basar la coordinación de asilamiento en estos valores.

Para subestaciones protegidas por pararrayos, se debe tomar en cuenta la pendiente de la onda de sobretensión que llega desde la línea y la distancia de separación entre el pararrayos y el equipo a proteger.

La pendiente de la onda de sobretensión que llega a ala subestación se reduce principalmente por el efecto corona en la línea. Además, si el rayo cae a cierta distancia de la subestación, se consigue tener una sobretensión de menor amplitud en ella.

### c) Operaciones de maniobra y fallas:

Las sobretensiones de frente rápido por maniobra ocurren principalmente cuando se conectan o desconectan equipos en subestaciones o por descargas disruptivas en el

aislamiento externo, esto a su vez provoca un fuerte estrés sobre el aislamiento interno cercano.

Aunque en general se trata de fenómenos oscilatorios, para propósitos de coordinación de aislamiento puede considerarse que la forma de la sobretensión representativa corresponde al impulso atmosférico estándar (1,2/50  $\mu$ s).

El máximo pico de sobretensión depende del tipo y comportamiento del equipo de maniobra. Como los valores pico de sobretensión son usualmente más pequeños que los debidos a descargas atmosféricas, su importancia es restringida a casos especiales.

Por lo tanto, es técnicamente justificado caracterizar la amplitud de la sobretensión representativa por el máximo de los siguientes valores (en p.u. de  $\sqrt{2} * U_s / \sqrt{3}$ ):

- Maniobra de interruptores sin re-encendido: 2 p.u.
- Maniobra de interruptores con re-encendido: 3 p.u
- Maniobra de seccionador: 3 p.u

Como es altamente improbable la ocurrencia de sobretensiones de maniobra de frente rápido en mas de una fase, se puede asumir que no existen sobretensiones fase-fase más altas que las sobretensiones fase-tierra.

### **2.2.5 Sobretensiones de Frente muy Rápido**

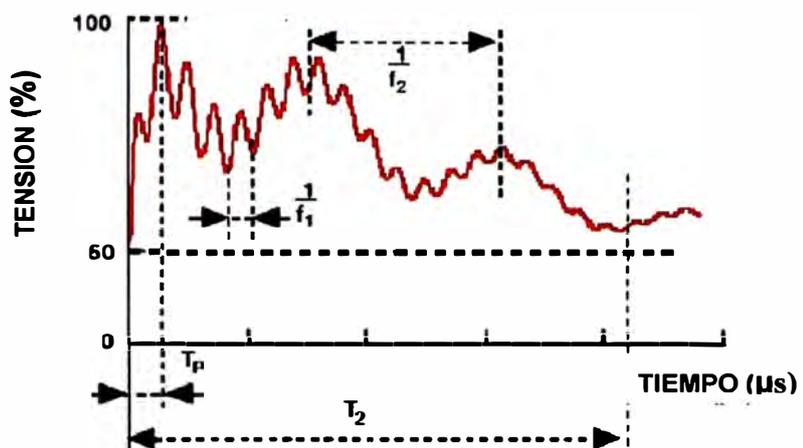
Las sobretensiones de frente muy rápido se originan por la operación de los seccionadores o por fallas internas en las subestaciones blindadas de gas SF<sub>6</sub> (también conocidas como GIS, Gas Insulated Substations), debidas al rápido flameo del gas y a la posterior propagación poco amortiguada en el interior de la GIS.

La forma de onda de este tipo de sobretensión se caracteriza por el rápido incremento en su amplitud, tanto así que el tiempo que tarda en alcanzar su valor pico o frente de onda es incluso inferior a 1  $\mu$ s.

Para operaciones de seccionadores este frente es seguido generalmente por una oscilación con frecuencias por encima de 1 MHz. La duración de las sobretensiones de frente muy rápido es menor de 3ms, pero estas pueden ocurrir varias veces. Puede estimarse que es posible limitar las amplitudes máximas a 2,5 p.u.

En GIS donde las sobretensiones presenten oscilaciones de entre 0,2 MHz a 2 MHz y con amplitudes de 1,5 veces superiores a la tensión de descarga disruptiva, se recomienda proteger el equipo con pararrayos.

La figura 2.11 muestra la forma de onda característica de una sobretensión de frente muy rápido, donde se aprecia los criterios anteriormente mencionados.



**Fig. 2.11** Forma de onda de sobretensión de frente muy rápido

## **CAPITULO III**

### **PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES – PARARRAYOS**

#### **3.1 Introducción**

Una red segura exige una protección extensiva del equipo eléctrico contra sobretensiones, los elementos para protección contra sobretensiones tienen como propósito proteger a los equipos eléctricos contra tensiones transitorias, a través de la descarga a tierra de las corrientes de impulso, permitiendo la circulación de la corriente de frecuencia industrial posterior al transitorio (corriente subsiguiente) y con la capacidad de repetir su función. Es decir, el dispositivo de protección debe cumplir con las siguientes funciones:

- Comportarse como un aislador mientras la tensión aplicada no supere un valor determinado, superior a la tensión máxima del sistema.
- Comportarse como un conductor para descargar a tierra la onda de corriente producida por la sobretensión.
- Interrumpir la conducción de la corriente a tierra una vez que la sobretension ha desaparecido del sistema y se ha restablecido la tensión nominal.
- No debe operar con sobretensiones temporales a frecuencia industrial

Las protecciones contra sobretensiones pueden conseguirse básicamente de dos formas distintas:

- Evitando la sobretensión producida por las descargas eléctricas de los rayos en el punto de origen, mediante la instalación de cables de guarda.
- Limitando la sobretensión cerca del equipo eléctrico mediante la instalación de pararrayos próximos a la subestación a proteger

En este capítulo se estudiara a los pararrayos como protección ante tensiones y sobretensiones como: tensión normal de funcionamiento (tensión mas elevada del sistema), sobretensiones temporales (TOV), sobretensiones de frente lento (sobretensiones por maniobra) y sobretensiones de frente rápido (sobretensiones atmosféricas).

Los pararrayos son dispositivos cuya misión es limitar las sobretensiones en los sistemas en los que están instalados, protegiendo al resto de la subestación.

En la figura 3.1 se muestra de manera general cada una de estas sobretensiones con sus respectivos rangos de duración y amplitud en p.u. y la relación que debe existir entre ellas con las tensiones limitadas por el pararrayos y las tensiones soportadas por el aislamiento del equipo [3].

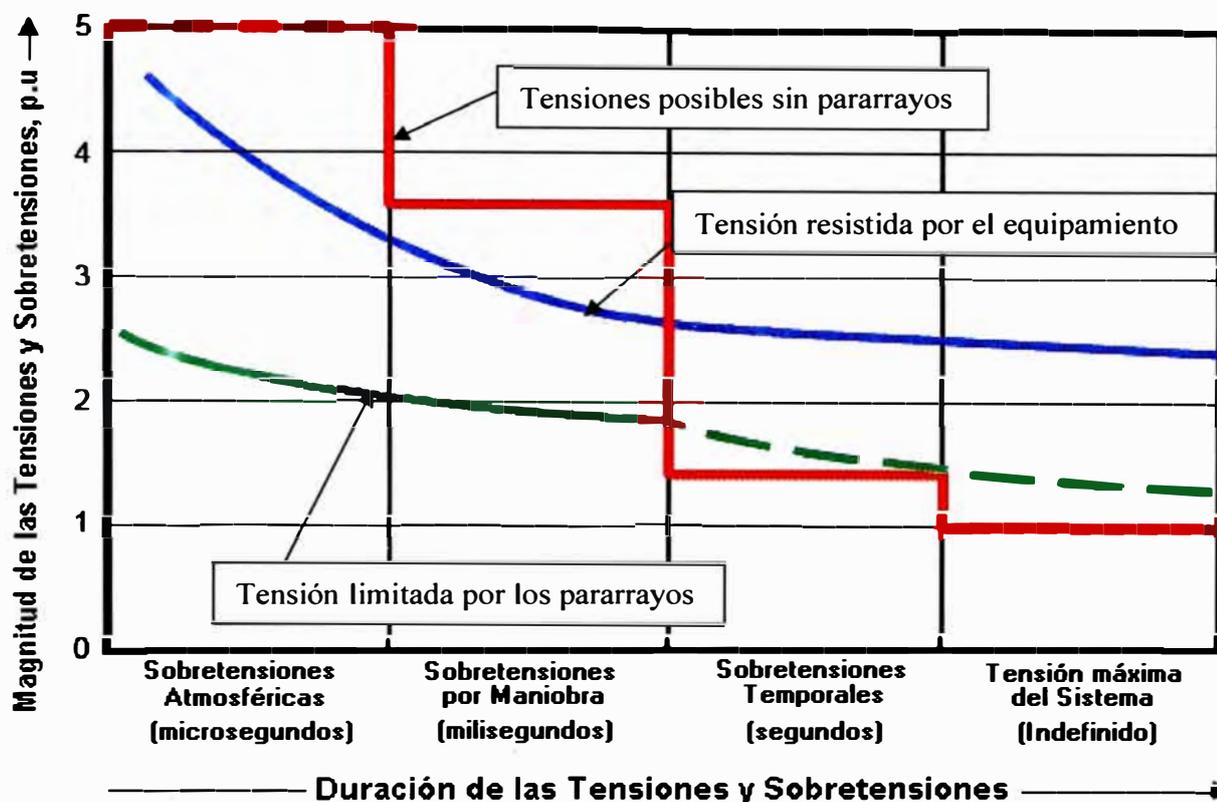


Fig. 3.1 Tensiones y sobretensiones limitadas por el pararrayos

Durante la operación normal del sistema, a través de los pararrayos solo circula una pequeña corriente de fuga (del orden de unos pocos mA). Sin embargo, cuando aparece una sobertensión en el sistema, los pararrayos derivan a tierra la sobreintensidad asociada, limitando la tensión a valores que pueda soportar el equipamiento. La correcta selección de pararrayos es fundamental para limitar la tensión en el equipamiento que deben proteger.

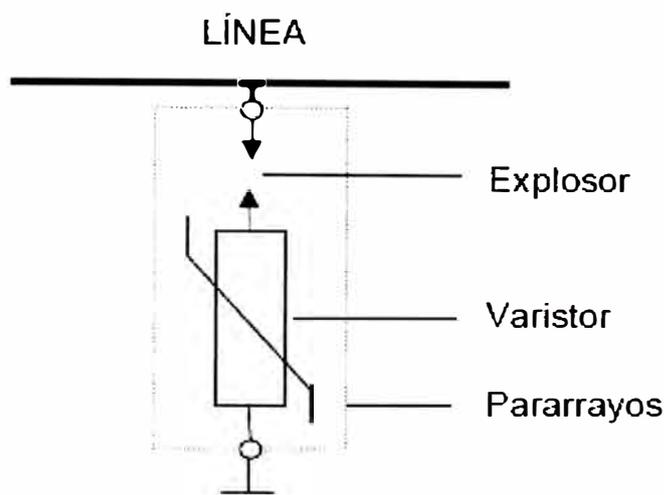
### 3.2 Clases de Pararrayos

Existen dos tipos de elementos de protección estandarizados de acuerdo a la norma IEC 60071-2, sin decir que estos sean la única alternativa. Estos son pararrayos de resistencia no lineal con explosores en serie y pararrayos de óxido metálico sin explosores.

Inicialmente los pararrayos se fabricaban con explosores y resistencias no lineales de carburo de silicio (SiC), pero en los últimos años han sido desplazados por pararrayos construidos con resistencias no lineales de óxido de zinc (ZnO) sin explosores. A continuación veremos cada tipo de Pararrayos:

### 3.2.1 Pararrayos de carburo de silicio (SiC) con explosores

Los dispositivos mas comúnmente utilizados para proteger la subestación contra sobretensiones eran los descargadores o pararrayos con explosores. Estos consisten en la asociación en serie de explosores y resistencias variables (varistores), como muestra la figura 3.2.



**Fig. 3.2** Esquema de un varistor

En condiciones normales de operación, los varistores están aislados del circuito por el explosor, siendo introducidos cuando se produce el cebado del explosor como consecuencia de una sobertensión. El material mas utilizado tradicionalmente como varistor ha sido el carburo de silicio (SiC).

La tensión de cebado es aquella que causa el cebado de los electrodos del pararrayos (formación del arco en los explosores). La magnitud de esta tensión de cebado depende de la forma de onda de la sobretensión, así según el tipo de onda considerado se definen diferentes tensiones de cebado: tensiones de cebado al frente de onda, tensión de cebado al 100 por 100 de la onda de choque, tensión de cebado al 50 por 100 de la onda de choque, tensión máxima de cebado en la onda de choque por maniobra, tensión alterna de cebado, etc.

Si el varistor de SiC estuviera permanentemente en paralelo con el resto del sistema (es decir sin explosores), la corriente residual que circularía por el varistor por estar conectado a la red seria tan elevada que lo destruiría. Por tanto los explosores tienen una doble función:

- Aislar la resistencia variable de la tensión del sistema, de forma que por el pararrayo no circule ninguna corriente residual en condiciones normales de explotación.
- En caso de producirse una sobertensión en el sistema, el explosor debe reaccionar

dejando el varistor en paralelo con la red, derivando la sobreintensidad a tierra por medio del arco y de las resistencias variables, y extinguir la corriente residual originada por la tensión de servicio después del proceso de derivación.

La complejidad de fabricación y funcionamiento de los pararrayos de SiC debida a la presencia de explosores y las peores características de SiC hacen que actualmente las empresas eléctricas ya no instalen este tipo de pararrayos, aunque todavía permanece instalada una gran cantidad de ellos en el actual parque eléctrico.

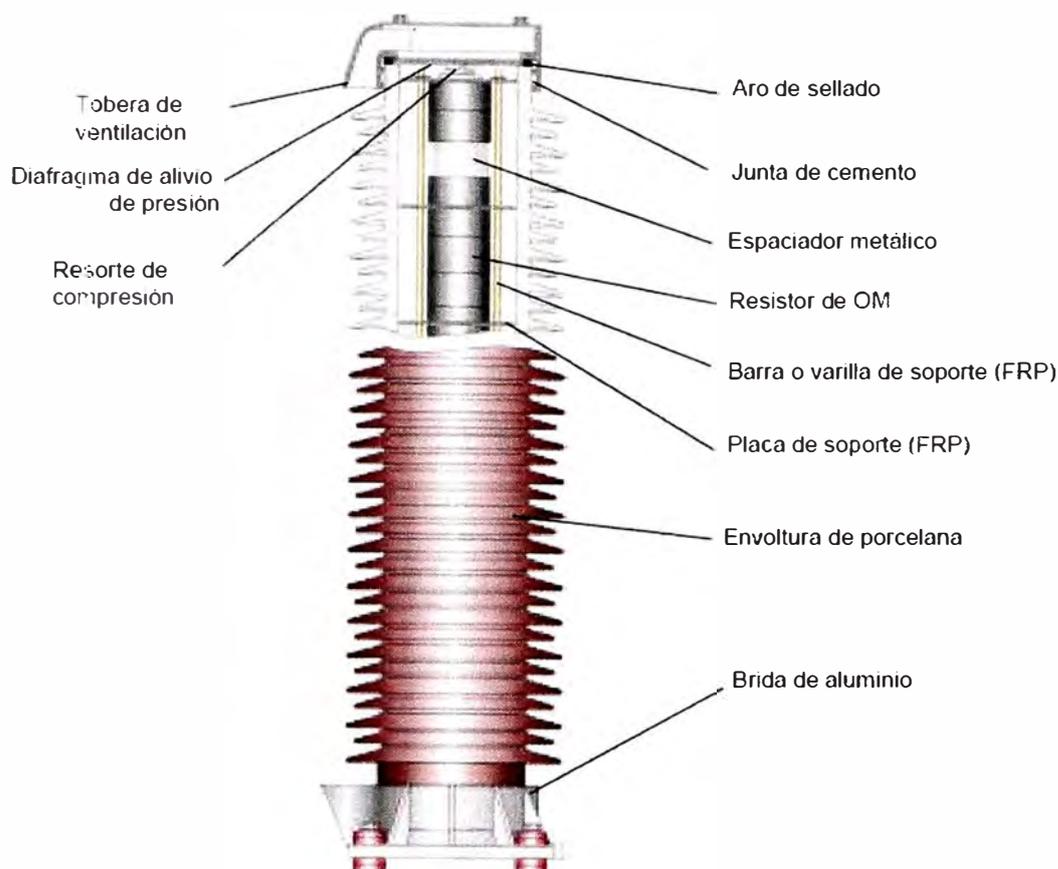
### **3.2.2 Pararrayos de óxido de zinc (ZnO) sin explosores**

A mediados de los ochenta aparecen en el mercado nuevos materiales para una amplia gama de aplicaciones eléctricas. Dentro de este grupo destacan los varistores de óxido de zinc (ZnO), semiconductores cuya propiedad más relevante es la fuerte no-linealidad de su curva característica (tensión-intensidad), que los hace muy útiles en la tecnología de los pararrayos.

La tensión asignada de estos pararrayos se selecciona de acuerdo con las sobretensiones temporales encontradas durante fallas a tierra, pero también se deben tener en cuenta la duración de la sobertensión, la tensión máxima del sistema y el grado de contaminación del sitio para así especificar la distancia de fuga requerida y evitar alteraciones en la distribución de tensiones en la superficie de la porcelana, las cuales pueden producir sobrecalentamientos en los varistores de ZnO por hacerse más conductores al aumentarse el gradiente de tensión. En la figura 3.3 se muestra un esquema típico interno de un pararrayo de ZnO.

Durante las sobretensiones temporales producidas especialmente en las fases sanas cuando existe una falla a tierra, aumentará la corriente de fuga en los varistores de los pararrayos de ZnO, lo cual va a determinar su capacidad térmica. Por lo tanto, es necesario especificar la duración total del cortocircuito, la cual depende del tiempo de operación de los relés y del tiempo de apertura de los interruptores. Otro fenómeno que condiciona la capacidad térmica de los pararrayos de ZnO es la capacidad de descarga de las líneas de transmisión.

Las características de los varistores de ZnO se alteran con el tiempo y por lo tanto, es necesario efectuar mediciones periódicas de la corriente de fuga y reemplazar el pararrayos cuando llegue a valores que pongan en peligro su capacidad térmica; estos valores serán fijados por el fabricante.



**Fig. 3.3** Esquema de corte típico de un pararrayo [3].

### 3.3 Características de los Pararrayos

Las características necesarias para definir y seleccionar pararrayos de resistencia variable sin explosores para un sistema eléctrico son:

- Tensión nominal o asignada:  $U_r$
- Tensión de funcionamiento continuo:  $U_c$
- Capacidad para soportar sobretensiones temporales:  $TOV_c$
- Corriente nominal de descarga:  $I_n$
- Clase de descarga de línea
- Tensión residual o de descarga
- Clase del limitador de presión
- Línea de fuga
- Dispositivo de desconexión
- Frecuencia asignada

#### 3.3.1 Tensión nominal o asignada: $U_r$

La tensión asignada o nominal ( $U_r$ ) de un pararrayos (rated voltaje) es el valor eficaz máximo de tensión a frecuencia industrial admisible entre sus bornes (terminales) para el

cual esta previsto un funcionamiento correcto en condiciones de sobretensiones temporales.

La tensión asignada se utiliza como un parámetro de referencia para la especificación de las características de funcionamiento. Según los ensayos, el valor de la tensión nominal del pararrayos corresponde a un valor normalizado inferior al obtenido (normalmente el inmediato inferior) para garantizar el correcto funcionamiento del pararrayos. Los valores normalizados de la tensión asignada de los pararrayos (en kV eficaces) son establecidos por la IEC 60099-4, como se muestra en la Tabla N° 3.1.

**Tabla N° 3.1** Tensiones asignadas de pararrayos [4]

Rango de tensiones asignadas (kV eficaces)	Pasos de incremento de la tensión asignada (kV eficaces)
3-30	1
30-54	3
54-96	6
96-288	12
288-396	18
396-756	24

### 3.3.2 Tensión de funcionamiento continuo: $U_c$

La tensión de funcionamiento continuo ( $U_c$ ) de un pararrayos (continuous operating voltage) es el valor máximo admisible de tensión eficaz a frecuencia industrial que puede aplicarse de forma permanente en los bornes de un pararrayos (según ensayos especificados en IEC 60099-4). Representa la tensión eficaz máxima que puede soportar el pararrayos entre sus terminales de forma permanente y corresponde a la tensión máxima que el pararrayos es capaz de soportar cuando esta trabajando en la zona de predescarga.

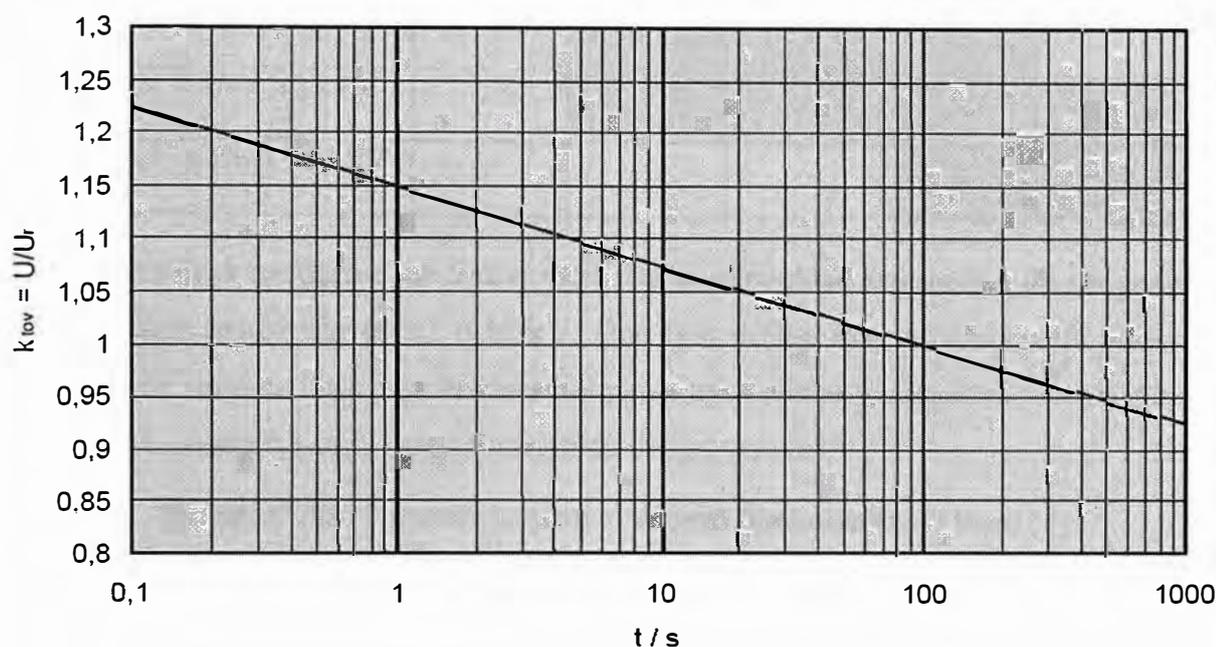
### 3.3.3 Capacidad para soportar sobretensiones temporales: $TOV_c$

La capacidad del pararrayos para soportar sobretensiones temporales  $TOV_c$  (temporary overvoltages capability) es el valor eficaz de la máxima sobretensión temporal a frecuencia industrial que es capaz de soportar entre sus terminales durante un tiempo determinado. Los fabricantes proporcionan graficas con la variación del  $TOV_c$  para distintos valores de tiempo, como referencia se suelen presentar los valores  $TOV_c$  para 1s y 10s. En la figura 3.4 se muestra una grafica de una curva típica de  $k_{toV}$  versus tiempo [3].

