

PROGRAMA DE AHORRO DE ENERGIA

CALIDAD DE LA ENERGIA

Ponente
Ing. Eugenio Téllez Ramírez



AUTOMATIZACION, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD S.A. de C.V.
16 SUR 2122 Col. Bellavista C.P. 72500 Puebla, Pue.
Tel/Fax : (222) 243-5437 e-mail : apc@mail.precitool.com.mx

INTRODUCCION

El objetivo del presente documento es proporcionar información sobre los transitorios de voltaje que ocurren en circuitos de potencia de bajo voltaje, para que los usuarios puedan evaluar su entorno de operación y determinar la necesidad de aplicar dispositivos de protección contra transitorios.

Los transitorios considerados en el alcance están limitados a perturbaciones cuya duración es menor a medio ciclo de la forma de onda y que pueden aparecer en cualquier combinación entre los conductores de línea, neutro y tierra.

Es difícil asignar los valores límites a algunas de las características de los transitorios debido a que su efecto y por lo tanto su impacto, depende de la naturaleza del equipo sometido a esta perturbación, ya que a algunos puede dañarlos, a otros puede modificar temporalmente su desempeño y a otros no les causa ningún problema.

La norma IEEE C62.41-1991 "*Prácticas Recomendadas sobre los transitorios de voltaje en circuitos de potencia de corriente alterna de bajo voltaje*" no busca establecer los parámetros de desempeño de equipos de protección sino que presenta lineamientos sobre los parámetros de aplicación, así como las acciones correspondientes a ser implementadas por los usuarios para alcanzar la protección contra transitorios deseada.

Con esta información se pretende que el usuario pueda efectuar la selección entre varios dispositivos de protección contra transitorios de voltaje, presentándose una guía para identificar parámetros o determinar un plan de prueba.

1.0 CALIDAD DE LA ENERGIA

La calidad de la energía se entiende cuando la energía eléctrica es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes.

Cuatro parámetros pueden servir como referencia para clasificar los disturbios de acuerdo a su impacto en la calidad de la energía:

- *Variaciones de frecuencia* que raramente ocurren en sistemas alimentados por las compañías suministradoras, siendo más común que se encuentren en sistemas aislados de motor-generador en los que las variaciones de carga provocan variaciones de frecuencia.
- *Variaciones de amplitud* pueden ocurrir en diferentes formas y rangos de duración que van desde transitorios de muy corta duración hasta condiciones de estado estable.
- *Variaciones en la forma de onda* de voltaje o corriente producidas por cargas no lineales, denominada distorsión armónica, siendo una condición de estado estable.
- *Desbalanceo* entre las fases de un sistema polifásico causado principalmente por la operación de cargas monofásicas desiguales que afectan principalmente a máquinas rotatorias y circuitos rectificadores trifásicos.

En México se cuenta con la “ Ley del servicio público de energía eléctrica y su reglamento 1993 ” que define las condiciones de suministro de la energía eléctrica, estableciendo en el capítulo V artículo 18 del suministro y venta de energía eléctrica que

“ El suministrador de energía eléctrica deberá ofrecer y mantener el servicio en forma de corriente alterna en una, dos o tres fases, a las tensiones alta, media y baja disponibles en la zona de que se trate observando que

- La frecuencia sea de 60 Hz, con una tolerancia de 0.8 % en mas o menos
- Que las tolerancias en el voltaje de alta, media o baja tensión, no excedan de 10% en mas o en menos y tiendan a reducirse progresivamente”

En la actualidad cada vez es mas extendido el uso de equipo electrónico sensible y continuamente las velocidades de procesamiento se incrementan por lo que es indispensable que las instalaciones se realicen con apego a las normas, se cuente con equipos de protección adecuado y se reduzcan los disturbios en el sistema eléctrico, para lo cual es importante establecer una coordinación entre la compañía suministradora, los fabricantes de equipos y los usuarios.

2.0 DEFINICIONES

De acuerdo al libro esmeralda de la IEEE

Calidad de energía (power quality)

Es el concepto de alimentación y de puesta a tierra de equipo electrónico sensible en una manera que sea adecuado para su operación.

Disturbio (power disturbance)

Cualquier desviación del valor nominal, o de un límite seleccionado en la tolerancia de la carga, en las características de entrada de la energía de CA.

Transitorio (transient o surge)

Un disturbio que ocurre en la forma de onda de CA con una duración inferior a medio ciclo y que es evidente por la abrupta discontinuidad que presenta. Puede ser de cualquier polaridad y puede ser aditiva o substractiva a la onda nominal.

Ruido de modo común (common- mode noise)

Es el voltaje de ruido que aparece igualmente y en fase desde cada conductor activo y tierra.

Ruido de modo diferencial (transverse-mode noise o differential mode noise)

Señales de ruido medidas entre los conductores activos del circuito que alimenta la carga, pero que no existen entre los conductores activos del circuito y el conductor de puesta a tierra del equipo o a la estructura de referencia de señal.

Voltaje de recuperación (recovery voltage)

Es el voltaje que ocurre a través de las terminales de un polo del dispositivo de interrupción del circuito en el evento de su apertura.

Estructura de referencia de señal (signal reference structure)

Es un sistema de trayectorias conductoras entre equipo interconectado que reduce los voltajes de ruido inducidos a niveles que minimizan la operación inadecuada. Las configuraciones más comunes incluyen parrillas o placas.

Blindaje (shield)

Aplicado normalmente a cables de instrumentación, siendo una envoltura conductora, usualmente metálica aplicada sobre el aislamiento de un conductor o grupo de conductores, con el propósito de proporcionar un medio para reducir el acoplamiento entre conductores blindados que pueden ser susceptibles a campos electrostáticos o electromagnéticos no deseados y otros conductores.

Blindar (shielding)

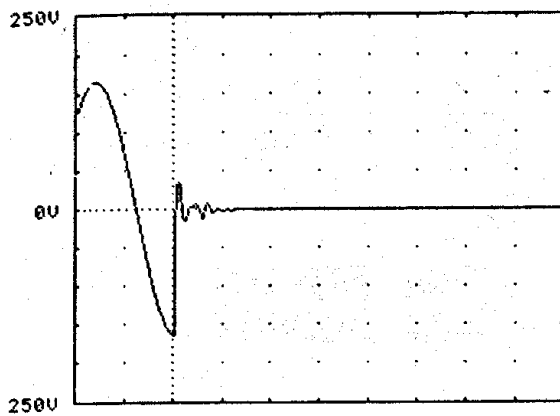
Es el uso de una barrera conductora entre una fuente potencial de ruido y los circuitos sensibles. Se usa para proteger cables de datos y alimentación y circuitos electrónicos, pudiendo ser en forma de barreras metálicas, gabinetes o enrollamientos alrededor de los circuitos fuente y de los circuitos receptores.

Regulación de voltaje (voltage regulation)

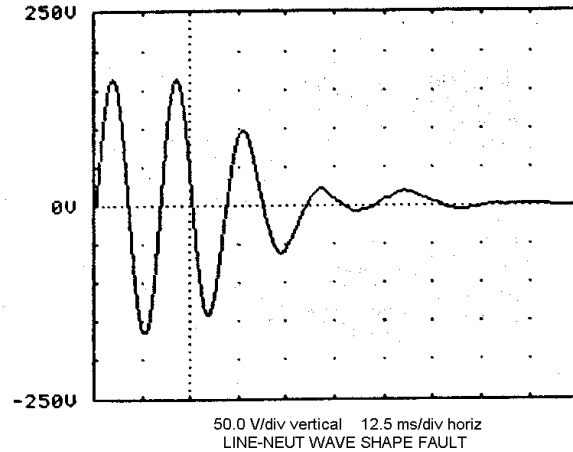
El grado de control o estabilidad del valor eficaz (rms) de voltaje en la carga, generalmente especificado en relación con otros parámetros tales como cambios en el voltaje de entrada, cambios de carga o cambios de temperatura.

