

01/29
13



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE SOBRE TENSIONES EN
REDES DE BAJA TENSIÓN**

T E S I S

Que para obtener el Título de

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P r e s e n t a n

JUAN MANUEL CALVILLO PERÉZ

ANTONIO CHAAC VELÁZQUEZ RINCÓN

DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ COHEN SAK

Julio del 2003



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I SOBRE TENSIONES TRANSITORIAS 7

| | |
|--|----|
| 1.1 ANTECEDENTES | 7 |
| 1.2 PICOS ELÉCTRICOS Y RUIDO | 8 |
| 1.3 CAUSAS Y NATURALEZA DE LAS SOBRE TENSIONES TRANSITORIAS | 11 |
| 1.4 FORMA DE ONDA DE LAS SOBRE TENSIONES TRANSITORIAS | 16 |
| 1.5 ENERGÍA E IMPEDANCIA DE LAS SOBRE TENSIONES TRANSITORIAS | 16 |
| 1.6 NORMATIVIDAD | 18 |

CAPÍTULO II DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN 21

| | |
|---|----|
| 2.1 IMPORTANCIA DE LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRE TENSIONES | 21 |
| 2.2 DISPOSITIVOS SUPRESORES DE PICOS | 21 |
| 2.3 REQUERIMIENTOS PARA PRUEBAS DE DISPOSITIVOS TVSS | 22 |
| 2.4 ACERCAMIENTO A LA APLICACIÓN DE DISPOSITIVOS TVSS | 23 |
| 2.5 POSIBLES SOLUCIONES | 33 |

CAPÍTULO III PROPUESTA 37

| | |
|---|----|
| 3.1 ANTECEDENTES PARA EL DISEÑO | 37 |
| 3.2 INSTRUMENTACIÓN | 38 |
| 3.3 PRUEBAS | 51 |
| 3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN | 53 |

CAPÍTULO IV MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 55

| | |
|--|----|
| 4.1 SELECCIÓN DE PUNTOS DE ESTUDIO | 55 |
| 4.2 MEDICIONES | 55 |
| 4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS CIRCUITOS ESTUDIADOS | 69 |
| 4.4 COMPORTAMIENTO DE LAS SOBRE TENSIONES OBSERVADAS EN EL ESTUDIO | 71 |

CAPÍTULO V CONCLUSIONES 73

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Antonio Velázquez
Durcan
FECHA: 25/01/03
FIRMA: [Firma]

[Firma manuscrita]

INTRODUCCIÓN

ANÁLISIS DE SOBRE TENSIONES EN REDES DE BAJA TENSIÓN

I. Objetivos

- Estudio de los tipos de sobre tensiones que se presentan en redes de baja tensión, sus orígenes, la instrumentación actual que las limita y los efectos que tienen en la calidad de la energía de las redes de baja tensión.
- Diseño y desarrollo de instrumentación especial para realizar y registrar mediciones de la amplitud y duración de sobre tensiones transitorias en circuitos residenciales de baja tensión.
- Análisis de distintos circuitos residenciales dentro de la ciudad de México con el fin de reportar las condiciones de sobre tensiones presentes en cuanto amplitud, duración, frecuencia de ocurrencia y si existe una relación entre las sobre tensiones esperadas y el valor nominal de tensión de los circuitos residenciales.

II. Definición del Problema

Los transitorios o cambios momentáneos de la amplitud de la onda de tensión son impredecibles y la amenaza de que ocurran en la red de baja tensión del sistema eléctrico es una preocupación creciente para los usuarios finales del sistema debido a los nuevos equipos electrónicos sensibles a estos fenómenos cuya presencia en los circuitos residenciales es cada vez mayor. El realizar el cálculo de la magnitud, duración y energía que generan los transitorios de tensión no es una tarea fácil, así como también la disponibilidad de instrumentación para estos fines es reducida. Las sobre tensiones en redes eléctricas de baja tensión son clasificadas en dos tipos: temporales y transitorias.

Las sobre tensiones temporales tienen una frecuencia de 50 Hz y una duración mayor a una docena de milisegundos e inclusive algunos ciclos. Son originadas debido a fallas en las redes eléctricas que se propagan a la red de baja tensión, caída de líneas de redes de alta o media tensión sobre las líneas de distribución debido a tormentas eléctricas o accidentes que dañan los postes de potencia. Su presencia en las redes de distribución es frecuente y en la mayoría de los casos son limitadas por la mayoría de los dispositivos de protección disponibles.

Las sobre tensiones transitorias tienen una frecuencia mucho mayor a 50 Hz y una duración por debajo de unos cuantos milisegundos y en ocasiones micro segundos. Este tipo de sobre tensiones son las más importantes debido a las grandes variaciones de amplitud de la onda de tensión en instantes de tiempo, se originan principalmente por los siguientes fenómenos: descargas atmosféricas en las líneas de distribución, conmutación de cargas reactivas dentro de los circuitos residenciales o industriales, la caída de líneas de transmisión de media o alta tensión sobre las líneas de distribución

debido a tormentas eléctricas o accidentes que dañan los postes de potencia. Su presencia en las redes de baja tensión es considerada poco frecuente aunque realmente no existe un estudio en México que describa su comportamiento. En el ámbito internacional se encontraron sólo dos estudios similares registrados ante IEEE. Un estudio en los EE.UU. realizado por Francois Marzloff en el año de 1970 llamado "Surge Voltaje in Residential and Industrial Power Circuits" y otro realizado en Alemania por Klaus Stimper en 1998 llamado "Transient Overvoltages in Low Voltage Systems". Con los resultados obtenidos de estos estudios se obtienen los parámetros de diseño en cuanto amplitud y duración de la instrumentación especial para medición de sobre tensiones.

III. Justificación

Las redes eléctricas de baja tensión cada vez se perturban más en cuanto a calidad de la energía. El modo de encendido y apagado de las fuentes de potencia utilizadas para algunos equipos tales como variadores de frecuencia para manejadoras de aire acondicionado, elevadores, escaleras eléctricas, impresoras, balastos electrónicos, etc. y un gran porcentaje de otras cargas que están convirtiéndose no lineales ocasionan distorsiones en la forma de onda de tensión que deben de ser compensadas, limitadas y mensurables. Los transitorios de tensión pueden ser abatidos por los supresores de transitorios, sin embargo, no siempre protegen en forma adecuada. Este estudio busca dar un panorama de la magnitud y frecuencia de las sobre tensiones transitorias en la red de baja tensión de la Ciudad de México, y poner en evidencia la necesidad de la elaboración de normas y acciones de la compañía suministradora para limitar este fenómeno y no sea el usuario el que tenga toda la responsabilidad de proteger su equipo electrónico sensible.

IV. Antecedentes

La calidad de la energía eléctrica es un aspecto de la ingeniería eléctrica que ha estado presente desde la concepción de los sistemas eléctricos de potencia; Sin embargo, en las etapas iniciales del desarrollo de los sistemas eléctricos de distribución, el problema de calidad de la energía no fue considerado con la debida importancia. Actualmente temas referentes a calidad de la energía en sistemas eléctricos de distribución han llegado al frente de nuestra atención debido al hecho de que cada vez más cargas sensibles generalmente constituidas por equipo electrónico son conectadas al sistema eléctrico, debido al advenimiento de interruptores de alta potencia basados en semiconductores, y debido a la interconexión de redes eléctricas de transmisión y distribución. A su vez, la tendencia en ingeniería eléctrica moderna ha sido extraer lo mayor posible del sistema eléctrico existente, y esto también ha ejercido presión en asuntos como son la fidelidad de la forma de onda sinusoidal, la ausencia de condiciones de tensión altas y bajas, y otras distorsiones de la forma de onda de tensión y corriente alterna.

¿Qué es exactamente la calidad de la energía eléctrica? Esta es una pregunta que no tiene una respuesta completamente aceptada, pero sin duda la respuesta involucra las formas de onda de corriente y tensión de un sistema de corriente alterna, la presencia de

señales armónicas en corrientes de carga y buses de tensión, la presencia de transitorios y condiciones momentáneas de baja tensión y otros tipos de distorsión. Una de las mejores definiciones de calidad de la energía es la provisión de tensión y diseño del sistema eléctrico de tal forma que el usuario de potencia eléctrica pueda utilizar la energía eléctrica del sistema de distribución de manera exitosa, sin interferencia o interrupción. Una definición amplia de calidad de la energía abarca confiabilidad en el sistema, selección dieléctrica en equipos y conductores, interrupciones del suministro de larga duración, tensión no balanceada en sistemas trifásicos, electrónica de potencia y su relación con el suministro de potencia eléctrica, y muchas otras áreas. En cambio, una definición estrecha se enfoca en asuntos relacionados con la distorsión de la forma de onda de tensión. [1]

Una razón adicional para entender el renovado interés en la calidad de la energía eléctrica a nivel de distribución es que la era de desregulación ha traído cuestionamientos acerca de cómo los servicios eléctricos pueden ser clasificados y comparados de una compañía suministradora a otra. Es posible proveer un valor agregado o servicios adicionales en el suministro de potencia que las compañías suministradoras pueden ofrecer a sus clientes por medio de la aplicación de controladores electrónicos de potencia en diferentes puntos del sistema de distribución [2]. A pesar de estos servicios adicionales, de ninguna compañía suministradora se puede esperar que provea un suministro de potencia perfecto para sus clientes debido a disturbios que ocurren en el sistema eléctrico de potencia que se encuentran más allá de su control. También, la ingeniería de potencia moderna es frecuentemente dirigida por la razón costo - beneficio. Los índices de calidad de la energía eléctrica a proveen formas para medir el nivel del servicio eléctrico y mostrar los beneficios de actualizar los circuitos de suministro.

El hecho de mantener un buen nivel de calidad en la onda de tensión en los sistemas eléctricos de distribución es esencial para minimizar los principales tipos de problemas de calidad de la energía eléctrica [3].

Tipos de problemas de calidad de la energía eléctrica

La clasificación principal de problemas de calidad de la energía son el estado estable y el transitorio. Los problemas más comúnmente encontrados son [4]:

a) Distorsión Armónica: Se presenta cuando frecuencias armónicas son sumadas a la forma de onda de tensión, haciendo que la curva suave de tensión tome una forma distorsionada. La distorsión puede ser causada por dispositivos de estado sólido, controladores de velocidad, lámparas fluorescentes e inclusive por computadoras. En altos niveles puede causar mal funcionamiento de computadoras y calentamiento extremo en elementos del sistema eléctrico. La forma de onda de tensión afectada por armónicas es la siguiente:



Forma de onda: Distorsión Armónica

b) Transitorios: Los transitorios son señales con una vida finita, esto es, un transitorio alcanza el valor de cero en un intervalo de tiempo finito. Los transitorios son instantáneos pero considerables desviaciones de los valores nominales de la onda de

tensión. Estos impulsos son típicamente causados por descargas atmosféricas, por la operación de los dispositivos de interrupción del sistema eléctrico, por fallas en el sistema eléctrico y por descargas electrostáticas. La forma de onda de tensión afectada por transitorios es la siguiente:



El fenómeno de las sobre tensiones transitorias en circuitos residenciales es el tema fundamental de esta tesis y será tratado a profundidad dentro de los siguientes capítulos.

e) **Ruido:** El ruido eléctrico está compuesto por una sucesión rápida de transitorios aleatorios que siguen en sus excursiones positivas y negativas a la onda de tensión. La magnitud de estos transitorios es usualmente menor a la de un transitorio aislado. El ruido a menudo se origina en motores eléctricos, controladores de motores, hornos eléctricos, descargas atmosféricas, interferencia entre conductores. La forma de onda de tensión afectada por ruido eléctrico es la siguiente:



A pesar de ser menos destructivo que un transitorio rápido de mayor amplitud, el ruido eléctrico puede causar mal funcionamiento de computadoras y puede interferir en la operación de equipamiento para comunicaciones y otro equipo electrónico sensible.

d) **Bajas tensiones momentáneas:** Una baja tensión momentánea es un decremento de los valores nominales de la forma de onda de tensión generalmente con una duración corta. Cuando éste fenómeno tiene una duración mayor a dos minutos es considerado como baja tensión. Las causas más comunes de las bajas tensiones son los cortos circuitos, fallas en el sistema eléctrico de potencia, encendido de motores y adición de cargas al sistema por sus usuarios. La forma de onda de tensión cuando se presentan bajas tensiones momentáneas es la siguiente:



e) **Interrupciones:** Las interrupciones ocurren cuando los niveles de tensión decrecen hasta llegar a cero. Se clasifican de acuerdo a su tiempo de duración en: momentáneas, temporales y permanentes. Las momentáneas ocurren cuando el suministro de potencia eléctrica es interrumpido, pero es automáticamente reestablecido en menos de dos segundos. Las temporales ocurren cuando el servicio es interrumpido por más de dos segundos, pero es automáticamente reestablecido en menos de dos minutos. Las permanentes tienen una duración mayor a dos minutos y pueden requerir de trabajadores de campo para que el servicio sea reestablecido. Las interrupciones se aprecian así:



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VI. Contenido

Capítulo I: Sobre tensiones Transitorias.

Este capítulo define los diferentes tipos de picos eléctricos y ruido asociado. Abarca las causas que originan las sobre tensiones transitorias en los circuitos residenciales, su clasificación por forma de onda, amplitud y duración. Este capítulo provee un panorama fundamental de las sobre tensiones transitorias y ruido asociado en las redes eléctricas de distribución de baja tensión.

Capítulo II: Dispositivos de Protección.

Este capítulo trata el tema de los dispositivos de protección contra sobre tensiones transitorias y las diferentes pruebas que se les aplican. Incluye un acercamiento a la aplicación de supresores de sobre tensiones transitorias en circuitos residenciales que pueda servir como ayuda en la selección y aplicación del dispositivo correcto de protección.

Capítulo III: Propuesta.

En este capítulo se exponen las bases teóricas para el diseño para presentar la propuesta de instrumentación desarrollada para medir la amplitud y duración de las sobre tensiones transitorias en las redes de baja tensión. Explica de qué manera se definieron los intervalos de medición de estos dos parámetros. Presenta el funcionamiento de cada uno de los módulos que constituyen al dispositivo, desde el suministro de la red de baja tensión hasta la comunicación y control por la computadora personal o PC, así como también, el principio teórico de operación y el cálculo de las diferentes variables involucradas en la etapa de diseño.

Capítulo IV: Medición y Análisis de Resultados.