El valor de  $TOV_c$  para 10s suele ser algo superior al valor de la tensión asignada del pararrayos ( $U_r$ ), ya que  $U_r$  es la tensión a frecuencia industrial durante 10s usada para verificar la estabilidad después de aplicar los impulsos indicados en IEC 60099-4.

Por lo tanto, la tensión nominal del pararrayos ( $U_r$ ) será a lo sumo el valor de  $TOV_c$  para 10s:

$$U_r \leq TOV_c(10s) \quad (3.1)$$



**Fig. 3.4** Curva típica  $k_{tov}$  vs tiempo

### 3.3.4 Corriente nominal de descarga: $I_n$

En general, se denomina corriente de descarga a la onda de corriente que circula por el pararrayos cuando se encuentra en la zona de descarga o alta descarga. La corriente nominal de descarga ( $I_n$ ) de un pararrayos (nominal discharge current) es el valor de cresta del impulso de corriente tipo rayo (8/20  $\mu$ s) que se usa para designar el pararrayos. Los valores normalizados de corriente nominal de descarga son: 1.5 kA, 2.5 kA, 5 kA, 10 kA y 20 kA. En la Tabla N° 3.2 se presentan los valores normalizados en función de la tensión asignada del pararrayos.

### 3.3.5 Clase de descarga de línea

La norma IEC 60099-4 ha definido la clase de descarga de línea como el valor relacionado con la capacidad de absorción de energía de los pararrayos de 20 kA y 10 kA para la descarga de líneas de gran longitud.

Existen cinco clases de descarga de línea normalizadas: clases 1, 2 y 3 para los

pararrayos de 10 kA de corriente nominal, y clases 4 y 5 para las de 20 kA.

**Tabla N° 3.2** Valores de corriente nominal de descarga normalizados de Pararrayos

Rango de tensión asignada ( $U_r$ )	Corriente nominal de descarga				
	1.5 kA	2.5 kA	5 kA	10 kA	20 kA
$U_r < 3 \text{ kV}$	.	.	.		
$3 \text{ kV} \leq U_r \leq 29 \text{ kV}$		.	.	.	
$30 \text{ kV} \leq U_r \leq 132 \text{ kV}$		.	.	.	.
$144 \text{ kV} \leq U_r \leq 756 \text{ kV}$				.	.

La normativa no define de forma explícita la capacidad energética de un pararrayos como un valor expresado en kJ o kJ/kV, sino que define los parámetros de ensayo que determinan la clase de descarga de línea del pararrayos. Estos parámetros se muestran en la Tabla N° 3.3, donde  $U_r$  es la tensión asignada del pararrayos.

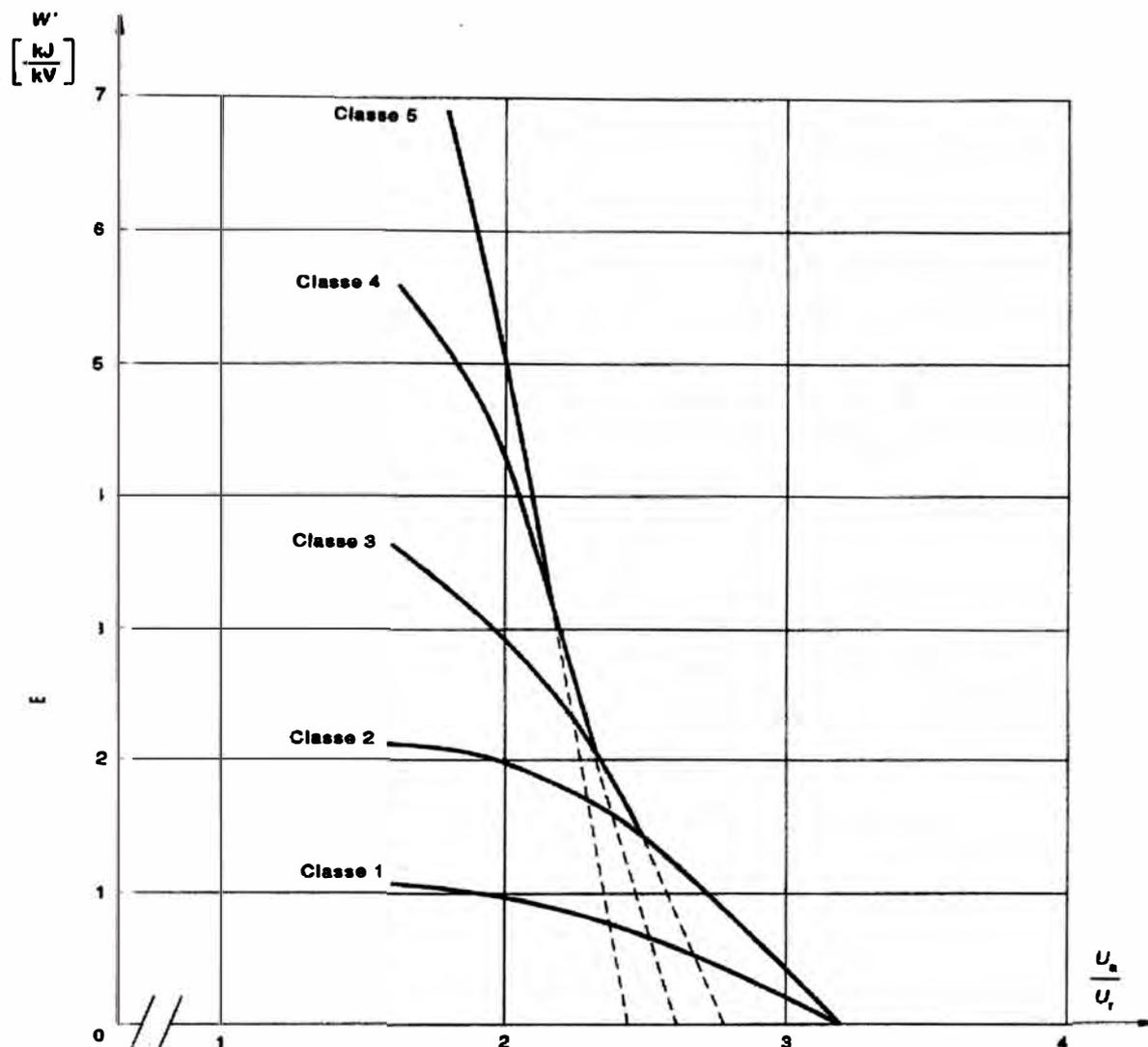
**Tabla N° 3.3** Parámetros para el ensayo de descarga de línea [5].

Corriente de descarga $I_n$	Clase de descarga de línea	Impedancia de onda de la línea $Z (\Omega)$	Duración convencional de la cresta $T (\mu\text{s})$	Tensión de carga $U_L$ (kV de tensión continua)
10 kA	1	$4.9 U_r$	2000	$3.2 U_r$
	2	$2.4 U_r$	2000	$3.2 U_r$
	3	$1.3 U_r$	2400	$2.8 U_r$
20 kA	4	$0.8 U_r$	2800	$2.8 U_r$
	5	$0.5 U_r$	3200	$2.4 U_r$

A partir de los parámetros de la Tabla N° 3.3 y de la tensión residual del pararrayos, es posible obtener la energía inyectada ( $W$ ) utilizando la siguiente ecuación:

$$W = U_{res} (U_L - U_{res}) \cdot \frac{1}{Z \cdot T} \quad (3.2)$$

La relación entre la energía absorbida por un pararrayos y la clase de descarga de línea con base en la relación entre el valor de la tensión residual al impulso de maniobra y la tensión asignada del pararrayos se presenta en la figura 3.5 [3].



**Fig. 3.5** Energía específica en kJ/kV con respecto a la razón de la tensión residual con la tensión asignada

### 3.3.6 Tensión residual o de descarga

La tensión residual ( $U_{res}$ ) de un pararrayos (residual voltaje, discharge voltaje) es el valor de cresta de la tensión que aparece entre bornes del pararrayos durante el paso de la corriente de descarga. Su valor depende de la forma de onda y la magnitud de la corriente de descarga. Las tensiones residuales se obtienen para impulsos de corriente tipo maniobra (30/60 $\mu$ s para pararrayos de 10 kA y 20 kA) y tipo rayo (8/20  $\mu$ s para todos los pararrayos, independiente de su corriente nominal).

Los valores de cresta de las corrientes para los ensayos de tensión residual vienen definidas en IEC 60099-4 y son valores mínimos que el fabricante debe presentar en función de la corriente nominal de descarga y clase de descarga de línea del pararrayos, como se muestra en la Tabla N° 3.4.

En función de las tensiones residuales de cada tipo de ensayo se definen los niveles de

proyección de los pararrayos:

- El nivel de protección a impulsos tipo maniobra de un pararrayos (SIPL, switching impulse protection level) es el valor máximo de la tensión residual del pararrayos a las corrientes de impulso tipo maniobra especificadas.
- El nivel de protección a impulsos tipo rayo de un pararrayos (LIPL, lightning impulse protection level) es la máxima tensión residual del pararrayos para la corriente nominal de descarga.

**Tabla N° 3.4** Valores de forma de onda y magnitud de la corriente de descarga

Clasificación de pararrayos		Impulso de maniobra (30/60 $\mu$ s)	Impulso de maniobra (30/60 $\mu$ s)
1.5 kA		-----	1.5 kA
2.5 kA		-----	2.5 kA
5 kA		-----	5 kA
10 kA	Clase 1	125 A y 500 A	10 kA
	Clase 2	125 A y 500 A	10 kA
	Clase 3	250 A y 1000 A	10 kA
20 kA	Clase 4	500 A y 2000 A	20 kA
	Clase 5	500 A y 2000 A	20 kA

### 3.3.7 Clase del limitador de presión

Se refiere a la capacidad de corriente de cortocircuito del pararrayos, es decir, a la capacidad de soportar corrientes de falla internas sin producir la explosión violenta de su revestimiento o cubierta, ya que esto podría ocasionar daños a los equipos circundantes o daños personales.

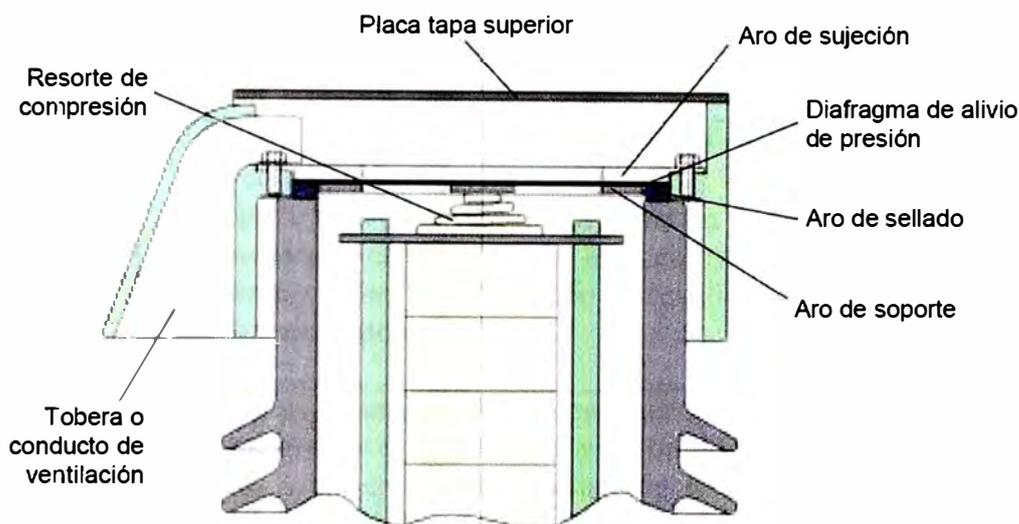
En consecuencia, se recomienda que la corriente de falla soportada por el pararrayos sea igual o superior a la corriente de falla máxima en el lugar donde esta instalado.

Este problema puede ser especialmente crítico para los pararrayos de envoltorio de porcelana (mayor riesgo de daño en caso de explosión) y de elevada tensión nominal (mayor tamaño).

Una medida de seguridad para el equipo y el personal que pueda estar cerca en casos de falla de un pararrayos es la instalación de un dispositivo limitador de presión. Esto hace

que el pararrayos rompa de forma no explosiva, quedando los posibles fragmentos en una zona muy próxima al equipo. La figura 3.6 muestra el diafragma como parte del sistema de sellado en un pararrayos [3].

Los dispositivos de alivio de presión consisten de diafragmas que permiten evacuar los gases ionizados del interior del pararrayos.



**Fig. 3.6** Sistema de sellado de un pararrayo

### 3.3.8 Línea de fuga

La línea de fuga (creeping distance) es la distancia medida a lo largo del aislamiento exterior del equipo y es una medida de la capacidad del equipo respecto al riesgo de contorno exterior en entornos contaminados. Se definen 4 niveles de contaminación, con una línea de fuga específica nominal mínima para cada uno de ellos (expresada en mm/kV de la tensión máxima del sistema  $U_s$ ), como se ve en la Tabla N° 3.5.

### 3.3.9 Dispositivo de desconexión

Para determinadas aplicaciones es habitual utilizar pararrayos con dispositivo de desconexión. Este dispositivo permite que la unión del pararrayos con el conductor de tierra se separe en caso de falla, pudiendo comprobarse visualmente si el pararrayos está averiado. Cuando un pararrayos está provisto de dispositivo de desconexión, este dispositivo debe soportar, sin actuar, los ensayos indicados en la IEC 60099-4 (impulso de corriente de larga duración y de funcionamiento).

En la práctica el dispositivo de desconexión suele utilizarse para pararrayos instalados en sistemas con tensión máxima de hasta 36 kV, correspondiendo a tensiones nominales de hasta 30 kV.

### 3.3.10 Frecuencia asignada

La frecuencia asignada corresponde a la de la red en la que va a estar instalado el pararrayos. Las frecuencias normalizadas son 50 Hz y 60 Hz.

**Tabla N° 3.5** Línea de fuga específica nominal

<b>Nivel de contaminación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Línea de fuga específica nominal mínima mm/kV</b>
I Ligero (L)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zona sin industrias y baja densidad de viviendas con calefacción.</li> <li>- Zonas de baja densidad de industrias o viviendas, sometidas a viento o lluvias frecuentes.</li> <li>- Zonas agrícolas (sin quemado de residuos).</li> <li>- Zonas montañosas.</li> </ul>	16 mm/kV
II Medio (M)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zona con industrias que no producen humo especialmente contaminante y/o con densidad media de viviendas con calefacción.</li> <li>- Zonas con elevada densidad de industrias y/o viviendas, sometidas a viento o lluvias frecuentes.</li> <li>- Zonas expuestas a vientos desde el mar, pero no muy próximas a la costa (nunca menos de 1 km).</li> </ul>	20 mm/kV
III Fuerte (H)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zona con elevada densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades, con elevada densidad de calefacción generando contaminación.</li> <li>- Zonas cercanas al mar o en cualquier caso expuestas a vientos relativamente fuertes provenientes del mar.</li> </ul>	25 mm/kV
IV Muy Fuerte (V)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonas (extensión moderada) sometidas a polvos conductores y a humo industrial que produce depósitos conductores particularmente espesos.</li> <li>- Zonas (extensión moderada) muy próximas a la costa y expuestas a pulverización salina o a vientos muy fuertes y contaminantes desde el mar.</li> <li>- Zonas desérticas caracterizadas por no tener lluvia durante largos periodos, expuestas a fuertes vientos que transportan arena y sal, y sometidas a condensación regular.</li> </ul>	31 mm/kV

### 3.4 Criterios de Selección de Pararrayos

Las características que debe cumplir un pararrayos para proteger un conjunto de equipos en un punto del sistema son:

### 3.4.1 Elección de la corriente nominal y la clase de descarga de línea

Los valores normalizados de corriente nominal de descarga según IEC 60099-4 son los indicados en la Tabla N° 3.2. Además, existen valores de corriente nominal recomendados por IEC 60099-5 en función de la tensión máxima del sistema, presentados en la Tabla N° 3.6.

**Tabla N° 3.6** Valores característicos de corriente nominal de descarga de Pararrayos

Tensión máxima del sistema $U_s$ (kVef)	Corriente nominal de descarga $I_n$
$U_s \leq 72,5$ kV	5 kA
$72,5$ kV < $U_s \leq 245$ kV	10 kA
$245$ kV < $U_s \leq 420$ kV	10 kA
$U_s > 420$ kV	20 kA

Como ya se ha mencionado, en caso de pararrayos con corriente de descarga de 10 kA y 20 kA, es posible elegir entre clase 1,2 y 3 para 10 kA y clase 4 y 5 para 20 kA.

### 3.4.2 Criterio de elección de la tensión de funcionamiento continuo ( $U_c$ )

El pararrayos debe ser capaz de soportar la tensión máxima del sistema en condiciones normales de operación. Por tanto, el valor de la tensión de funcionamiento continuo del pararrayos ( $U_c$ ) debe ser mayor que el valor de la tensión máxima del sistema ( $U_s$ ).

Si el pararrayos está instalado entre fase y tierra, su tensión de operación continua deberá cumplir:

$$U_c \geq \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (3.3)$$

Donde:

$U_c$ : Tensión de funcionamiento continuo del pararrayos

$U_s$ : Tensión máxima del sistema

### 3.4.3 Criterio de elección de las sobretensiones temporales ( $TOV_c$ )

Los pararrayos son capaces de limitar tensiones elevadas cuya duración apenas dura unos pocos microsegundos. Sin embargo, las sobretensiones temporales, al tener una duración mucho mayor exigen una disipación energética mucho mayor. Un pararrayos debe ser capaz de soportar estas sobretensiones hasta el tiempo de actuación de las protecciones convencionales. Además dependiendo de la magnitud de la sobretensión, el propio pararrayos limitará su valor, al entrar en la zona de descarga.

Para poder comparar diferentes valores de magnitud y duración de las diferentes sobretensiones temporales con la capacidad del pararrayos para soportarlas, se suele convertir cada una de ellas a una amplitud equivalente ( $U_{eq}$ ) para una duración de 10s:

$$U_{eq} = U_t \left( \frac{T_t}{10} \right)^m \quad (3.4)$$

Donde:

$U_t$ : es la amplitud de la sobretension temporal representativa

$T_t$ : es la duración de la sobretension temporal representativa

$U_{eq}$ : es la amplitud de la sobretension temporal representativa equivalente para 10 s

$m$ : es un exponente que describe la característica de la tensión a frecuencia industrial frente al tiempo del pararrayos, el exponente  $m$  varía entre 0,018 y 0,022 y se puede utilizar un valor medio de 0,02.

Así, la capacidad del pararrayos para soportar sobretensiones temporales  $TOV_c$  durante 10s debe ser superior a la sobretension temporal representativa equivalentes para 10s ( $U_{eq}$ ):

$$TOV_c(10s) \geq U_{eq} \quad (3.5)$$

El valor de sobretension máxima que puede aparecer en un sistema por falla a tierra  $U_t$  es:

$$U_t = \frac{k \cdot U_s}{\sqrt{3}} \quad (3.6)$$

Donde:

$k$ : Factor de falla a tierra

$U_t$ : Sobretensión máxima en el sistema por falla a tierra

$U_s$ : Tensión máxima del sistema

En función del tipo de conexión de neutro, la magnitud de la sobretension temporal por falla a tierra puede alcanzar diferentes valores (ver Tabla N° 3.7).

**Tabla N° 3.7** Valores característicos del factor de falla a tierra

Conexión del neutro	k
Neutro rígido a tierra	$k \leq 1.4$
Neutro no rígido a tierra	$1.4 \leq k \leq 1.73$
Neutro aislado	$1.73 \leq k \leq 1.9$

Conociendo el tipo de conexión de neutro del sistema y el tiempo máximo de actuación de las protecciones, se puede calcular la amplitud de la sobretensión equivalente ( $U_{eq}$ ) a partir de la expresión:

$$U_{eq} = U_t \cdot \left(\frac{T_t}{10}\right)^m = \frac{k \cdot U_s}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{T_t}{10}\right)^m \quad (3.7)$$

#### 3.4.4 Elección de la línea de fuga

La línea de fuga mínima del pararrayos debe ser la exigida según el nivel de contaminación de la zona donde se instale (véase Tabla N° 3.5). La línea de fuga mínima se expresa en mm y puede obtenerse a partir de la tensión máxima del sistema ( $U_s$ ) según la ecuación (3.8).

$$\text{Línea de fuga (mm)} = U_s \text{ (kV)} \cdot \text{Línea de fuga específica nominal mínima (mm/kV)} \quad (3.8)$$

#### 3.4.5 Margen de protección a impulsos tipo rayo

El margen de protección a impulsos tipo rayo de un pararrayos es el cociente entre la tensión soportada a impulsos tipo rayo del equipamiento a proteger ( $LIW$ , Lightning Impulse Withstand Level) y el nivel de protección a impulsos tipo rayo del pararrayos ( $U_{pl}$ ):

$$\text{Margen de protección a impulsos tipo rayo} = \frac{LIW}{U_{pl}} \quad (3.9)$$

Cuando menor sea el nivel de protección a impulso tipo rayo ( $U_{pl}$ ), mas alejada estará la tensión residual de la tensión soportada a impulso tipo rayo de los equipos a proteger ( $LIW$ ) y mayor será el margen de protección. Por lo tanto nos conviene seleccionar los pararrayos con niveles de protección bajos, obteniendo los mayores márgenes de protección posibles.

En general, el mínimo margen de protección a impulso tipo rayo que se suele escoger es del 20%, esto implica que:

$$\frac{LIW}{U_{pl}} \geq 1,2 \quad (3.10)$$

#### 3.4.6 Margen de protección a impulsos tipo maniobra

El margen de protección a impulsos tipo maniobra de un pararrayos es el cociente entre la tensión soportada a impulsos tipo maniobra del equipamiento a proteger ( $SIW$ , Switching Impulse Withstand Level) y el nivel de protección a impulsos tipo maniobra del pararrayos ( $U_{ps}$ ):

$$\text{Margen de protección a impulsos tipo maniobra} = \frac{SIW}{U_{ps}} \quad (3.11)$$

La Tabla N° 3.8 muestra el valor de cresta de la corriente de descarga que origina la tensión residual que representa un valor típico de  $U_{ps}$  en función de la tensión máxima del sistema.

**Tabla N° 3.8** Valor de cresta de corriente de descarga en función de la tensión máxima

Tensión máxima del sistema $U_s$	Corriente de cresta para obtener $U_{ps}$
$U_s \leq 145 \text{ kV}$	0.5 kA
$145 \text{ kV} < U_s \leq 362 \text{ kV}$	1 kA
$420 \text{ kV} < U_s \leq 800 \text{ kV}$	2 kA

Cabe mencionar que a partir de los años noventa han salido al mercado los pararrayos con envoltente polimérico, el cual tiene varias ventajas:

#### **Durante el transporte y la instalación**

- Peso reducido, instalación flexible y sencilla, montaje posible en todos los ángulos.
- Resistencia a daños de transporte, instalación y vandalismo.

#### **Durante el transporte y la instalación**

- Servicio seguro en sobrecarga y alta resistencia mecánica.
- Carcasa de silicona resistente y de hidrofobia duradera, garantizando un funcionamiento perfecto incluso en condiciones ambientales extremas (polución, costa, desierto).
- Línea de fuga extendida
- Ignífugo y autoextinguible.

#### **Durante su vida útil**

- Larga duración, penetración de humedad impedida por recubrimiento de silicona.

Para mayor información acerca de este tipo de pararrayos ver el Anexo D al final de este informe, donde existe información de los pararrayos con envoltente polimérico, los cuales están siendo usados actualmente por diversas empresas del sector eléctrico.