Interrupción (interruption)

Es la pérdida completa de voltaje por un periodo de tiempo



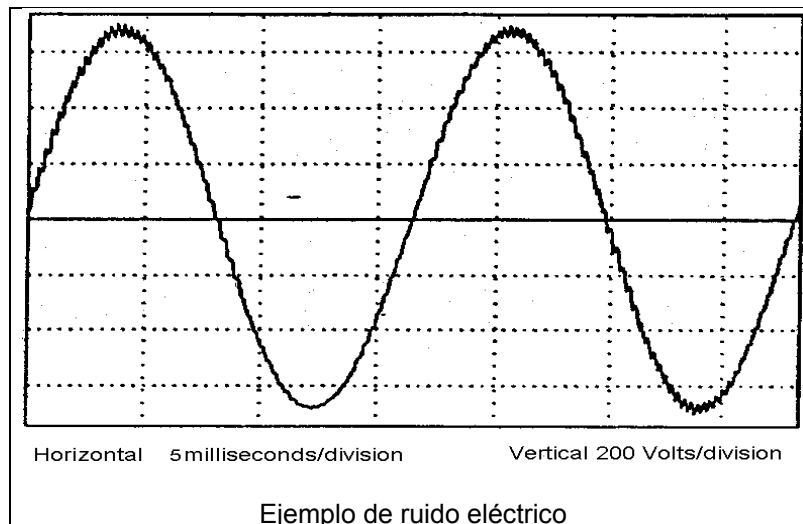
Interrupción local



Interrupción del suministrador

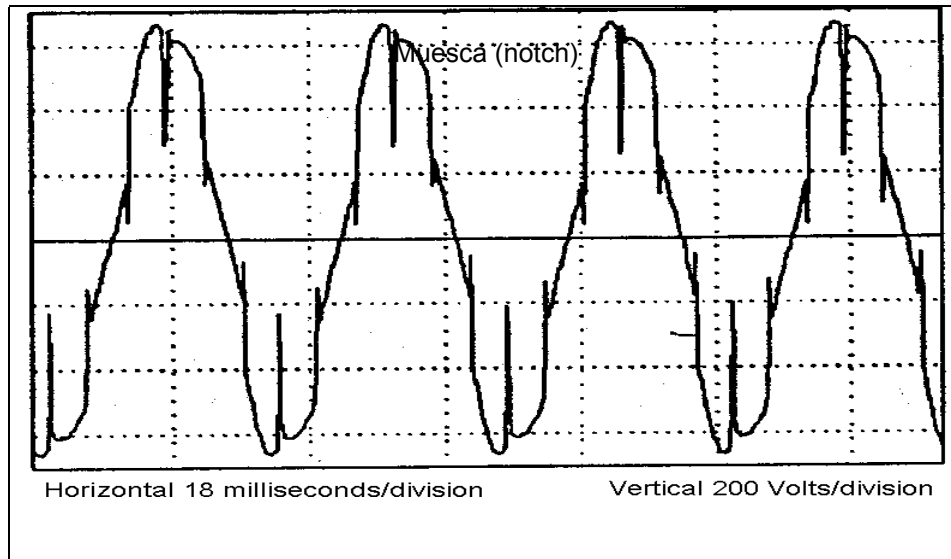
Ruido (noise)

Se considera como ruido las señales eléctricas no deseadas que producen efectos indeseables en los circuitos de control en los que se presentan y que incluyen el equipo electrónico sensible en su totalidad o en alguna de sus partes.



Muesca (notch)

Una conmutación u otro disturbio en la forma de onda de voltaje del sistema con duración menor a medio ciclo la cual es inicialmente opuesta en polaridad a la forma de onda normal, siendo por lo tanto substractiva en términos de la amplitud. Incluye la pérdida completa de voltaje por medio ciclo.

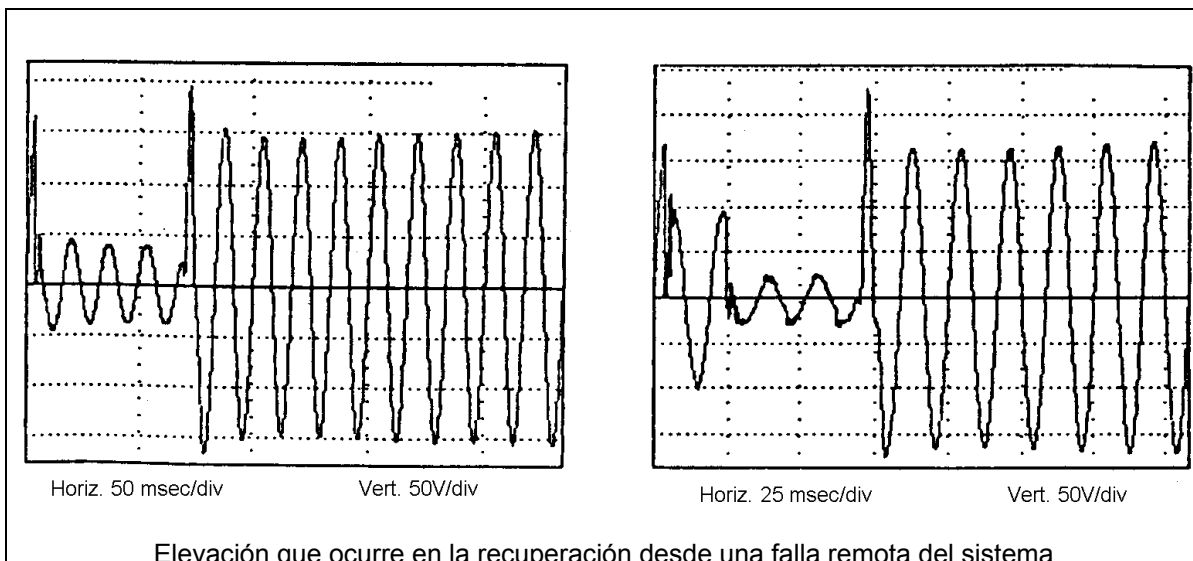


Sobrevoltaje (overvoltage)

Un incremento en el valor eficaz (rms) del voltaje de corriente alterna a la frecuencia del sistema con duración mayor a algunos segundos.

Elevación (swell)

Un incremento en el valor eficaz (rms) del voltaje de corriente alterna a la frecuencia del sistema, con duración entre medio ciclo a algunos segundos.

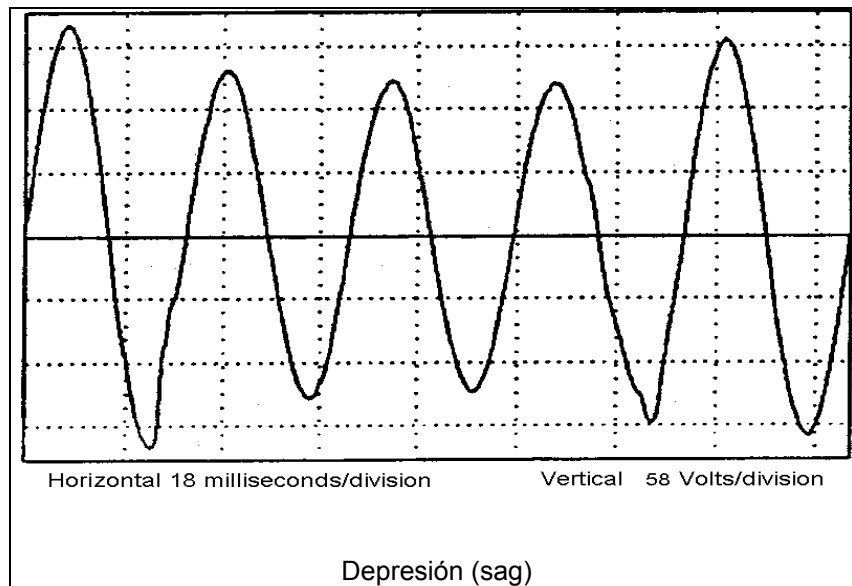


Bajo-voltaje (undervoltage)

Un decremento en el valor eficaz (rms) del voltaje de corriente alterna a la frecuencia del sistema con duración mayor a algunos segundos.