En este capítulo se define el tiempo y los puntos de medición a considerar dentro de este estudio de calidad de la energía. Este capítulo contiene las tablas de datos adquiridos por el dispositivo, los tipos de gráficos obtenidos que modelan el comportamiento de las sobre tensiones transitorias en cuanto amplitud, duración y contenido energético registradas en este estudio. Por último, contiene una comparación con los resultados obtenidos en los diferentes puntos del estudio, así como algunas medidas estadísticas relacionadas.

Capítulo V: Conclusiones.

Expone el análisis y evaluación final del desarrollo de la investigación y sus resultados. Se presentan los resultados obtenidos por dos estudios anteriores a éste con el fin de dar a conocer el panorama de estudios con periodos de muestreo mayores y las diferencias entre los resultados obtenidos. Resalta la problemática en cuanto a daños en equipos electrónico sensibles dentro de los circuitos residenciales como consecuencia de la presencia de las sobre tensiones transitorias. Por último, brinda la perspectiva acerca de la utilidad de este estudio para las compañías suministradoras y a los usuarios interesados en proteger sus equipos electrónicos.

Referencias Bibliográficas

1. Gerald Heydt "Electric Power Quality: A Tutorial Introduction", IEEE Applications in Power, January 1998. p 15
2. N.G. Hingorani, "Introducing Custom Power", IEEE Spectrum June 1995 p. 41-48
3. B. Cannas, G. Celli, "Power System Condition Monitoring and Protection", Nro Computing 23, July 1998 p. 111-123
4. Gerald Heydt "Electric Power Quality: A Tutorial Introduction", IEEE Applications in Power, January 1998. p. 17
5. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, www.cnaee.org.mx : Normas Oficiales

CAPÍTULO I

SOBRE TENSIONES TRANSITORIAS

1.1 Antecedentes

Las sobre tensiones transitorias son breves e impredecibles. Estas dos características las hacen difíciles de detectar y medir. Las sobre tensiones transitorias tienen una frecuencia mayor a los 60 Hz y en ocasiones una duración de hasta unos cuantos μ s [1]. A nivel mundial se ha hecho un trabajo considerable y hay mucha información disponible del grupo de trabajo de calidad de la energía para una mejor comprensión de los transitorios [2].

Los sistemas eléctricos de baja tensión están siendo más afectados en términos de disturbios de calidad de la energía eléctrica. El modo de encendido de las fuentes de tensión utilizadas para equipos electrónicos, tales como impresoras, copiadoras, variadores de frecuencia para eficiencia energética en sistemas de aire acondicionado, escaleras eléctricas, balastos electrónicos, etc. y un gran porcentaje de otras cargas se han convertido en no lineales. Tales cargas generan corrientes armónicas que llevan a distorsión de la onda de tensión. En adición a esta distorsión de tensión, los picos originados por descargas atmosféricas y operación de dispositivos de interrupción del sistema eléctrico de potencia que se propagan al sistema de distribución llevan a sobre tensiones transitorias.

Ambos, circuitos analógicos y digitales utilizan complejos componentes de estado sólido en los actuales sistemas de control y son inherentemente susceptibles a ser dañados o funcionar mal con la presencia de picos eléctricos. La tendencia actual hacia un mayor rendimiento en un tamaño más pequeño ha contribuido al problema del ruido eléctrico. Los circuitos digitales con frecuencias altas de cambio de estado, utilizados por su alta eficiencia, contribuyen al ruido [3]. El constante incremento de aplicaciones de potencia basadas con circuitos SCR y capacitores contribuye también con problemas de ruido para su propio sistema de control.

Las sobre tensiones que ocurren en las redes de baja tensión tienen una amplia variedad de orígenes. El hecho de conocer sus características es esencial para determinar los mejores dispositivos de protección para una instalación dentro de la red de baja tensión, o al menos, para reconocer la necesidad de una protección adecuada.

Antes de continuar hablando de baja tensión sería bueno definir qué representa. Para este trabajo de investigación se consideran redes de baja tensión a aquellas instalaciones eléctricas residenciales con un suministro de tensión de 127 Vrms.

Las sobre tensiones transitorias son dañinas para equipos electrónicos sensitivos y deben de ser suprimidas por medio de la aplicación de supresores de picos transitorios de tensión (Transient Voltage Surge Supresor, TVSS). Sin embargo, el problema es cuantificar la magnitud, duración y los parámetros de energía del pico de tensión para realizar una evaluación correcta al seleccionar dispositivos supresores de picos de tensión. Este capítulo provee un panorama fundamental de las sobre tensiones transitorias y ruido asociado en las redes eléctricas de distribución de baja tensión.

1.2 Picos eléctricos y Ruido

El ruido eléctrico generado dentro de una instalación por los picos eléctricos transitorios corrompe las fuentes de suministro de potencia de baja tensión. Para discutir las características de los picos transitorios y el ruido asociado, es importante entender otros términos relacionados.

1.2.1. Definiciones – Ruido y términos relacionados [4]

- El ruido puede ser definido como cualquier forma de energía electromagnética diferente a la señal deseada y sus componentes armónicas.
- Un transitorio es el cambio momentáneo de amplitud en la onda de tensión o de corriente o ambas.
- Pico es el término para ya sea ruido de alta tensión o transitorios de larga duración.
- Interferencia electromagnética IEM es la no paridad de la señal electromagnética deseada por un disturbio electromagnético como puede ser el ruido. IEM a menudo ocurre en el intervalo de frecuencias de radio de 10 kHz hasta 30 MHz, el término FRI (Frecuencia de radio de Interferencia) es a menudo utilizado en lugar del término general IEM.
- Compatibilidad electromagnética (CEM) es la capacidad de un dispositivo para realizar la función para la cual fue diseñado dentro de un ambiente electromagnético dado, sin afectar y sin ser afectado en forma adversa por otros dispositivos dentro del mismo ambiente.
- Ambiente Electromagnético es una serie de condiciones caracterizadas por; a) la presencia de uno o más tipos de disturbios, energía, frecuencia, duración y amplitud del disturbio y b) el efecto que tienen estos disturbios en otros equipos dentro del mismo ambiente.

1.2.2 Modos de Ruido

Varios modos de ruido y sus características son definidos a continuación:

1. **Ruido de modo común:** El término “común” indica que las señales de ruido en cada uno de los conductores que transportan corriente están en fase y de igual magnitud. Por lo tanto la señal de tensión no es generada entre los conductores.

2. **Ruido de modo normal:** Es definido como el ruido que aparece entre los conductores que transportan corriente. Es también conocido como ruido de modo transversal, diferencial, metálico o simétrico.
3. **Ruido de modo normal a común:** El ruido de modo común es más problemático que el de modo normal. El ruido siempre es transmitido a través de un transformador de distribución como ruido de forma común. Sin importar el modo en que el ruido fue generado.
4. **Ruido de Baja Tensión:** Ruido con valores pico de tensión menores a 2000 V es considerado de baja tensión.
5. **Impulsos de Tensión o Corriente:** Son llamados transitorios rápidos debido a su rápido tiempo de subida, en el orden de un nanosegundo hasta 10 microsegundos. Estos ocupan un amplio espectro de frecuencias que va desde 4 KHz. hasta 5 MHz; ocasionalmente alcanzan los 30 MHz. Su duración típica es entre 1 y 150 microsegundos. El nivel de tensión alcanza 150 % o más del valor nominal de la línea de tensión.
6. **Picos de alta tensión:** Estos incrementos instantáneos en la magnitud de la amplitud de la onda de tensión oscilan entre los 100V y 500V para una red de eléctrica de baja tensión de 127 V. En raras ocasiones la magnitud alcanza entre 4,000 V y 6,000 V [5]. El límite superior resulta por el arco eléctrico producido entre conductores de tensión superior a una distancia cercana del sistema eléctrico de potencia de baja tensión de 127 V.
7. **Ruido de Banda Ancha:** Las características espectrales de la forma de onda del ruido dictan la frecuencia de atenuación requerida para un dispositivo de protección contra ruido. Entre más corto sea el tiempo de subida de un pulso de ruido, más ancha o amplia es la banda de energías que deben de ser atenuadas. Las sobre tensiones transitorias o picos eléctricos contienen un espectro de potencia con un ancho intervalo de frecuencia, son consideradas como ruido de banda ancha.
8. **Ruido de Banda Angosta:** Este tipo de ruido tiene un contenido de frecuencia mucho menor que el ruido de banda ancha; Tiene un intervalo de frecuencia menor a 1 MHz.
9. **Atenuación del ruido de modo común:** Los transformadores de potencia eléctrica no transforman señales de alta frecuencia de la misma forma que lo hacen con las señales de potencia a 60 Hz. Para transitorios de alta frecuencia, un transformador no es más que una red de capacitancias y una reactancia del núcleo de acero. El núcleo de acero del transformador no es capaz de responder a altas frecuencias y por lo tanto se convierte en un factor no conveniente. En algunas aplicaciones la utilización de un transformador de aislamiento o un transformador con un escudo electrostático son efectivos para la atenuación del ruido de modo común, el cual de no ser atenuado puede afectar el rendimiento de equipo electrónico sensible. En el caso del transformador de aislamiento, el grado de atenuación depende de las magnitudes relativas de las capacitancias entre los devanados del transformador (Ci) y la capacitancia entre devanados y tierra (Cg) como se muestra en la figura 1:

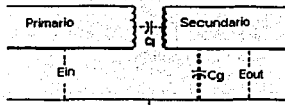


Figura 1

$$\frac{E_{out}}{E_m} \equiv \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

En el caso del transformador con escudo electrostático, la introducción de un escudo aterrizado entre los devanados da como resultado una mejor atenuación a los transitorios de modo común. La carga electrostática en el devanado primario es conducida a tierra por el escudo antes de que pueda inducir tensión al devanado secundario. La pequeña cantidad de acoplamiento del campo electrostático alrededor del escudo es generalmente llamada "capacitancia efectiva" [6] y es mucho más pequeño que la capacitancia entre devanados \$C_1\$ de un transformador sin escudo o blindaje. (Ver figura 2)

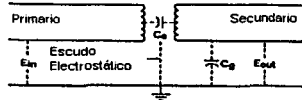


Figura 2

$$\frac{E_{out}}{E_m} \equiv \frac{C_e}{C_e + C_2}$$

10. Uno o más de los siguientes parámetros pueden caracterizar a la distorsión por ruido:

- Impulsos sencillos o señales oscilatorias
- Tiempos de subida y bajada
- Duración
- Frecuencia de repetición
- Amplitud
- Frecuencia

La atenuación es generalmente descrita en unidades de decibel (dB). La relación logarítmica de los dB para la atenuación en Voltios o amperios es mostrada por la siguiente ecuación:

$$dB = 20 \log_{10} \left\{ \frac{V_m}{V_{out}} \right\} \text{ Ó bien, } dB = 20 \log_{10} \left\{ \frac{I_m}{I_{out}} \right\}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.3 Causas y Naturaleza de las Sobre Tensiones Transitorias

Estas son sobre tensiones con una frecuencia que excede los 60 Hz y con una duración menor a unos cuantos microsegundos y en ocasiones alcanzan el orden de los milisegundos, a su vez presentan un incremento instantáneo del valor cresta nominal de la onda de tensión.

Las sobre tensiones transitorias pueden ser causadas por la operación de los interruptores que conectan el sistema eléctrico, eventos de la naturaleza y en ocasiones por los usuarios del sistema. En los circuitos eléctricos residenciales las fuentes más significativas identificadas son: encendido y apagado de cargas dentro del mismo circuito residencial y picos eléctricos provenientes del exterior [7], comúnmente asociados con descargas eléctricas y otros fenómenos no controlables por la compañía suministradora propagándose a través del sistema eléctrico de potencia de distribución al interior del circuito residencial.

Las varias causas de sobre tensiones transitorias y ruido asociado están bien documentadas, una breve descripción de sus orígenes son los siguientes:

1.3.1 Descargas Eléctricas Atmosféricas:

Son concernientes a las redes de baja y media tensión localizadas en áreas diferentes a aquellas con un denso asentamiento urbano. Existen dos causas posibles para este tipo de sobre tensiones transitorias.

a) La descarga eléctrica alcanza directamente la línea de baja tensión. En este caso un arco eléctrico se presenta sistemáticamente. Sin embargo, esto no es frecuente debido a que las líneas de baja tensión tienen poca altura y están generalmente rodeadas por edificios más altos con una mayor exposición a un impacto directo. Este tipo de descargas generalmente tiene un ritmo de crecimiento en su tensión muy rápido (1,000 – 10,000 kV/μs) y corrientes de pico altas (1-200 kA).

b) La descarga eléctrica incide directamente en el suelo cercano a una línea de baja tensión. En este caso un voltaje es directamente inducido en los conductores. Este tipo de descargas generalmente tiene un ritmo de crecimiento en su tensión menor que las descargas directas (20 – 100 kV/μs) y corrientes de descarga de 2 kA o menores.

Las descargas eléctricas pueden producir varios modos de ruido y disturbios transitorios como son los siguientes:

- a) Ruido de modo común.
- b) La descarga eléctrica induce acoplamiento electrostático.
- c) La descarga eléctrica induce acoplamiento magnético.
- d) La descarga eléctrica induce acoplamiento entre conductores.
- e) Ruido de modo normal.

Las descargas eléctricas producen ondas que viajan a una velocidad de: $1 / \sqrt{L/C}$ [35] (unidades de longitud por segundo) en el sistema. La corriente inducida I por una descarga atmosférica y su onda de tensión E están relacionadas por:

$$E = I Z_o = I \sqrt{L/C} \quad [35]$$

Dónde Z_o es la impedancia de la sobre tensión transitoria.