## **CAPITULO IV**

### **CRITERIOS Y METODOLOGIA EMPLEADA SEGÚN NORMA IEC 60071**

#### **4.1 Introducción**

La coordinación de aislamiento tiene por objetivo determinar las características de aislamiento necesarias y suficientes de los equipos de las redes eléctricas, en nuestro caso de los equipos de una subestación, para garantizar que el nivel de tensión soportada por el aislamiento del equipo sea mayor que la tensión que pueda aparecer como resultado de una sobretension transitoria, una vez que esta ha sido limitada por el dispositivo de protección o pararrayos.

Antiguamente el dimensionamiento de los aislamientos se realizaba de una forma netamente empírica, exigiendo a los materiales que soportaran una tensión a frecuencia industrial de un valor igual al producto de la tensión de servicio por un cierto coeficiente de seguridad elegido según la experiencia en instalaciones anteriores.

La aparición de tensiones nominales más elevadas exigió un mayor estudio del problema, comprobándose que los aislamientos no solo se clasificaban por su capacidad para soportar las sobretensiones a frecuencia industrial, sino que su comportamiento ante riesgos de falla son diferentes según su importancia y costo de cada aparato, de tal forma que el fallo del equipo menos importante protegiese a los equipos de mayor responsabilidad en una subestación.

Es así como se originó el término “coordinación de aislamiento”, que hoy en día se refiere al dimensionamiento de los aislamientos de acuerdo con los materiales empleados, las características de las sobretensiones y los elementos de protección utilizados contra las sobretensiones.

#### **4.2 Metodología de Coordinación de Aislamiento**

La metodología de coordinación de aislamiento que se desarrolla en este capítulo se basa en la norma IEC 60071 [1], que se define como una guía de aplicación para la selección de los niveles de aislamiento de las instalaciones eléctricas tales como las subestaciones de alta tensión.

El propósito de esta metodología es dar recomendaciones para la determinación de la tensión soportada asignada y justificar la asociación de estos valores asignados con los valores normalizados de las tensiones más elevadas para el material.

Los criterios a emplear en la selección de las tensiones soportadas tendrán como fin la reducción a niveles aceptables del riesgo de falla de la instalación por falla de los aislamientos, tanto desde un punto de vista económico como de continuidad del servicio y seguridad de las personas. Por lo tanto será preciso determinar la causa y magnitud de las sobretensiones que pueden originarse, mediante el análisis del sistema que incluirá la selección y localización de los dispositivos empleados para su limitación.

La metodología de coordinación de aislamiento, cuyo esquema se indica en la figura 4.1, consiste en líneas generales, en determinar a partir de las sobretensiones representativas del sistema, las tensiones soportadas de coordinación y especificada de los equipos, que a su vez permitirá seleccionar el nivel de aislamiento normalizado de los mismos.

La práctica actual en la coordinación de aislamiento establece dos métodos para la determinación del nivel de aislamiento, estos son el método estadístico y el determinista o convencional, el uso de uno y otro depende de que sean o no conocidas las distribuciones estadísticas de las sobretensiones soportadas por los materiales y de las sobretensiones a prever en la instalación.

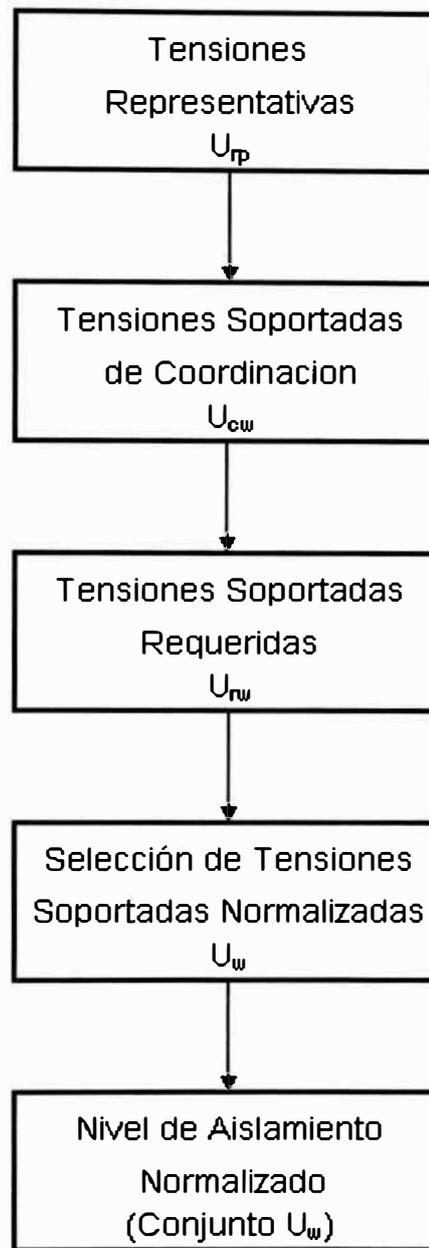
Muchos de los procedimientos aplicados, sin embargo, son una mezcla de ambas metodologías. Por ejemplo, algunos factores usados en el método determinista se han derivado de experiencias estadísticas y algunas consideraciones estadísticas se pueden omitir en el método estadístico haciendo en ambos casos una metodología híbrida. En este capítulo se indicarán los criterios de utilización de ambos métodos.

#### **4.2.1 Método Determinista o Convencional**

El método determinístico se aplica cuando no se tiene información estadística proveniente de pruebas relacionada con la posible tasa de fallas del equipo que se pondrá en servicio. Mediante el método convencional los aislamientos se dimensionan de manera que tengan una tensión soportada superior a la mayor sobretensión representativa que pueda aparecer sobre los equipos.

El criterio del método determinista es totalmente conservador debido a que considera la no existencia de descargas disruptivas al aplicar tensiones de prueba en ensayos de tensiones soportadas, esto es una probabilidad del 100% de soportar las tensiones de

prueba aplicadas.



**Fig. 4.1** Esquema de coordinación de aislamiento

#### 4.2.2 Método Estadístico

El método estadístico se basa en análisis probabilísticos, esto es cuando se conoce la distribución de sobretensiones en el sistema y la distribución de sobretensiones soportadas por los materiales.

El método se basa en el cálculo de riesgo de falla de los equipos, lo que permite dimensionar su aislamiento de manera que dicho riesgo este comprendido dentro de unos límites aceptables que dependerán de la frecuencia de aparición de las sobretensiones y de las consecuencias de la falla en el propio aislamiento y en la operación de la red.

### 4.3 Determinación de las Tensiones Representativas ( $U_{rp}$ )

La tensión representativa puede caracterizarse por un valor máximo estimado, un conjunto de valores de cresta o una distribución estadística de valores de cresta. A continuación se presenta las tensiones representativas, en sus distintos casos.

#### 4.3.1 Tensiones permanentes

Con propósitos de diseño y coordinación de aislamiento, la tensión permanente representativa frecuencia industrial será sin embargo, considerada como constante e igual tensión más alta del sistema ( $U_s$ ).

#### 4.3.2 Sobretensiones Temporales

Las sobretensiones temporales se caracterizan por su amplitud, su forma de tensión y su duración. Todos los parámetros dependen del origen de las sobretensiones, pero las amplitudes y las formas de onda pueden incluso variar durante la existencia de la sobretension. A continuación las sobretensiones temporales en los casos que se debe considerar:

##### a) Fallas a tierra

Cuando se produce una falla a tierra en un determinado punto del sistema lleva a un aumento de la tensión fase-tierra en las fases sanas cuyo valor depende del grado de aterrizamiento del sistema.

En el cálculo del valor de la sobretensión se ha de suponer que la falla a tierra tiene lugar cuando la tensión de servicio es igual a la tensión más alta del sistema ( $U_s$ ).

##### b) Pérdida de carga

Las sobretensiones temporales fase-tierra o longitudinales debidas a las perdidas de carga dependen de la carga desconectada, de la configuración de la red después de la desconexión y de las características de las fuentes de energía. El incremento de tensión fase-tierra de las tres fases es idéntico y por tanto las mismas sobretensiones relativas ocurren entre fase y tierra y entre fases.

#### 4.3.3 Sobretensiones de Frente Lento.

A continuación las sobretensiones de frente lento en los casos que se debe considerar:

##### a) Conexión y reenganche de líneas

Los reenganches trifásicos pueden generar elevadas sobretensiones de frente lento debido a cargas atrapadas en la línea reenganchada. Al mismo tiempo que el reenganche, la amplitud de la sobretensión remanente sobre la línea (debido a la carga atrapada) puede ser

tan alta como el valor de cresta de la sobretensión temporal.

Existen datos estadísticos para poder calcular las sobretensiones tanto fase-tierra y fase-fase, sin limitación de pararrayos:

- **Sobretensiones fase-tierra:** los parámetros representativos de la función de densidad de probabilidad de las sobretensiones fase-tierra pueden obtenerse, en función del método de cálculo de la sobretensión representativa del 2%, como se indica a continuación:

$$U_{et} = 1,25U_{e2} - 0,25 \tag{4.1}$$

Donde:

$U_{e2}$ : Valor de sobretensión fase a tierra que tiene una probabilidad del 2%

$U_{et}$ : Valor de truncamiento de la distribución acumulada de las sobretensiones fase-tierra

En la figura 4.2 se muestra una guía para la selección de las sobretensiones estadísticas fase-tierra ( $U_{e2}$ ) en función de parámetros conocidos del sistema [5], sin la presencia de pararrayos y en el extremo de la línea donde las sobretensiones son mayores.

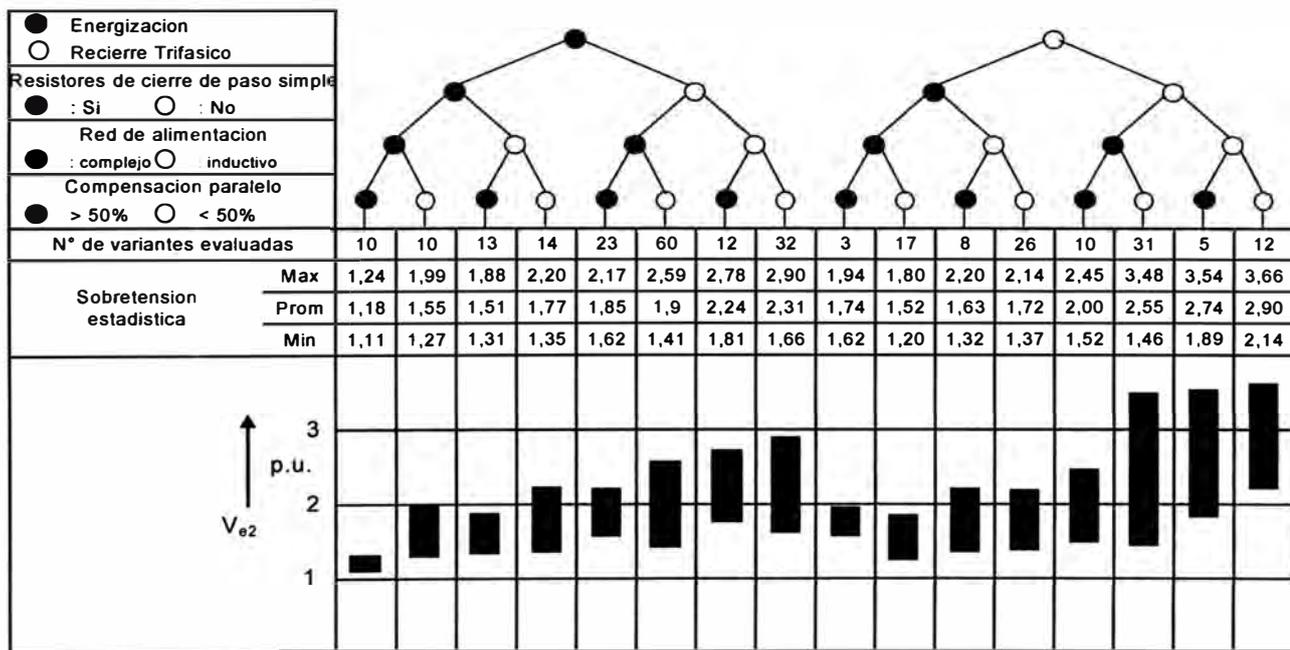


Fig. 4.2 Rango de sobretensiones de frente lento del 2% ( $U_{e2}$ )

- **Sobretensiones entre fases:** los parámetros de la distribución de probabilidad de sobretensión fase-fase pueden ser estimados como sigue:

$$U_{pt} = 1,25U_{p2} - 0,43 \tag{4.2}$$

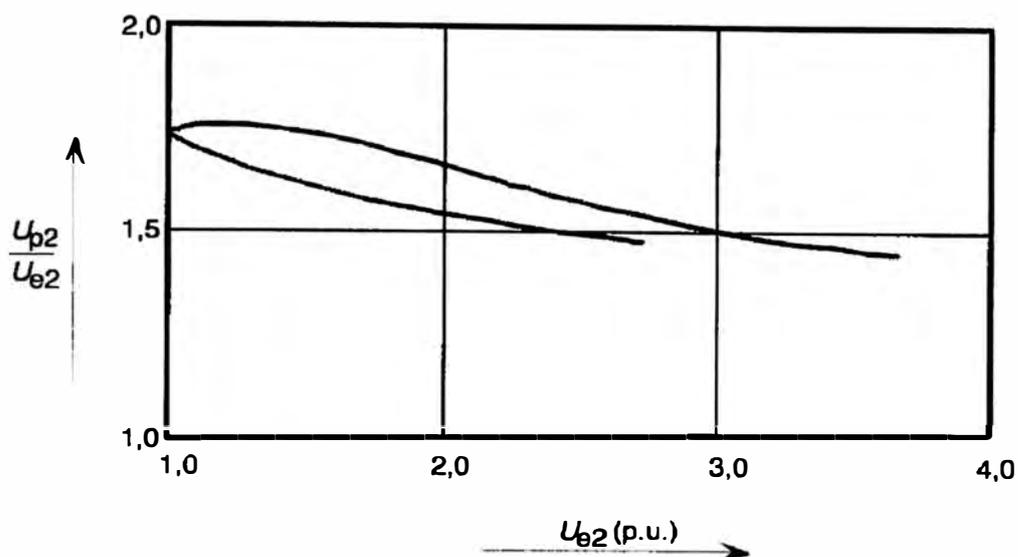
Donde:

$U_{p2}$ : Valor de sobretensión fase a fase que tiene una probabilidad del 2%

$U_{pt}$ : Valor de truncamiento de la distribución acumulada de las sobretensiones fase-fase

En la figura 4.3 se muestra el rango de relaciones posibles entre los valores del 2% de

sobretensiones entre fase-fase y fase-tierra.



**Fig. 4.3** Relación entre los valores del 2% de sobretensiones entre fases y fase-tierra

#### b) Pararrayos en la entrada de línea

Los pararrayos muchas veces se instalan en los extremos de largas líneas de transmisión con el propósito de limitar las sobretensiones de frente lento, pero hay que notar que las sobretensiones en mitad de la línea pueden ser substancialmente mayores que en los extremos.

Como regla general puede asumirse que los pararrayos de óxidos metálicos limitan las amplitudes de las sobretensiones fase-tierra (kV cresta) a aproximadamente el doble de la tensión asignada del pararrayos (kV en valor eficaz).

Esto significa que los pararrayos de óxidos metálicos son adecuados para limitar las sobretensiones de frente lento debidas a conexión y reenganche de líneas, así como maniobra de corrientes inductivas y capacitivas, pero no en general, las sobretensiones causadas por fallas a tierra y eliminación de fallas, puesto que las amplitudes de estas son demasiado bajas.

La sobretensión máxima representativa en presencia de pararrayos se escogerá de la siguiente forma:

- **Fase-tierra:** será igual al nivel de protección del pararrayos ( $U_{ps}$ ), en caso de actuar el pararrayos.
- **Fase-fase:** será el menor valor de dos veces el nivel de protección del pararrayos y el de truncamiento de la función de distribución de probabilidad de sobretensiones fase-fase en ausencia de pararrayos.

#### 4.4 Determinación de las Tensiones Soportadas de Coordinación ( $U_{cw}$ )

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 ( $K_c$ ).

El valor del factor de coordinación depende de la 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.

A continuación se presentan como se obtienen las tensiones soportadas de coordinación para las sobretensiones estudiadas.

##### 4.4.1 Tensión soportada de coordinación permanente

La tensión soportada de coordinación para la tensión permanente a frecuencia industrial coincide con la representativa, es decir, es igual a la tensión compuesta mas elevada de la red para el aislamiento fase-fase con una duración igual a la de servicio. Para el aislamiento fase-tierra se tomara el valor anterior dividido por  $\sqrt{3}$ .

##### 4.4.2 Tensión soportada de coordinación temporal

Con el método determinista, la tensión soportada de coordinación de corta duración, es igual a la sobretensión temporal representativa, por lo tanto el factor de coordinación  $K_c$  es igual a 1.

Con el procedimiento estadístico y cuando la sobretensión temporal representativa viene dada por una frecuencia de distribución característica amplitud/duración se ha de determinar el aislamiento que cumple el criterio de comportamiento. La amplitud de la tensión soportada de coordinación será igual a la que corresponde a la duración de 1 minuto en la característica amplitud/duración de soportabilidad del aislamiento.

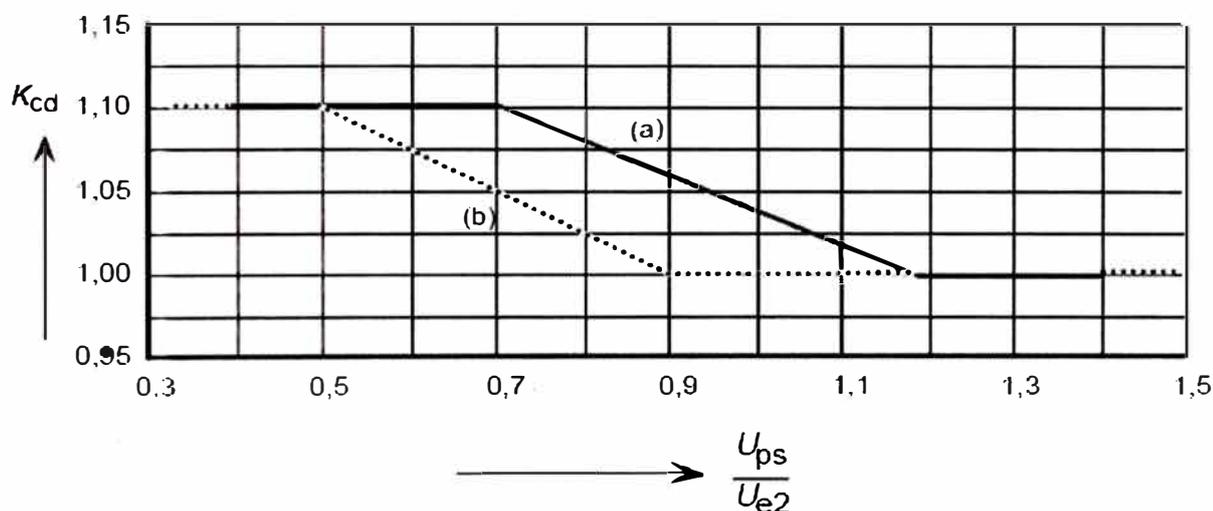
##### 4.4.3 Tensión soportada de coordinación de frente lento

Para estos cálculos usaremos el **método determinista**, el cual involucra la determinación de las tensiones máximas que ocurren en el equipo y por lo tanto la elección de la rigidez dieléctrica mínima de este equipo, tendrá un margen que cubra las incertidumbres a la hora de determinar estos valores.

La tensión soportada de coordinación se obtiene multiplicando el valor máximo previsto de la sobretension representativa correspondiente por el factor de coordinación determinista  $K_{cd}$ .

Para equipos protegidos por pararrayos, la sobretensión máxima representativa es igual al nivel de protección a impulso tipo maniobra  $U_{ps}$  del pararrayos, sin embargo existe una asimetría en la distribución estadística de las sobretensiones. Para cubrir este efecto la norma propone evaluar el factor de coordinación determinista  $K_{cd}$  dependiendo de la regulación entre el nivel de protección a impulsos tipo maniobra del pararrayos  $U_{ps}$  y el valor 2% de las sobretensiones previstas fase-tierra  $U_{e2}$ . Esta dependencia se observa en la figura 4.4.[6].

Para equipos no protegidos por pararrayos, la sobretensión máxima prevista es igual al valor de truncamiento ( $U_{et}$  o  $U_{pt}$ ) de la función probabilística de sobretensiones y el factor de coordinación determinista es  $K_{cd} = 1$ .



- a) Factor de coordinación aplicado a nivel de protección del pararrayos, para obtener la tensión soportada de coordinación fase-tierra.  
 b) Factor de coordinación aplicado al doble del nivel de protección del pararrayos, para obtener la tensión soportada de coordinación fase-fase.

**Fig. 4.4** Evaluación del factor de coordinación determinista  $K_{cd}$

#### 4.4.4 Tensión soportada de coordinación de frente rápido

La tensión soportada de coordinación  $U_{cw}$  para impulso de tipo rayo se obtiene a través de la forma simplificada según la norma IEC 60071-2:

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} \frac{L}{L_{sp} + L_a} \quad (4.3)$$

Donde:

$U_{cw}$ : Tensión soportada de coordinación al impulso tipo rayo, kV

$U_{pl}$ : Nivel de protección al impulso tipo rayo del pararrayos, kV

$A$  : Factor dado en la Tabla N° 4.1 que representa el comportamiento frente al rayo de la línea aérea conectada a la subestación

$n$  : El numero mínimo de líneas conectadas a la subestación ( $n = 1$  ó  $n = 2$ )

$L$  : Separación equivalente entre el pararrayos más cercano y el equipo en consideración, ver figura 4.5 y se obtiene de:

$$L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \quad (4.4)$$

$L_{sp}$  : Longitud del vano de las líneas, m

$L_a$  : Es la porción de línea aérea calculada a partir de una tasa de salida igual a una tasa de falla aceptable, y se calcula de la siguiente manera:

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} \quad (4.5)$$

$R_a$  : Tasa de falla aceptable para el equipo

$R_{km}$ : Tasa de falla por año del primer kilómetro de línea desde la subestación

**Tabla N° 4.1** Factor A para diferentes tipos de líneas aéreas

Tipo de Línea	A (kV)
Líneas de distribución (cebados entre fases)	
- Con las crucetas puestas a tierra (cebado a tierra con una tensión pequeña)	900
- Líneas con apoyos de madera (cebado a tierra con una tensión alta)	2700
Líneas de transporte (cebado fase-tierra)	
- Un solo conductor	4500
- Haz doble	7000
- Haz cuádruple	11000
- Haz de seis u ocho conductores	17000

#### 4.5 Determinación de las Tensiones Soportadas Requeridas ( $U_{rw}$ )

Debido a que la tensión soportada de coordinación determinada en el punto anterior es independiente de las condiciones atmosféricas al sitio de instalación y de las particularidades del equipo, en este punto del procedimiento se define una tensión soportada requerida en la que se toma en cuenta estos factores. Es decir, se considera los factores que hacen disminuir la soportabilidad del aislamiento en las condiciones reales de servicio.

Por lo tanto, para determinar las tensiones soportadas requeridas es necesario multiplicar a las tensiones soportadas de coordinación por factores que compensen las

diferencias entre las condiciones reales de servicio al sitio de ubicación del equipo y las condiciones de prueba normalizadas, que corresponden a condiciones atmosféricas a nivel del mar con temperatura y humedad relativa promedios.

Los factores a tomar en cuenta son:

- Factor de corrección asociado a las condiciones atmosféricas
- Factor de seguridad, que toma en cuenta las diferencias entre las condiciones reales de operación del aislamiento y las condiciones de prueba.