Depresión (sag)

Una reducción en el valor eficaz (rms) del voltaje de corriente alterna a la frecuencia del sistema, con duración entre medio ciclo a algunos segundos. La terminología que emplea IEC es *dip*.

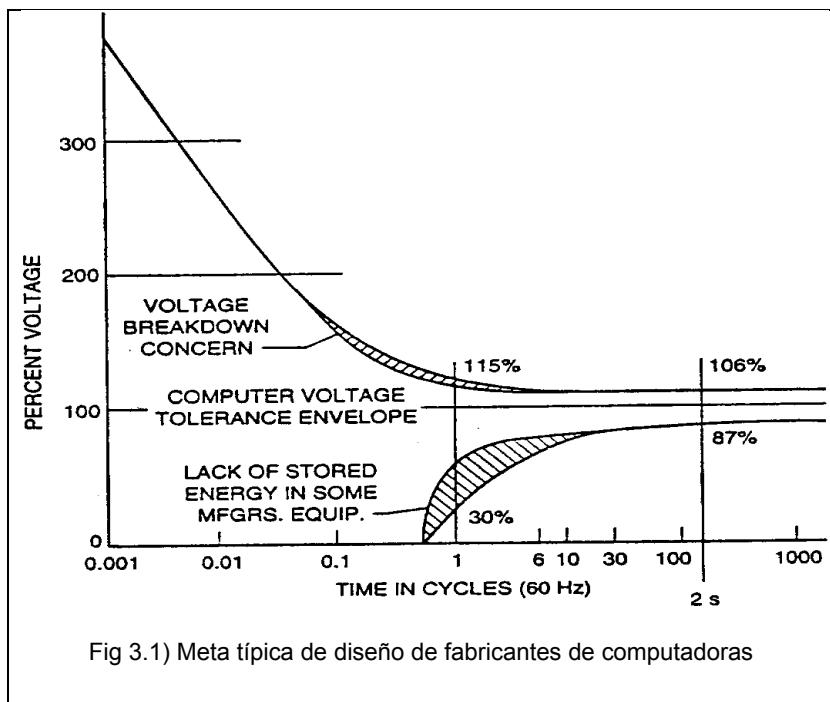


3.0 SENSIBILIDAD DEL EQUIPO

El concepto de protección implica la confrontación de un entorno hostil y de un equipo sensible.

La protección del equipo sensible que opera en un ambiente hostil es el objetivo de la tecnología de compatibilidad electromagnética, en la que los equipos eléctricos y electrónicos operen en este entorno sin sufrir o causar interferencia electromagnética que degrade su funcionamiento.

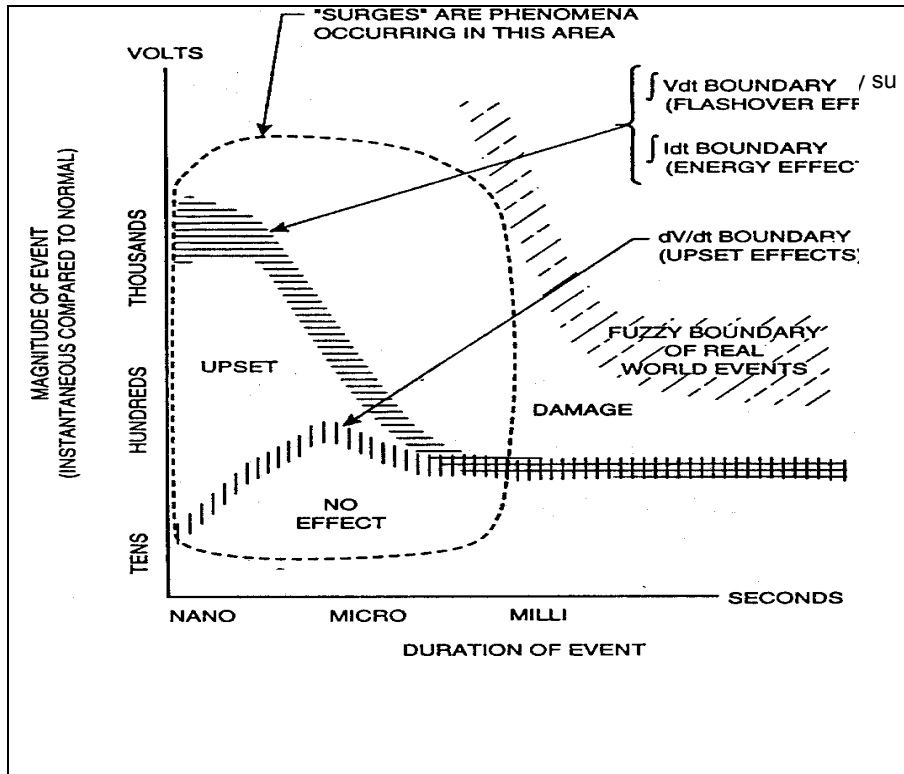
Determinar el nivel de sensibilidad del equipo es un aspecto difícil de cuantificar ya que se requiere la información precisa de los fabricantes, sin embargo un proceso de consenso ha producido una gráfica útil de los niveles típicos de sensibilidad que se muestra a continuación.



La gráfica solo señala la magnitud del voltaje con la correspondiente duración del disturbio, sin que indique la razón de cambio del voltaje, siendo este aspecto importante en dos puntos:

- 1) Una razón de cambio rápida tiene mayor capacidad de producir un disturbio en circuitos adyacentes por acoplamiento capacitivo e inductivo.
- 2) Una razón de cambio lenta puede hacer inefectivo a un dispositivo de protección basado en insertar inductancia en la línea de potencia.

En la Fig. 3.2) se muestra el impacto que sobre los equipos tienen los disturbios considerando su amplitud, duración y razón de cambio



4.0 TRANSITORIOS EN BAJO VOLTAJE

4.1 Consideraciones para la protección contra transitorios

Las siguientes consideraciones son necesarias para alcanzar un nivel razonable de protección ante transitorios:

- Grado de protección deseado
 - Integridad del equipo
 - Evitar perturbaciones en procesos
- Sensibilidad específica de los equipos
- Entorno del sistema de potencia
 - Características de los transitorios
 - Sistema eléctrico
- Desempeño de los equipos de protección contra transitorios de voltaje
 - Grado de protección
 - Vida media
- Costos totales y relativos

Protección deseada

En aquellas aplicaciones que no involucran procesamiento en línea, la protección es deseada para disminuir la falla de los equipos. En aplicaciones donde están involucrados equipos médicos, procesamiento de datos o en líneas de manufactura crítica cualquier interrupción puede ser inaceptable.

Sensibilidad de equipos

Las sensibilidades son diferentes para la falla de equipos que para errores de procesamiento, cuya definición incluye: la amplitud máxima remanente del pico y la duración que puede tolerar, así como la energía contenida y la forma de onda.

Características de los transitorios

Las formas de onda aplicables deben ser cuantificadas basándose en las categorías por localización y a sus niveles de exposición

Entorno eléctrico

Debe considerarse en la aplicación de los dispositivos de protección contra transitorios las amplias variaciones de voltaje que ocurren en la operación normal del sistema, para efectuar una selección adecuada del voltaje de sujeción

Desempeño de los equipos de protección contra transitorios de voltaje

Al evaluar un dispositivo de protección contra transitorios se debe asegurar que se consiga una vida prolongada tanto por la presencia de los transitorios como por las variaciones del sistema eléctrico y que los niveles de voltaje remanente tengan margen suficiente sobre el nivel de sensibilidad de los equipos para conseguir la protección deseada. No se debe comprometer la vida de los dispositivos por tratar de obtener voltajes remanentes bajos.

Costos

El costo de los dispositivos de protección contra transitorios debe ser bajo comparado con los costos de reemplazo y mantenimiento de los equipos y los beneficios de disponibilidad y productividad.