Otro factor a considerar como causa de éste tipo de sobre tensiones transitorias es la exposición a descargas eléctricas e intensidad del pico eléctrico. La probabilidad de que el valor de la amplitud de la tensión de un pico eléctrico exceda los valores pico especificados esta relacionada con los niveles de exposición a descargas eléctricas como se muestra en la figura 3. [8]

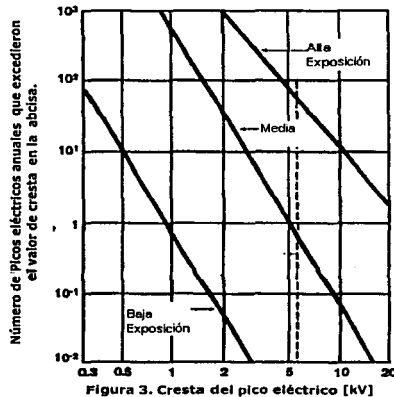


Figura 3. Cresta del pico eléctrico [kV]

1.3.2 Operación de dispositivos de conexión del sistema:

El encendido o apagado de dispositivos que interconectan, protegen y compensan el sistema eléctrico de potencia, en ocasiones su funcionamiento causa sobre tensiones generalmente debidas a energía atrapada en alguna parte del circuito y la subsiguiente liberación de esa energía. Algunas de estas causas son las siguientes:

a) **Interrupción de Corriente Inductiva:** Los dispositivos de interrupción rápidos actuales son capaces de interrumpir bajos niveles de corriente antes de que la corriente tenga un valor real de cero. Esta acción, conocida como interrupción de



L_s = Inductancia del sistema

L_t = Inductancia del transformador

C = Capacitancia (Cable, transformador, y bancos de corrección de factor de potencia)

1.3.3 Conexión y desconexión de bancos de capacitores: Cuando un banco de capacitores es energizado o descargado, se producen sobre tensiones transitorias por algunas de las siguientes causas o sus combinaciones:

- Re-cierres ocurridos durante la interrupción de un banco de capacitores,
- Precierres durante el energizado de un banco de capacitores,
- La magnificación de la tensión transitoria de energizado o descarga de un banco de capacitores debido a la presencia de condiciones de resonancia en el sistema,
- Carga o descarga del capacitor con tensión residual de una previa carga.

Cada una de las operaciones anteriores pueden desarrollar sobre tensiones peligrosas para el sistema, para el mismo banco de capacitores y los dispositivos de protección contra sobre tensiones transitorias del sistema. Bajo ciertas condiciones del sistema eléctrico de potencia, múltiples re-cierres pueden ocurrir, los dispositivos limitadores de sobre tensiones transitorias deben de ser capaces de absorber la energía asociado con éste fenómeno.

1.3.4 Arco de tensión de los fusibles limitadores de corriente: Ocasionalmente los dispositivos limitadores de sobre tensiones transitorias por dañados por el arco de tensión de los fusibles limitadores de corriente. El arco de tensión de un fusible limitador de tensión puede estar relacionado con la inductancia del sistema, la tensión y un rápido cambio en la corriente como se muestra a continuación:

$$E = e + L \frac{di}{dt}$$

Donde:

E= Arco de tensión

e= Tensión nominal del sistema

L= Inductancia total del sistema

$\frac{di}{dt}$ = Razón de cambio en el tiempo de la corriente de falla

El máximo arco de tensión depende de la construcción del elemento fusible, y puede o no tener una relación exacta con la corriente de falla disponible. Los

dispositivos de protección contra sobre tensiones transitorias deben de ser coordinados con los fusibles limitadores de corriente con base a la energía del sistema, arco de tensión del fusible, tensión máxima y capacidad de energía del dispositivo de protección.

La energía almacenada en el sistema (W) en el instante de un pico eléctrico llevado por la corriente (Ip) para un fusible limitador de corriente es:

$$W = \frac{1}{2} L I_p^2$$
$$L = \frac{e}{377 I_f}$$

Donde (e) es la tensión simétrica RMS de línea a tierra del sistema e I_f es la corriente simétrica RMS de falla disponible. Por lo tanto, la energía (W) puede ser calculada, si este valor es menor que la capacidad de energía del dispositivo de protección, no se debe de realizar más análisis. Si esta magnitud de energía es mayor que la capacidad de energía del dispositivo, entonces se necesita un mayor análisis para determinar cuanta energía está pasando en realidad por el dispositivo de protección como lo indica [9].

1.3.5 Ferro Resonancia: La resonancia serie que involucra a la capacitancia del cable y la inductancia no lineal de un transformador conectado en delta puede resultar en una sobre tensión transitoria durante la caída de una de las fases del dispositivo primario de interrupción y conexión [9][12]. Esto puede sobrecargar al dispositivo de protección contra sobre tensiones transitorias del transformador de distribución en sus otras dos fases.

1.3.6 Cargas no lineales y bancos de capacitores: Si la frecuencia de cualquiera de las corrientes armónicas producidas por las cargas no lineales se encuentra cercana a la frecuencia de resonancia de la combinación en paralelo de la inductancia del sistema (L) y la capacitancia de corrección de factor de potencia (C), se desarrollará una sobre tensión transitoria debido a resonancia en paralelo.

1.3.7 Operación de dispositivos de conexión del Sistema: En ocasiones ciertos elementos, generalmente interruptores, que constituyen el sistema eléctrico de potencia tienen que ser desconectados por diferentes causas, ya sea por mantenimiento, por la operación de dispositivos para eliminar fallas, o el encendido y apagado de cargas electrónicas. El resultado de estas actividades es variado en cuanto a disturbios de calidad de la energía pero en la mayoría de los casos generan disturbios en la onda de tensión, incluyendo sobre tensiones transitorias, como consecuencia de la energía atrapada, que se propagan al resto del sistema eléctrico de potencia.

1.4 Forma de onda de las sobre Tensiones Transitorias.

Los grupos de trabajo de la IEEE y IEC, han desarrollado diferentes formas de onda estándar que modelan picos eléctricos transitorios para la prueba de dispositivos supresores de picos eléctricos transitorios en aplicaciones interiores o exteriores. En el sistema de distribución de potencia de baja tensión. [9]

1) Exterior: Onda Mixta- Ondas de tensión de 1.2/50 μ s y ondas de corriente de 8/20 μ s son predominantes en el exterior de la acometida de potencia eléctrica. Sin embargo, las descargas eléctricas inducen oscilaciones que aparecen como oscilaciones amortiguadas en un sistema eléctrico de potencia de baja tensión.

2) Interior: Onda Oscilante: Un pico eléctrico entrando en el sistema eléctrico de baja tensión excita la frecuencia natural de resonancia de los conductores del sistema. Como resultado, no solamente son los picos eléctricos oscilatorios, sino también diferentes amplitudes y formas de onda en diferentes lugares dentro del sistema eléctrico de baja tensión.

Estas frecuencias de oscilación de los picos eléctricos varían en el intervalo de 5 KHz. hasta más de 500 KHz. Basado sobre tales conclusiones, una onda oscilante, de 0.5 μ s con 100 KHz. cuyo tiempo de subida es de 0.5 μ s, posteriormente decae mientras oscila a una frecuencia de 100 KHz., cada pico siendo del 60 % del valor del pico precedente. Tales ondas son mostradas en la tabla 1.


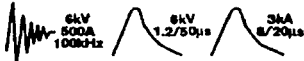

| | |
|---------------------------|---|
| <p>Categoría A</p> |  |
| <p>Categoría B</p> |  |
| <p>Categoría C</p> |  |

Tabla 1. Formas de onda de prueba descritas por ANSI/IEEE C62.41-1991 [9]

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1.5 Energía e impedancia de las Sobre tensiones Transitorias

Como se mencionó en la introducción de este documento existe una falta de datos acerca de la duración, forma de onda e impedancia de la fuente de las sobre tensiones transitorias en sistemas eléctricos de potencia de corriente alterna. Estos tres parámetros son importantes para estimar la energía que un transitorio puede entregar a un dispositivo electrónico sensible, o bien, a un supresor de picos. La impedancia presentada por una fuente de energía en las terminales de un dispositivo o de una red eléctrica es definida como la impedancia de la fuente [10]. Debido a la amplia variedad de posibles impedancias de la fuente y la dificultad de seleccionar un valor en específico, tres categorías generales de localización de cargas como se muestran en la tabla 2, han sido consideradas para la aplicación de supresores de picos eléctricos en el sistema eléctrico de potencia de baja tensión. El grado de importancia de la impedancia de la fuente depende ampliamente del tipo de supresor de picos eléctricos que será utilizado. Los supresores de pico deben ser capaces de soportar la corriente que pasa a través de ellos ocasionada por la impedancia de la fuente.

La impedancia de la fuente no debe de ser confundida con la impedancia de la sobre tensión transitoria. La impedancia del transitorio es el concepto relacionado con los parámetros de la línea eléctrica con la propagación de la onda en tránsito, para el sistema eléctrico de baja tensión su valor se encuentra dentro del intervalo entre los 150 y 300 Ohms.

Los dispositivos de protección para picos eléctricos de tipo abrazadera (clamping), trabajan exclusivamente si la impedancia de la fuente es finita. [11]

| Tabla 2. Categorías Generales de Localización | | |
|---|--|--|
| Categoría A | Categoría B | Categoría C |
| Circuitos en ramificaciones largas. | Alimentadores y circuitos en ramificaciones cortas | Afuera y adentro de la entrada del suministro. |
| Todos los suministros a más de 10 m de la categoría B | Tableros de distribución | En la entrada del suministro desde el poste de potencia y un edificio. |
| Todos los suministros a más de 20 m de la categoría C | Alimentadores de plantas industriales Sistemas de iluminación en edificios grandes. | Entre el tablero y el medidor. Línea subterránea para bombas de agua. |

La demarcación entre las categorías de localización B y C es arbitrariamente definida en el medidor principal o en el secundario del transformador de servicio si éste es suministrado al usuario a un valor de tensión más elevado.

La cantidad de energía que se puede esperar en una sobre tensión ocasionada por la operación de dispositivos que interconectan al sistema eléctrico de potencia es indeterminada debido al hecho que los parámetros de los picos eléctricos no son precisos, y pueden cambiar de acuerdo a la configuración del sistema. El conocimiento de la inductancia del sistema (L) y el máximo valor RMS de la corriente (I) en el momento de la operación de los dispositivos de interconexión pueden proveer un estimado de la energía atrapada en el sistema de la siguiente manera:

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

Donde:

W = Energía [Joules]

L = Inductancia [Henrys]

I = Valor RMS de la corriente [Amperes]

A partir del conocimiento de la capacitancia del sistema y del valor máximo de la amplitud de la tensión de la sobre tensión desarrollada, la energía también puede ser estimada por medio de:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

Donde:

C = Capacitancia [Farads]

V = Valor RMS de la tensión [Voltz]

La energía del pico eléctrico puede ser evaluada por medio de la expresión [12]:

$$\int_0^t VI dt = \int_0^t \frac{dv}{dt} \cdot \frac{di}{dt} t^2 dt \quad [\text{Joules}]$$

Donde

$\frac{dv}{dt}$ = Ritmo de crecimiento del pico eléctrico de tensión [V/s]

$\frac{di}{dt}$ = Ritmo de crecimiento de la corriente asociada con el pico eléctrico de tensión [A/s]

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{dv}{dt}$$

t = Tiempo en que el pico eléctrico alcanza la máxima tensión aplicable a las terminales del dispositivo de protección.

V = Tensión máxima aplicable a las terminales del dispositivo de protección antes del flujo de la corriente de descarga. [Voltz]

I = Valor pico de la corriente de descarga. [Amperes]

1.6 Normatividad.

En México no se cuenta con un conjunto de normas que traten en forma completa el problema de las sobre tensiones transitorias en circuitos industriales, comerciales y residenciales. Con la intención de reflejar la importancia de este tema en otros países decidimos presentar el conjunto de estándares y recomendaciones relacionadas con sobre tensiones que se aplican en los EE.UU.

a) Protección contra Sobre tensiones Transitorias: La prácticas recomendadas en cuanto a sobre tensiones en sistemas eléctricos de baja tensión son establecidas por:

- UL 1449: Estándar de Seguridad: Dispositivos supresores de picos
- IEEE Estándar C62
- IEEE Estándar 587 (igual a ANSI C62.41)
- Agencia Nacional de Protección contra Incendios publicación 78: Código de protección contra descargas atmosféricas para edificios.

b) Ruido Eléctrico: Estándares para Radio Frecuencia y otras formas de ruido eléctrico están cubiertos por:

- IEEE Estándar P1100: Guía para energizar y aterrizar equipo electrónico sensible.
- IEEE Estándar 518: Guía de instalación de equipamiento eléctrico para minimizar la entrada de ruido eléctrico de fuentes externas.

c) Armónicos: Los estándares que cubren armónicas y distorsión armónica son:

- IEEE Estándar 519: Prácticas recomendadas y requerimientos para control armónico en sistemas eléctricos de potencia.

d) Conexión a Tierra Eléctrica: Los estándares que cubren este tema son:

- IEEE Estándar P1100: Guía para energizar y aterrizar equipo electrónico sensible.
- IEEE Estándar 141: Sistemas Eléctricos de Potencia Industriales.
- IEEE Estándar 142: Conexión a tierra de sistemas eléctricos industriales y comerciales.

e) Seguridad: Los estándares de seguridad están incluidos en:

- NFPA Publicación 70: Código Eléctrico Nacional.
- NFPA Publicación 75: Protección de equipamiento electrónico y computadoras

f) Telecomunicaciones: Los estándares para telecomunicaciones están cubiertos en:

- IEEE Estándar P487: Protección de la línea eléctrica de comunicaciones.

g) Monitoreo de Calidad de la Energía: Los estándares están cubiertos por:

- IEEE Estándar P1159: Monitoreo y Definiciones.
- IEEE Estándar P1250: Guía para equipo sensible a disturbios de tensión.

1.7 Referencias Bibliográficas

6. M. Clement - J. Michaud "Overvoltages on the Low Voltage Distribution Networks" Electricité de France, 1992
7. Recommended Practice For Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment, IEEE Std 1100 1992 (Emerald Book)
8. Dev Paul "Low Voltage Power System Surge Over Voltage Protection", 078035843 IEEE, 2000
9. Dev Paul "Low Voltage Power System Surge Over Voltage Protection", 078035843 IEEE, 2000 p. 22
10. Tseng Wu Liao "Surge Suppressors for the Protection of Solid State Devices" IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol, IGA-2 1996
11. Dev Paul "Low Voltage Power System Surge Over Voltage Protection", 078035843 IEEE, 2000 p. 24
12. Francois D. Martzloff, "Surge Voltage in Residential and Industrial Power Circuits" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-89, pp. 1049-1055, July 1970
13. Paul G. Slade, "Vacuum Interrupters: The New Technology for Switching and Protecting Distribution Circuits", IEEE Trans. Industry Applications, vol 34, no.6, Nov/Dec 1997
14. IEEE Guide for the application of Metal Oxide Surge Arresters for AC Systems, Draft ANSI/IEEE Std C62.22-1991
15. Dev Paul "Low Voltage Power System Surge Over Voltage Protection", 078035843 IEEE, 2000 p. 25
16. "Transient Voltage Suppression Devices", Harris Semiconductors, USA 1992
17. Dev Paul "Low Voltage Power System Surge Over Voltage Protection", 078035843 IEEE, 2000 p. 26-30

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO II

DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

2.1 Importancia de la Protección contra Sobre Tensiones

La importancia de protección contra sobre tensiones en los equipos que forma el sistema eléctrico de potencia de distribución no puede ser sobre enfatizada. Una protección inadecuada contra este fenómeno ha demostrado ser una de las principales causas mayores de apagones en plantas eléctricas y falla de los equipos. La protección contra sobre tensiones es igual de importante que la protección contra sobre corriente para considerar a un sistema eléctrico confiable. Dado que el daño acumulativo ocasionado por las sobre tensiones transitorias a los equipos durante un periodo de tiempo no puede ser fácilmente mensurable, dispositivos de protección contra sobre tensiones deberán de ser aplicados para mitigar la tensión de las sobre tensiones transitorias y su energía asociada de tal forma que no se causen daños a los equipos.