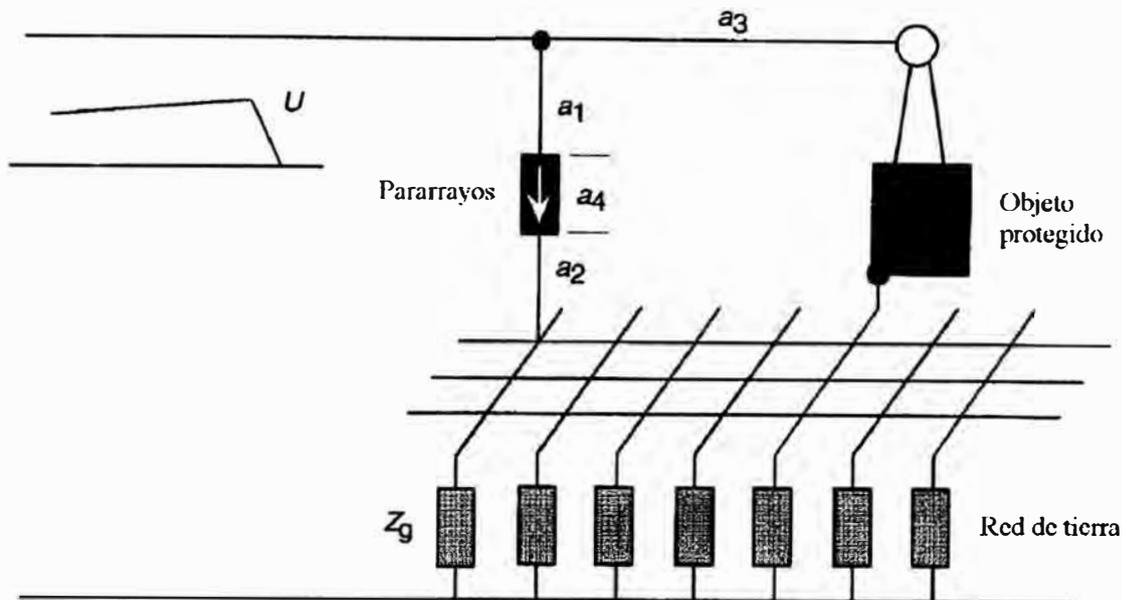


Fig. 4.5 Diagrama de la conexión del pararrayos al objeto protegido

#### 4.5.1 Corrección por altitud

La corrección por efectos atmosféricos se aplica únicamente al aislamiento externo ya que al estar en contacto directo con el medio ambiente su rigidez dieléctrica varía con las condiciones atmosféricas.

El factor de corrección  $K_a$  se basa en la variación de la presión atmosférica en función de la altitud y puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$K_a = e^{m\left(\frac{H}{8150}\right)} \quad (4.6)$$

Donde:

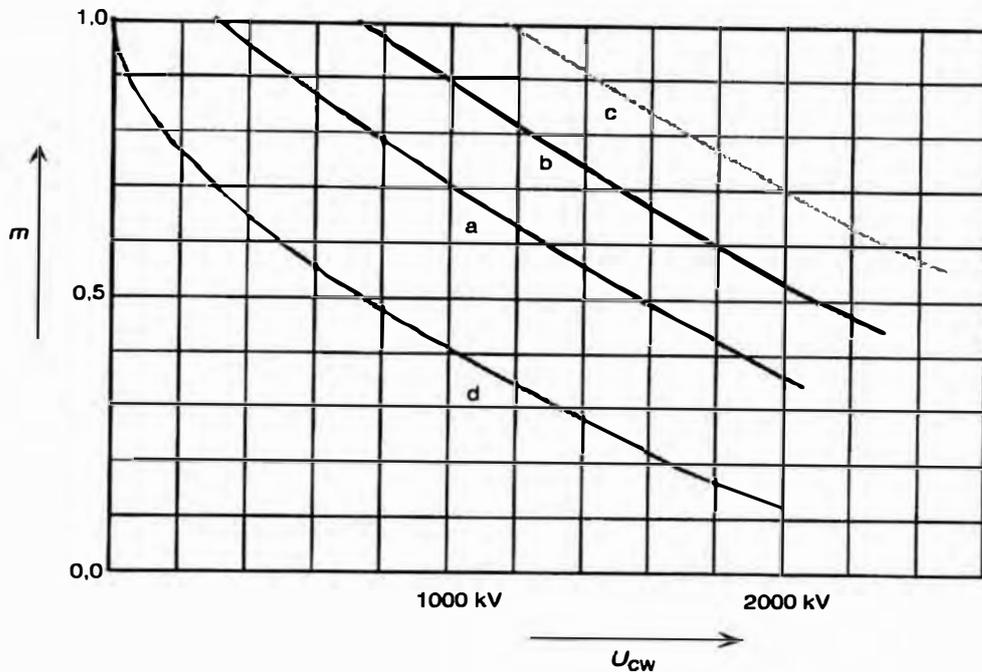
$H$  : Es la altitud sobre el nivel del mar (en metros)

$m$  : Se calcula de acuerdo con la figura 4.6 para las tensiones soportada de coordinación a impulsos tipo maniobra.

$m=1$ : Para las tensiones soportadas de coordinación a impulsos tipo rayo

$m=1$ : Para tensiones soportadas a frecuencia industrial de corta duración

Para el aislamiento interno puede asumirse que las condiciones atmosféricas no afectan las propiedades del aislamiento.



- 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.

**Fig. 4.6** Relación entre el exponente  $m$  y la tensión soportada de coordinación [6]

#### 4.5.2 Factor de Seguridad

Los factores de seguridad recomendados por la norma IEC y que cubren todas las diferencias entre las condiciones de prueba y las condiciones reales de operación toman los siguientes valores de acuerdo al tipo de aislamiento:

- Factor de seguridad para el aislamiento externo:  $K_s = 1,05$
- Factor de seguridad para el aislamiento interno:  $K_s = 1,15$

Aplicando tanto el factor de corrección por altura  $K_a$  así como el factor de seguridad  $K_s$  a cada una de las tensiones soportadas de coordinación se obtienen las tensiones soportadas requeridas, que vendrían a ser las tensiones que al menos debe soportar el equipo en condiciones reales de operación. Resultando de la siguiente manera:

- Para aislamiento externo:

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot K_a \cdot K_s \quad (4.7)$$

- Para aislamiento interno:

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot K_x \quad (4.8)$$

#### 4.6 Determinación de las Tensiones Soportadas Normalizadas ( $U_w$ )

Una vez obtenidas las tensiones soportadas requeridas en el paso anterior se procede a la conversión en tensiones soportadas normalizadas a través de la aplicación de un factor de conversión de ensayo. Este factor se aplica teniendo en consideración según el rango I y II de tensiones asignadas:

##### 4.6.1 Factor de conversión para Rango I

En la Tabla N° 4.2 se indica los factores de conversión de ensayo a aplicar a las tensiones soportadas a impulso tipo maniobra requeridas. Estos factores se aplican tanto a las tensiones soportadas requeridas entre fase y tierra como a la suma de los componentes de las tensiones soportadas entre fases y longitudinales.

**Tabla N° 4.2** Factores de conversión de ensayo para el rango I

Aislamiento	Tensión soportada a frecuencia industrial de corta duración	Tensión soportada a impulso tipo rayo
<b>Aislamiento externo:</b> * Distancias en el aire y aisladores limpios, en seco: - Fase-tierra - Fase-fase * Aislamientos limpios, bajo lluvia	$0,6 + U_{rw}/8500$ $0,6 + U_{rw}/12700$ 0,6	$1,05 + U_{rw}/6000$ $1,05 + U_{rw}/900$ 1,3
<b>Aislamiento interno:</b> * GIS * Aislamiento sumergido en liquido * Aislamiento sólido	0,7 0,5 0,5	1,25 1,10 1,00
Nota: $U_{rw}$ es la tensión soportada a impulso tipo maniobra requerida en kV		

##### 4.6.2 Factor de conversión para Rango II

En la Tabla N° 4.3 se dan los factores de conversión de ensayo aplicables a la tensión soportada a frecuencia industrial de corta duración requerida para obtener la tensión soportada a impulso tipo maniobra. Estos factores también son aplicables para el aislamiento longitudinal.

**Tabla N° 4.3** Factores de conversión de ensayo para el rango II

<b>Aislamiento</b>	<b>Tensión soportada a impulso tipo maniobra</b>
Aislamiento externo: * Distancias en el aire y aisladores limpios, en seco. * Aislamientos limpios, bajo lluvia	1,4 1,7
Aislamiento interno: * GIS * Aislamiento sumergido en liquido * Aislamiento sólido	1,6 2,3 2,0

#### 4.7 Selección de los Niveles de Aislamiento Normalizados

Se define el nivel de aislamiento normalizado como el nivel de aislamiento asignado cuyas tensiones soportadas normalizadas están asociadas a la tensión mas elevada para el material ( $U_m$ ), como se indica en las tablas de Nivel de Aislamiento de la IEC 60071-1, las cuales las podemos observar en el Anexo B y Anexo C al final de este documento, siendo  $U_m$  el valor eficaz máximo para el cual esta especificado el material en relación a su aislamiento entre otras características.

Son suficientes dos tensiones soportadas normalizadas para definir el nivel de aislamiento normalizado del material:

\* Para los materiales del rango I son suficientes la tensión soportada normalizada para impulso tipo rayo y la tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia industrial.

\* Para materiales del rango II son suficientes la tensión soportada normalizada para impulso tipo maniobra y la tensión soportada normalizada para impulso tipo rayo.

## CAPITULO V

### CALCULOS Y APLICACIONES

#### 5.1 Ecuaciones a emplear para determinar las tensiones

Con lo descrito en el capítulo anterior se hace un resumen de las ecuaciones a emplear en el cálculo de las tensiones y sobretensiones para así poder determinar el nivel de aislamiento del equipamiento.

##### 5.1.1 Determinación de las Sobretensiones Representativas ( $U_{rp}$ )

###### a) Tensión a frecuencia industrial

Para propósitos de coordinación de aislamiento es considerada igual a la tensión más alta del sistema, en este caso corresponde a la máxima de tensión de diseño de los equipos de patio  $U_s = U_m$  y la tensión base ( $U_{base}$ ).

$$U_{base} = U_m \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (5.1)$$

**Tabla N° 5.1. Tensión base**

Tensión asignada al equipo	Tensión base
$U_m$	$U_m \sqrt{2}/\sqrt{3}$

###### b) Sobretensiones temporales

Se consideran los valores para las sobretensiones sugeridas en la recomendación IEC 60071-2, los cuales incluyen factores que llevan a resultados conservativos.

###### - Sobretensiones por fallas a tierra

Si el sistema está sólidamente puesto a tierra la norma considera que la máxima sobretensión eficaz no sobrepasa 1,4 veces la tensión máxima eficaz fase a tierra del sistema. Para sistemas con neutro aislado las sobretensiones alcanzan hasta 1,73 veces la tensión eficaz máxima.

$$U_{rp}(p-e) = K \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (5.2)$$

Donde:

$K$ : Factor de falla a tierra

$U_s$ : Máxima tensión del sistema, kV

#### - Sobretensiones por rechazo de carga

Otra fuente de sobretensiones temporales es el rechazo de carga el cual produce sobre tensiones que afectan el aislamiento fase – fase y fase – tierra.

$$\text{Fase a tierra: } U_{rp}(p-e) = 1,4 * \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (5.3)$$

$$\text{Fase a fase: } U_{rp}(p-p) = 1,4 * U_s \quad (5.4)$$

#### c) Sobretensiones representativas temporales

Las sobretensiones representativas temporales considerando las anteriores fuentes no simultáneamente son:

$$\text{Fase a tierra: } U_{rp}(p-e)$$

$$\text{Fase a fase: } U_{rp}(p-p)$$

#### d) Sobretensiones de frente lento

##### - Impulsos que afectan los equipos en la entrada de la línea energización extremo remoto

La re-energización desde el extremo remoto resulta en impulsos de sobretensión fase a tierra  $U_{e2}$  y fase a fase  $U_{p2}$ , seleccionados a partir de la Figura 4.2 del capítulo anterior. Las sobretensiones representativas para los equipos en la entrada de la línea sin tener en cuenta los pararrayos son los siguientes:

$$U_{et} = 1,25 \cdot U_{e2} - 0,25 \quad (5.5)$$

$$U_{pt} = 1,25 \cdot U_{p2} - 0,43 \quad (5.6)$$

Donde:

$U_{e2}$ : Valor de la sobretensión fase a tierra que tiene una probabilidad del 2% de ser excedido (Ver figura 4.2)

$U_{et}$ : Valor de sesgamiento de la distribución acumulada de las sobretensiones fase a tierra

$U_{p2}$ : Valor de la sobretensión fase a fase que tiene una probabilidad del 2% de ser excedida (Ver figura 4.3)

$U_{pt}$ : Valor de sesgamiento de la distribución acumulada de las sobretensiones fase a fase

### - Impulsos que afectan todos los equipos energización extremo local

La energización y re-energización local (extremo emisor) resulta en impulsos de sobretensión menos críticos que para el extremo receptor, con el fin de ser conservativos se seleccionan los valores recomendados por la norma  $U_{e2}$  y  $U_{p2}$ .

$$U_{et}' = 1,25 \cdot U_{e2}' - 0,25 \quad (5.7)$$

$$U_{pt}' = 1,25 \cdot U_{p2}' - 0,43 \quad (5.8)$$

### - Pararrayos en la entrada de la línea energización desde el extremo remoto

Con el fin de controlar las sobretensiones por energización de la línea en el extremo remoto se instalan pararrayos en la entrada de la línea con las siguientes características de protección:

- **El NPM** ( $U_{ps}$ , Nivel de protección al impulso tipo maniobra) es igual a la máxima tensión residual para impulsos de corrientes de maniobra, 1kA.
- **El NPR** ( $U_{pl}$ , Nivel de protección para el impulso tipo rayo) es la tensión máxima residual para un impulso atmosférico a la corriente nominal de descarga, 10 kA.

Con el uso de pararrayos, las sobretensiones representativas pueden ser dadas directamente por  $U_{ps}$  para las sobretensiones fase a tierra o  $2 U_{ps}$  para las sobretensiones fase a fase si los valores de protección son menores a los máximos esfuerzos de sobretensión  $U_{et}$  y  $U_{pt}$  de frente lento.

Las sobretensiones de frente lento representativas son:

Para todos los otros equipos:

- Fase a tierra:  $U_{rp}(p - e)$

- Fase a fase:  $U_{rp}(p - p)$

Para equipo a la entrada de la línea:

- Fase a tierra:  $U_{rp}(p - e)$

- Fase a fase:  $U_{rp}(p - p)$

## 5.1.2 Determinación de las Tensiones de Soportabilidad para Coordinación ( $U_{cw}$ )

### a) Sobretensiones temporales

Para esta clase de sobretensiones, la tensión de soportabilidad de coordinación es igual a la sobretensión representativa temporal, por lo tanto el factor de coordinación  $K_c$  es igual a 1.

Fase a tierra: 
$$U_{cw} = U_{rp} \cdot K_c \quad (5.9)$$

Fase a fase: 
$$U_{cw} = U_{rp} \cdot K_c \quad (5.10)$$

### b) Sobretensiones de frente lento

La tensión de coordinación de soportabilidad es obtenida multiplicando el valor máximo de la sobretensión representativa por un factor de coordinación determinístico  $K_{cd}$  el cual depende de la relación entre el nivel de protección al impulso de maniobra del pararrayos  $U_{ps}$  y el valor de la sobretensión fase a tierra  $U_{e2}$ , en la figura 4.3 se muestra la relación.

#### Factor de coordinación determinístico:

Para equipo a la entrada de la línea:

- Fase a tierra: 
$$U_{ps} / U_{e2} \Rightarrow K_{cd} \quad (5.11)$$

- Fase a fase: 
$$2 \cdot U_{ps} / U_{p2} \Rightarrow K_{cd} \quad (5.12)$$

Para todos los otros equipos:

- Fase a tierra: 
$$U_{ps} / U_{e2} \Rightarrow K_{cd} \quad (5.13)$$

- Fase a fase: 
$$2 \cdot U_{ps} / U_{p2} \Rightarrow K_{cd} \quad (5.14)$$

Las tensiones de coordinación serán:

$$U_{cw} = U_{rp} \cdot K_{cd} \quad (5.15)$$

### c) Sobretensiones de frente rápido

La metodología estadística simplificada de la norma IEC 60071-2 permite calcular la tensión mínima de soportabilidad de los equipos mediante la siguiente ecuación:

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} \cdot \frac{L}{L_{sp} + L_a} \quad (5.16)$$

Donde:

$U_{cw}$ : Tensión soportable de coordinación al impulso atmosférico, kV

$U_{pl}$ : Nivel de protección al impulso tipo rayo del pararrayos, kV

$A$ : Factor dado en la Tabla N° 4.1 del capítulo IV que describe el comportamiento de la línea ante las descargas eléctricas atmosféricas, kV

$n$ : Número de líneas conectadas a la subestación, (n-1)

$L$ : Separación equivalente entre el pararrayos más cercano y el equipo en

consideración, obtenido de:

$$L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \quad (5.17)$$

- $a_1$ : Longitud de la conexión del pararrayos a la línea, m  
 $a_2$ : Longitud de la conexión a tierra del pararrayos, m  
 $a_3$ : Longitud del conductor de fase entre el pararrayos y el equipo a proteger para el aislamiento interno y para el aislamiento externo, m  
 $a_4$ : Longitud de la parte activa del pararrayos, m  
 $L_{sp}$ : Longitud del vano de las líneas, m  
 $L_a$ : Sección de línea aérea calculada a partir de una tasa de salida igual a una tasa de falla aceptable, Ra  
 $R_a$ : Tasa de falla aceptable para el equipo, 0,0067 fallas/año (1 falla/150 años)  
 $R_{km}$ : Tasa de fallas por año del primer kilómetro de línea desde la subestación, fallas/año/km

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} \quad (5.18)$$

Las sobretensiones de frente rápido afectan los aislamientos fase a fase y fase a tierra de igual forma.

### 5.1.3 Determinación de las Tensiones de Soportabilidad Requeridas ( $U_{rw}$ )

Las tensiones de soportabilidad requeridas son obtenidas aplicando a las tensiones de soportabilidad para coordinación dos factores de corrección:

$K_a$ : Factor de corrección que tiene en cuenta la altitud de la instalación

$K_s$ : Factor de seguridad

#### a) Factor de seguridad

El factor de seguridad es aplicable a cualquier tipo de sobretensión fase a fase y fase a tierra (temporal, frente lento, frente rápido).

Para aislamiento interno  $K_s = 1,15$

Para aislamiento externo  $K_s = 1,05$

#### b) Factor de corrección atmosférico

El factor de corrección atmosférico está definido por la siguiente ecuación:

$$K_a = e^{m \left( \frac{H}{8150} \right)} \quad (5.19)$$

Donde:

- H*: Altura sobre el nivel del mar, m
- m*: 1,0 para la coordinación de las tensiones de soportabilidad al impulso tipo rayo
- m*: De acuerdo a la figura 4.6 del capítulo IV para la coordinación de las tensiones de soportabilidad al impulso de maniobra
- m*: 1,0 voltajes de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial de distancias en el aire y de aisladores

### c) Tensiones de soportabilidad requeridas

Los valores para las tensiones de soportabilidad requeridas son obtenidos aplicando la siguiente ecuación:

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \cdot K_a \quad (5.20)$$

#### Para sobretensiones temporales:

Aislamiento externo:

- Fase a tierra:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \cdot K_a$
- Fase a fase:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \cdot K_a$

Aislamiento interno:

- Fase a tierra:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s$
- Fase a fase:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s$

#### Para sobretensiones de frente lento:

##### Equipo a la entrada de la línea

Aislamiento externo:

- Fase a tierra:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \cdot K_a$
- Fase a fase:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \cdot K_a$

##### Para otros equipos

Aislamiento externo:

- Fase a tierra:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \cdot K_a$
- Fase a fase:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \cdot K_a$

Aislamiento interno:

- Fase a tierra:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s$
- Fase a fase:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s$

#### Para sobretensiones de frente rápido:

Aislamiento externo:

- Fase a tierra:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \cdot K_a$

- Fase a fase:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \cdot K_a$

Aislamiento interno:

- Fase a tierra:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s$

- Fase a fase:  $U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s$

#### 5.1.4 Conversión a Tensiones de Soportabilidad Normalizadas ( $U_w$ )

En el rango 1 (hasta 245 kV) el nivel de aislamiento es normalmente descrito por la tensión soportada a frecuencia industrial y la tensión soportada al impulso tipo rayo. La Tabla N° 5.2 muestra los factores de conversión requeridos, obtenidos de la norma IEC 60071-2 [6].

**Tabla N° 5.2** Factores de conversión para rango I

Aislamiento	Tensión de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial	Tensión de soportabilidad al impulso tipo rayo
Aislamiento externo (seco)		
- Fase a tierra	$0,6 + U_{rw}/8500$	$1,05 + U_{rw}/6000$
- Fase a fase	$0,6 + U_{rw}/12700$	$1,05 + U_{rw}/9000$
Aislamiento limpio, húmedo	0,6	1,3
Aislamiento interno		
- Aislamiento inmerso en líquido	0,5	1,10
- Aislamiento sólido	0,5	1,00

Donde:

$U_{rw}$ : Es la tensión de soportabilidad requerida para el impulso de maniobra

#### a) Conversión a tensión de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial (SDW)

##### Equipo a la entrada de la línea

Aislamiento externo:

- Fase a tierra:  $SDW = U_{rw} \cdot (0,6 + U_{rw}/8500)$  (5.21)

- Fase a fase:  $SDW = U_{rw} \cdot (0,6 + U_{rw}/12700)$  (5.22)

##### Para otros equipos

Aislamiento externo:

- Fase a tierra:  $SDW = U_{rw} \cdot (0,6 + U_{rw}/8500)$  (5.23)

- Fase a fase:  $SDW = U_{rw} \cdot (0,6 + U_{rw}/12700)$  (5.24)

Aislamiento interno:

- Fase a tierra:  $SDW = U_{rw} \cdot 0,5$  (5.25)

- Fase a fase:  $SDW = U_{rw} \cdot 0,5$  (5.26)

## b) Conversión a tensión de soportabilidad del impulso tipo rayo (LIW)

### Equipo a la entrada de la línea

Aislamiento externo:

- Fase a tierra:  $LIWL = U_{rw} \cdot 1,3 *$  (5.27)

- Fase a fase:  $LIWL = U_{rw} \cdot (1,05 + U_{rw}/9000)$  (5.28)

### Para otros equipos

Aislamiento externo:

- Fase a tierra:  $LIWL = U_{rw} \cdot 1,3 *$  (5.29)

- Fase a fase:  $LIWL = U_{rw} \cdot (1,05 + U_{rw}/9000)$  (5.30)

Aislamiento interno:

- Fase a tierra:  $LIWL = U_{rw} \cdot 1,1$  (5.31)

- Fase a fase:  $LIWL = U_{rw} \cdot 1,1$  (5.32)

\* Caso más crítico para aisladores limpios y húmedos

### 5.1.5 Selección de las Tensiones de Soportabilidad Normalizadas

Después de haber obtenido todos los valores de las distintas sobretensiones y de acuerdo a las tablas del Anexo B y Anexo C sacadas de la norma IEC 60071-1, se procede a seleccionar los valores normalizados de aislamiento correspondientes a un sistema con una tensión máxima  $U_m$ , estos niveles de aislamiento cubrirán cualquier aislamiento externo e interno fase-fase y fase-tierra.

En rango I, los valores requeridos de soportabilidad al impulso de maniobra fase a tierra son cubiertos por la prueba de corta duración a frecuencia industrial. Los valores de soportabilidad al impulso de maniobra fase a fase son cubiertos por la prueba de corta duración a frecuencia industrial ó por la prueba de soportabilidad al impulso tipo rayo.