4.2 Consideraciones de puesta a tierra

La puesta a tierra es esencial para obtener un desempeño seguro y satisfactorio en el sistema de potencia, debiendo cumplir con tres requerimientos:

- 1) Proporcionar una trayectoria de baja impedancia a las corrientes de falla, de forma que los dispositivos de protección de sobre-corriente operen oportunamente.
- 2) Mantener una diferencia de potencial baja entre las partes metálicas expuestas para evitar daños al personal
- 3) Controlar el sobre-voltaje

La puesta a tierra de equipo sensible tal como equipo de procesamiento de información, involucra otro aspecto, ya que cuenta con líneas de comunicación con otros equipos que cuentan con su propio conductor de referencia cero que puede o no estar unido a la tierra de seguridad del equipo, por lo que puede haber una trayectoria común entre los circuitos de señal y los circuitos de alimentación, provocando problemas de ruido por acoplamiento.

Las líneas de datos conducen señales de alta frecuencia, de forma que las consideraciones de impedancia de puesta a tierra para la alimentación y seguridad en el equipo puede que no proporcionen la baja impedancia deseada a la frecuencia de la señal.

4.3 Origen de los Transitorios de Voltaje

Los transitorios de voltaje que ocurren en los circuitos de potencia de bajo voltaje tienen dos orígenes: Los efectos de las descargas atmosféricas tanto directas como indirectas y los transitorios ocasionados por las conmutaciones en el sistema.

Descargas atmosféricas:

- *Descargas cercanas* de un rayo ya sean a tierra o entre nubes, produce campos electromagnéticos que pueden inducir voltajes en los conductores de los circuitos primarios y secundarios.
- *Descargas a tierra* de un rayo producen que la corriente que fluye se acople a la impedancia de la malla de tierra, causando diferencias de voltaje a lo largo y ancho.
- *La acción de apartarrayos de tipo abertura* al limitar súbitamente el voltaje primario, se acopla a través de la capacitancia de un transformador y produce transitorios de voltaje adicionales a aquellos que se inducen por la misma acción del transformador.
- *Descargas directas a circuitos de alta tensión*, inyectan altas corrientes que producen voltajes que o bien fluyen a través de la resistencia a tierra y causan un cambio en el potencial de tierra o fluyen por los conductores primarios cuyos voltajes se acoplan a los circuitos secundarios por la capacitancia entre los devanados primario y secundario o por la inducción misma del transformador o por ambos efectos, apareciendo en los sistemas de bajo voltaje.
- *Descargas directas a circuitos de baja tensión*, involucran muy altas corrientes y altos voltajes resultantes que pueden exceder la capacidad de soporte de los equipos.

Transitorios por conmutación pueden asociarse con condiciones normales o anormales:

- *Conmutaciones menores* cercanas al punto de interés, tal como el apagado de utensilios en una casa o el apagado de diversas cargas en el sistema individual
- *Transitorios periódicos (muescas en el voltaje)* ocurren cada ciclo durante la operación de convertidores electrónicos de potencia, debido a un corto circuito momentáneo entre fases cuya duración se ubican en el rango de 100 μ s.
- *Reigniciones múltiples* o rebotes durante la operación de conmutación, tal como sucede con los contactores de aire y los relevadores de mercurio, que producen transitorios de voltaje cuyas formas de onda son complejas y sus amplitudes alcanzan valores de varias veces la magnitud del voltaje normal.
- *La Conmutación de bancos de capacitores* para la compensación del factor de potencia cuando no hay rebotes, genera sobre-voltajes transitorios del orden de 1.5 a 2 veces la magnitud del voltaje normal, teniendo formas de onda de larga duración de varios cientos de microsegundos. Si durante la apertura del dispositivo que conmuta a los capacitores ocurren múltiples rebotes, el sobre-voltaje transitorio puede exceder 3 veces la magnitud del voltaje normal e involucrar niveles de alta energía.
- *Durante los libramientos de fallas* que ocurren cuando dispositivos de protección de sobre-corriente de acción rápida tales como fusibles e interruptores que tienen tiempos de arqueo menores a 2 μ s actúan, dejan energía inductiva atrapada del lado de carga que cuando se colapsa el campo, se generan altos voltajes.

4.4 Selección de transitorios representativos

Las perturbaciones en sistemas de potencia de bajo voltaje pueden ser causadas por la alteración de los siguientes parámetros: Amplitud, duración, tiempo de elevación, frecuencia de oscilación, polaridad, capacidad de aporte de energía, densidad espectral de amplitud, posición con respecto a la fase de la forma de onda normal y frecuencia de ocurrencia.

Las mediciones obtenidas en estudios realizados muestran la amplia variedad de transitorios que pueden ocurrir en sistemas de potencia de bajo voltaje, por lo que se han elegido transitorios representativos que permitan efectuar pruebas en laboratorio que sean reproducibles y significativas.

Una combinación en la selección de la categoría de localización y la determinación del nivel de exposición proporcionará el criterio para dimensionar la protección.

Caracterización del entorno

El proceso para caracterizar un entorno involucra:

- Identificar si se trata de una instalación interior o exterior y las condiciones de operación de los circuitos.
- Seleccionar las formas de onda de los transitorios representativos del entorno bajo estudio.
- Determinar los factores de sensibilidad de los equipos, pudiendo ser:
 - La amplitud y duración del pico que pueden causar tanto errores en la operación como daño en los equipos.
 - La razón de cambio del voltaje que puede causar errores en la operación, aun cuando las amplitudes de los transitorios estén muy por debajo de los niveles que causan daño a los equipos

Razón de ocurrencia de transitorios

Tratar de predecir la frecuencia de ocurrencia de los transitorios para un sistema en particular es frecuentemente imposible. La frecuencia de ocurrencia de los transitorios está relacionada con el nivel, prevaleciendo mayormente los de menor nivel a los de mayor nivel.

Un pico de voltaje que se observa en un sistema de potencia puede ser el original o el residuo que resulta de la operación de algún dispositivo de protección del sistema.

La distribución de los niveles de los transitorios está influenciada por el mecanismo que lo produce y por el nivel de arqueo entre separaciones y por la operación de dispositivos de protección no identificados. Es importante reconocer el efecto del creciente número de dispositivos protectores de transitorios instalados dentro de los equipos y en los sistemas de distribución.

Los equipos exteriores están expuestos a niveles de arqueo altos, con valores típicos de 10 kV aunque es posible alcanzar hasta 20 kV. En la acometida, los equipos de medición pueden incluir protecciones entre fases y tierra con niveles de arqueo (sparkover) en el rango de 8 kV.

La mayor parte de los sistemas en interiores operan a voltajes de 127 V, 220V y 440V teniendo niveles de arqueo entre fases o entre fase y tierra típicos de 6 kV aun cuando en excepciones pueden llegar a ser mayores.

Frecuencia de ocurrencia y nivel de voltaje

Los datos reportados por diversos estudios, muestran una reducción en la ocurrencia para crestas mayores, sin embargo el número absoluto de ocurrencias depende de cada sitio.