2.2 Dispositivos Supresores de Picos

La mayoría de los problemas sobre calidad de la energía en los sistemas de distribución de baja tensión están siendo resueltos con la aplicación de dispositivos supresores de picos o TVSS por sus siglas en inglés (Transient Voltage Surge Suppressors) y sus combinaciones con otros dispositivos de filtrado de ruido.

Los dispositivos TVSS están disponibles en una amplia variedad de nombres dados por los fabricantes individuales, haciendo su selección adecuada y aplicación un reto para los diseñadores de sistemas de potencia. En un sistema de distribución de potencia de baja tensión, los dispositivos TVSS conectados en serie están disponibles, sin embargo, tales dispositivos llevan la corriente nominal continuamente y necesitan tener la capacidad de resistir corrientes de corto circuito sin crear una situación peligrosa. El incremento en la demanda de la aplicación de dispositivos TVSS para resolver problemas de calidad de la energía, en general está determinado por el costo relativo de dichos dispositivos comparados con otros dispositivos mostrados en la pirámide de calidad de la energía de la figura 1.

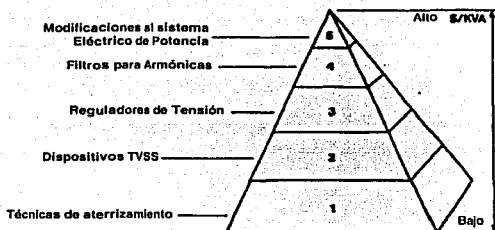


Figura 1. Pirámide de calidad de la energía

En forma general se pueden definir las siguientes categorías de dispositivos TVSS [1]:

- 1) **Abrazadera:** Compuestos por un elemento Varistor de óxido metálico o MOV por sus siglas en inglés (Metal Oxide Varistor), presenta una capacidad de absorción de alta-energía, y tiempo de respuesta en nanosegundos.
- 2) **Barra de Acero:** Tubos de acero que contienen gas, no responden rápidamente, en la mayoría de los casos el transitorio es más rápido que la respuesta del dispositivo.
- 3) **Híbrido:** Estos dispositivos se pueden considerar como una combinación de los tipos 1 y 2.
- 4) **Seguidor de onda sinusoidal:** Es una nueva tecnología, sigue la señal sinusoidal de corriente alterna; este seguimiento permite la respuesta a cambios menores en la amplitud de la señal que pueden pasar desapercibidos en otras categorías de dispositivos de protección
- 5) **Otros:** TVSS para señales telefónicas y dispositivos de filtrado de ruido [2]

2.3 Requerimientos para pruebas de dispositivos TVSS

La segunda edición del estándar UL Std. 1449 [3] contiene importantes cambios que afectan los requerimientos de prueba para una mayor seguridad y funcionamiento de los productos TVSS conectados permanentemente. Esta edición incluye la prueba de tiempo de vida útil del dispositivo, esta prueba puede resultar en daños para los productos debidos a una sobre tensión transitoria de gran amplitud, una sobre tensión sostenida tal como la pérdida del neutro, o errores de instalación como pueden ser la operación incorrecta o aterrizamiento impropio.

El elemento MOV de un dispositivo TVSS puede provocar una condición de corto circuito cuando se llega a un exceso en las condiciones térmicas. Si no se controla adecuadamente, el equipo puede resultar dañado.

Los dispositivos TVSS deben de pasar las siguientes pruebas sin correr el riesgo de fuego o un choque eléctrico [4]:

- 1) Sobre tensión: Soportar el 110% de la tensión nominal por siete horas.
- 2) Sobre tensión anormal, Tensión de fase completa – Corriente alta: Soportar 25 kA a una tensión de fase completa de 208V para 120V y 480V para 277V. La sobre tensión se aplica por siete horas.
- 3) Sobre tensión anormal, Tensión de fase completa – Corriente limitada: Soportar una corriente de 5A (también 2.5A, 0.5A y 0.125A) a una tensión de fase completa de 208V para 120V y 480V para 277V. La sobre tensión es aplicada por siete horas.
- 4) Pruebas de límite de tensión y ciclo de trabajo: Esta prueba se realiza para conexiones Línea-Línea, Línea-Neutro, Línea-Tierra y Neutro-Tierra de un dispositivo TVSS sujeto a un impulso transitorio de 6 kV y 0.5 kA, el límite de tensión es medido y procesado. El dispositivo es posteriormente sometido a 10 impulsos positivos consecutivos de 6 kV y 3 kA a intervalos de 60 segundos y 10 impulsos negativos de 6 kV y 3 kA a intervalos de 60 segundos. Continuando con la prueba del ciclo de trabajo, el dispositivo TVSS es sometido a otros 6 kV y un impulso de 0.5kA y una vez más el límite de tensión es medido y procesado. El resultado promedio de la prueba de límite de tensión es caer en el mínimo nivel de tensión suprimido y no es exceder el nivel de tensión suprimido por más del 10%.
- 5) Prueba de corriente del pico eléctrico: Esta prueba está diseñada para calificar cada dispositivo para resistir un transitorio estándar de categoría C3. EL dispositivo debe resistir dos impulsos transitorios consecutivos (uno positivo y uno negativo) de 6 kV y 10 kA. Después de las pruebas el dispositivo debe permanecer conectado al suministro de energía eléctrica durante siete horas o hasta alcanzar el equilibrio térmico.

2.4 Acercamiento a la aplicación de dispositivos TVSS

El concepto de "Protección Total" contra sobre tensiones transitorias se ha convertido en un tema de discusión popular y de hecho ha sido implementado por numerosas compañías suministradoras en Norte América [5]. En este caso, la compañía suministradora instalará un dispositivo TVSS en la acometida del cliente y proveerá dispositivos TVSS adicionales que se conectan a cualquier contacto del circuito residencial. Estos dispositivos de protección adicionales se presumen bien coordinados con el dispositivo TVSS instalado en la entrada del suministro o acometida, y son instalados bajo las premisas del cliente, es decir, brindan protección a equipo electrónico sensible definido por el mismo cliente tales como sistema de entretenimiento caseros, computadoras y sofisticados equipos electrodomésticos.

El propósito principal de estos dispositivos de protección es el de proteger equipo sensible contra los picos eléctricos transitorios, misión que pueden cumplir muy bien. Sin embargo, la falla de estos dispositivos bajo sobre tensiones temporales, o por sus siglas en inglés TOV (Temporary Overvoltages), que pueden ser esperadas bajo anormales pero posibles condiciones del sistema de potencia se ha convertido en la causa de cierto descontento para las compañías suministradoras y sus clientes.

No debe de esperarse que un dispositivo de protección contra sobre tensiones transitorias proteja el equipo conectado a él (tal vez aislándolo) en caso de una sobre tensión temporal y luego lo regrese a su operación normal, como lo hace por definición para la protección de picos eléctricos. El dilema de los diseñadores de dispositivos de protección es si se selecciona una tensión de operación continua máxima o MCOV, en inglés (Maximum Continuous Operating Voltage), suficientemente alta para subsistir a sobre tensiones temporales comunes – pero al precio de una protección de picos disminuida – o si se selecciona una protección de picos con una tensión de operación continua máxima menor – y después aceptar el fallo del dispositivo de protección para poco frecuentes pero posibles sobre tensiones temporales. En cualquier caso, se debería esperar que si una sobre tensión temporal a cualquier nivel causara la falla del dispositivo de protección, este modo de falla debe ser aceptable.

Este dilema de protección de picos versus posibles escenarios de sobre tensiones ha sido creado por la obsesión de la industria con el aprovisionamiento de tensiones muy bajas en el elemento varistor para la mitigación de picos (Martzloff & Leedy, 1989 [6]).

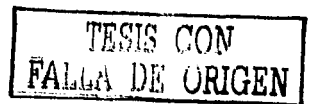
Adicional a este dilema, es de suma importancia que el ingeniero encargado de llevar a cabo la aplicación de dispositivos TVSS tenga un conocimiento básico de la literatura publicada referente a sobre tensiones transitorias, su ambiente, contenido energético, así como también los tipos de ondas utilizados para probar dispositivos TVSS [7][8].

Para evitar el trabajo especulativo y la mal aplicación de los dispositivos TVSS, los ingenieros encargados de la aplicación, en el mejor de los casos, deberían desarrollar su propia lista de factores de evaluación. Estos factores de evaluación, en general, establecerán el camino para el análisis y solución del problema de picos eléctricos y el ruido de alta frecuencia asociado.

1. Desarrollar el Diagrama unifilar o de una línea completo del sistema de distribución de potencia de baja tensión mostrando, el transformador principal, el tablero principal, sub-paneles, transformadores alimentadores de distribución, tipos de cargas y dispositivos de medición en cada panel. Mostrar sistemas de control, comunicación de datos, y otras cargas sensibles en puntos apropiados a través del inmueble en un diagrama de una línea.
2. Revisar el método de aterrizamiento y configuración del suministro de energía primario por parte de la compañía suministradora con el fin de seleccionar el dispositivo de protección adecuado contra sobre tensiones en el devanado primario del transformador principal.
3. Realizar un bosquejo de la forma de distribución del equipo, indicando el tendido de los circuitos, el tipo y calibre de conductor, configuración y longitudes aproximadas.

DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

4. Revisar aterrizamiento y blindaje del sistema de distribución necesario para la protección del equipo, la seguridad del personal y el blindaje contra altas frecuencias para sistemas de datos y control. [9][10]
5. Establecer la tensión máxima continua de operación en cada panel principal de distribución de potencia basado en la regulación útil de tensión y en el efecto de los devanados del transformador, si los tiene.
6. Realizar el análisis de corto circuito de las tres fases y de una sola fase para establecer la corriente de corto circuito máxima esperada en puntos críticos dentro del sistema de distribución de potencia donde se aplican los dispositivos TVSS.
7. Revisar la capacidad del sitio asociado con la configuración del sistema de distribución de potencia y con las cargas para determinar el grado de exposición de picos transitorios externos así como la propagación de picos internos originados por el encendido y apagado de equipo electrónico. [11]
8. Analizar el diseño del sistema de distribución de potencia para una posible condición ferro resonante que pueda provocar la falla de arrestadores de picos. [12]
9. Para cada localización, establecer el tipo de categoría del dispositivo TVSS, modos de protección, requerimientos de filtrado de ruido de alta frecuencia, y los principios de conexión al equipo que necesita protección de picos.
10. Establecer los requerimientos locales o remotos de monitoreo para el dispositivo TVSS.
11. En las localizaciones de categoría A, hacer un análisis de la selección entre los dispositivos TVSS conectados en serie o los dispositivos TVSS conectados en paralelo. Esto puede requerir la revisión del problema con el vendedor del equipo para asegurar una aplicación adecuada.
12. Revisar el diseño de aterrizaje y blindaje, un elemento clave para el éxito de la aplicación de dispositivos TVSS.
13. Revisar cuidadosamente la literatura del vendedor de los dispositivos TVSS de cada categoría para requerimientos específicos y requerimientos de pruebas de seguridad. [2] El criterio de la aplicación de los dispositivos TVSS y sus especificaciones deben incluir por lo menos lo siguiente.
 - a) Capacidad de corriente de pico: rendimiento, seguridad.
 - b) Diseño falla-segura.
 - c) Modos de protección
 - d) Capacidad de filtrado
 - e) Pruebas de ciclo de vida
 - f) Características de monitoreo
 - g) Capacidad de contrarrestar cortos circuitos y niveles de fusión de fusión provocados por ellos.
 - h) Tiempo de respuesta



2.4.1 Dispositivos de Protección en redes de Baja Tensión

La introducción del varistor óxido metálico en los setentas fue una innovación muy sobresaliente, aunado con el incremento del uso de semiconductores en productos del consumidor. Mientras estos semiconductores abrieron nuevas oportunidades, su relativamente baja tolerancia para picos creó una demanda fuerte de mejores dispositivos protectores de picos. Desafortunadamente, la competencia del mercado alentó una acción inconveniente que llevó a atribuir una alta importancia a sobre tensiones de baja magnitud, una situación ocasionada sin intención por el listado de los niveles de supresión de transitorios estipulado por el Standard UL 1449 [3]. La lista empieza a 330 V para dispositivos de protección de picos propuestos para circuitos de 120 V, aunque hay una gran evidencia de que la mayoría de los consumidores de carga no necesitan tal nivel bajo de protección (Anderson & Bowes, 1990 [13]); (Smith & Standler, 1992 [14]).

La estructura genérica del típico sistema eléctrico residencial de baja tensión se muestra en la figura 2 para el caso de un solo inmueble. El servicio de suministro subterráneo tiene características similares. Este sistema se extiende desde la línea lateral externa del servicio y sigue hacia el cableado principal, incluyendo el tipo de conector del dispositivo protector de picos. La figura 1 también muestra varias localizaciones en donde se puede instalar un dispositivo protector de picos.

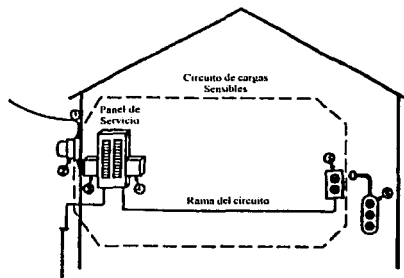


Figura 2. Posibles localizaciones de dispositivos TVSS para un circuito residencial

Típicamente, hay seis localizaciones.