En el rango II, las tensiones soportadas normalizadas para impulso tipo rayo son iguales a las tensiones soportadas a impulso tipo rayo fase-tierra.

Con estos criterios en los siguientes puntos se verán las aplicaciones respectivas.

## 5.2 Aplicaciones

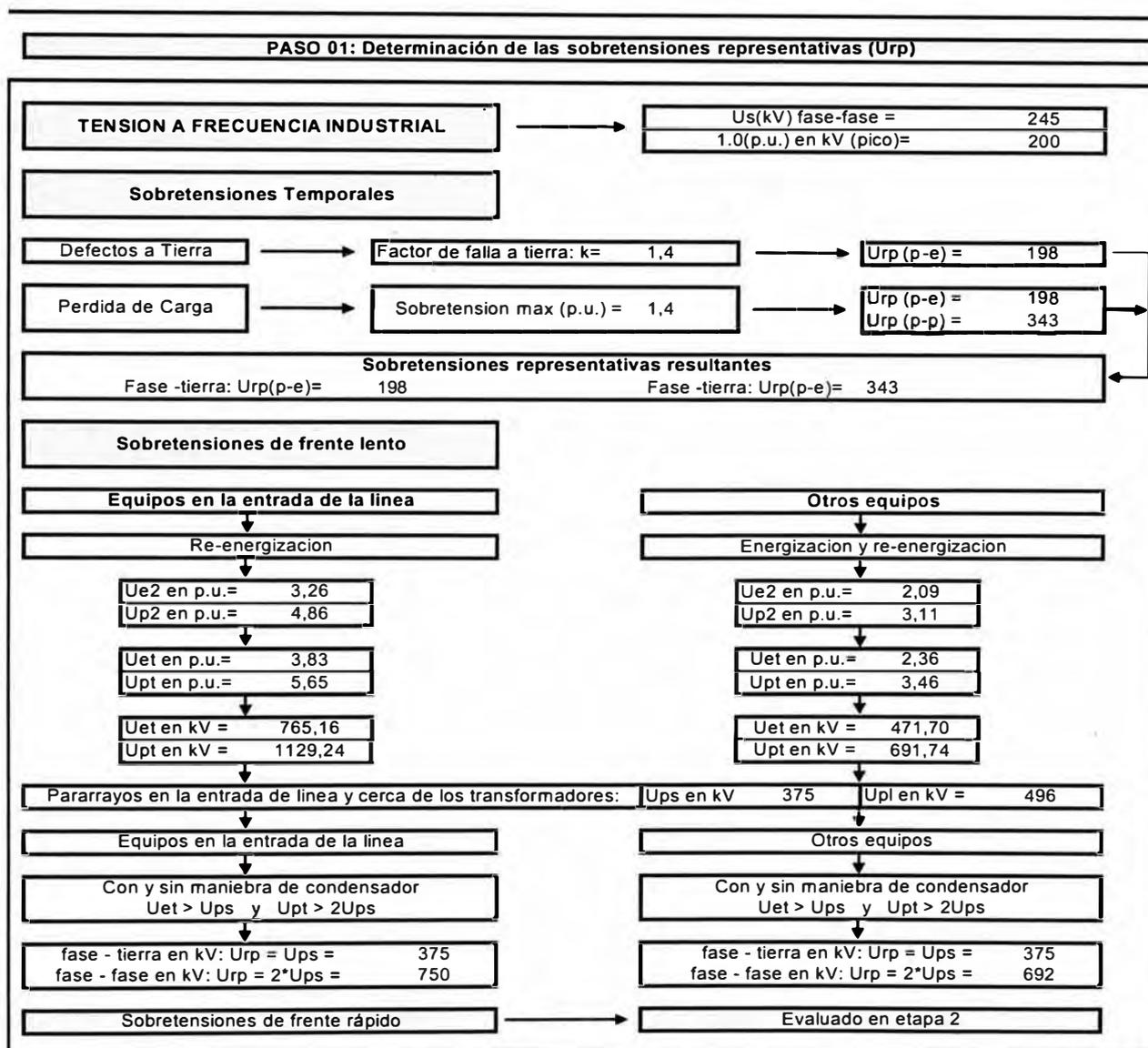
Ahora se realizarán algunas aplicaciones de la metodología de coordinación de aislamiento explicada en los capítulos IV y parte del V y considerando algunas recomendaciones de la norma IEC 60071-2.

Las aplicaciones serán para subestaciones en tres niveles de tensión: 60 kV, 138 kV y 220 kV, mostrándose cuadros de resumen que han sido calculados con las ecuaciones presentadas en el punto 5.1.

### 5.3 Cálculo de Nivel de Aislamiento en S.E. 220 kV (Caso SE Chilca-REP)

A continuación en la Tabla N° 5.3, Tabla N° 5.4, Tabla N° 5.5 y la Tabla N° 5.6 se muestran los pasos para la coordinación de aislamiento en el nivel de tensión de 220 kV.

**Tabla N° 5.3 Paso 1 Determinación de las sobretensiones representativas ( $U_{rp}$ )**



En la Tabla N° 5.3 se hizo las siguientes consideraciones:

- 1.- En el nivel de 220 kV se tiene un sistema sólidamente puesto a tierra y de acuerdo a la

recomendación de la norma el factor de falla a tierra no es superior a 1,4 sobre la tensión de operación, siendo un valor conservativo.

2.- Las sobretensiones por rechazo de carga producen sobretensiones fase a fase y fase a tierra del orden de 1,4, valor recomendado por la norma.

3.- El nivel de protección de los descargadores de sobretensión al impulso de maniobra,  $U_{ps}$  es igual a 375 kV.

4.- El nivel de protección de los descargadores de sobretensión al impulso tipo rayo,  $U_{pl}$  es igual a 496 kV.

5.- Se asumen los máximos valores de energización para 220 kV de acuerdo a la metodología de la norma, con el objetivo de ser conservativos.

**Tabla N° 5.4** Paso 2 Determinación de las Tensiones de Soportabilidad para Coordinación ( $U_{cw}$ )

PASO 02: Determinación de las tensiones de soportabilidad para coordinacion ( $U_{cw}$ )			
Sobretensiones temporales		Factor $K_c = 1$	
Fase-tierra	$U_{cw} = K_c \cdot U_{rp} = 1 \cdot 198 = 198$		
Fase-fase	$U_{cw} = K_c \cdot U_{rp} = 1 \cdot 343 = 343$		
Sobretensiones de frente lento		Metodo determinista usado = factor $K_{cd}$	
Equipos en entrada de linea (aislamiento externo solamente)		Otros equipos	
Fase-tierra	Fase-fase	Fase-tierra	Fase-fase
$U_{ps}/U_{e2} = 0,58$	$2 \cdot U_{ps}/U_{p2} = 0,77$	$U_{ps}/U_{e2} = 0,90$	$2 \cdot U_{ps}/U_{p2} = 1,21$
$K_{cd} = 1,1$	$K_{cd} = 1,04$	$K_{cd} = 1,06$	$K_{cd} = 1$
Valor fijado $K_{cd} = 1,1$		Valor fijado $K_{cd} = 1,1$	
$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ $U_{cw} = 413$	$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ $U_{cw} = 780$	$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ $U_{cw} = 398$	$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ $U_{cw} = 692$
Sobretensiones de frente rapido		Método estadístico simplificado	
Datos tomados de la experiencia Prestaciones requeridas		Parametro "A" : $A = 7000$ Longitud de vano : $L_{sp}(m) = 300$ tasa de defectos( $R_{km}$ ) : $0,03 \text{ km.año}$ Tasa de fallos aceptables( $R_a$ ) : $0,01 \text{ años}$	
Nivel de proteccion a impulso tipo rayo del pararrayos: $U_{pl}(kV) = 496$		$La, \text{ en m} = 222,22$	
Maxima distancia de separacion del aislamiento interno: $L(m) = 25$			
Maxima distancia de separacion del aislamiento externo: $L(m) = 65$			
Aislamiento interno: $U_{cw} = 663,55$			
Aislamiento externo: $U_{cw} = 931,64$			

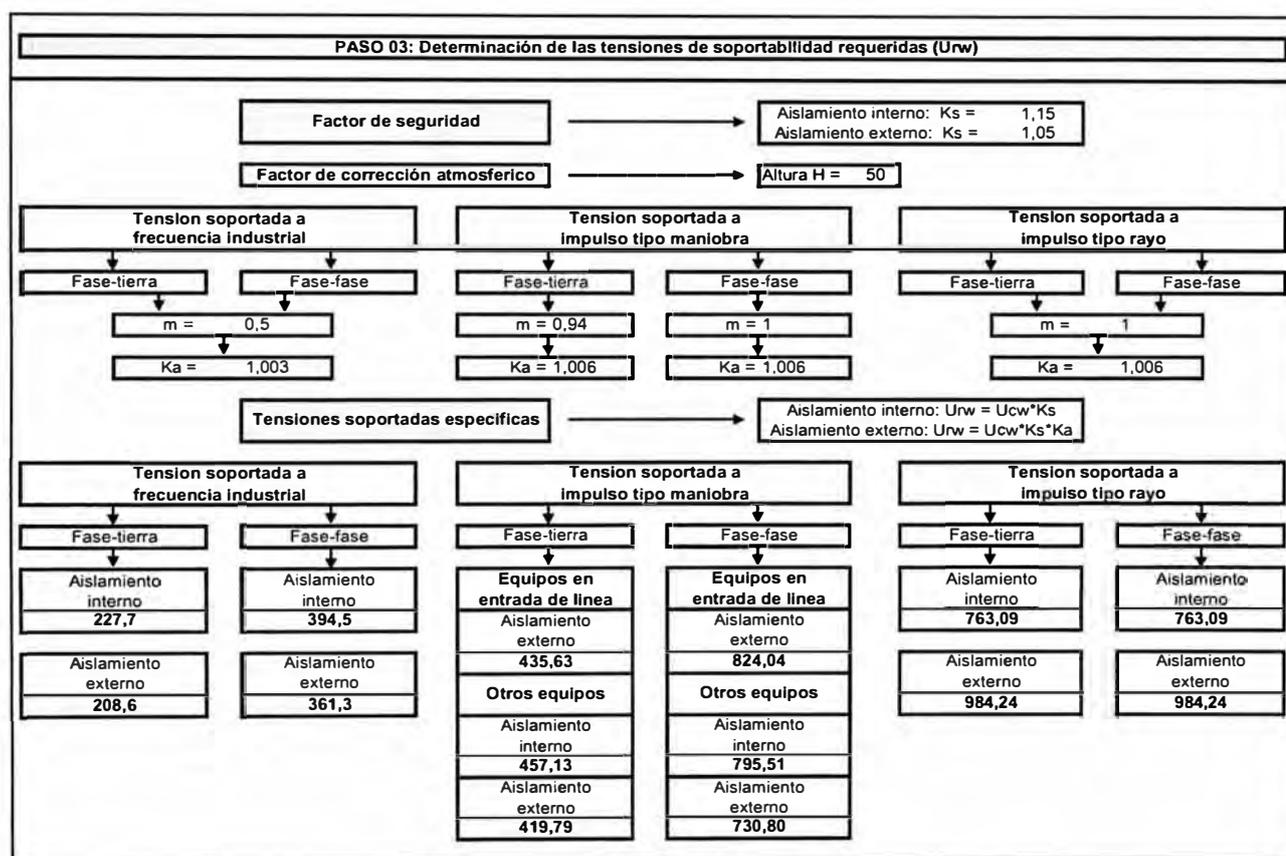
En la Tabla N° 5.4 se hizo las siguientes consideraciones:

1.- Para el cálculo de las sobretensiones de frente rápido se usa la metodología simplificada de la norma para obtener resultados conservativos, y se usaron los siguientes parámetros:

- Longitud del vano de las líneas; 300 m.
- Parámetro A, 7000 kV. (haz de 2 conductores por fase)
- Ra, tasa de falla aceptable para el equipo 1 falla/150 años.
- Rkm, 3 salidas al año por cada 100 km de línea.

2.- Las distancias de protección del aislamiento interno y externo fueron tomadas de los planos de disposición física, considerando la instalación de los descargadores de sobretensión a la entrada de las líneas y la reubicación de los transformadores de potencial, entre las celdas de línea para su protección.

**Tabla N° 5.5** Paso 3 Determinación de las tensiones de soportabilidad requeridas (Urw)

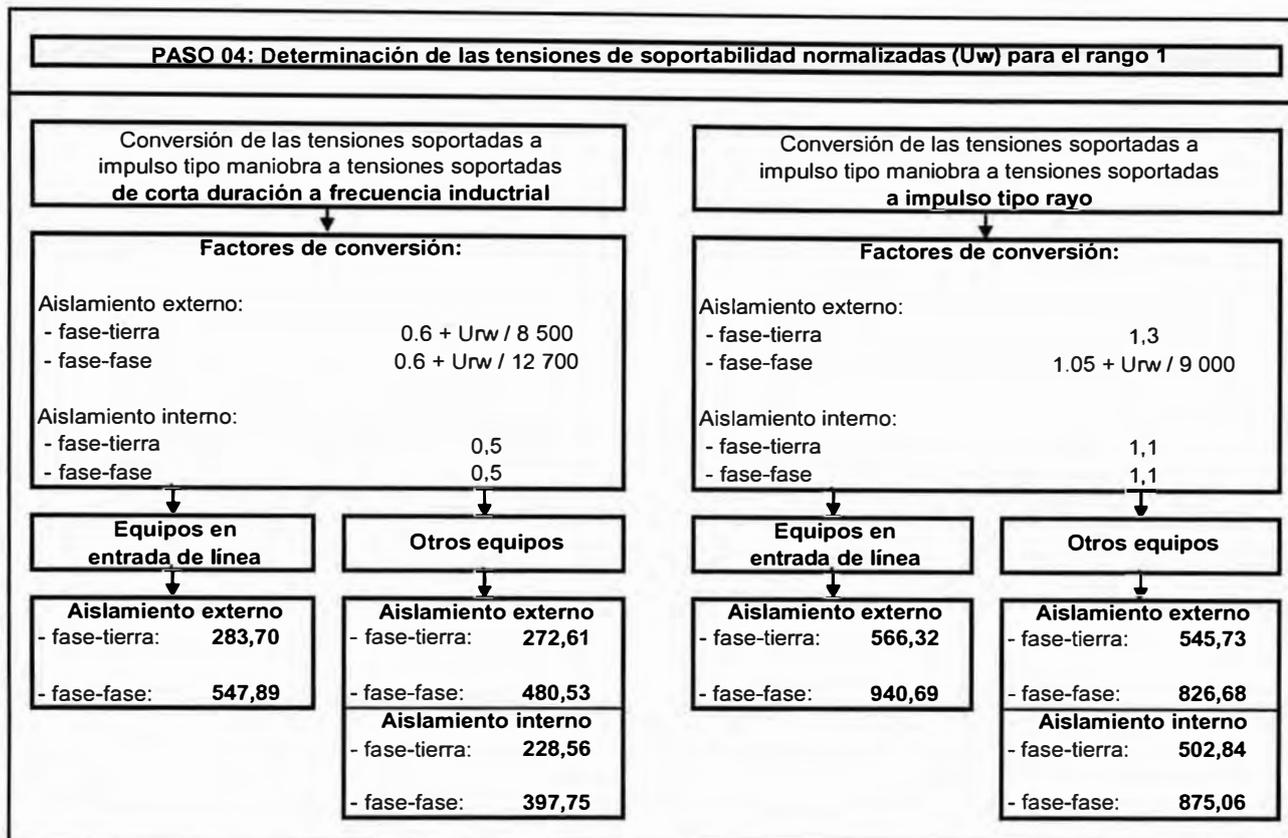


En la Tabla N° 5.5 se hizo las siguientes consideraciones:

- 1.- El factor de corrección atmosférico  $K_a$  es calculado considerando la ecuación 5.19, y que los equipos se encuentran a menos de 1000msnm.
- 2.- El factor de corrección de aislamiento externo  $K_s$  es igual a 1,05 y el factor de corrección de aislamiento interno es igual a 1,15, el lugar donde se encuentra ubicada la subestación Chilca es Lima.
- 3.- El valor de "m" se considera unitario para las sobretensiones por maniobra fase-fase y las atmosféricas fase-fase y fase-tierra, mientras que para las sobretensiones por maniobra

fase-tierra toma el valor de 0,94, según la figura 4.6 que tomada de la norma de coordinación de aislamiento IEC 60071-2.

**Tabla N° 5.6** Paso 4 Determinación de las Tensiones de Soportabilidad Normalizadas



Después de haber obtenido todos los valores de las tensiones y sobretensiones a través de los pasos correspondientes, procedemos a elaborar la Tabla N° 5.7, donde se muestra el resumen de las tensiones de soportabilidad requeridas  $U_{rw}(s)$  y su correspondiente valor a las tensiones de conversión  $U_{rw}(c)$ .

**Tabla N° 5.7** Resumen de las tensiones de soportabilidad requerida

* kV r.m.s para frecuencia industrial  * kV pico para impulsos de maniobra y rayo		<b>Aislamiento externo</b>				<b>Aislamiento interno</b>	
		<b>Equipos entrada de línea</b>		<b>Otros equipos</b>			
		<b>U<sub>rw</sub>(s)</b>	<b>U<sub>rw</sub>(c)</b>	<b>U<sub>rw</sub>(s)</b>	<b>U<sub>rw</sub>(c)</b>		
Frecuencia industrial	Fase-tierra	<b>208,60</b>	283,70	<b>208,60</b>	272,61	227,70	228,56
	Fase-fase	<b>361,30</b>	<b>547,89 (2)</b>	<b>361,30</b>	480,53	394,50	397,75
Impulso de maniobra	Fase-tierra	435,63	(1)	419,79	(1)	457,13	(1)
	Fase-fase	824,04		730,80		795,51	
Impulso atmosférico	Fase-tierra	<b>984,24</b>	566,32	<b>984,24</b>	545,73	763,09	502,84
	Fase-fase	<b>984,24</b>	940,69	<b>984,24</b>	826,68	763,09	875,06

De acuerdo a la Tabla del Anexo B se seleccionan unos valores normalizados de aislamiento correspondientes a un sistema con una tensión máxima  $U_m$  de 245 kV, estos niveles de aislamiento cubrirán cualquier aislamiento externo e interno fase-fase y fase-tierra.

Para el aislamiento interno y externo se seleccionan las siguientes tensiones de soportabilidad, las cuales cubren todos los niveles de sobretensión a los que se ven expuestos los equipos del campo:

- 460 kV para la tensión de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial, a tierra y entre polos.
- 1050 kV para la tensión de soportabilidad al impulso atmosférico, a tierra y entre polos.

En la Tabla N° 5.7 se observa lo siguiente:

1.- En rango I, los valores requeridos de soportabilidad al impulso de maniobra fase a tierra son cubiertos por la prueba de corta duración a frecuencia industrial. Los valores de soportabilidad al impulso de maniobra fase a fase son cubiertos por la prueba de corta duración a frecuencia industrial ó por la prueba de soportabilidad al impulso tipo rayo.

2.- Se observa que 547,89kV es mayor que el valor adoptado de 460kV, pero este BIL adoptado garantizará la soportabilidad a frecuencia industrial fase-fase, ya que la relación entre la tensión soportada normalizada tipo rayo fase-fase (940,69kV) y la tensión normalizada de corta duración a frecuencia industrial (547,89kV) es 1,716 que es mayor a 1,7 según la norma IEC 60071-2 en su numeral A.1, ver Anexo F del presente informe.

#### **5.4 Calculo de Nivel de Aislamiento en S.E. 138 kV (Caso SE Bayovar-VALE)**

A continuación en la Tabla N° 5.8, Tabla N° 5.9, Tabla N° 5.10 y la Tabla N° 5.11 se muestran los pasos para la coordinación de aislamiento en el nivel de tensión de 138 kV.

En la Tabla N° 5.8 se hizo las siguientes consideraciones:

1.- En el nivel de 138 kV se tiene un sistema sólidamente puesto a tierra y de acuerdo a la recomendación de la norma el factor de falla a tierra no es superior a 1,4 sobre la tensión de operación, siendo un valor conservativo.

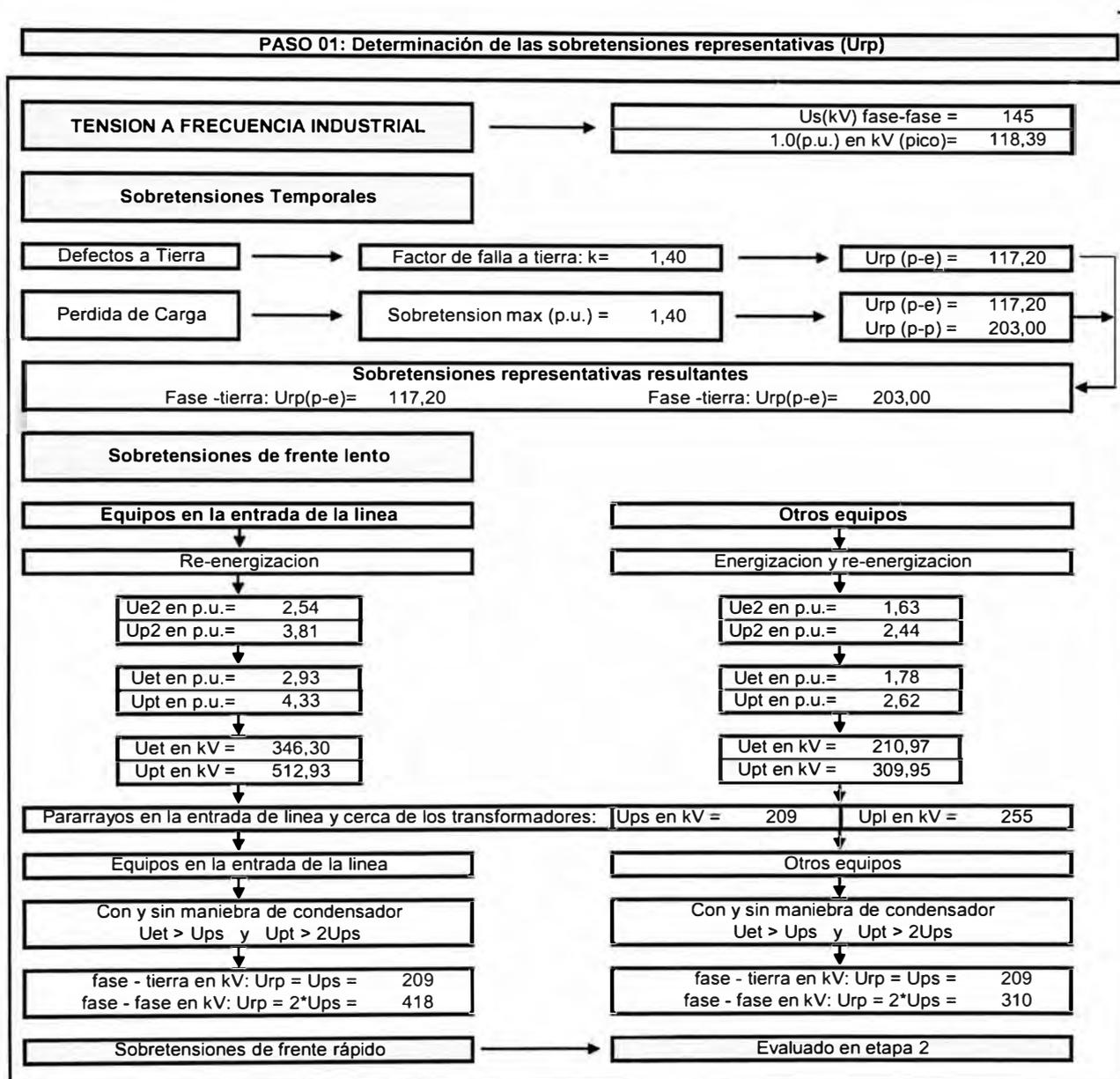
2.- Las sobretensiones por rechazo de carga producen sobretensiones fase a fase y fase a tierra del orden de 1,4, valor recomendado por la norma.