Nivel de exposición

El nivel de exposición está relacionado con los transitorios inducidos en el sistema de potencia, dependiendo de las condiciones del sistema y del entorno, estableciéndose tres rangos:

Exposición Baja

- Sistema en áreas con baja actividad de rayos
- Poca carga
- Poca conmutación de capacitores

Exposición Media

- Sistema en áreas con actividad de rayos media y alta
- Conmutaciones significativas

Exposición Alta

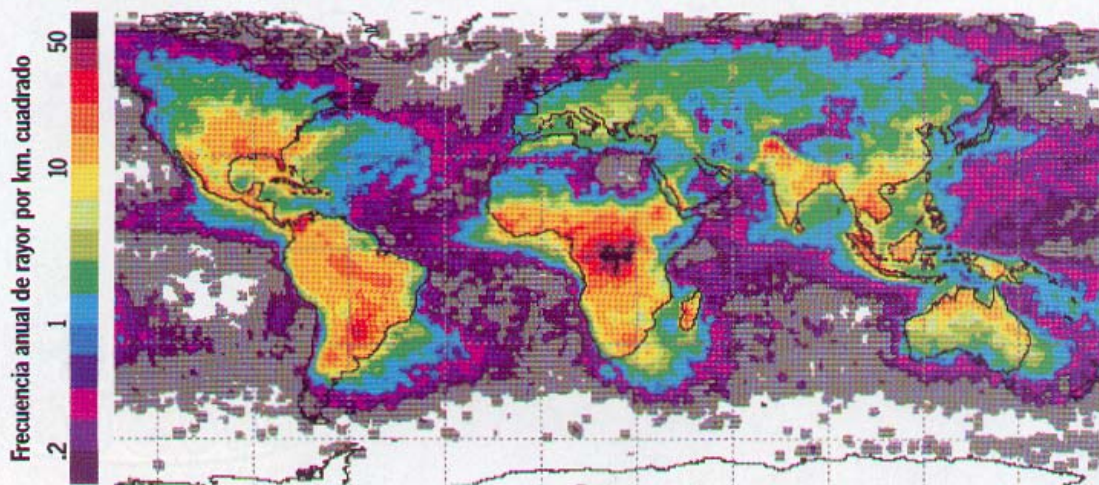
- Aquellas instalaciones excepcionales que tienen exposiciones a transitorios mayores que las definidas en las categorías baja y media.

Las condiciones más severas resultan de altas exposiciones a rayos o por transitorios severos ocasionados por conmutaciones.

La frecuencia de ocurrencia y el nivel de exposición a rayos está influenciada por los niveles isocerámicos y densidades de rayos.

Donde cae el rayo

SI LE ATEMORIZAN LOS RAYOS, NO SE ACERQUE A ÁFRICA CENTRAL: ES EL LUGAR DEL MUNDO QUE RECIBE LA MAYOR CANTIDAD de rayos, según un nuevo mapa (abajo). Las altas montañas y el aire húmedo incitan tormentas que azotan a la región todo el año, dice Dennis Boccippio del Centro Marshall de Vuelos Espaciales, de la NASA. Él y sus colegas recopilaron cinco años de datos de dos satélites de observación de la Tierra con cámaras sensibles de video. Para sorpresa de los investigadores, la mayor cantidad de rayos cae en las zonas donde hay el mayor número de tormentas, no necesariamente donde las tormentas son más intensas. Más tarde, Boccippio y sus colaboradores intentan poner cámaras similares en satélites meteorológicos, con la meta a largo plazo de utilizar la información de rayos para predecir climas severos. —Solana Pyne



Los niveles de los transitorios son influenciados por las prácticas de puesta a tierra y la disposición del sistema de distribución tal como líneas aéreas abiertas, líneas áreas con conductores torcidos y cables.

La ocurrencia y el nivel de los transitorios por conmutaciones dependen del modo de operación del suministrador de la energía, tal como conmutación de bancos de capacitores o de circuitos.

Los transitorios generado por conmutación de cargas internas dependen de la naturaleza e impedancia de las cargas adyacentes, así como de su distancia eléctrica al punto de interés, mas que de la ubicación geográfica o prácticas del suministrador.

El arqueo (sparkover) de los dispositivos de cableado indica que mientras que la capacidad de soporte puede ser suficiente para asegurar que un dispositivo interior sobreviva, una capacidad de soporte de 10 kV o mayor puede ser requerida para exteriores.

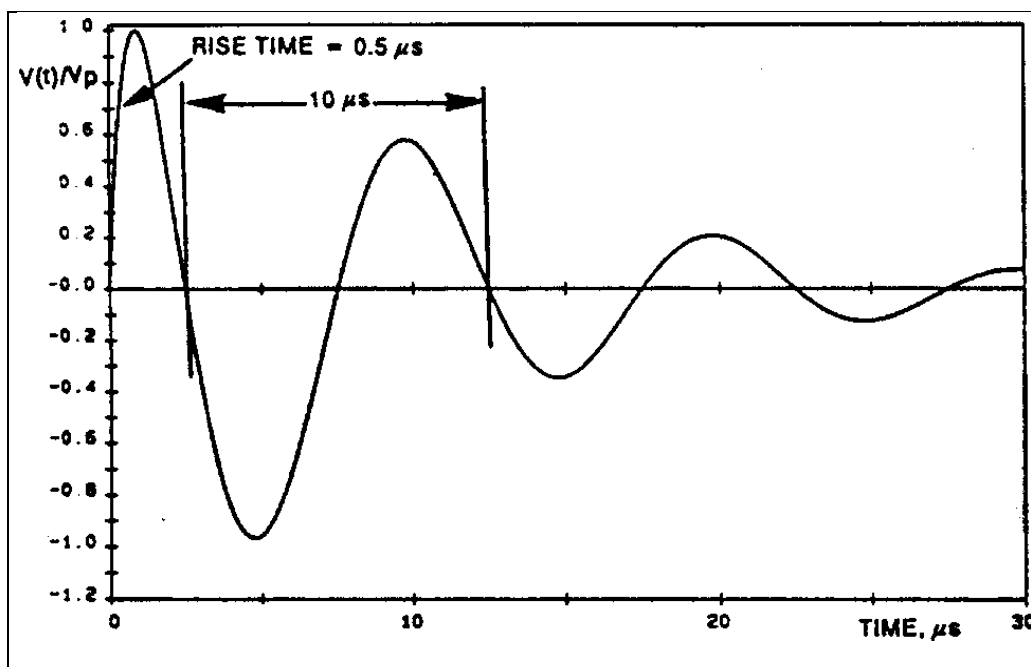
Formas de onda recomendadas

La amplia variedad de eventos reportados en diferentes estudios pueden simplificarse en 3 tipos de transitorios.

- *Ondas oscilatorias (ring wave)* Las de mayor frecuencia tienen una capacidad limitada de energía pero presentan altos voltajes, mientras que los de menor frecuencia tienen mayor capacidad de energía pero voltajes de menor amplitud.
- *Transitorios de alta energía* de diversas formas de onda, asociados con descargas atmosféricas cercanas, operación de fusibles o conmutación de capacitores.
- *Ráfagas de transitorios muy rápidas*, asociadas a conmutaciones de cargas locales de baja energía pero capaces de producir interferencia o bloqueo de la operación de equipo sensible.

Ondas oscilatorias

Las mediciones en campo y en laboratorio indican que la mayor parte de los transitorios de voltaje que se propagan en los sistemas de bajo voltaje en instalaciones interiores tienen formas de onda oscilatorias.



Cuando un pico impacta en un sistema, aun cuando originalmente sea unidireccional, excita las frecuencias naturales de resonancia del sistema, generándose transitorios de diferentes amplitudes y formas de onda, teniendo estos transitorios frecuencias de oscilación que se ubican en el rango de 1 kHz, asociadas a conmutación de capacitores, a 500 kHz causadas principalmente por oscilaciones locales.

La representación de este tipo de transitorios fue presentada en la edición de 1980 de la norma IEEE C62.41 habiendo definido la onda oscilatoria con un tiempo de crecimiento de $0.5 \mu\text{s}$ y frecuencia de 100 kHz, siendo cada pico de 60% de la amplitud del pico precedente de polaridad opuesta.

Ya que es necesario representar estas situaciones con mas de una forma de onda, en la versión de la norma IEEE C62.41-1991 sección 10 se propone en forma adicional una forma de onda oscilante de menor frecuencia.

Las razones de crecimiento rápidas en el frente de la onda oscilante, producen fallas a ciertos dispositivos semiconductores sensibles a altos dv/dt , particularmente cuando están en la transición de los estados de conducción, dependiendo del momento en que ocurre el pico con relación a la frecuencia de la línea.

La amplitud del voltaje pico puede producir la ruptura del aislamiento en equipos y componentes conectados, aun si la energía involucrada en la onda de 100 kHz es pequeña.