- 1) En la entrada externa del suministro
- 2) En la entrada interna del suministro
- 3) En el lado de la línea del dispositivo principal de protección contra sobre corriente
- 4) En el lado de la carga del dispositivo principal de protección contra sobre corriente
- 5) En el receptáculo permanentemente conectado
- 6) Conectados en contactos

Un requerimiento surgido en estándares para la aplicación de los dispositivos protectores de picos en redes de baja tensión bajo desarrollo de la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC 61643-1 [15]) así como la IEEE (P62.62 [16]) es de un interruptor propuesto para desconectar un dispositivo protector de picos que falla. Las fallas bajo condiciones que exceden la capacidad del dispositivo protector de picos se reconoce como inevitables, pero las consecuencias de tales fallas se hacen aceptables gracias a la acción del interruptor.

Desafortunadamente, algunas ambigüedades se han generado debido a la interpretación de este requerimiento. En algunos casos ha sido interpretado como la desconexión del componente protector de picos que falla del sistema de potencia, pero dejando la carga energizada – y sin más protección de picos (Martzloff, 1998 [17]). Si el interruptor es de este último tipo, los componentes del dispositivo protector de picos de un paquete de dispositivos protectores de picos fallaran bajo condiciones de sobre tensiones temporales, presumiblemente de manera segura, pero después dejarán pasar la sobre tensión temporal y que sea aplicada al resto de los equipos conectados. Este caso no es deseable desde el punto de vista de los usuarios típicos del sistema quienes valoran la protección del equipo por encima de la continuidad en el suministro.

Finalmente, está el caso más grave, en el cual el modo de falla del dispositivo TVSS bajo condiciones de sobre tensiones temporales TOV no es agradable del todo por decirlo de la mejor manera. Este tipo de casos, aunque no son muy frecuentes, han llevado a nuevas pruebas de los dispositivos TVSS contra modos de falla en la actualizada segunda edición del estándar UL 1449 para dispositivos de protección TVSS en circuitos de baja tensión.

Dada esta situación, es útil revisar los escenarios que pueden llevar a una falla de un dispositivo de protección TVSS en un paquete de dispositivos TVSS, en condiciones particulares de sobre tensiones temporales TOV. Con el fin de abordar los modos de falla en forma completa, también se incluyen los escenarios de fallas para sobre tensiones transitorias.

2.4.2 Modos de Falla Bajo Sobre Tensiones Transitorias

Para que un dispositivo protector de picos sea aplicado correctamente, las condiciones de falla por transitorios deben de ocurrir en raras ocasiones. Sin embargo, se pueden numerar los siguientes escenarios de falla en una aplicación de campo de dispositivos TVSS – incluyendo malas aplicaciones:

1. Un solo, grande y no anticipado pico entrante excede la capacidad del dispositivo protector de picos. Un ejemplo de esta situación puede ser la presencia de un capacitor interruptor.
2. Una sucesión de picos, como son múltiples descargas atmosféricas, excede la capacidad del dispositivo protector de picos. Esta situación ha sido identificada para los arrestadores de distribución (Darveniza, 1997 [18]) y también puede ocurrir para dispositivos protectores de picos de baja tensión.

3. El sobrecalentamiento provocado en un dispositivo protector de picos expuesto a altas temperaturas del ambiente en el momento en el que el pico ocurre (dentro de las especificaciones para ambiente normal).

4. En el escenario cuestionable de un supuesto dispositivo protector de picos degradado (Stringfellow, 1992 [19]), se inicia un sobrecalentamiento por el calor generado durante un pico que se encuentra dentro de las especificaciones.

Para todos estos escenarios, el modo de falla depende de la corriente de falla que el sistema de potencia puede enviar al punto de conexión del dispositivo protector de picos. Para corrientes de falla moderadas, tales como en circuitos de ramas, el interruptor puede generalmente proveer de protección. El diseño del fusible todavía puede ser un reto: llevar la corriente de la carga, llevar la corriente de la sobre tensión transitoria especificada, pero derretirse en caso de una corriente de falla de potencia-frecuencia resultado de una falla del dispositivo protector de picos. Para corrientes de falla muy altas, como las existentes en los suministros de energía cercanos a un gran transformador de distribución, una protección contra fallas exitosa puede ser un reto mayor. Además la coordinación de protección contra sobre corrientes es más difícil, comparada con los circuitos de ramas dentro del edificio donde la impedancia del cableado y los niveles de los interruptores principales del circuito en el panel pueden asegurar un coordinación adecuada.

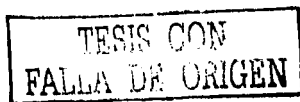
2.4.3 Modos de falla en condiciones de sobre tensiones temporales

Aunque en éste análisis de sobre tensiones de la red eléctrica el principal objetivo son las sobre tensiones transitorias, es importante conocer los efectos que las sobre tensiones temporales causan a los dispositivos de protección contra picos eléctricos transitorios.

Se pueden identificar tres principales tipos de fallas inducidas de sobre tensiones temporales para dispositivos protectores de picos de baja tensión:

a) **Sobre tensiones temporales moderadas** asociadas a las fallas del sistema de potencia, como la falla de línea-tierra en un sistema trifásico, creando una tensión de línea 1.73 veces el valor normal en las otras fases. La ferro-resonancia puede también producir moderadas pero significativas sobre tensiones.

b) **Sobre tensiones temporales extremas** asociadas con el escenario de caída accidental de conductores de tensión mayor sobre conductores de tensión menor. Solo un Varistor no convencional de un dispositivo protector de picos se puede esperar que sobreviva a dicho escenario.



c) Sobre tensiones temporales de doble tensión asociadas con la pérdida del neutro en una sola fase, tres conductores, sistema aterrizado por devanado central tal como el servicio 120/240 V típico de sistemas de Norte América. [5]

Dependiendo de la filosofía del diseñador del sistema, en particular la utilidad para el caso de un dispositivo protector de picos aplicado en la entrada del servicio o suministro, la sobre vivencia o una esperada pero aceptable falla puede ser estipulada para un escenario de pérdida del neutro.

a) Sobre tensiones temporales moderadas: fallas del sistema

Entre las condiciones anormales que pueden producir sobre tensiones temporales, se dan dos ejemplos de incidentes resultantes de sobre tensiones que no exceden dos veces la tensión normal. Algunos dispositivos protectores de picos basados en la mala concepción de que una tensión de operación muy baja es deseable, pueden no sobrevivir a tales sobre tensión transitoria moderadas.

- Fallas de una sola fase a tierra en un sistema trifásico producen una modificación en las fases sin falla. La severidad del incremento de tensión depende de la ubicación de la falla, la impedancia del sistema, y las prácticas de aterrizamiento. Para un sistema de potencia en estado estable, el neutro estará por simetría al mismo potencial que la tierra, como en la figura 3.a. Sin embargo, si una falla a tierra ocurre en una de las fases, ésta ocasionará un incremento en el potencial debido a que el sistema siempre busca su balance. El neutro será elevado y un cambio correspondiente será experimentado en las dos fases restantes. En el peor de los casos, el de un sistema completamente aislado con una falla a tierra en una de sus fases se puede tener la situación que se muestra en la figura 3.b. Ésta muestra el neutro que ha sido elevado a uno por unidad, causando que las fallas no falladas eleven su tensión 1.73 por unidad con respecto a la tierra.

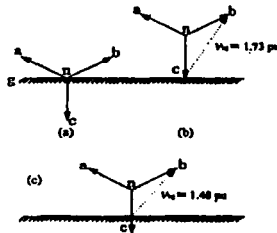


Figura 3 Efectos de una falla de una sola fase a tierra

Para sistemas trifásicos con un neutro artificial a través de un transformador de aterrizamiento o una resistencia finita, la impedancia de la tierra es alta. Este arreglo limita la corriente de falla durante una falla de una sola línea a tierra, pero permite el flujo de suficiente corriente para la detección de la falla utilizando relevadores de sobre corriente. Este arreglo también inserta un poco de impedancia entre el neutro del sistema y la tierra física de tal forma que la tensión en las fases no falladas se elevará a un valor menor que la tensión de línea en línea como se muestra en la figura 6.c.

- **Resonancia en serie** ocurre en un sistema eléctrico de potencia cuando un circuito en serie compuesto de un inductor y un capacitor es excitado a su frecuencia natural. Como un ejemplo de esta condición la figura 4 siguiente muestra una porción de una sobre tensión temporal resultante de la operación de los interruptores del sistema eléctrico de potencia (reestablecer el suministro de potencia después de una interrupción [20]), los cuales produjeron una tensión RMS sostenida de 150% el valor nominal con una duración de cuatro segundos.

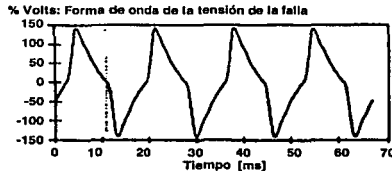


Figura 4. Sobre tensión temporal causada por ferro resonancia. Fuente: EPRI [20]

b) Sobre tensiones temporales extremas: Contacto entre conductores

En este escenario de la vida real, el dispositivo protector de picos de baja tensión conectado en el lado secundario del transformador de distribución y normalmente energizado a su tensión nominal, es primero llevado a falla debido a la larga sobre tensión resultante de los conductores en contacto. En un sistema sobre construido (líneas de diferentes tensiones soportadas por la misma estructura), una colisión de un vehículo con un poste de potencia, o rompimientos debidos a congelamiento, los conductores de un sistema de distribución más elevada o sub-transmisión pueden caer encima de un sistema de distribución de potencia de menor tensión. Tal contacto accidental inyecta una tensión intrusa por algunos ciclos, hasta que los interruptores del sistema de mayor tensión eliminan la falla.

c) Sobre tensión temporal de doble tensión (pérdida del neutro)

Existen muchas situaciones en las que la pérdida del neutro puede ocurrir. Algunas pueden ser de naturaleza transitoria tales como la pérdida de la conexión, mientras que otras pueden ser permanentes hasta ser reparadas, tales como una ruptura mecánica o corrosión del conductor neutro. Mientras que el segundo puede que lingüísticamente no caiga dentro del concepto temporal, las consecuencias son las mismas. En un sistema trifásico típico de Norte América, esta condición ha sido observada en varias ocasiones.

La figura 5 muestra un sistema en el cual un lado del suministro está ligeramente cargado, mientras que el otro lado está altamente cargado, bajo condiciones normales; ambos lados permanecen a una tensión normal. Si la conexión del neutro es pérdida, la tensión en el punto medio es determinada por la relación de las impedancias en ambos lados: el lado L1 experimenta una sobre tensión que puede llegar al doble del valor normal. Cualquier dispositivo protector de picos conectado a este lado será expuesto a una tensión del doble de la normal, con una corriente determinada por la impedancia Z2. Esta corriente, por el puro diseño del circuito no será interrumpida por la protección contra sobre corriente y es capaz de genera suficiente calor en el protector de picos que ha fallado como resultado de la sobre tensión.

Un interruptor diseñado para eliminar grandes corrientes de falla, tales como las que ocurren cuando falla un dispositivo protector de picos cuando tienen un neutro conectado, puede ser que no sea capaz de eliminar la corriente limitada. Otros esquemas son entonces necesarios para asegurar un modo aceptable de falla, tales como interruptores activados por temperatura.

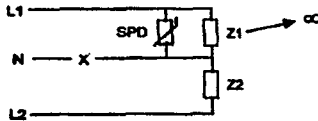


Figura 5. Sistema monofásico donde un neutro desconectado o intermitente produce un desbalance de tensión.

2.4.4 Corriente de falla disponible

Como se describió en los párrafos anteriores, varios escenarios pueden producir la falla del dispositivo protector de picos, ofreciendo una muy baja (pero no cero) impedancia al flujo de la corriente de falla que el sistema eléctrico de potencia puede entregar. Para cada escenario, la corriente de falla disponible en el punto de conexión del dispositivo protector de picos tendrá un efecto muy significativo en el modo de falla.



La importancia de la corriente de falla disponible es reconocida en estándares, pero el valor que se le debe asignar es generalmente dejado indefinido. Las siguientes aseveraciones pueden ser encontradas en estándares publicados.

1996 National Electrical Code, 230-65 Corriente de corto circuito disponible

“El equipo en servicio debe de ser adecuado para la corriente de corto circuito disponible en las terminales del suministro.”

IEEE C62.34-1996 Estándar para rendimiento de dispositivos de protección contra sobre tensiones transitorias en la red de baja tensión.

“Si el fabricante indica una capacidad de corriente de falla, entonces ese valor debe ser verificado.”

IEC 61643-1 Dispositivos de protección contra sobre tensiones transitorias conectados a sistemas eléctricos de potencia de distribución de baja tensión.

“El dispositivo protector de picos debe ser capaz de llevar la corriente de corto circuito hasta que sea interrumpida por éste mismo, por una interruptor interno o externo, o por la protección de respaldo contra sobre corriente.”

Es importante resaltar que ninguno de estos documentos especifica el valor para la corriente de corto circuito disponible, y al contrario dejan este valor a juicio del fabricante, mientras que imponen criterios de aceptabilidad después de la falla. Los dos estándares aplicables al dispositivo de protección instalado en el suministro principal, donde la corriente de falla puede ser muy alta, reconocen la posibilidad de falla y la importancia de la corriente de falla disponible, pero no estipulan valores específicos.

En un intento por obtener información acerca de los niveles de corrientes de falla que deben de ser considerados una encuesta informal fue realizada a varios ingenieros de compañías suministradoras en los Estados Unidos [21]. Resultó que muy pocas compañías suministradoras limitan la corriente de falla en el punto de entrada de los clientes residenciales, pero mucha gente está bajo el mal entendido, como se cita más adelante, que todos los centros de carga e interruptores de suministro residencial están limitados para una corriente de falla de 10 kA y por lo tanto asumen que la corriente de falla disponible real debe de ser menos que 10 kA.

De manera interesante, ninguno de los individuos consultados en la encuesta pudo citar un estándar o un documento donde se establezca el consenso que estipule el valor de la corriente. Las siguientes dos percepciones se reflejaron entre los individuos consultados:

1. Basados en la observación que para interruptores típicos en paneles residenciales (hasta 200 A) generalmente tienen una capacidad interruptiva de 10 kA, sería lógico que la corriente de falla disponible en la entrada del suministro sea del mismo orden de magnitud.

2. Basados en la realidad de que un suministro principal conectado cercano a un transformador de distribución grande tendrá corrientes de fallas disponibles mayores a 10 kA, sería prudente revisar las especificaciones de esta situación.

Adicionalmente, estos estándares no requieren que los datos de aplicación del dispositivo de protección contra picos establezcan un límite de corriente de falla aceptable.