3.- El nivel de protección de los descargadores de sobretensión al impulso de maniobra,  $U_{ps}$  es igual a 209 kV.

4.- El nivel de protección de los descargadores de sobretensión al impulso tipo rayo,  $U_{pl}$  es igual a 255 kV.

5.- Se asumen los máximos valores de energización para línea de 138 kV en los cuales no existe re-energización trifásica ya que se cuenta con un transformador como carga única y este no debe ser re-energizado.

**Tabla N° 5.8 Paso 1 Determinación de las sobretensiones representativas (U<sub>rp</sub>)**



En la Tabla N° 5.9 se hizo las siguientes consideraciones:

1.- Para el cálculo de las sobretensiones de frente rápido se usa la metodología simplificada de la norma para obtener resultados conservativos. Para el cálculo se tienen los siguientes parámetros:

- Longitud del vano de las líneas, 400 m.
- Parámetro A, 4500 kV. (un conductores por fase)
- Ra, tasa de falla aceptable para el equipo 1 falla/150 años.

- Rkm, 3 salidas al año por cada 100 km de línea.

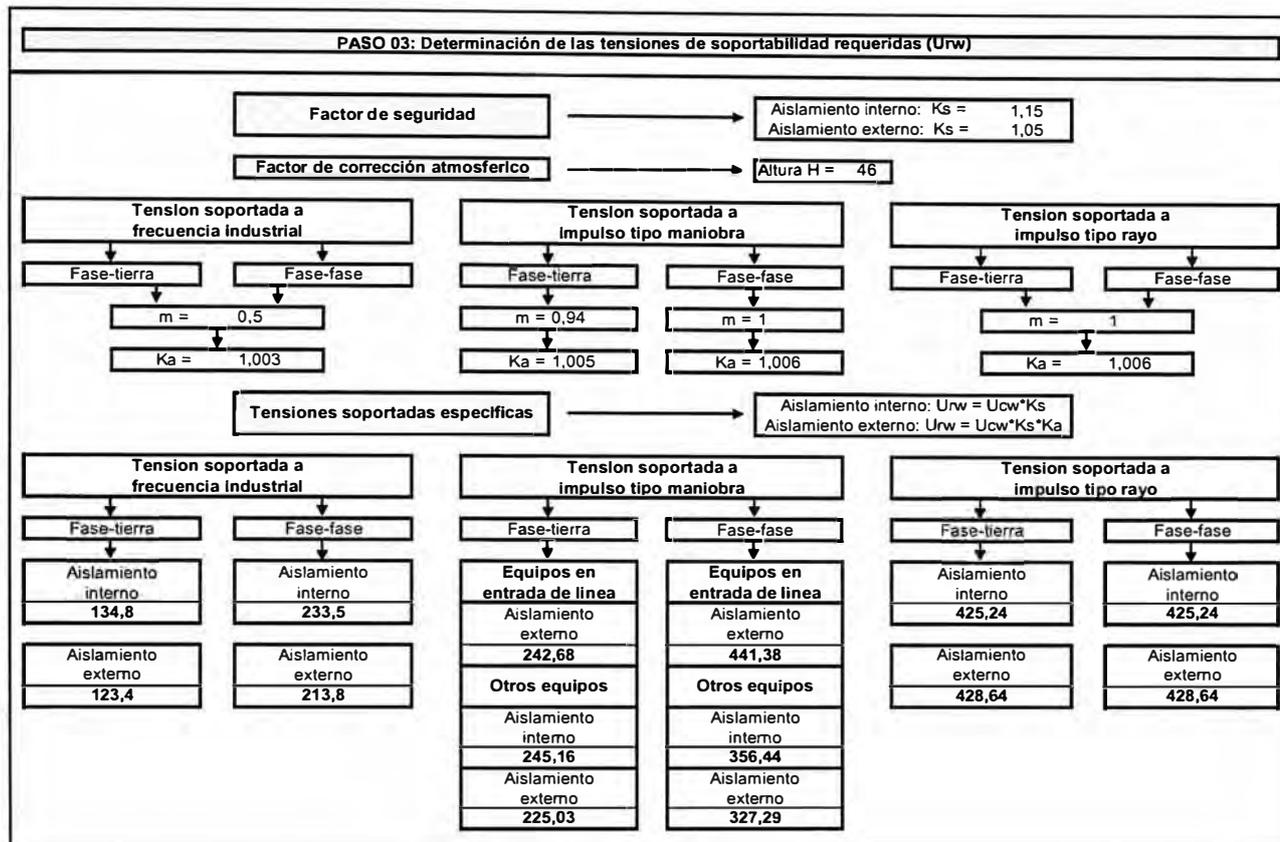
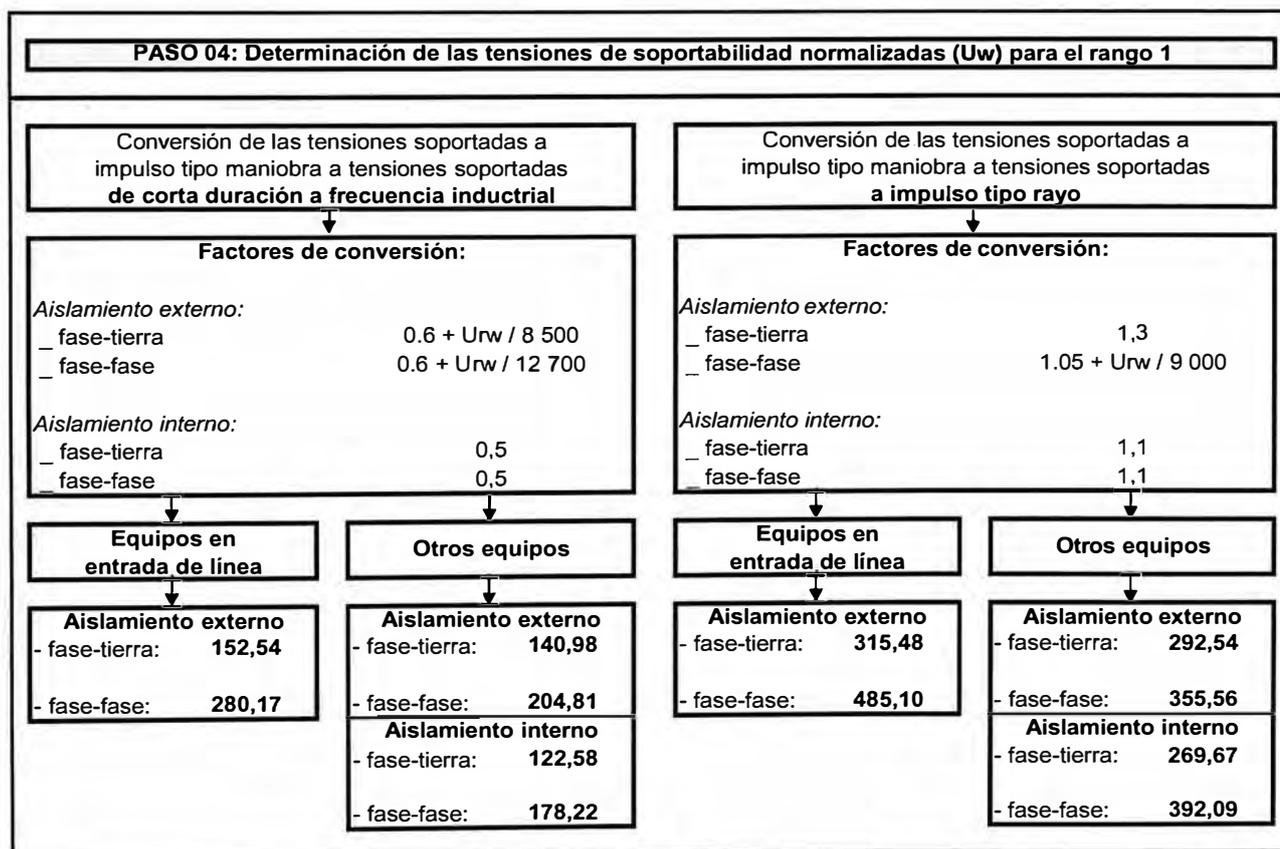
2.- Las distancias de protección del aislamiento interno y externo fueron tomadas de los planos de disposición física, considerando la instalación de los descargadores de sobretensión a la entrada de las líneas.

**Tabla N° 5.9** Paso 2 Determinación de las Tensiones de Soportabilidad para Coordinación (Ucw)

PASO 02: Determinación de las tensiones de soportabilidad para coordinacion (Ucw)			
Sobretensiones temporales		Factor Kc = 1	
Fase-tierra	$U_{cw} = K_c \cdot U_{rp} = 1 \cdot 117,2 = 117,20$		
Fase-fase	$U_{cw} = K_c \cdot U_{rp} = 1 \cdot 203 = 203,00$		
Sobretensiones de frente lento		Metodo determinista usado = factor Kcd	
Equipos en entrada de linea (aislamiento externo solamente)		Otros equipos	
Fase-tierra	Fase-fase	Fase-tierra	Fase-fase
Ups/Ue2= 0,70	2*Ups/Up2= 0,93	Ups/Ue2= 1,09	2*Ups/Up2= 1,45
Kcd = 1,10	Kcd = 1,00	Kcd = 1,02	Kcd = 1
Valor fijado Kcd = 1,1		Valor fijado Kcd = 1,1	
$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ Ucw = 230	$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ Ucw = 418	$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ Ucw = 213	$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ Ucw = 310
Sobretensiones de frente rapido		Método estadístico simplificado	
Datos tomados de la experiencia Prestaciones requeridas		Parametro "A" : A = 4500 Longitud de vano : Lsp(m) = 400 tasa de defectos(Rkm) : 0,03 km.año Tasa de fallos aceptables(Ra) : 0,01 años	
Nivel de proteccion a impulso tipo rayo del pararrayos: Upl(kV) = 255		La, en m = 222,22	
Maxima distancia de separacion del aislamiento interno: L(m) = 31,74			
Maxima distancia de separacion del aislamiento externo: L(m) = 41,74			
Aislamiento interno: Ucw = 369,77			
Aislamiento externo: Ucw = 405,93			

En la Tabla N° 5.10 se hizo las siguientes consideraciones:

- 1.- El factor de corrección atmosférico Ka es calculado considerando la ecuación 5.19, y que los equipos se encuentran a menos de 1000msnm.
- 2.- El valor de "m" se considera unitario para las sobretensiones por maniobra fase-fase y las atmosféricas fase-fase y fase-tierra, mientras que para las sobretensiones por maniobra fase-tierra toma el valor de 0,94, según la figura 4.6 que tomada de la norma de coordinación de aislamiento IEC 60071-2.

**Tabla N° 5.10 Paso 3 Determinación de las tensiones de soportabilidad requeridas (Urw)**

**Tabla N° 5.11 Paso 4 Determinación de las Tensiones de Soportabilidad Normalizadas**


Después de haber obtenido todos los valores de las tensiones y sobretensiones a través de los pasos correspondientes, procedemos a elaborar la Tabla N° 5.12, donde se muestra el resumen de las tensiones de soportabilidad requeridas  $U_{rw}(s)$  y su correspondiente valor a las tensiones de conversión  $U_{rw}(c)$ .

**Tabla N° 5.12** Resumen de las tensiones de soportabilidad requerida

* kV r.m.s para frecuencia industrial		Aislamiento externo				Aislamiento interno	
		Equipos entrada de línea		Otros equipos			
* kV pico para impulsos de maniobra y rayo		U <sub>rw</sub> (s)	U <sub>rw</sub> (c)	U <sub>rw</sub> (s)	U <sub>rw</sub> (c)	U <sub>rw</sub> (s)	U <sub>rw</sub> (c)
Frecuencia industrial	Fase-tierra	<b>123,40</b>	152,54	<b>123,40</b>	140,98	134,80	122,58
	Fase-fase	<b>213,80</b>	<b>280,17 (2)</b>	<b>213,80</b>	204,81	233,50	178,22
Impulso de maniobra	Fase-tierra	242,68	(1)	225,03	(1)	245,16	(1)
	Fase-fase	441,38		327,29		356,44	
Impulso atmosférico	Fase-tierra	<b>428,64</b>	315,48	<b>428,64</b>	292,54	425,24	269,67
	Fase-fase	<b>428,64</b>	485,10	<b>428,64</b>	355,56	425,24	392,09

De acuerdo a la Tabla del Anexo B se seleccionan unos valores normalizados de aislamiento correspondientes a un sistema con una tensión máxima  $U_m$  de 145 kV, estos niveles de aislamiento cubrirán cualquier aislamiento externo e interno fase-fase y fase-tierra.

Para el aislamiento interno y externo se seleccionan las siguientes tensiones de soportabilidad, las cuales cubren todos los niveles de sobretensión a los que se ven expuestos los equipos del campo:

- 275 para la tensión de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial, a tierra y entre polos.
- 650 kV para la tensión de soportabilidad al impulso atmosférico, a tierra y entre polos.

En la Tabla N° 5.12 se observa lo siguiente:

1.- En Rango I, los valores requeridos de soportabilidad al impulso de maniobra fase a tierra son cubiertos por la prueba de corta duración a frecuencia industrial. Los valores de soportabilidad al impulso de maniobra fase a fase son cubiertos por la prueba de corta duración a frecuencia industrial ó por la prueba de soportabilidad al impulso tipo rayo.

2.- Se observa que 280,17kV es mayor que el valor adoptado de 275kV, pero este BIL adoptado garantizará la soportabilidad a frecuencia industrial fase-fase, ya que la relación entre la tensión soportada normalizada tipo rayo fase-fase (485,10kV) y la tensión

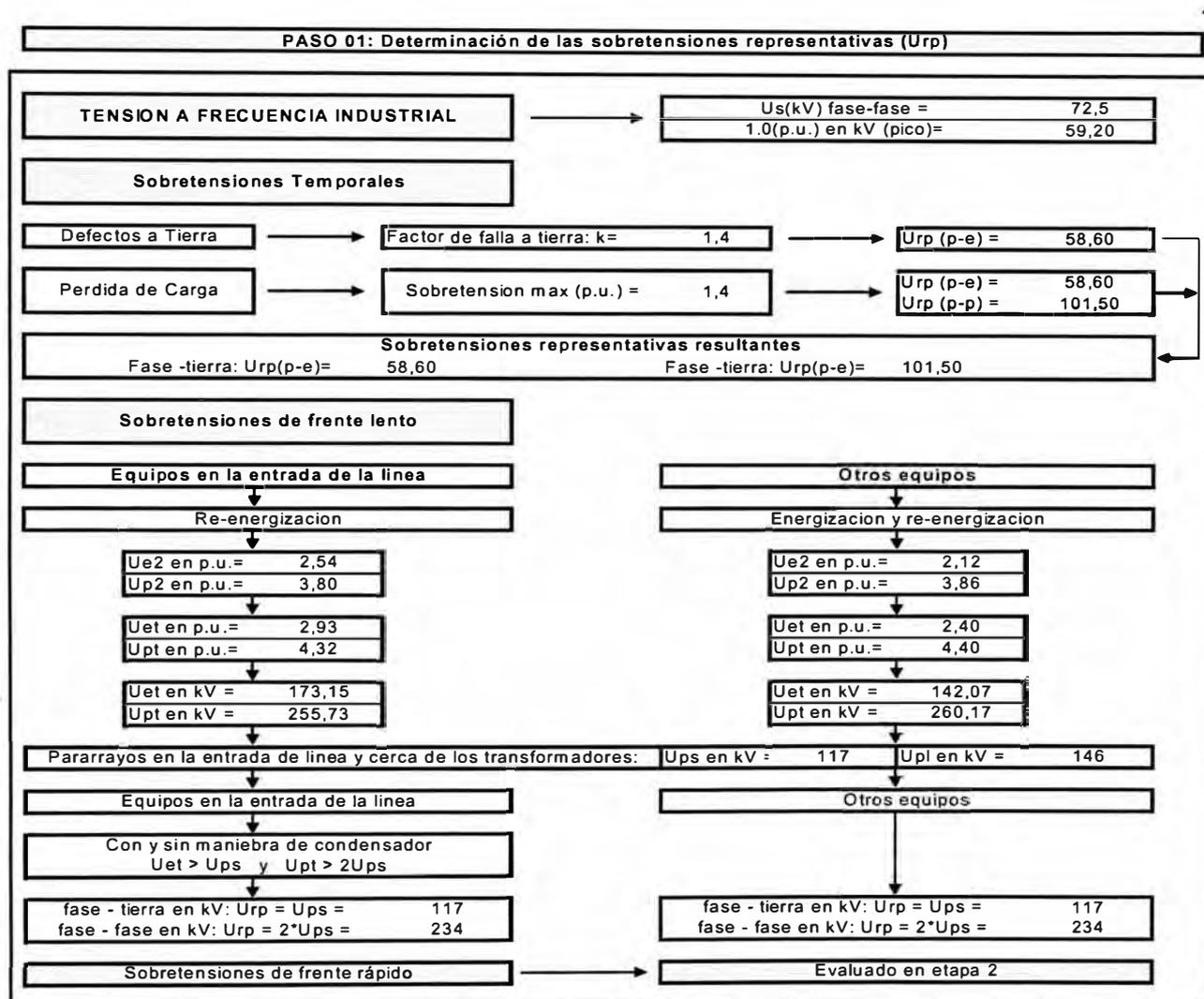
normalizada de corta duración a frecuencia industrial (280,17kV) es 1,731 que es mayor a 1,7 según la norma IEC 60071-2 en su numeral A.1, ver Anexo F del presente informe.

### 5.5 Calculo de Nivel de Aislamiento en S.E. 60 kV (Caso SE Santa Rosa-REP)

A continuación en la Tabla N° 5.13, Tabla N° 5.14, Tabla N° 5.15 y la Tabla N° 5.16 se muestran los pasos para la coordinación de aislamiento en el nivel de tensión de 138kV.

En la Tabla N° 5.13 se observa el resumen del paso 1 para determinar las sobretensiones representativas.

**Tabla N° 5.13** Paso 1 Determinación de las sobretensiones representativas (U<sub>rp</sub>)



En la Tabla N° 5.13 se hizo las siguientes consideraciones:

- 1.- En el nivel de 60 kV se tiene un sistema solidamente puesto a tierra y de acuerdo a la recomendación de la norma el factor de falla a tierra no es superior a 1,4 sobre la tensión de operación, siendo un valor conservativo.
- 2.- Las sobretensiones por rechazo de carga producen sobretensiones fase a fase y fase a tierra del orden del 1,4, valor recomendado por la norma.

3.- El nivel de protección del pararrayos al impulso tipo maniobra,  $U_{ps}$  es igual a 117 kV.

4.- El nivel de protección del pararrayos al impulso tipo rayo,  $U_{pl}$  es igual a 146 kV.

En la Tabla N° 5.14 se observa el resumen del paso 2 para determinar las tensiones de soportabilidad para coordinación.

**Tabla N° 5.14** Paso 2 Determinación de las Tensiones de Soportabilidad para Coordinación ( $U_{cw}$ )

PASO 02: Determinación de las tensiones de soportabilidad para coordinación ( $U_{cw}$ )			
Sobretensiones temporales		Factor $K_c = 1$	
Fase-tierra	$U_{cw} = K_c \cdot U_{rp} = 1 \cdot 58,6 = 58,60$		
Fase-fase	$U_{cw} = K_c \cdot U_{rp} = 1 \cdot 101,5 = 101,50$		
Sobretensiones de frente lento		Método determinista usado = factor $K_{cd}$	
Equipos en entrada de línea (aislamiento externo solamente)		Otros equipos	
Fase-tierra	Fase-fase	Fase-tierra	Fase-fase
$U_{ps}/U_{e2} = 0,78$	$2 \cdot U_{ps}/U_{p2} = 1,04$	$U_{ps}/U_{e2} = 0,93$	$2 \cdot U_{ps}/U_{p2} = 1,02$
$K_{cd} = 1,09$	$K_{cd} = 1,00$	$K_{cd} = 1,06$	$K_{cd} = 1,00$
Valor fijado $K_{cd} = 1,09$		Valor fijado $K_{cd} = 1,06$	
$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ $U_{cw} = 128$	$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ $U_{cw} = 234$	$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ $U_{cw} = 124$	$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{rp}$ $U_{cw} = 234$
Sobretensiones de frente rápido		Método estadístico simplificado	
Datos tomados de la experiencia Prestaciones requeridas		Parametro "A": $A = 900$ Longitud de vano: $L_{sp}(m) = 100$ tasa de defectos( $R_{km}$ ): $0,03 \text{ km.año}$ Tasa de fallos aceptables( $R_a$ ): $0,01 \text{ años}$	
Nivel de protección a impulso tipo rayo del pararrayos:		$U_{pl}(kV) = 146$	$L_a, \text{ en m} = 222,22$
Maxima distancia de separacion del aislamiento interno:		$L(m) = 54,90$	
Maxima distancia de separacion del aislamiento externo:		$L(m) = 54,90$	
Aislamiento interno:		$U_{cw} = 222,67$	
Aislamiento externo:		$U_{cw} = 222,67$	

En la Tabla N° 5.14 se hizo las siguientes consideraciones:

1.- Para el cálculo de las sobretensiones de frente rápido se tienen los siguientes parámetros:

- Longitud del vano de las líneas, 100 m.
- Parámetro A, 900 kV. (un conductores por fase)
- $R_a$ , tasa de falla aceptable para el equipo 1 falla/150 años.
- $R_{km}$ , 3 salidas al año por cada 100 km de línea.