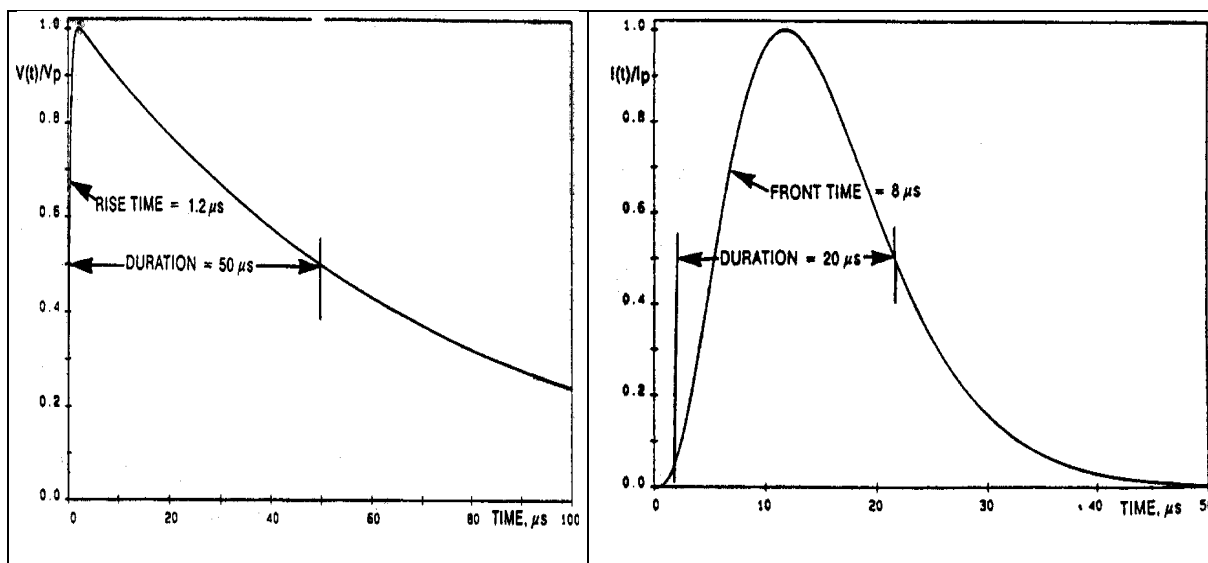
Transitorios de alta energía

Experiencias de campo muestran que diversos dispositivos de protección contra transitorios, con capacidades limitadas de manejo de corriente e instalados en la acometida han fallado repetidamente, mientras que cuando el mismo dispositivo es instalado adentro de la instalación opera adecuadamente.

De los factores de energía e impedancia de la fuente, llega a ser aparente que las ondas oscilatorias de 100 kHz no depositan suficiente energía en los dispositivos de protección contra transitorios para producir las fallas observadas.

Diferentes tipos de eventos pueden dar origen a transitorios de alta energía y sus consecuentes daños:

A) *Transitorios causados por rayos en sistemas con líneas de distribución aéreas* son representados por un pico de voltaje de 1.2/50 μs y un pico de corriente de 8/20 μs siendo descrito como impulso en el documento de la IEC 99 aparta-rayos y como onda combinada en la norma IEEE C62.41-1991.



Estas formas de onda son una simplificación apropiada del ambiente cercano en las acometidas de construcciones conectadas a sistemas de distribución con líneas aéreas, teniendo una capacidad substancial de energía para provocar esfuerzos al equipo conectado.

Debido al tiempo frontal corto del pico de corriente de 8 μs no se propagará muy lejos en la instalación. La caída de voltaje asociada con la propagación de un pico de corriente de alta amplitud y por lo tanto de alto di/dt en la impedancia inductiva del cableado requiere de un voltaje alto en la acometida que lo impulse (sostenga) suficiente para causar arcos en las separaciones.

B) *Transitorios causados por rayos originados en líneas aéreas y que viajan por cable subterráneo* involucran mayores duraciones y en longitudes considerables de cables tienen frentes de onda con pendientes menores que las originales. La amplitud del pico iniciador refleja la operación de un aparta-rayos en la transición aérea subterránea.

C) *Transitorios generados por la operación de fusibles, involucrando energía atrapada en la inductancia del sistema de potencia* tienen características unidireccionales con duraciones del orden de cientos de microsegundos que dependen de la inductancia del cable y del transformador que alimenta a la falla que esta siendo librada por los fusibles.

D) *Transitorios generados por la conmutación de bancos de capacitores para la compensación del factor de potencia* involucran oscilaciones amortiguadas con frecuencias de 300 Hz a 5 kHz y duraciones de máximas de unos cuantos milisegundos. Desde el punto de vista de intercambio de energía, una oscilación tan larga puede simplificarse como una envolvente de la oscilación teniendo un orden de magnitud y duración similar a los transitorios generados por la operación de fusibles.

Los transitorios de menor frecuencia contienen mayor energía, pudiendo llegar a ser excesiva para un dispositivo protector de transitorios que trata de efectuar la sujeción del voltaje particularmente si el interruptor debe restaurar mientras esta abriendo y existe poca impedancia entre él y el protector de transitorios.

Los transitorios descritos en B), C) y D) tienen amplitudes máximas relativas al voltaje del sistema en contraste con el descrito en A).

Otros tipos de forma de onda han sido especificados como requerimientos para protección de transitorios tales como:

Frecuencia o Duración	Tipo	Aplicación	Norma
10/1000 μ s	Unidireccional	Control de procesos y comunicaciones	IEEE Std 518-1982
100/1300 μ s	Unidireccional	Compatibilidad electromagnética	IEC
10/1000 μ s	Unidireccional	Específica	IEEE C62-41-1991
5 kHz	Oscilatoria	Específica	IEEE C62-41-1991

Para ondas largas en cables de sistemas de potencia con tiempos de viaje mayores que el tiempo del frente del pico, la impedancia de la fuente será la impedancia característica del cable, ubicándose típicamente entre 10 Ω y 100 Ω , sin embargo para líneas aéreas abiertas los valores serán mayores.

Si los tiempos de viaje son menores que el tiempo del frente del pico, la impedancia inductiva prevalecerá y su valor puede ser solo una fracción de ohm.

Transitorios rápidos

La apertura de circuitos por interruptores por separación de aire, tales como relevadores o contactores, producen una sucesión de separaciones y re-igniciones que generan ráfagas de transitorios de oscilaciones rápidas en los circuitos que son conmutados, relacionándose con ondas cuyos tiempos de elevación son de 5 ns y duraciones de 50 ns denominadas transitorios eléctricos rápidos (EFT).

La duración de este transitorio es corta comparada con el tiempo de viaje en el cableado (50 ns es el tiempo requerido para viajar 10 m), por lo que los conceptos de líneas de transmisión son aplicables para describir su propagación en el cableado de edificaciones y grandes equipos.