2.5 Posibles Soluciones

Entre las posibles soluciones para realizar la mejor aplicación de dispositivos de protección contra sobre tensiones dos acercamientos pueden ser considerados: hacer el dispositivo de protección menos sensitivo a sobre tensiones temporales, y, en cualquier caso, asegurar que si la falla es inevitable en condiciones extremas, ésta será en un modo aceptable.

La manera obvia de quitarle la sensibilidad a los dispositivos de protección en condiciones de sobre tensiones temporales es diseñarlos con una tensión máxima continua de operación (MCOV) mayor. Sin embargo, debido al más alto MCOV en dispositivos de protección compuestos únicamente por un elemento Varistor se traduce en un límite más alto contra picos eléctricos, existe un límite que al ser rebasado el dispositivo de protección se vuelve inútil [21].

Para el caso "raro" de contacto entre conductores de diferentes tensiones, se puede hacer muy poco para asegurar un modo de falla aceptable. Está condición debería de ser un requerimiento implícito, pero, como se expuso previamente en la corriente de falla disponible, las implicaciones de tal requerimiento no han sido reconocidas por las partes interesadas. Aun entre la comunidad de ingenieros diseñadores de dispositivos de protección contra sobre tensiones transitorias ha existido un poco de reticancia para aceptar el concepto de que las sobre tensiones temporales deben de ser consideradas en documentos que estudian o analizan el fenómeno y entorno de las sobre tensiones transitorias o picos eléctricos.

Adicionalmente, existe una amplia variedad de soluciones potenciales complejas y simples con diferentes costos y efectividad para mitigar las consecuencias asociadas con una calidad de energía pobre que incluye la ocurrencia de sobre tensiones. Las soluciones de calidad de la energía pueden ser aplicadas en diferentes puntos dentro del sistema eléctrico de potencia. Los cinco puntos principales son:

- Modificaciones al sistema de suministro y equipo que afecta a múltiples clientes.
- Tecnologías de acometida de servicio que afectan a un cliente específico.
- Acondicionamiento de potencia en los puntos de localización de equipos sensibles en la industria, comercio y hogar.
- Especificaciones de los equipos y mejores diseños
- Soluciones simples. (a nivel residencial)

En general, los costos de estas soluciones se incrementan en la medida que el nivel de potencia de la carga que debe ser protegida aumenta (figura 6) [22]. La forma de hacer la solución más conveniente en términos económicos en cualquier punto del sistema eléctrico de potencia consiste en lograr separar los equipos electrónicos sensibles, de tal manera que puedan ser aislados y protegidos individualmente separados de los equipos que no requieren protección.

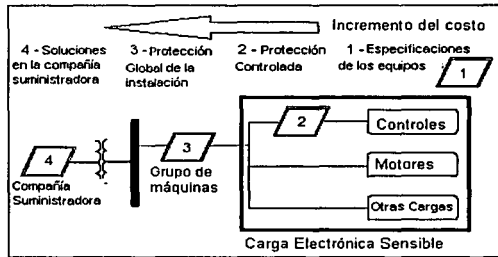


Figura 6: Incremento del costo de soluciones de calidad de la energía

Idealmente, el diseño de los nuevos equipos electrónicos sensibles debería de incluir la protección necesaria para mitigar la mayoría de los disturbios de calidad de la energía eléctrica, pero esto sólo es el caso ideal. En la realidad no todos los equipos cuentan con las nuevas especificaciones en su diseño y el ingeniero de potencia se encuentra ante instalaciones en funcionamiento ya existentes que requieren mejorar el nivel de calidad de la energía.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.6 Referencias Bibliográficas

1. Dev Paul "Low Voltage Power System Surge Over Voltage Protection", 078035843 IEEE, 2000 p. 26
2. "Transient Voltage Suppression Devices", Harris Semiconductors, USA 1992
3. UL Standard for Safety for Transient Voltage Surge Suppressors, UL 1449, Second ed. 1998
4. UL Standard for Safety for Transient Voltage Surge Suppressors, UL 1449, Second ed. 1998
5. Martzloff F. and Mansoor A, "The Dilemma of Surge Protection vs. Overvoltage Scenarios: Implications for Low voltage Surge Protective Devices, IEEE 1998
6. Martzloff, F. and Leedy, T.F., "Selecting Varistor Clamping Voltage: Lower is not Better" Proceedings, 1989 Zurich International EMC Symposium.
7. IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits, ANSI/IEEE Std C62.41-1991
8. IEEE Guide on Surge Testing for Equipment connected to Low-Voltage AC Power Circuits, ANSI/IEEE Std C62.45-1987
9. Francois D. Martzloff, "The propagation and attenuation of surge voltages and surge currents in low voltage ac power circuits", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99 No. 1 Jan/Feb. 1980
10. Warren H. Lewis. "Recommended Power and Signal Grounding and Control and Computer Rooms". IEEE Trans Industry Applications, vol IA-21, no 6, Nov/Dec, 1985
22. IEEE Standard Test Methods for Surge Protectors Used in Low-Voltage Data, Communications, and Signaling Circuits, ANSI/IEEE Std C62
11. Francois D. Martzloff, "Matching Surge Protective devices to their environment", IEEE Trans. Industry Applications, vol IA-21 No 1, Jan Feb. 1991
12. M.B. Marz and D.R. Mendis, "Protecting Load devices form the effect of low-side surges", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 29, no 6. Nov./Dec. 1993
13. Anderson, L.M and Bowes, K.B. "The Effects of Power Line disturbances on consumer Electronic Equipment" IEEE Transactions PWRD-5, No2, April 1990
14. Smith S.B. and Sandler R.B. "The Effects of Surges on Electronic Appliances" IEEE Transactions PWRD-7, No3, July 1992
15. IEC Document 37A/63/IDIS - Draft IEC 61643-1: Surge Protective Devices Connected to Low Voltage Distribution Systems Part 1: Performance Requirements and Testing.
16. IEEE Project p62.62 Application Guide- Low Voltage Surge Protective Devices(ongoing)
17. Martzloff, F.D. "Interpretation and Misinterpretation of TVSS Disconnector Indications" Power Quality Magazine, July/August 1998
18. Darveniza, M., Turman, L.R., "Multiple Lightning Currents and Metal Oxide Arresters", IEEE Transactions PWRD-12 No. 3 July 1997
19. Stringfellow, M.F., "Fire Hazard of Surge Suppressors" Proceedings, Fifth Annual Power Quality Conference, Irvine CA 1992
20. EPRI Report An assessment of Distribution System Power Quality, Electric Power Quality Research Institute, Palo Alto CA, 1996
21. Martzloff F. and Mansoor A, "The Dilemma of Surge Protection vs. Overvoltage Scenarios: Implications for Low voltage Surge Protective Devices, IEEE 1998 p.96/
21. Martzloff F. and Lai, J.S., "Cascading Surge Protective Devices: Coordination Versus the IEC 664 Staircase," Proceedings, PQA 91 Conference
22. "Transient Voltage Suppression Devices", Harris Semiconductors, USA 1992

3.1 Antecedentes para el diseño

Como se mencionó en los capítulos anteriores el hecho de medir la amplitud y duración de las sobre tensiones transitorias no es tarea fácil. [1] Instrumentación especial fue diseñada y desarrollada para el monitoreo de la magnitud, duración y frecuencia de ocurrencia de las sobre tensiones transitorias en redes de baja tensión. En los circuitos residenciales, dos fuentes principales de sobre tensiones transitorias son identificables: conmutación de cargas dentro de la casa, y fuentes externas, en su mayoría más comúnmente asociadas con descargas eléctricas y fallas en otros puntos de la red que se propagan al interior de la casa por medio del suministro primario.

En la investigación que se realizó solamente se encontraron dos estudios similares: en 1970 por Francois Martzloff llamado "Surge Voltaje in Residencial and Industrial Power Circuits" y otro realizado en Alemania por Klaus Stimper en 1998 llamado "Transient Overvoltages in Low Voltaje Systems" [2]. Ambos estudios presentan resultados interesantes en el sentido de los valores de magnitud de tensión y frecuencia de señales que fueron medidas para un suministros que deben de tener las siguientes características: (127 V, 60 Hz) y (220V, 50 Hz).

En la conclusión del periodo de monitoreo en el estudio de Martzloff se registraron eventos en un total de de 30 localidades, incluyendo dos postes de distribución, por un tiempo total cercano a las 15,000 horas. La tabla 3.1 [3] muestra la información detallada de 21 de las localidades. Tres casas habitación y seis instalaciones industriales no produjeron ningún evento con el umbral en 400 Voltz. Un análisis más detallado de los registros fue realizado por medio de operar deliberadamente diferentes tipos de cargas conectadas en los circuitos residenciales generando sobre tensiones transitorias similares a algunas de las registradas. En otras ocasiones ninguna operación deliberada de cargas logró generar los eventos que fueron registrados en periodos de monitoreo sin operador. Los propietarios de los hogares ocasionalmente fueron capaces de correlacionar registros de sobre tensiones con descargas eléctricas o disturbios en el sistema eléctrico de potencia. Tal análisis da soporte a la teoría de las dos principales causas de las sobre tensiones transitorias: Descargas eléctricas y operación de dispositivos de interconexión del sistema eléctrico de potencia.

Los parámetros de diseño se extrajeron del estudio conducido durante los dos años de medición en circuitos residenciales de diferentes ciudades de los Estados Unidos por

Francois Martzloff. La siguiente tabla muestra un análisis detallado de los eventos de sobre tensiones transitorias registrados.

Tabla 3.1 Análisis Detallado de sobre tensiones transitorias registradas [3]

| Casa | Más Severas | | Más Frecuentes | | |
|----------|-------------|---------------------------|----------------|---------------------------|--------------------|
| | Cresta (V) | Duración μ s o ciclos | Cresta (V) | Duración μ s o ciclos | Promedio Por hora. |
| 1 | 700 | 10 μ s | 300 | 10 μ s | 0.07 |
| 2 | 750 | 20 μ s | 500 | 20 μ s | 0.14 |
| 3 | 600 | 1 ciclo | 300 | 1 ciclo | 0.05 |
| 4 | 400 | 2 ciclos | 300 | 2 ciclos | 0.2 |
| 5 | 640 | 15 μ s | Muy pocos | Para tipificar | 10 total |
| 6 | 400 | 1 ciclo | 250 | 1 ciclo | 0.01 |
| 7 | 1800 | 1 ciclo | 800 | 1 ciclo | 0.03 |
| 8 | 1200 | 10 μ s | 300 | 4 ciclos * | 0.1 |
| 9 | 1500 | 1 ciclo | 1500 | 1 ciclo | 0.2 |
| 10 | 2500 | 1 ciclo | 2000 | 1 ciclo | 0.4 |
| 11 | 1500 | 1 ciclo | 1500 | 1 ciclo | 0.15 |
| 12 | 1700 | 1 ciclo | 1400 | 1 ciclo | 0.06 |
| 13 | 350 | 1 ciclo | Muy pocos | Para tipificar | 4 total |
| 14 | 800 | 15 μ s | - | - | 1 total |
| 15 | 800 | 3 ciclos | 600 | 3 ciclos | 0.05 |
| 16 | 400 | 15 μ s | 200 | 30 μ s | 0.4 |
| Poste | 5600 * | 4 ciclos | 1000 | 1 ciclo | 0.1 |
| Hospital | 2700 | 9 μ s * | 900 | 14 μ s | 0.1 |
| Hospital | 1100 | 1 ciclo | Muy pocos | Para tipificar | 4 total |
| Tienda | 300 | 1 ciclo | 300 | 1 ciclo | 0.5 |
| Poste | 1400 | 4 ciclos | 600 | 4 ciclos | 0.07 |

* Valores importantes para el diseño.

3.2 Instrumentación

El proceso de diseño comenzó por una selección conceptual de los parámetros que interesan medir de una sobre tensión transitoria, que a su vez brindan un panorama general acerca del comportamiento del fenómeno por medio de la acumulación de registros durante un periodo de tiempo. Estos parámetros son:

- Amplitud del disturbio [V]
- Duración del disturbio [μ s]
- Fecha y hora

Posteriormente, el diseño se enfocó a seleccionar los diferentes tipos de electrónica (digital y analógica), herramientas de software y métodos de adquisición e interpretación de lecturas que fueron necesarios para dar solución a éste problema. En toda etapa del proceso de diseño se respetaron los parámetros conceptuales ocasionando la elaboración de varios prototipos. Un factor adicional y muy importante fue diseñar sin causar un costo alto por la utilización de componentes muy avanzados o poco disponibles en el mercado.

3.2.1 Parámetros conceptuales de diseño

a) Amplitud del disturbio: En un sistema eléctrico como el mexicano, el suministro de tensión establecido por la Comisión Federal de Electricidad es de 179 V de pico con un margen de variación de $\pm 5\%$ [4], en estas condiciones, ¿Qué valores máximos de amplitud de la onda de tensión se pueden esperar? Con base en los resultados del estudio de Martzloff mostrados en la tabla 3.1 se estableció el intervalo de amplitud máximo y mínimo.

El valor máximo se obtuvo a partir del registro más significativo del estudio previamente citado que corresponde a 5,600 Voltz, este valor máximo se estableció como mayor a 5,000 Voltz y menor a 6,000 Voltz. El valor mínimo se define como el valor de la tensión oficial establecida en la norma [4] más un 5 por ciento.

O bien,

$$V_{\min} = V_{\text{norma}} \times \sqrt{2} \times 1.05 = 189V \quad (1)$$

Este valor indica que la excursión de la onda de tensión ya sea positiva o negativa ha rebasado el 5% de su valor nominal, quedando como un suministro fuera de norma y siendo registrada como una sobre tensión por la instrumentación desarrollada en este trabajo. Finalmente el intervalo de medición en cuanto a la amplitud de la señal queda de la siguiente manera:

Intervalo de Amplitud: [189V, 5600V]

Los cálculos de los umbrales intermedios entre el mínimo y el máximo serán presentados detalladamente más adelante.

b) Duración del disturbio: Se define como el tiempo transcurrido en el cual la onda de tensión rebasa el V_{\min} y decrece hasta un valor menor a V_{\min} sin importar la forma de onda del disturbio.