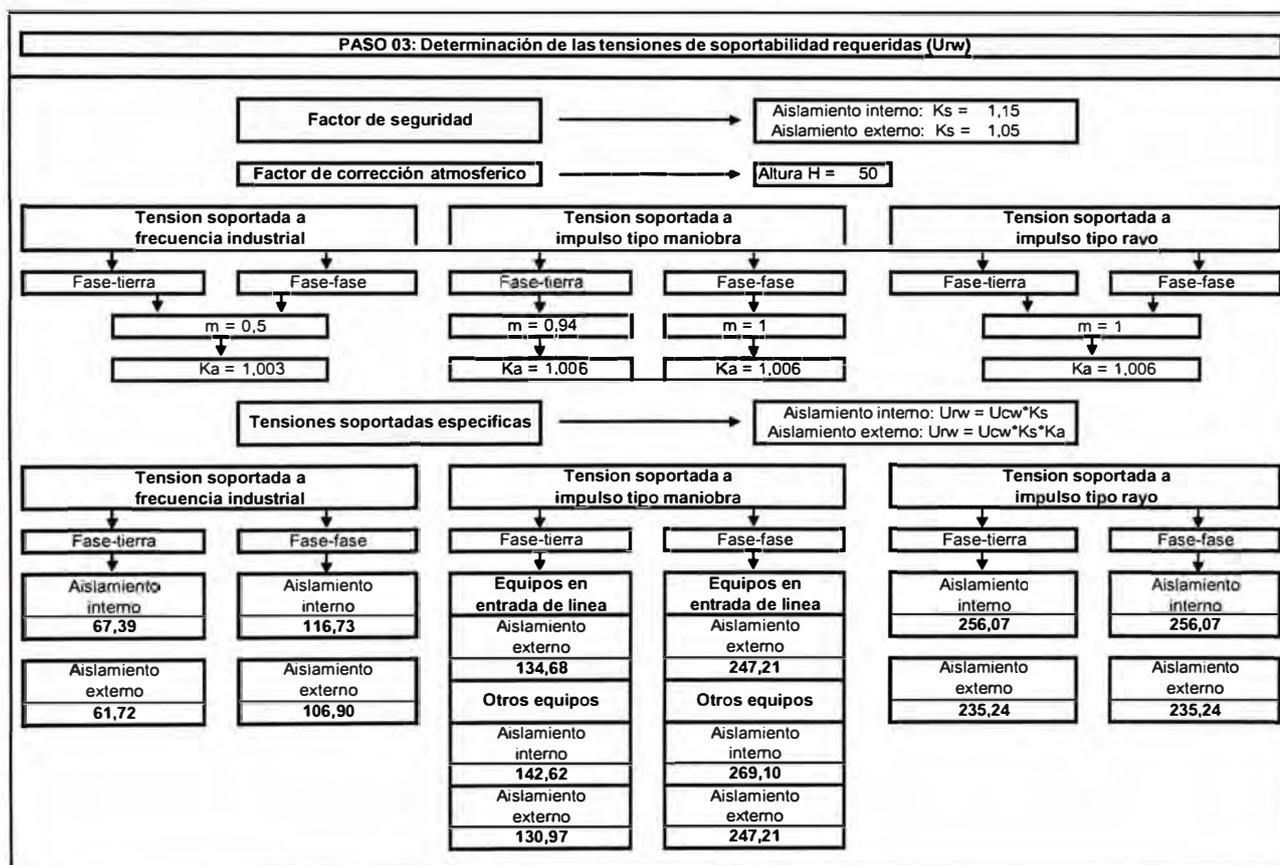
2.- Las distancias de protección del aislamiento interno y externo fueron tomadas de los planos de disposición física.

En la Tabla N° 5.15 se observa el resumen del paso 3 para determinar las tensiones de

soportabilidad requeridas, y hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1.- El factor de corrección atmosférico  $K_a$  es calculado considerando la ecuación 5.19, y que los equipos se encuentran a menos de 1000msnm.
- 2.- El factor de corrección de aislamiento externo  $K_s$  es igual a 1,05 y el factor de corrección de aislamiento interno es igual a 1,15, el lugar donde se encuentra ubicada la subestación Santa Rosa es Lima.
- 3.- El valor de “m” se considera unitario para las sobretensiones por maniobra fase-fase y las atmosféricas fase-fase y fase-tierra, mientras que para las sobretensiones por maniobra fase-tierra toma el valor de 0,94, según la figura 4.6 que tomada de la norma de coordinación de aislamiento IEC 60071-2.

**Tabla N° 5.15** Paso 3 Determinación de las tensiones de soportabilidad requeridas ( $U_{rw}$ )



En la Tabla N° 5.16 se observa el resumen del paso 4 para determinar las tensiones de soportabilidad normalizadas.

Después de haber obtenido todos los valores de las tensiones y sobretensiones a través de los pasos correspondientes, procedemos a elaborar la Tabla N° 5.17, donde se muestra el resumen de las tensiones de soportabilidad requeridas  $U_{rw}(s)$  y su correspondiente valor a las tensiones de conversión  $U_{rw}(c)$ .

De acuerdo a la Tabla del Anexo B se seleccionan unos valores normalizados de

aislamiento correspondientes a un sistema con una tensión máxima  $U_m$  de 72,5 kV, estos niveles de aislamiento cubrirán cualquier aislamiento externo e interno fase-fase y fase-tierra.

**Tabla N° 5.16** Paso 4 Determinación de las Tensiones de Soportabilidad Normalizadas

PASO 04: Determinación de las tensiones de soportabilidad normalizadas ( $U_w$ ) para el rango 1							
Conversión de las tensiones soportadas a impulso tipo maniobra a tensiones soportadas de corta duración a frecuencia industrial				Conversión de las tensiones soportadas a impulso tipo maniobra a tensiones soportadas a impulso tipo rayo			
<b>Factores de conversión:</b> <i>Aislamiento externo:</i> - fase-tierra $0.6 + U_{rw} / 8\ 500$ - fase-fase $0.6 + U_{rw} / 12\ 700$ <i>Aislamiento interno:</i> - fase-tierra 0,5 - fase-fase 0,5				<b>Factores de conversión:</b> <i>Aislamiento externo:</i> - fase-tierra 1,3 - fase-fase $1.05 + U_{rw} / 9\ 000$ <i>Aislamiento interno:</i> - fase-tierra 1,1 - fase-fase 1,1			
Equipos en entrada de línea		Otros equipos		Equipos en entrada de línea		Otros equipos	
<b>Aislamiento externo</b> - fase-tierra: <b>82,94</b> - fase-fase: <b>153,14</b>		<b>Aislamiento externo</b> - fase-tierra: <b>80,60</b> - fase-fase: <b>153,14</b> <b>Aislamiento interno</b> - fase-tierra: <b>71,31</b> - fase-fase: <b>134,55</b>		<b>Aislamiento externo</b> - fase-tierra: <b>175,09</b> - fase-fase: <b>266,36</b>		<b>Aislamiento externo</b> - fase-tierra: <b>170,27</b> - fase-fase: <b>266,36</b> <b>Aislamiento interno</b> - fase-tierra: <b>156,89</b> - fase-fase: <b>296,01</b>	

**Tabla N° 5.17** Resumen de las tensiones de soportabilidad requerida

* kV r.m.s para frecuencia industrial		Aislamiento externo				Aislamiento interno	
		Equipos entrada de línea		Otros equipos			
		* kV pico para impulsos de maniobra y rayo	U <sub>rw</sub> (s)	U <sub>rw</sub> (c)	U <sub>rw</sub> (s)	U <sub>rw</sub> (c)	U <sub>rw</sub> (s)
Frecuencia industrial	Fase-tierra	61,70	82,94	61,70	80,60	67,40	71,31
	Fase-fase	106,90	<b>153,14 (2)</b>	106,90	153,14	116,70	134,55
Impulso de maniobra	Fase-tierra	134,68	(1)	130,97	(1)	142,62	(1)
	Fase-fase	247,21		247,21		269,10	
Impulso atmosférico	Fase-tierra	235,24	175,09	235,24	170,27	256,07	156,89
	Fase-fase	235,24	266,36	235,24	266,36	256,07	296,01

Para el aislamiento interno y externo se seleccionan las siguientes tensiones de

soportabilidad, las cuales cubren todos los niveles de sobretensión a los que se ven expuestos los equipos del campo:

- 140 kV para la tensión de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial, a tierra y entre polos.
- 325 kV para la tensión de soportabilidad al impulso atmosférico, a tierra y entre polos.

De la Tabla N° 5.17 se observa lo siguiente:

1.-En Rango I, los valores requeridos de soportabilidad al impulso de maniobra fase a tierra son cubiertos por la prueba de corta duración a frecuencia industrial. Los valores de soportabilidad al impulso de maniobra fase a fase son cubiertos por la prueba de corta duración a frecuencia industrial ó por la prueba de soportabilidad al impulso tipo rayo.

2.-Se observa que el aislamiento externo fase-fase (153,14kV) es mayor que el valor adoptado de 140kV, pero este BIL adoptado garantizará la soportabilidad a frecuencia industrial fase-fase, ya que la relación entre la tensión soportada normalizada tipo rayo fase-fase (266,36kV) y la tensión normalizada de corta duración a frecuencia industrial (153,14kV) es 1,739 que es mayor a 1,7 según la norma IEC 60071-2 en su numeral A.1, ver Anexo F del presente informe.

En el Anexo E tenemos las características técnicas de los pararrayos empleados en la metodología de coordinación de aislamiento.

## CONCLUSIONES

1.- Se concluye que el estudio de la coordinación de aislamiento es muy importante para seleccionar los niveles de aislamiento adecuados en los equipos de una subestación eléctrica, de manera que estos equipos puedan soportar los fenómenos naturales y fenómenos propios del sistema eléctrico a los que serán sometidos.

2.- El uso de la norma IEC 60071 es fundamental porque establece los cálculos y pasos adecuados para la selección del aislamiento, basada en experiencias y pruebas realizadas a equipos; y nos recomienda utilizar valores normalizados dependiendo del tipo de sobretensión.

3.- La geografía del Perú conlleva a que existan subestaciones eléctricas a elevadas altitudes sobre el nivel del mar, haciendo necesario aplicar la norma con las correcciones por altitud pertinentes para la coordinación del aislamiento externo del equipamiento; seleccionando así adecuados niveles de aislamiento, particularmente para sobretensiones atmosféricas.

4.- La norma IEC 60071 para la coordinación de aislamiento aplica un método combinado, porque aplica tanto el método estadístico como el método determinista, aplica un método simplificado según se conozcan los datos de sobretensiones.

5.- Dependiendo del rango de nivel de tensión: Rango I ó Rango II (Ver Anexo B y C) la norma IEC 60071 define las tensiones soportadas normalizadas necesarias para la selección del nivel de aislamiento:

\* Para los materiales del rango I son suficientes la tensión soportada normalizada para impulso tipo rayo y la tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia industrial.

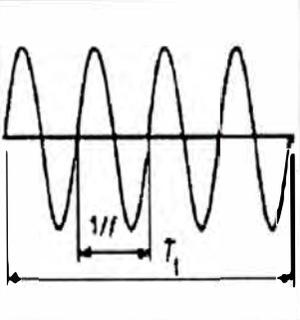
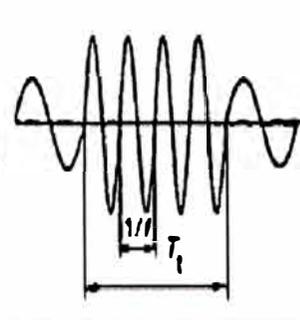
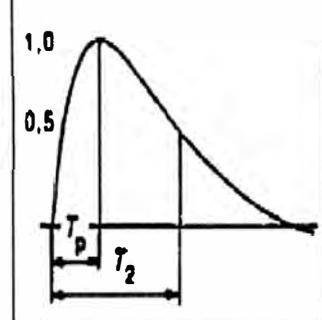
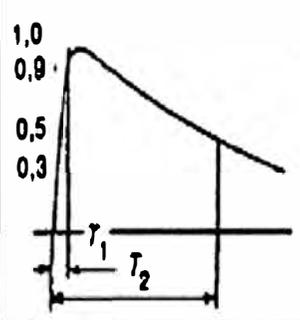
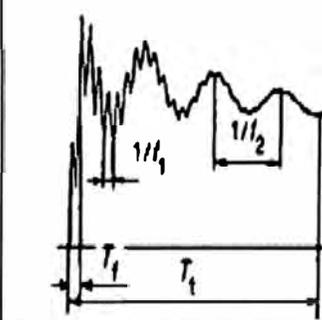
\* Para materiales del rango II son suficientes la tensión soportada normalizada para

impulso tipo maniobra y la tensión soportada normalizada para impulso tipo rayo.

6.- La utilización de pararrayos conlleva a un mejor dominio del nivel de protección, especialmente por la mejora de sus características como su capacidad de limitación y su fiabilidad. Colocar pararrayos en las subestaciones eléctricas ayuda a mitigar las sobretensiones de origen atmosférico y de maniobra.

# **ANEXOS**

**ANEXO A Clases y formas de onda de sobretensiones**

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

**ANEXO B Niveles de aislamiento normalizados para Rango I**

<b>Tensión más elevada para el material</b> $U_m$ <b>kV</b> <b>(valor eficaz)</b>	<b>Tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia industrial</b> <b>kV</b> <b>(valor eficaz)</b>	<b>Tensión soportada normalizada a los impulsos tipo rayo</b> <b>kV</b> <b>(valor de cresta)</b>
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
125	(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	1 050

**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.

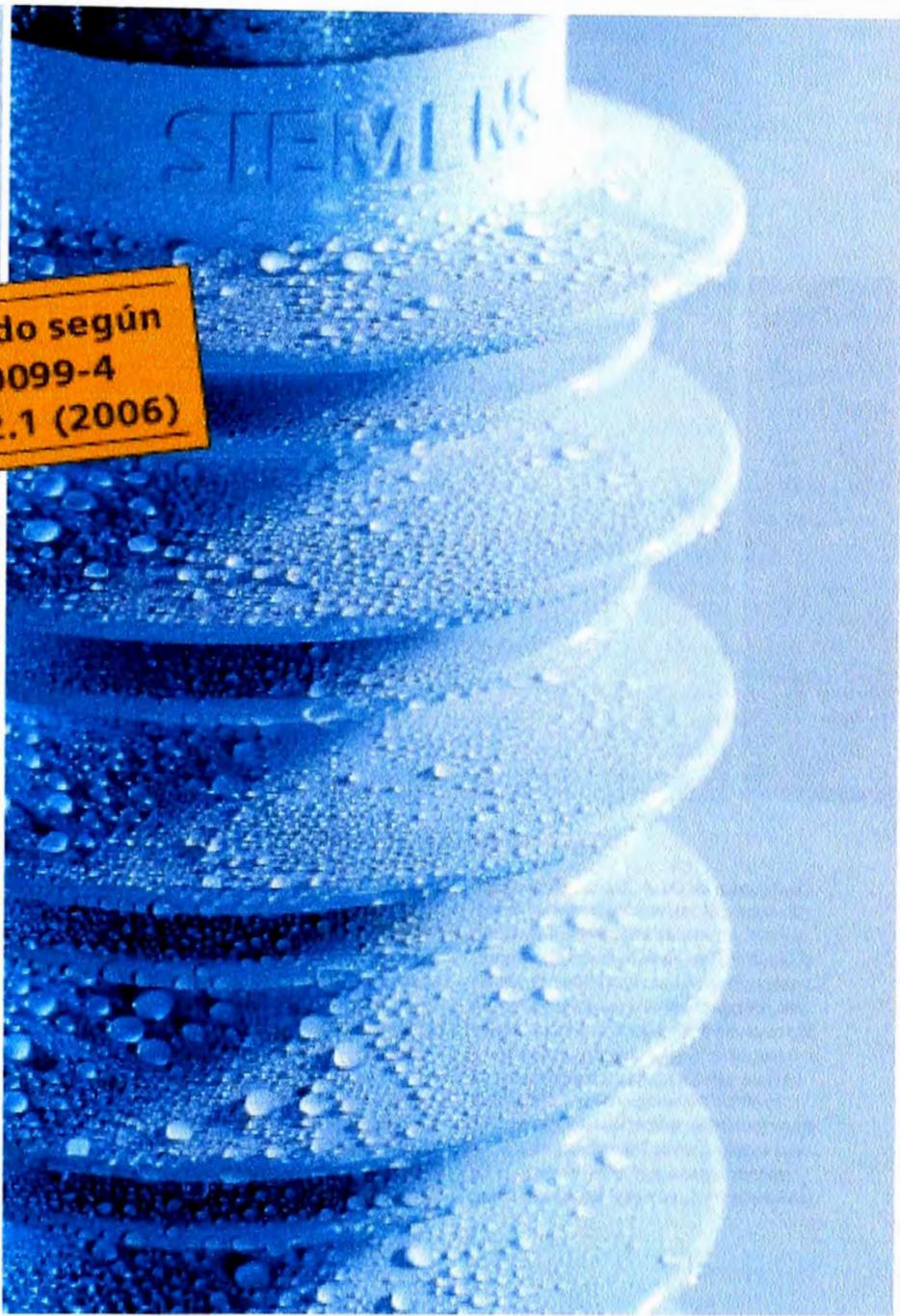
## ANEXO C Niveles de aislamiento normalizados para Rango II

Tensión más elevada para el material $U_m$  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 de cresta)	Fase-tierra  kV (valor de cresta)	Entre fases (relación al valor de cresta fase-tierra)	
300	750	750	1,50	850 950
	750	850	1,50	950 1 050
362	850	850	1,50	950 1 050
	850	950	1,50	1 050 1 175
420	850	850	1,60	1 050 1 175
	950	950	1,50	1 175 1 300
	950	1 050	1,50	1 300 1 425
525	950	950	1,70	1 175 1 300
	950	1 050	1,60	1 300 1 425
	950	1 175	1,50	1 425 1 550
765	1 175	1 300	1,70	1 675 1 800
	1 175	1 425	1,70	1 800 1 950
	1 175	1 550	1,60	1 950 2 100

### Notas:

- 1.- Valor de la componente de impulso del ensayo combinado aplicable.
- 2.- La introducción de  $U_m=550kV$  (en lugar de  $525kV$ ), de  $800kV$  (en lugar de  $765kV$ ), de  $1200kV$ , de un valor comprendido entre  $765kV$  y  $1200kV$  y las tensiones soportadas normalizadas asociadas esta en estudio.

**ANEXO D Pararrayos de envolvente polimérico**



**Certificado según  
IEC 60099-4  
Edición 2.1 (2006)**

**Descargador de sobretensión 3EL2 –  
Protección superior hasta 550 kV**

Peso ligero. Alto rendimiento.

Power Transmission and Distribution

**SIEMENS**

# Simplemente irresistible.

... aunque él sí resiste todas las inclemencias.

Nuestro nuevo descargador de sobretensión es pionero gracias a un diseño y una estructura extraordinarios. Las descargas y la entrada de humedad son prácticamente imposibles en cualesquiera condiciones físicas o ambientales, ya que los bloques de óxido metálico (OM) van recubiertos directamente de sílicona.

Este descargador ofrece una protección óptima para tensiones de servicio desde 7,2 hasta 550 kV. La combinación de estas características con una carcasa ligera y una estructura robusta da como resultado un descargador de sobretensión muy económico para estaciones y líneas de transmisión.

## Buenos motivos para elegir el 3EL

Los descargadores de sobretensión 3EL llevan los mismos bloques de OM que nuestras reputadas series 3EP y 3EQ, con lo cual disfrutan de las mismas características eléctricas. La novedad es su carcasa con diseño jaula, confeccionada con varillas de sílicona y plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP), que ofrece múltiples ventajas.

### Diseño jaula: alta resistencia mecánica y seguridad frente a sobrecargas

Los bloques de OM del 3EL se encuentran alojados en el interior de una jaula confeccionada de varillas de FRP que, gracias

a su gran resistencia a la tracción, sujetan los bloques. Esta característica convierte a los 3EL en los descargadores de mayor resistencia del mercado.

En caso de sobrecarga o en el caso poco probable de un cortocircuito, no podrán formarse altas presiones en el descargador de sobretensión, ya que los bloques de OM no están instalados en el interior de una carcasa hermética ni están recubiertos por material rígido. Gracias a esta estructura, el arco puede escapar directamente a través de la carcasa blanda de sílicona, al mismo tiempo que se reduce al mínimo la posibilidad de que salgan disparadas piezas del interior del descargador y dañen otros componentes instalados en las inmediaciones.

## Larga vida útil

Mientras que la hidrofobia de otros plásticos se debilita rápidamente, la sílicona la conserva durante mucho tiempo, incluso durante décadas. Además, el tipo de sílicona que se utiliza en nuestros descargadores 3EL es ignífuga y autoextinguible, no sufre erosión y es resistente a los rayos UV, lo cual garantiza una larga conservación de la forma de la carcasa (imposible usando otros polímeros comparables, como el EPDM). La resistencia al ensayo dinámico de los descargadores 3EL se ha puesto a prueba alcanzando un nivel de resistencia mínimo aceptado (1000 h de test de resistencia salina).

### Innovaciones en el IEC 60099-4, Edición 2.1:

El último cambio en la edición 2.1, publicada como estándar obligatorio en Julio del 2006, incluye una nueva clasificación de los descargadores de sobretensión según su diseño interno. Según la forma de proceder con las pruebas de corto circuito, los descargadores están subdivididos en „Diseño tipo A” y „Diseño tipo B” dependiendo de la existencia de un volumen con gas en su interior. Mientras que los descargadores „tipo A” son típicamente huecos (por ejemplo carcasas de porosa lana o composite),

los „tipo B” no contienen gas o apenas tienen un pequeño volumen con gas en su interior y por lo tanto no disponen de dispositivos de alivio de presión (como es el caso de descargadores con envolvente moldeada directamente sobre las resistencias). Por lo tanto, no se permite más que los descargadores „tipo B” sean probados mediante un conductor fusible a través del interior de las resistencias. En vez de ello, se debe usar el llamado „método pre-falla” antes de aplicar el nivel alta corriente.



## Siempre listo

Materiales de primera calidad, un diseño extraordinario y una relación calidad-precio imbatible hacen del 3EL la mejor solución

**Durante el transporte y la instalación**

- Peso reducido, instalación flexible y sencilla, montaje posible en todos los ángulos
- Resistencia a daños de transporte, instalación y vandalismo

**Durante el servicio**

- Servicio seguro en sobrecarga y alta resistencia mecánica gracias a su diseño jaula
- Excelentes características eléctricas
- La carcasa, confeccionada de silicona resistente y de hidrofobia duradera, garantiza un funcionamiento perfecto incluso en condiciones ambientales extremas (industria / polución, costa, desierto)
- Línea de fuga extendida
- Ignífugo y autoextinguible

**Durante toda su vida útil**

- Larga duración, penetración de humedad impedida por recubrimiento de silicona directamente moldeado sobre los bloques de OM

El diseño de la jaula es otro punto decisivo para prolongar la vida útil del descargador 3EL. La silicona se moldea directamente sobre los bloques de OM para evitar con seguridad la formación de huecos y burbujas de aire que permitan descargas parciales o la penetración de humedad.

### Peso reducido: instalación flexible y sencilla

El uso del plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP) y de silicona para la carcasa tiene como consecuencia una reducción considerable del peso de nuestros descargadores, facilitando su transporte. La instalación es flexible, ya que son posibles todos los ángulos de montaje (por ejemplo, horizontal, vertical o suspendido como descargador de línea de transmisión). Además, se puede prescindir de construir pesadas estructuras de soporte, así como de toda la maquinaria necesaria para tales trabajos – grandes grúas.

El recubrimiento del 3EL es resistente a los daños que pudieran producirse durante el transporte o la instalación, por tormentas, terremotos o vandalismo.

### Silicona: protección óptima contra polución

La silicona utilizada en nuestros descargadores 3EL es altamente hidrófobo – repele el agua y los depósitos de suciedad para que no lleguen a formar una película conductora en la superficie. Así se evitan corrientes superficiales y el riesgo de descargas eléctricas, sobre todo en zonas muy contaminadas o donde abundan las neblinas salinas. La larga línea de fuga del descargador 3EL ( $\approx 25 \text{ mm/kV}$ ) contribuye también notablemente a su buen funcionamiento en regiones contaminadas.