Categorías de localización

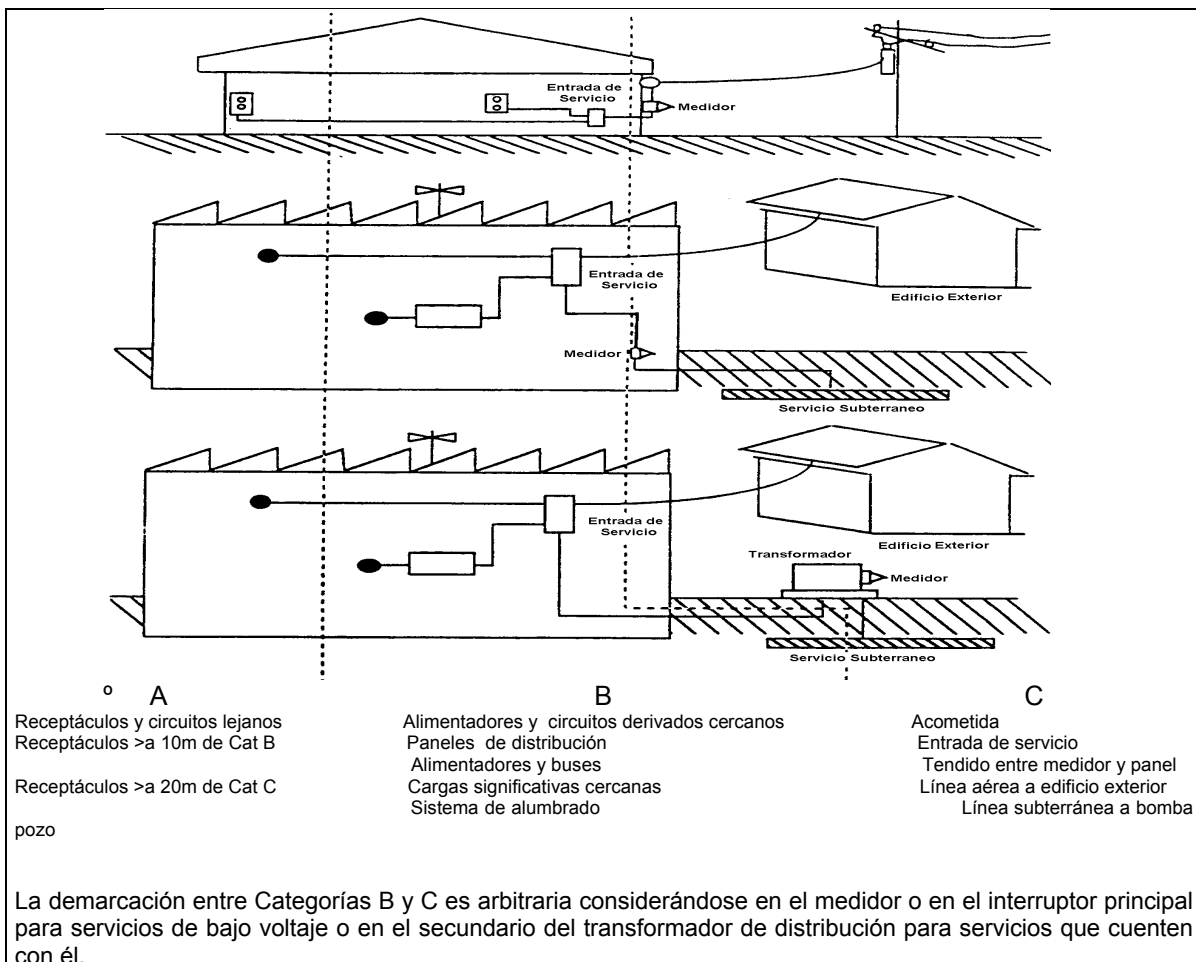
Se han definido tres categorías por localización de circuitos que representan la gran mayoría de ubicaciones, desde aquellas cercanas a la acometida hasta las más remotas.

Para los transitorios originados en la alimentación del suministrador, la impedancia de la fuente puede considerarse como constante, mientras que la impedancia serie se incrementa con la distancia hasta la carga, restringiendo la razón de crecimiento de la corriente del transitorio.

La siguiente figura muestra la aplicación de las tres categorías de localización en un sistema de potencia que están relacionada con la impedancia y por lo tanto con la corriente del transitorio.

En la Categoría C se está expuesto a transitorios de mayor nivel, esperando voltajes que excedan los 10 kV y corrientes de descarga de 10 kA y mayores. La experiencia en campo muestra que la aplicación por años de aparta-rayos con capacidades de 10 kA, 4/10 μ s han demostrado su efectividad para desviar la mayor parte de las corrientes asociadas con este entorno. Aun cuando descargas directas de rayos en el punto de interés producen voltajes y corrientes mayores.

La mayoría de las aplicaciones de protección involucran entornos interiores distantes de la conexión de entrada de servicio y de las condiciones de la categoría C, por lo que no deberá aplicarse indiscriminadamente como una especificación para todos los equipos.



Efecto de los transitorios

Cuando las consecuencias de una falla solo representan una pérdida económica, puede ser apropiado valorar el costo de la protección contra la posibilidad de una falla causada por un transitorio de alta energía que puede ocurrir, tal como las causadas por rayos o por múltiples re-cierres al des-energizar bancos de capacitores o por frecuentes interrupciones en el suministro de la energía.

Las consecuencias que los transitorios pueden causar se pueden clasificar en:

- 1) Los equipos pueden estar sujetos a transitorios cuyos niveles no causan un daño visible u operacional, pero puede estar sucediendo una degradación en sus componentes siendo un punto latente de falla.
- 2) Fallas en el procesamiento de información que puede ser recuperado por software o que puede requerir la intervención del personal para restaurar la operación.
- 3) Falla del equipo o de sus componentes, requiriendo su reemplazo y ocasionando la indisponibilidad del equipo.
- 4) Daño consecuente causado por un equipo que ha sido afectado por un transitorio y que sus errores de procesamiento o daño provocan que otros equipos fallen o queden indispuestos.

Experiencia de campo

Se obtuvo una reducción de 100:1 en las razones de falla de algunos motores de reloj cuando el voltaje de soporte se elevó de 2 000 V a 6 000 V.

Se ha reportado fallas ocasionales en MOV's de 20 mm de diámetro o menores instalados en las acometidas, mientras que cuando se instalan en puntos remotos su desempeño es adecuado, pudiéndose estimar la capacidad de disposición de energía de los transitorios de acuerdo a la localización dentro de la instalación.

En las líneas de distribución aéreas generalmente se presenta transitorios cuya amplitud se ubica entre 5 kV y 20 kV, mientras que en ubicaciones dentro de la edificación pueden ser limitadas por los arcos entre espacios o por las características de propagación del cableado.

El cableado local de distribución de energía es predominantemente inductivo y resistivo a las frecuencias de interés (60 Hz a 3 kHz), mientras que a frecuencias de 1 Mhz y mayores predomina la inductiva y capacitiva, pudiendo ser usado ventajosamente para atenuar ruido de voltaje no deseado de alta frecuencia y transitorios de tiempos de elevación cortos.

Transitorios con tiempos de elevación de ms y frecuencias de oscilación en el rango de kHz no se atenúan rápidamente por los transformadores de distribución y cableado

Al seleccionar los dispositivos de protección se debe considerar el modo de acoplamiento del transitorio al sistema pudiendo ser:

L-N : Fase a neutro para sistemas monofásicos y trifásicos

L-L : Fase a fase para sistemas monofásicos y trifásicos

L-G: Fase al conductor de puesta a tierra del equipo en sus terminales de utilización

N-G: Neutro al conductor de puesta a tierra del equipo en sus terminales de utilización

Una combinación en la selección de la categoría de localización y la determinación del nivel de exposición proporcionará el criterio para dimensionar la protección.

5.0 VALORES PICO DE FORMAS DE ONDA

Las formas de onda de transitorios se aplican de acuerdo a la categoría de localización siendo la onda oscilatoria de 100 kHz y la onda combinada recomendadas para el diseño básico y pruebas. Las formas de onda adicionales solo deben ser incluidas cuando existe evidencia suficiente que garantice su uso.

Categoría de localización	100 kHz Onda Oscilatoria	Onda Combinada	5/50 ns Ráfaga EFT	Onda 10/1000 μ s	5 kHz Onda Oscilatoria
A	Estándar	No	Adicional	Adicional	Adicional
B	Estándar	Estándar	Adicional	Adicional	Adicional
C	No	Estándar	No	Adicional	Adicional

Onda oscilatoria: La relación nominal del voltaje pico de circuito abierto con la corriente pico de corto circuito definen la impedancia efectiva, especificándose 12 Ω para simular los entornos de la categoría de localización B y 30 Ω para la categoría de localización A

Onda combinada: La relación nominal del voltaje pico de circuito abierto con la corriente pico de corto circuito es de 2 Ω para todos los niveles de severidad.