Las sobre tensiones transitorias son un fenómeno con características de alta frecuencia con respecto a la frecuencia del suministro de tensión nominal. Al igual que para el parámetro anterior, se parte de los resultados de la tabla 3.1. Los fenómenos más rápidos registrados en tal estudio tuvieron una duración de 9 μs mientras que los de mayor duración alcanzaron los 4 ciclos, es decir, los 66.64 ms. Entre estos valores de tiempo mínimo y máximos pueden presentarse sobre tensiones transitorias y temporales, por tal motivo, se decidió al igual que en el estudio de Martzloff registrar ambos fenómenos. El intervalo de medición de duración de sobre tensiones es el siguiente:

Intervalo de Duración: [8 μs , 101.25ms]

c) Fecha y Hora: Estos parámetros no fueron registrados en ninguno de los estudios anteriores realizados en los EE.UU. y Alemania [1], [2]. Se consideró que el hecho de conocer la fecha y hora de ocurrencia del fenómeno puede brindar mayor información acerca de las sobre tensiones por medio de relacionarlo con los registros de fallas en el sistema de suministro de potencia, la posible correlación con la curva de demanda de energía eléctrica diaria o bien tener la capacidad de detectar las horas de mayor presencia de este tipo de disturbios. La limitante es que la variable hora tiene una precisión de segundos, es decir, se puede saber mm/dd/aaaa/hh/mm/ss de cada disturbio.

3.2.2 Diseño electrónico.

Una vez identificadas y definidas las variables a registrar para estudiar las sobre tensiones transitorias se realizó el diseño electrónico teórico. El dispositivo propuesto está constituido por su funcionamiento de diferentes partes las cuales son:

- a) Acondicionamiento de la onda de tensión.
- b) Rectificación de la onda de tensión
- c) Detector de Picos
- d) Codificación de amplitud
- e) Cronómetro
- f) Interfase con la computadora

a. Acondicionamiento de la onda de tensión. Para la detección de picos de tensión en la línea se decidió diseñar un dispositivo que se conectará en cualquier contacto de 127 Vrms dentro de un circuito residencial. Desafortunadamente en electrónica analógica no es posible trabajar ni con el semiciclo negativo ni con tal magnitud de tensión. Mucho menos con los valores de tensión alcanzados durante la presencia de picos eléctricos, por tal motivo, es necesario acondicionar la señal de tal forma que el intervalo de medición definido en la sección 3.2.1.a sea factible de registrar en ambos semiciclos de la señal.

La utilización de un transformador reductor para acondicionar la onda de tensión no es posible, a pesar de que su funcionamiento es lineal, su respuesta en frecuencia ocasiona que deje de serlo causando la distorsión del fenómeno. [5] Para evitar este problema diseñamos un divisor para obtener un valor nominal de tensión equivalente de 500 mV para 189 V de entrada:

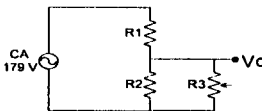


Figura 3.1 Divisor de tensión.

El objetivo es que V_o sea igual a 500mV cuando la onda de tensión tenga una amplitud de pico de 189 V. Del circuito de la figura 3.1 se puede obtener el valor de la tensión en el punto V_o por medio del siguiente desarrollo:

$$R_{eq} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \quad \dots(2)$$

$$V_o = \frac{R_{eq} \cdot V_m}{R_1 + R_{eq}} \quad \dots(3)$$

El procedimiento que se utilizó fue fijar un valor arbitrario de $R_1 = 500 \text{ k}\Omega$ que no excediese una corriente de $600 \mu\text{A}$ a tensión nominal para la resistencia equivalente R_1 y así calcular la R_{eq} como se muestra:

$$R_{eq} = \frac{V_{Req} \cdot R_1}{V_m - V_{Req}} = 1339.6\Omega$$

Donde:

$$V_{Req} = 500\text{mV}$$

$$R_1 = 500 \text{ k}\Omega$$

$$V_m = 189 \text{ V}$$

Los valores de R_2 y R_3 se obtuvieron por medio de un programa [6] que realizara iteraciones en las variables R_1 y R_2 de las ecuaciones (2) y (3). Las combinaciones de valores de R_1 y R_2 que resultaron más adecuadas tomando en cuenta las restricciones que se verán en el procedimiento de rectificación de onda fueron:

$$R_2 = 60 \text{ k}\Omega \quad \text{y} \quad R_3 = 1.3 \text{ k}\Omega$$

La tabla 3-2 muestra la relación entre los valores de la onda de tensión en condiciones nominales y después de haber sido acondicionada para los extremos del intervalo definido en la sección 3.1.a de este capítulo.

| Sobre Tensión | Tensión Nominal | Tensión de Acondicionamiento | Corriente |
|----------------|-----------------|------------------------------|-------------------|
| Tensión mínima | 189 V | 500 mV | 378 μA |
| Tensión máxima | 5670 V | 15 V | 11.34 mA |

Tabla 3.2 Equivalencia de Tensión

La magnitud de la corriente parece a simple vista no significativa como lo es la de la tensión. Sin embargo, pueden llegar a serlo si el fenómeno tiene una duración prolongada ya que el problema de los dispositivos sometidos a sobre tensiones es en gran parte un problema de disipación de energía.

b) Rectificación de la onda de tensión. La señal acondicionada tuvo que ser necesariamente rectificadas para poder registrar los picos eléctricos pertenecientes al semiciclo negativo de la señal.

Las restricciones en el diseño de esta etapa del dispositivo son el valor de la frecuencia de los picos más rápidos (hasta 9 μ s) y los 700 mV que consume cada diodo en estado de conducción. El hablar de 700 mV con respecto al valor equivalente de la onda de tensión acondicionada es sumamente significativo. Por esta razón es necesario ubicar los diodos rectificadores en un punto en el divisor de tensión de la figura 3.1 en el cual los 700 mV no sean representativos como ocurre con respecto a la tensión nominal. Esta solución trae consigo el problema de la magnitud de la tensión inversa a la que se verán expuestos los diodos pero es mitigado por medio de utilizar diodos rápidos NTE375 ($V_{directa}=1.5V$) con tiempo de recuperación de inversa de 30 ns, y con la capacidad de soportar una tensión inversa máxima de 1000V.

Las restricciones que se mencionaron en la sección 3.2.a. de este capítulo consisten en el numero de diodos a utilizar, su ubicación y su tensión inversa máxima. Estos tres factores fueron determinantes en la selección de los valores de R2 y R3.

En la ubicación de los diodos rectificadores en el circuito de la figura 3.2 la tensión inversa esta dada por la siguiente ecuación:

$$V_{inversa} = \frac{R_2 \cdot V_m}{R_1 + R_2} \quad \dots(4)$$

| Sobre Tensión | Tensión Nominal | Tensión Inversa |
|----------------|-----------------|-----------------|
| Tensión mínima | 189 V | 20.25 V |
| Tensión máxima | 5670 V | 607.5 V |

Tabla 3.3 Tensión inversa en los diodos

Los valores de tensión inversa mostrados en la tabla 3.3 validan la decisión de utilizar un solo diodo del tipo NTE375 por semiciclo.

Adicionalmente, ante la presencia de los diodos la ecuación de tensión de salida (3) es modificada así:

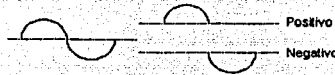
$$V_o = \frac{R_{eq} \cdot (V_m - V_{diodos})}{R_1 + R_{eq}} \quad \dots(5)$$

Por su respuesta en frecuencia no es posible utilizar un transformador para realizar un puente rectificador. Por tal motivo, se diseñó un método de rectificación especial para esta instrumentación que opera perfectamente con señales de entrada con frecuencias en el intervalo comprendido entre 60 Hertz y 1 MHz y ondas de tensión con amplitudes en el orden de mili Voltz.



El rectificador de onda completa diseñado tiene el siguiente algoritmo:

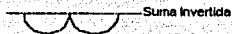
- c) El semiciclo positivo y negativo son rectificados por separado:



- c) El semiciclo negativo es invertido:



- c) Se suman el semiciclo positivo con el negativo invertido:



- c) Se invierte el resultado de la suma del paso 3 para obtener una señal rectificadora de onda completa:



Expresado en términos de aplicación electrónica, el algoritmo de rectificación es realizado por el siguiente circuito:

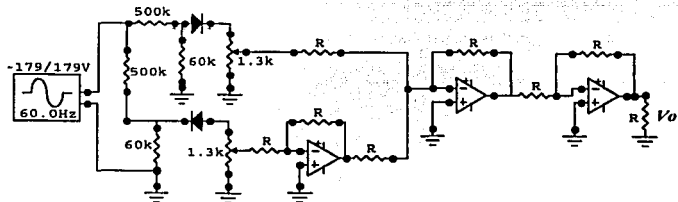
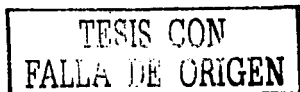


Figura 3.2 Rectificador de onda completa.

El rectificador fue probado con un generador de señales en lugar del divisor de tensión. Se aplicaron señales sinusoidales, cuadradas y diente de sierra como entradas a frecuencias de hasta 1.2 MHz. Más allá de este valor el semiciclo negativo rectificadora comienza a deformarse y a los 1.5 MHz desaparece completamente. Inferimos que se pueden alcanzar frecuencias mayores si se reemplazan los comparadores de propósito general por otros amplificadores operacionales para aplicaciones de alta frecuencia.



c) **Detector de Picos:** El modulo detector de picos esta compuesto por una red de comparadores operacionales los cuales comparan la señal de tensión acondicionada y rectificada con el nivel de tensión establecido en sus umbrales. Cuando la tensión de la señal de entrada es mayor que la del umbral en cada comparador, la salida de cada uno de estos se prende a 5V para que sean compatibles con dispositivos digitales TTL o CMOS [7]; generando una conversión de la señal analógica a digital. De acuerdo al número de comparadores encendidos es posible saber la magnitud de la onda de tensión entrante.

El diseño de la red de comparadores se realizo tomando como base los resultados del estudio llevado a cabo por Martzloff presentados en la tabla 3.1 para establecer el valor máximo de amplitud de las sobre tensiones mensurables por el dispositivo [5,600 V], y la norma oficial mexicana de suministro de tensión a nivel residencial para definir valor mínimo de sobre tensiones a medir [189 V].

La red de comparadores que se diseñó permite medir diferentes magnitudes de amplitud de sobre tensiones entre los valores máximos y mínimos previamente definidos. Los niveles mensurables por cada comparador son los siguientes:

| Comparador | Umbral | Sobre tensión (v) |
|------------|---------|----------------------|
| 18 | 13.75 V | 5,200 < St < 5,600 V |
| 17 | 12.50 V | 4,725 V |
| 16 | 11.25 V | 4,250 V |
| 15 | 10.0 V | 3,780 V |
| 14 | 8.75 V | 3,300 V |
| 13 | 7.5 V | 2,835 V |
| 12 | 6.25 V | 2,360 V |
| 11 | 5.00 V | 1,890 V |
| 10 | 3.75 V | 1,420 V |
| 9 | 2.5 V | 945 V |
| 8 | 2.25 V | 850 V |
| 7 | 2.00 V | 755 V |
| 6 | 1.75 V | 660 V |
| 5 | 1.5 V | 565 V |
| 4 | 1.25 V | 470 V |
| 3 | 1.00 V | 375 V |
| 2 | 750 mV | 285 V |
| 1 | 500 mV | 189 V |

Tabla 3.4 Umbrales del detector de picos

Una de las grandes ventajas de este detector de picos es que enciende y apaga comparadores conforme la magnitud de la amplitud de la sobre tensión varia en el tiempo, es decir, sigue la forma de onda de las sobre tensiones que se encuentran en los niveles de la tabla 3.4. Más adelante se demostrará que el encendido y apagado del comparador numero 1 es el que controla el proceso de medición del dispositivo.

d) Codificación de Amplitud: El modulo detector de picos brinda el valor de la sobre tensión en relación con el número de comparadores encendidos. El punto de interés es registrar el número de comparadores encendidos más no saber si cada uno de ellos esta encendido.

Con el fin de simplificar la transmisión y el almacenamiento de la magnitud de las sobre tensiones se decidió codificar las dieciocho salidas de los comparadores en dos datos de cuatro bits cada uno. El primer dato de cuatro bits para sobre tensiones mayores a 189 V y menores a 1,420 V (comparadores 1-9) y el segundo dato para disturbios mayores a 1420V y menores a 5,600 V (comparadores 10-18). Para este propósito se utilizaron dos codificadores del tipo 74LS147 que codifican nueve líneas de datos a 4 líneas (8-4-2-1) BCD. La tabla 3.5 muestra la relación entre el número de comparadores encendidos y su respectivo código.

Tabla 3.5 Función de Codificación

| Encendidos | Estado Comparadores | | | | | | | | | Código | | | |
|------------|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|--------|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | D | C | B | A |
| 1 | H | L | X | X | X | X | X | X | X | L | H | H | H |
| 2 | H | H | L | X | X | X | X | X | X | H | L | L | L |
| 3 | H | H | H | L | X | X | X | X | X | H | L | L | H |
| 4 | H | H | H | H | L | X | X | X | X | H | L | H | L |
| 5 | H | H | H | H | H | L | X | X | X | H | L | H | H |
| 6 | H | H | H | H | H | H | L | X | X | H | H | L | L |
| 7 | H | H | H | H | H | H | H | L | X | H | H | L | H |
| 8 | H | H | H | H | H | H | H | H | L | H | H | H | L |
| 9 | H | H | H | H | H | H | H | H | H | H | H | H | H |
| 0 | L | X | X | X | X | X | X | X | X | L | H | H | L |

H = Nivel Alto, L = Nivel Bajo y X = no importa.

Las dieciocho salidas de los comparadores se conectan directamente a las terminales de entrada de los codificadores 74LS147 como se muestra en el diagrama del circuito de la figura 3.5.

El valor del código se mantiene constante siempre y cuando la señal de entrada siga encendiendo el mismo número de comparadores del detector de picos, caso contrario, el código varía al parejo de la señal.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Cronómetro: El problema de medir el tiempo de duración de los disturbios fue el más complicado de solucionar. Del parámetro conceptual de diseño duración del disturbio sabemos que las sobre tensiones que esperamos medir tienen una duración dentro del intervalo comprendido entre 10 μ s y 3 ciclos.

Se decidió utilizar un oscilador astable y un conjunto de contadores binarios de 4 bits conectados en cascada para registrar la duración de las sobre tensiones. La frecuencia del oscilador tenía que ser tal que permitiera medir disturbios de micro segundos. Con una resistencia de 22 k Ω y un capacitor de 10 pF se logra una frecuencia de generación de onda cuadrada de 500 KHz, o bien, un período de 2 μ s.