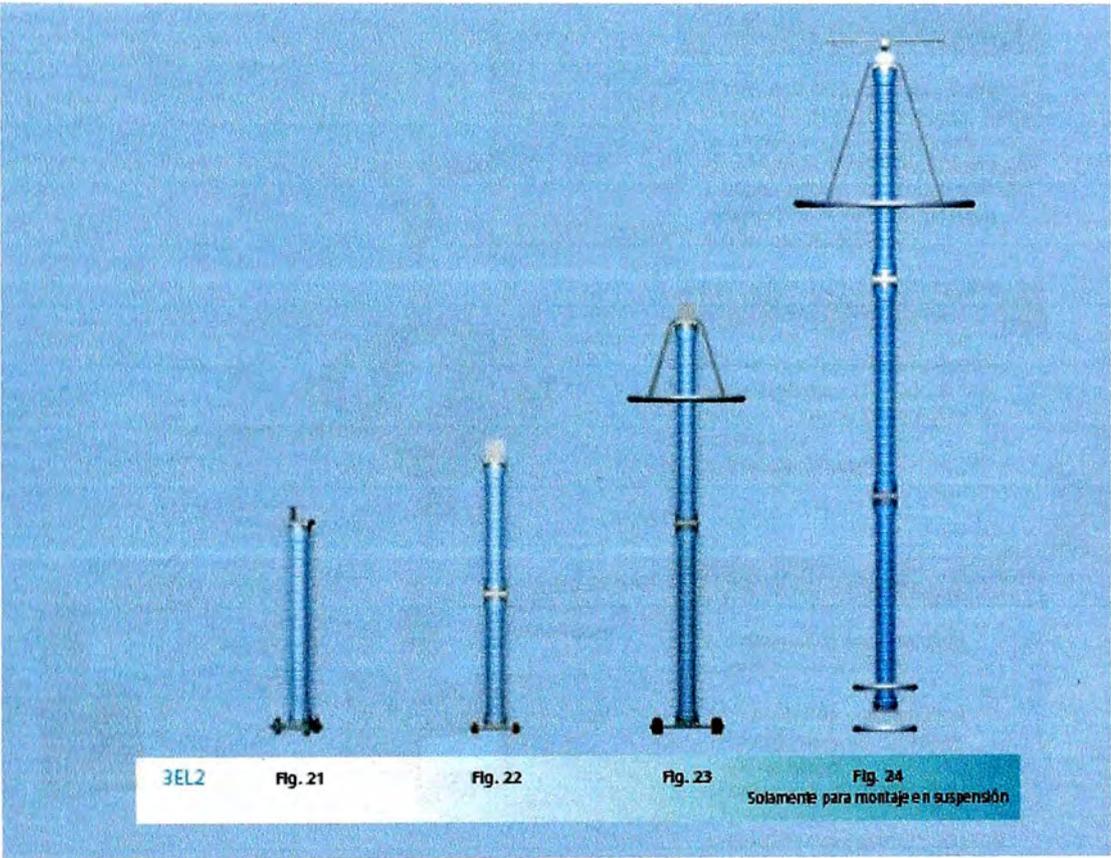
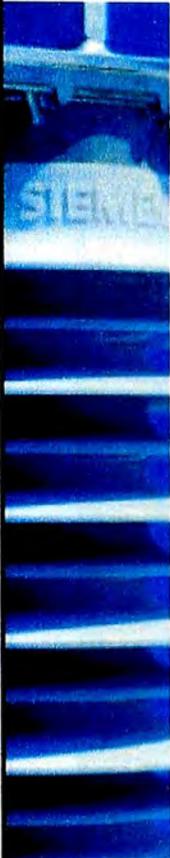
### Aplicaciones:

- Como descargador de estación o de línea de transmisión para proteger distribuidores, transformadores y otros equipos de sistemas de alta tensión de hasta  $U_m = 550 \text{ kV}$  contra sobretensiones producidas por rayos o de conmutación.
- Para todas las aplicaciones de descarga de sobretensión que impliquen grandes cargas mecánicas (de hasta  $4 \text{ kNm}$ )
- Para todas las posiciones de montaje: suspendido de componentes, en vertical o suspendido como descargador de líneas de transmisión.
- Para todas aquellas aplicaciones en las que se precise un descargador robusto y ligero.

Clase LD	Inputo de corriente de larga duración Valor máx. / A	Montaje fijo o en suspensión											Solamente montaje en suspensión			
		$U_m$	7.2	12	24	36	52	72	123	145	170	245	300	362	420	550
2	650															
3																
3	1200															
4																

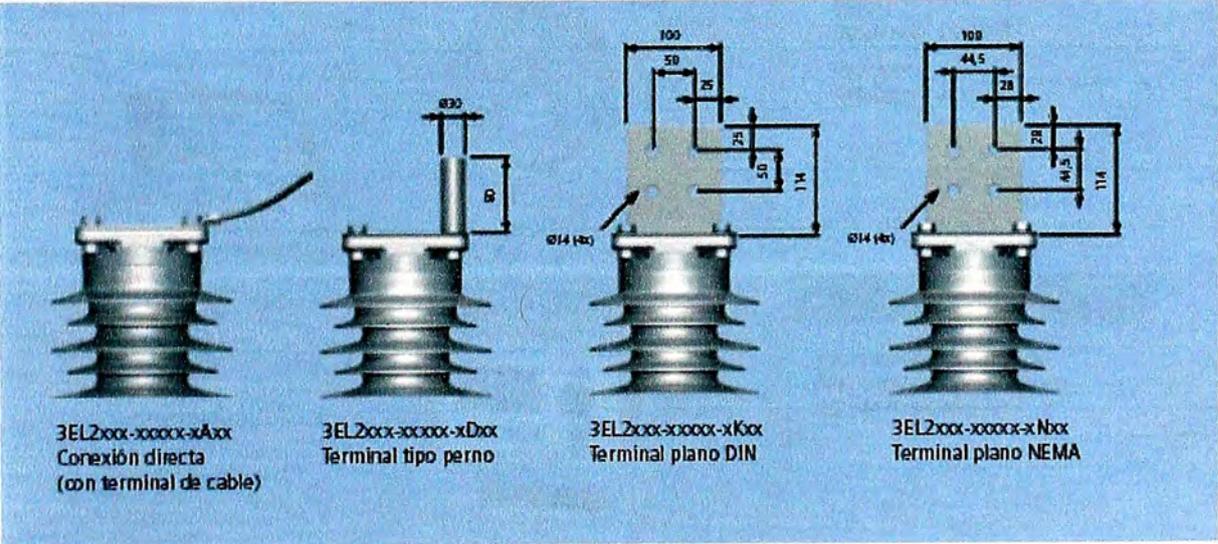
Serie 3EL2

# Siempre la carcasa adecuada.



3EL2 Fig. 21 Fig. 22 Fig. 23 Fig. 24  
Solamente para montaje en suspensión

## Conexiones a línea



3EL2xxx-xxxxx-xAxx  
Conexión directa  
(con terminal de cable)

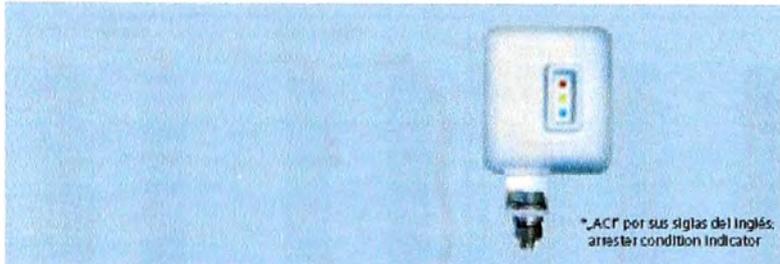
3EL2xxx-xxxxx-xDxx  
Terminal tipo perno

3EL2xxx-xxxxx-xKxx  
Terminal plano DIN

3EL2xxx-xxxxx-xNxx  
Terminal plano NEMA

## Aparatos de control para el descargador de sobretensión

Estos aparatos de control son compatibles con todos los descargadores de sobretensión que aparecen en este catálogo



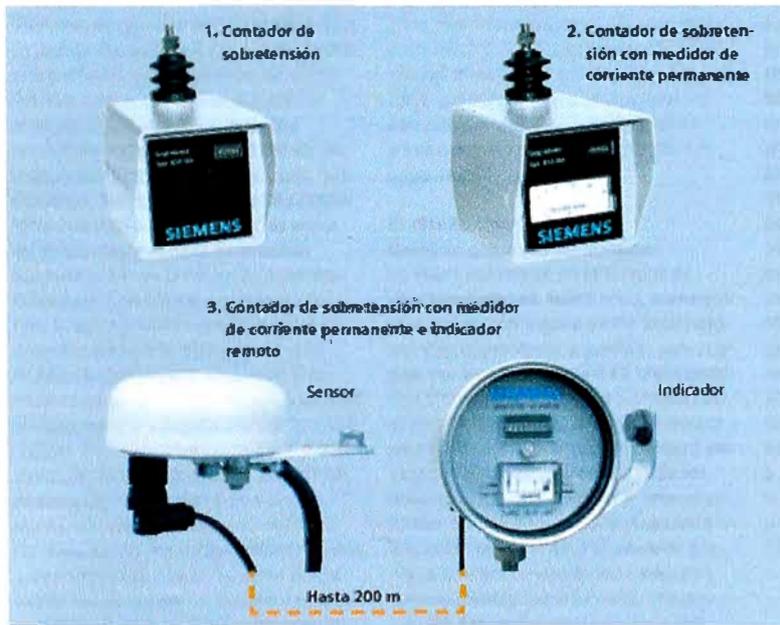
### ACI: Indicador del Estado del Pararrayos

El Indicador del Estado del Pararrayos\* muestra en un vistazo el estado actual de un pararrayos. Su sistema de visualización "traffic light" es fácil de entender y está basado en la Tercera evaluación armónica de la corriente de fuga. Referencia: 3EX5070



### Explosor de control

Para estimar la corriente que pasa por el descargador en caso de sobretensión y contar las sacudidas de sobretensión. Referencia: 3EX6040



### Contador de sobretensión

1. Contador de sobretensión  
Referencia: 3EX5030
2. Contador de sobretensión con medidor de corriente permanente  
Referencia: 3EX5050
3. Contador de sobretensión con medidor de corriente permanente e indicador remoto  
Sensor  
Referencia: 3EX5060  
Indicador  
Referencia: 3EX5062

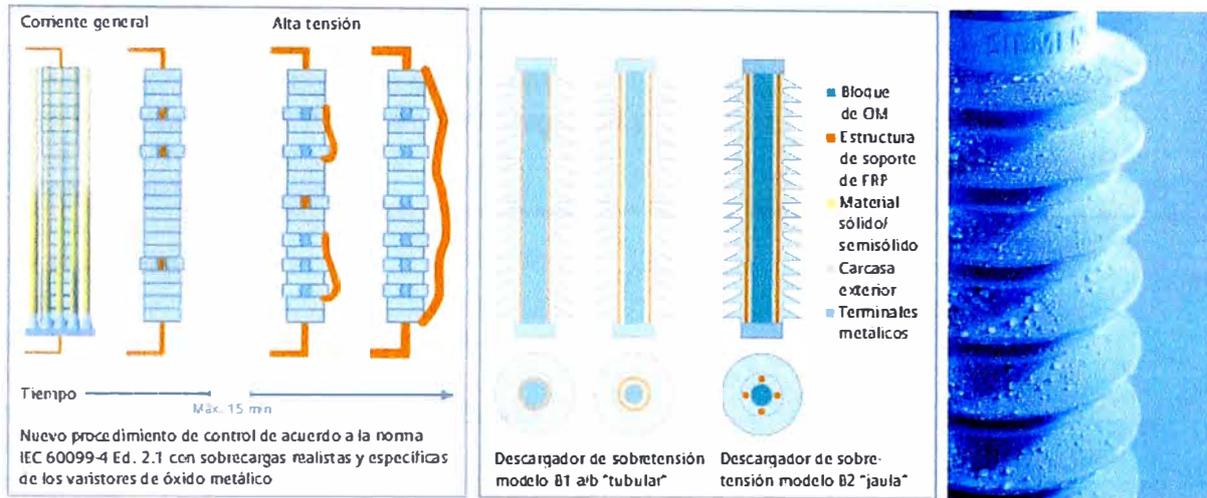


### LCM II

Aparatos de control para descargadores de sobretensión de óxido metálico

# Por fin, claridad sobre la **seguridad** de descargadores de sobretensión tipo jaula y tubulares

Siemens suministra descargadores de sobretensión con diseño jaula acorde a la nueva norma IEC 60099-4 Ed. 2.1



## IEC 60099-4 Ed. 2.1:

Siemens es pionera en la certificación. La norma IEC 60099-4 Ed. 2.1 prescribe que todos los descargadores de sobretensión deben someterse a distintas pruebas siguiendo unos métodos concretos, incluyendo el control de su comportamiento ante sobrecargas. Sin embargo, los resultados no son comparables debido a las divergencias entre los diferentes métodos de pruebas (dependiendo de la estructura del descargador). Con los descargadores del tipo A, por ejemplo (descargadores en una cápsula hueca, porcelana o polímero), se comprueba en principio la resistencia de la carcasa frente a un arco voltaico interno y la evolución de la sobrepresión tras una sobrecarga de la parte eléctricamente activa. En el caso de los descargadores del tipo B con diseño jaula o tubular el método es distinto: en ellos, se induce deliberadamente una sobrecarga eléctrica en la parte activa hasta que se rompe un bloque de óxido metálico, lo cual se acerca bastante a las condiciones reales en caso de fallo del descargador. El diseño en jaula de Siemens evita que los pedazos del bloque OM salgan disparados, mientras que el arco voltaico puede seguir su curso a través de la cubierta de silicona.

*Por esta razón, el estándar de seguridad exigido sólo se puede garantizar aplicando un test de alivio de presión acorde a la IEC 60099-4 Ed. 2.1, tal y*

*como Siemens lo viene haciendo ya para sus descargadores de sobretensión 3EK7 y 3EL2. Las viejas certificaciones acorde a la IEC 60099-4 Ed. 2.0 (que todavía usaban un fusible) no son comparables con las actuales y suponen un posible riesgo para la seguridad.*

## El diseño tipo jaula:

**dominio absoluto de Siemens**  
Lo más importante en la técnica de descargadores es, sobre todo, conseguir una protección segura de las instalaciones eléctricas frente a posibles sobrecargas. Por eso, si se desarrolla una alternativa técnica (como lo hizo Siemens con el diseño tipo jaula), la eficacia técnica de los nuevos descargadores deberá ser como mínimo equivalente a la de los otros diseños. Naturalmente, una alternativa de este tipo también lleva asociadas otras ventajas para el usuario: gracias a una construcción más sencilla y con excelentes características mecánicas, los descargadores tipo jaula son más ligeros que sus equivalentes tubulares. Esto no sólo ahorra material, sino que además, gracias a su estructura sin espacio hueco interior, los descargadores de sobretensión tipo jaula no necesitan dispositivos para aliviar la sobrepresión. Por otro lado, el recubrimiento de silicona se vulcaniza directamente sobre la estructura activa, lo cual evita la entrada de humedad y las descargas parciales.

## Ligeros, estables, seguros

Este proceso especial de fabricación presenta otras ventajas decisivas con respecto a los descargadores de sobretensión tubulares, en los cuales la carcasa no suele ir fundida sobre la estructura, sino que se trata de una simple cubierta. El resultado es que es imposible evitar que quede aire atrapado y las descargas parciales, aparte de que la resistencia mecánica también es notablemente menor. En las mallas de fibra de vidrio de los descargadores tubulares suele utilizarse resina epóxica, un material que puede arder en caso de sobrecarga, mientras que la cubierta de silicona utilizada en los descargadores de sobretensión Siemens es autoextinguible. En consecuencia, los modelos tipo jaula y tubulares de Siemens ofrecen una solución ideal para descargadores de polímero, según la dureza de las exigencias mecánicas de cada caso.

Siemens AG  
Power Transmission and Distribution  
High Voltage Division  
Tel.: +49 (30) 3 86-33 222  
Fax: +49 (30) 3 86-26 721  
E-mail: arrester@siemens.de  
[www.siemens.com/arrester-download](http://www.siemens.com/arrester-download)

## ANEXO E Datos Técnicos de Pararrayos utilizados

### HOJA DE DATOS TECNICOS

**Tipo : 3EP2 192 3PG32**

Marca: Siemens

Procedencia: Alemania

#### Datos del sistema

Tensión nominal del sistema	220 kV
Tensión máxima de servicio entre fases (Um)	245 kV
Nivel de aislamiento del equipo que se protege (BIL)	1050 kV
Puesta a tierra del sistema	rigida
Frecuencia nominal o industrial	48 ... 62 Hz

#### Datos eléctricos

Norma	IEC 60099-4
Tensión nominal del pararrayos (Ur)	192 kV
Tensión de operación continua (Uc)	154 kV
Intensidad nominal de descarga (In, 8/20ms)	20 kA
Clase de descarga de línea	3
Corriente resistida a impulso de larga duración (2 ms)	1200 A
Resistencia a impulso de alta corriente (4/10 us)	100 kA
Intensidad nominal de corto circuito (0.2 s)	65 kA
Tensión residual máxima para:	
20 kA 1/2 us	528 kV
5 kA 8/20 us	424 kV
10 kA 8/20 us	451 kV
20 kA 8/20 us	496 kV
40 kA 8/20 us	541 kV
500 A 30/60 us	366 kV
1 kA 30/60 us	375 kV
2 kA 30/60 us	393 kV
Sobretensiones temporales 1s	221 kV
Sobretensiones temporales 10s	206 kV
Capacidad de absorción de energía - térmica	10 kV/kVr
Capacidad de absorción de energía - impulso	5.6 kV/kVr
Nivel de aislamiento a frecuencia industrial (1 min, humedo), pararrayos completo	480 kV
Nivel de aislamiento a impulso atmosférico (1.2/50 us)*, pararrayos completo	1200 kV

#### Datos mecánicos

Altura (H)	3240 mm
Distancia de fuga	8070 mm
Número de unidades	2
Peso (G)	275 kg
Color de la envolvente	marrón
Fuerzas máximas admisibles en el cabezal, estática	1540 N
Fuerzas máximas admisibles en el cabezal, dinámica	3850 N
Accesorio 1	Contador de descarga

## HOJA DE DATOS TECNICOS

**Tipo : 3EP2 111 2PD32**

Marca: Siemens

Procedencia: Alemania

### Datos del sistema

Tensión nominal del sistema	138 kV
Tensión máxima de servicio entre fases (Um)	145 kV
Nivel de aislamiento del equipo que se protege (BIL)	650 kV
Puesta a tierra del sistema	rígida
Frecuencia nominal o industrial	48 ... 62 Hz

### Datos eléctricos

Norma	IEC 60099-4
Tensión nominal del pararrayos (Ur)	111 kV
Tensión de operación continua (Uc)	89 kV
Intensidad nominal de descarga (In, 8/20ms)	10 kA
Clase de descarga de línea	3
Corriente resistida a impulso de larga duración (2 ms)	850 A
Resistencia a impulso de alta corriente (4/10 us)	100 kA
Intensidad nominal de corto circuito (0.2 s)	65 kA
Tensión residual máxima para:	
10 kA 1/2 us	271 kV
5 kA 8/20 us	240 kV
10 kA 8/20 us	255 kV
20 kA 8/20 us	283 kV
40 kA 8/20 us	322 kV
500 A 30/60 us	204 kV
1 kA 30/60 us	209 kV
2 kA 30/60 us	220 kV
Sobretensiones temporales 1s	119 kV
Sobretensiones temporales 10s	111 kV
Capacidad de absorción de energía - térmica	5 kV/kVr
Capacidad de absorción de energía - impulso	3.8 kV/kVr
Nivel de aislamiento a frecuencia industrial (1 min, húmedo), pararrayos completo	218 kV
Nivel de aislamiento a impulso atmosférico (1.2/50 us)*, pararrayos completo	574 kV

### Datos mecánicos

Altura (H)	1235 mm
Distancia de fuga	2595 mm
Número de unidades	1
Peso (G)	84,3 kg
Color de la envolvente	marrón
Fuerzas máximas admisibles en el cabezal, estática	4030 N
Fuerzas máximas admisibles en el cabezal, dinámica	10120 N
Accesorio 1	Contador de descarga

## HOJA DE DATOS TECNICOS

**Tipo : 3EP5 055 1PJ21**

Marca: Siemens

Procedencia: Alemania

### Datos del sistema

Tensión nominal del sistema	60 kV
Tensión máxima de servicio entre fases (Um)	72,5 kV
Nivel de aislamiento del equipo que se protege (BIL)	350 kV
Puesta a tierra del sistema	rigida
Frecuencia nominal o industrial	48 ... 62 Hz

### Datos eléctricos

Norma	IEC 60099-4
Tensión nominal del pararrayos (Ur)	55 kV
Tensión de operación continua (Uc)	44 kV
Intensidad nominal de descarga (In, 8/20ms)	10 kA
Clase de descarga de línea	2
Corriente resistida a impulso de larga duración (2 ms)	500 A
Resistencia a impulso de alta corriente (4/10 us)	100 kA
Intensidad nominal de corto circuito (0.2 s)	40 kA
Tensión residual máxima para:	
10 kA 1/2 us	155 kV
5 kA 8/20 us	136 kV
10 kA 8/20 us	146 kV
20 kA 8/20 us	163 kV
40 kA 8/20 us	187 kV
500 A 30/60 us	112 kV
1 kA 30/60 us	117 kV
2 kA 30/60 us	122 kV
Sobretensiones temporales 1s	63,2 kV
Sobretensiones temporales 10s	59,1 kV
Capacidad de absorción de energía - térmica	5,00 kV/kVr
Capacidad de absorción de energía - impulso	2,60 kV/kVr
Nivel de aislamiento a frecuencia industrial (1 min, humedo), pararrayos completo	191 kV
Nivel de aislamiento a impulso atmosférico (1.2/50 us)*, pararrayos completo	448 kV

### Datos mecánicos

Altura (H)	896 mm
Distancia de fuga	2279 mm
Número de unidades	1
Peso (G)	40,5 kg
Color de la envolvente	marrón
Fuerzas máximas admisibles en el cabezal, estática	890 N
Fuerzas máximas admisibles en el cabezal, dinámica	2230 N
Accesorio 1	Contador de descarga

## ANEXO F    Numeral A.1 del Anexo A de la norma IEC 60071-2

71-2 © IEC: 1996

– 117 –

### A.1 Range I

The air clearance phase-to-earth and phase-to-phase is determined from table A.1 for the rated lightning impulse withstand voltage. The standard short-duration power-frequency withstand voltage can be disregarded when the ratio of the standard lightning impulse to the standard short-duration power-frequency withstand voltage is higher than 1,7.

### A.2 Range II

The phase-to-earth clearance is the higher value of the clearances determined for the rod-structure configuration from table A.1 for the standard lightning impulse, and from table A.2 for the standard switching impulse withstand voltages respectively.

The phase-to-phase clearance is the higher value of the clearances determined for the rod-structure configuration from table A.1 for the standard lightning impulse and from table A.3 for the standard switching impulse withstand voltages respectively.

The values are valid for altitudes which have been taken into account in the determination of the required withstand voltages (see 4.3.2).

The clearances necessary to withstand the standard lightning impulse withstand voltage for the longitudinal insulation in range II can be obtained by adding 0,7 times the maximum operating voltage phase-to-earth peak to the value of the standard lightning impulse voltage and by dividing the sum by 500 kV/m.

The clearances necessary for the longitudinal standard switching impulse withstand voltage in range II are smaller than the corresponding phase-to-phase value. Such clearances usually exist only in type tested apparatus and minimum values are therefore not given in this guide.

A continuación la versión en español del numeral A.1, sacada de la norma UNE-EN-60071-2 que es la versión oficial en español de la norma IEC 60071-2:

### A.1 Gama I

Las distancias en el aire entre fase y tierra y entre fases se determinan por medio de la tabla A.1 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.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Norma IEC 60071-1 “Insulation Coordination - Part. 1: Definitions, principles and rules”, International Electrotechnical Comisión, Suiza, 2006.
- [2] Carlos F. Ramírez, “Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión”, segunda edición, Hernán Mejía Villegas S.A., Colombia, 2003.
- [3] SIEMENS, “Descargadores de Sobretensiones de Oxido Metálico-Fundamentos”, primera edición, Alemania, 2002.
- [4] Norma IEC 60094-5 “Surge Arrester – Part. 5: Selection and application recommendations”, International Electrotechnical Comisión, Suiza, 2000.
- [5] Juan Martínez Velasco, “Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión”, primera edición, Mc Graw Hill, España, 2008.
- [6] Norma IEC 60071-2 “Insulation Coordination - Part. 2: Application guide”, International Electrotechnical Comisión, Suiza, 1996.