Onda oscilatoria estándar 0.5 μ s-100 kHz

Voltajes y Corrientes Transitorias Esperadas en Categorías de Localización A y B para exposiciones Baja, Media y Alta

Modos monofásicos: L-N, L-G y [L&N]-G

Modos polifásicos: L-L, L-G y [L's]-G

Categoría de Localización	Exposición del Sistema	Voltaje kV	Corriente kA	Impedancia Efectiva Ω
A1	Bajo	2	0.07	30
A2	Medio	4	0.13	30
A3	Alto	6	0.2	30
B1	Bajo	2	0.17	12
B2	Medio	4	0.33	12
B3	Alto	6	0.5	12

La onda oscilatoria no se considera para la categoría de localización C

Onda combinada estándar 1.2/50 μ s-8/20 μ s

Voltajes y Corrientes Transitorias Esperadas en Categorías de Localización B y C para exposiciones Baja, Media y Alta

Modos monofásicos: L-N, L-G y [L&N]-G

Modos polifásicos: L-L, L-N, L-G y [L's]-G

Categoría de Localización	Exposición del Sistema	Voltaje kV	Corriente kA	Impedancia Efectiva Ω
B1	Bajo	2	0.07	30
B2	Medio	4	0.13	30
B3	Alto	6	0.2	30
C1	Bajo	6	0.17	12
C2	Medio	10	0.33	12
C3	Alto	20	0.5	12

Las tablas muestran valores propuestos como una guía para la selección de parámetros apropiados para el diseño o pruebas sin que se consideren como requerimientos obligatorios, debiendo las partes involucradas seleccionar los valores pico

La literatura describe la frecuencia de ocurrencia contra la amplitud de la descarga directa de rayos desde niveles bajos de unos cuantos kilo-amperes, hasta valores de 20 kA y en ocasiones se encuentran valores excepcionales que exceden 100 kA.

La descarga de un rayo que termina en los conductores de una línea aérea de un sistema de distribución secundario, buscará un camino a tierra que involucra mas de un punto de puesta a tierra del sistema.

La figura B1 ilustra esta situación, en el que se asume que una descarga de un rayo de 100 kA, termina en los conductores primarios y el aparta-rayos desvía esta corriente a los diversos conductores puestos a tierra, repartiéndose dicha corriente de acuerdo a la admitancia de cada trayectoria de la combinación paralela. Los valores relativos mostrados son arbitrarios, sirviendo únicamente para ilustrar el concepto.

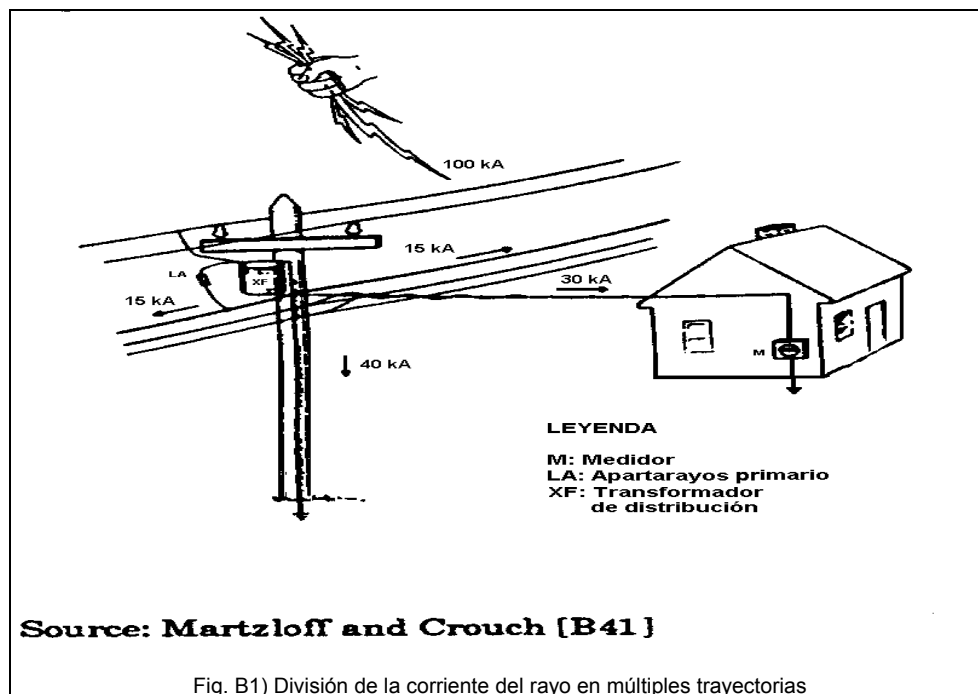


Fig. B1) División de la corriente del rayo en múltiples trayectorias

En la descripción sobre el entorno de los rayos presentada en 1972 por Cianos y Pierce, indican que solo el 5% de todas las descargas a tierra, exceden una corriente pico de 100 kA, siendo la frecuencia de ocurrencia dependiente de la localización geográfica y el punto de terminación depende de las estructuras locales.

Martzloff y Crouch realizaron simulaciones en laboratorio para determinar el efecto que la corriente de tal rayo tiene cuando fluye únicamente en el conductor de puesta a tierra, reportando que induce voltajes transitorios en los conductores adyacentes de las fases.

Con la instalación en la entrada de servicio del edificio de un aparta-rayo secundario con capacidad de 10 kA, se espera que maneje la corriente de los conductores de fase al circuito de tierra, además de proporcionar una sujeción del voltaje entre los conductores de línea a tierra para los circuitos derivados. Sin embargo, la descarga directa en los conductores de fase que alimentan el servicio y que es raro que ocurra, producirá corrientes más elevadas.

Características de diseño de los supresores de transitorios (Current Technology)

Bus de Supresión Integrado (ISB)

Utiliza un tablero de circuito multicapa de fibra de vidrio como superficie de montaje para los componentes de supresión, filtrado y monitoreo.

Para asegurar la integridad operacional tanto en desempeño como en confiabilidad, el diseño contempla para cada fase una barra sólida de cobre atornillada directamente al circuito impreso para permitir el flujo de la magnitud total de la corriente del transitorio.

El fusible debe sobrevivir a transitorios de gran magnitud sin que opere y que abra instantáneamente en condiciones de falla.

La razón principal de emplear fusibles dentro del TVSS es la seguridad, ya que si cualquier componente interno falla, se debe remover el dispositivo del circuito de alimentación evitando que afecte al resto del sistema de distribución.

El bus de supresión integrado está compuesto de cámaras individuales que alojan a los elementos fusibles encapsulados en arena que se conectan al bus colector de cobre distribuyendo la corriente del transitorio en trayectorias individuales con la misma impedancia sin que su capacidad exceda

El bus de supresión integrado (ISB) está compuesto de la barra colectora de cobre que se conecta a las cámaras individuales que alojan a los elementos fusibles encapsulados en arena, teniendo a su salida, trayectorias conductoras individuales con la misma impedancia que distribuyen la corriente del transitorio en partes proporcionales, habiéndose considerado una pista de circuito impreso de alta densidad cuya capacidad es superior a la máxima corriente a la que pueda estar sujeta bajo cualquier condición.

Cada trayectoria individual conecta a un grupo o banco de MOV's cuyo número depende de la capacidad del TVSS, utilizándose celdas de 10,000 A.

El diseño considera que ningún MOV individual sea sujeto a mas de 10,000 A que es su capacidad, teniendo los fusibles individuales la capacidad de manejar corrientes en exceso a los 10,000 A, lo que asegura que estos no abrirán ante la ocurrencia de un transitorio de cuya corriente se ubique dentro de la capacidad del dispositivo. Si mas de 10,000 A pasan a través de un MOV, ese componente puede fallar.

Adicionalmente los dispositivos cuentan con la capacidad de monitoreo, midiendo el estatus de cada uno de los elementos fusibles, permitiendo a los usuarios conocer el porcentaje de la protección disponible.