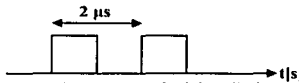


Figura 3.3 Frecuencia del oscilador

El encendido y apagado del comparador No. 1 del detector de picos, el del umbral de 189 V, indica la duración del disturbio. Al mismo tiempo que la señal de entrada rebasa el umbral de los 189 V el oscilador inicia la generación de pulsos hacia los contadores y lo deja de hacer hasta que el comparador No. 1 se apague, es decir, que la señal de entrada sea menor a 189 V. Inmediatamente después, la cuenta en los contadores es reiniciada desde la computadora con la señal de control "Clear ALL" Tabla 3.9.

El diagrama lógico del cronómetro es el siguiente:

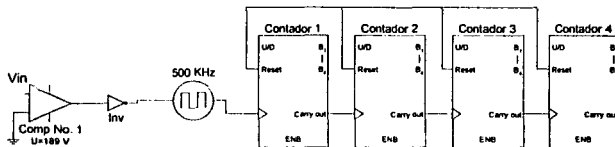
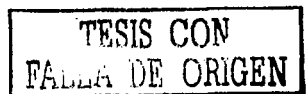


Figura 3.4 Cronómetro de Sobre tensiones

La duración del disturbio se obtiene sumando la cuenta acumulada por los cuatro contadores. En la tabla 3.6 se muestra la equivalencia en segundos.

| Contador | Ancho de pulso μ s | Cuenta en Bits | Cuenta en μ s |
|----------------|------------------------|----------------|-------------------|
| 1 | 2 | 16 | 32 |
| 2 | 32 | 16 | 512 |
| 3 | 512 | 16 | 8,192 |
| 4 | 8192 | 16 | 131,072 |
| Tiempo Total = | | | 139,808 μ s |

Tabla 3.6 Tiempo mensurable por contador y total.



e) Interfase con la computadora: Se decidió utilizar una computadora personal para la captura e interpretación de las sobre tensiones medidas. Sus principales ventajas son la capacidad de su microprocesador, el fácil control de sus puertos, la gran cantidad de memoria para almacenamiento de registros y la variedad de paquetes de Software para analizar las mediciones.

Se utilizó el puerto de impresora o LPT1 en su modo NORMAL [8], como la interfase entre la instrumentación y la computadora, controlado con el lenguaje de programación "C". Fue necesario medir con un analizador lógico la velocidad máxima del puerto paralelo cuando es controlado desde "C", es decir, el tiempo que le toma cambiar de estado lógico. Para esta prueba se elaboró un código en C que escribe 1's y 0's al puerto paralelo por un periodo de tiempo indefinido. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

| | |
|---------------------------------|----------------|
| Duración de un "Nivel Alto ó 1" | 1370 ns |
| Duración de un "Nivel Bajo ó 0" | 1370 ns |
| Duración Total: | 2749 ns |

Tabla 3.7 Velocidad máxima del puerto paralelo.

El puerto LPT1 está compuesto por 3 registros de 8 Bits cada uno comenzando en la dirección base con el registro de Datos 378h, siguiéndole el registro de Estado 379h y por último el registro de Control 37Ah. Las señales existentes en los tres registros son compatibles con TTL/LS. En el modo que se utilizó el puerto LPT1 para este proyecto solamente se requiere de los registros de Datos y Estados los cuales se renombraron como Control y Entrada respectivamente. En este modo solamente se tienen 5 bits de entrada en forma simultánea pero cada registro de un evento está compuesto por 6 señales de 4 bits. Para solucionar este problema se elaboró un sistema de selección de señales por medio de electrónica digital para llevar la señal de interés a los 4 Bits de entrada del puerto.

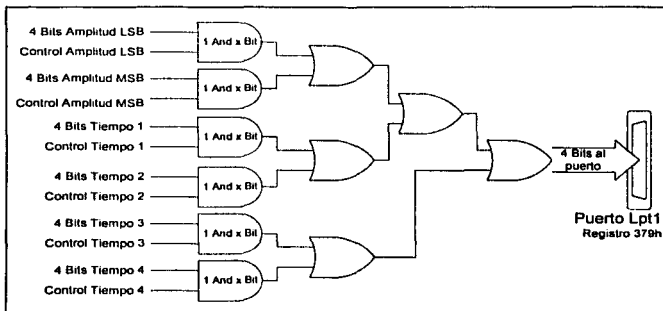
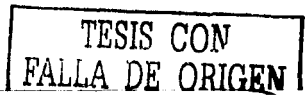


Figura 3.4 Cronómetro de Sobre tensiones



Y la tabla de función es la siguiente, se debe de cumplir el estado de todos los controles para tener una lectura confiable de la señal de entrada seleccionada:

| Dato Seleccionado | Estado Controles | | | | | |
|-------------------|------------------|-------|----|----|----|----|
| | A LSB | A MSB | T1 | T2 | T3 | T4 |
| Amplitud LSB | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Amplitud MSB | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tiempo 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Tiempo 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Tiempo 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Tiempo 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Tabla 3.8 Sistema de selección de señales de entrada al puerto.

Las señales de los registros de Datos y Estado (Control, Datos de Entrada) fueron asignadas de la siguiente manera a las señales de entrada y control de la instrumentación:

| REGISTRO 379: Datos de Entrada | | | REGISTRO 378: Control | | |
|--------------------------------|----------|---------------------|-----------------------|----------|-------------------|
| Señal | PIN DB25 | Función - Entradas | Señal | PIN DB25 | Función - Control |
| D7 | 11 | BIT 0 | D7 | 9 | - |
| D6 | 10 | BIT 1 | D6 | 8 | Tiempo 4 |
| D5 | 12 | BIT 2 | D5 | 7 | Tiempo 3 |
| D4 | 13 | BIT 4 | D4 | 6 | Tiempo 2 |
| D3 | 15 | BIT bandera, COMP 1 | D3 | 5 | Tiempo 1 |
| D2 | | | D2 | 4 | Amplitud MSB |
| D1 | | | D1 | 3 | Amplitud LSB |
| D0 | | | D0 | 2 | Clear ALL |

Tabla 3.9 Velocidad máxima del puerto paralelo.

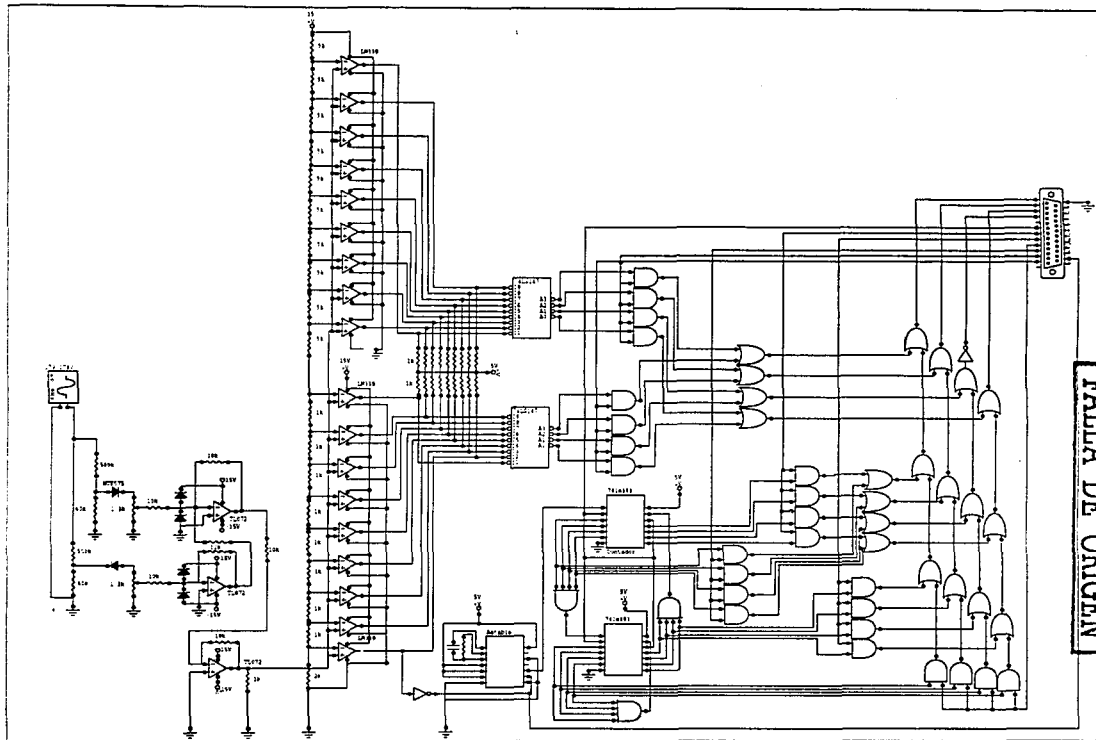
La señal de entrada "BIT Bandera" proviene de la salida del Comparador No. 1 (umbral = 189 V) del detector de picos. Esta señal es consultada cada vez que se selecciona una señal de entrada (amplitudes o tiempos) ya que siempre ocupa el quinto BIT de entrada de puerto de Estado o "Datos de Entrada".

3.2.3 Diseño Electrónico de Aplicación.

Este proceso de diseño consiste en integrar las partes constituyentes de la instrumentación descritas en la etapa de diseño electrónico y seleccionar los dispositivos electrónicos comerciales disponibles en el mercado.

La selección de algunos de los dispositivos utilizados fue realizada en el mismo diseño electrónico teórico como fue el caso de los diodos rectificadores, los resistores del divisor de tensión y el oscilador estable. La elección de los dispositivos restantes se llevó a cabo por el parámetro de tiempo de propagación en el orden de los ns, entre menor sea éste valor es mejor. (Ver las hojas de especificación).





TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

Figura 3.5 Diagrama del circuito.

*2 IN AND = 74LS08 ; 4 IN AND = 74LS21 ; 2 IN OR = 74HC32N ; ASTABLE R=22K, C=10 pF

3.3 Pruebas

Se realizaron pruebas en las diferentes etapas del dispositivo. La intención era buscar fallas o comportamientos especiales en condiciones del "peor caso", es decir, señales con frecuencias y amplitudes cercanas a las máximas registrables.

a) **Prueba de máxima frecuencia de una serie de picos:** Esta prueba consistió en identificar la máxima frecuencia registrable, es decir, el conjunto de picos a una misma frecuencia o sobre tensiones iguales más rápidas. En el circuito de la figura 3.5 la señal de entrada proveniente de la línea eléctrica y el divisor de tensión son reemplazados por un generador de funciones. El rectificador de la figura 3.2 fue excitado con una señal de entrada de tipo sinusoidal con amplitudes dentro del intervalo mínimo y máximo de tensiones equivalentes (500mV, 15V). Se inició el dispositivo y se varió la frecuencia hasta 83.33 KHz en donde las mediciones comenzaron a presentar variaciones. La conclusión de esta prueba fue que el conjunto de picos más rápidos registrables son de 12 μ s con cualquier magnitud de amplitud (incluyendo la máxima):

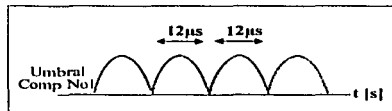


Figura 3.7 Máxima frecuencia de una serie de picos

De este resultado se infiere que se pueden medir picos más rápidos y que el dispositivo requiere de un tiempo de recuperación aproximadamente de 7 μ s antes de registrar el siguiente evento.

b) **Prueba de máxima frecuencia de un sólo pico:** Con base en los resultados de la prueba anterior se decidió realizar una prueba de un solo pico. Se diseñó un circuito de disparo compuesto por dos circuitos integrados 555 en modo monoestable. El primero es accionado por un interruptor, el ancho de su pulso es lo suficientemente largo para eliminar el transitorio del cambio de estado del interruptor, el segundo tiene un ancho de pulso que representa la duración de la sobre tensión.

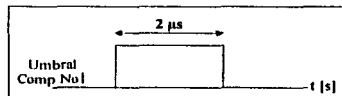


Figura 3.7 Máxima frecuencia de un solo pico

De los resultados se concluye que el pico más rápido registrable es de 2 μ s, o bien, de 500 KHz. Para poder medir un evento de la misma frecuencia tendrían que transcurrir 7 μ s que es el tiempo de recuperación obtenido en la prueba anterior.

e) **Prueba de amplitud real:** El objetivo de esta prueba era medir sobre tensiones con la mayor amplitud real posible. Se utilizó un Variac y un transformador elevador de tensión con relación 1:3. La tensión a la entrada del divisor de tensión es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Tensión pico de salida} &= \text{Tensión Variac} (\sqrt{2}) (\text{Relación de transformación}) \\ &= 150\text{V} \cdot \sqrt{2} (3) = 636 \text{ V} \end{aligned}$$

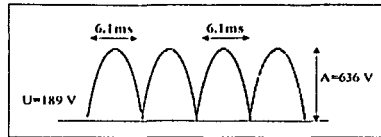


Figura 3.7 Prueba de Amplitud Real

Los resultados obtenidos en esta prueba son registros de amplitud que van siguiendo la forma de onda hasta los 636 Voltz pasando por cada umbral de la red de comparadores. La duración obtenida de la sobre tensión fue de aproximadamente 6.1 ms que es el tiempo que la onda permanece por arriba del umbral del comparador No. 1. El dispositivo estuvo funcionando con esta configuración durante una hora si presentar problemas de sobre calentamiento en sus elementos.

En esta misma prueba se conectaron cargas R, RC, RLC al dispositivo y no tuvieron ningún efecto sobre la magnitud de la amplitud de la onda de tensión al ser conectadas y desconectadas abruptamente.

d) **Prueba de amplitud real y duración:** El objetivo de esta prueba era medir sobre tensiones de duración definida a tensión "real". Se construyó el circuito de la figura 3.8 con dos Tiristores conectados en antiparalelo con un tiempo de encendido de 2 ciclos (60 Hz). Los resultados de las mediciones fueron 4 picos de amplitud entre el primer y segundo comparador ($189\text{V} < A < 285\text{V}$) con duración cada uno de ellos de 5.8 ms cada uno.

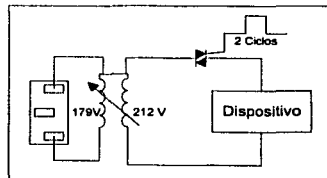


Figura 3.8 Circuito para prueba de Amplitud y duración Real

3.4 Caracterización de la instrumentación

Los requerimientos y restricciones para el buen funcionamiento de la instrumentación diseñada son los siguientes:

a) **Polarización:** Los componentes electrónicos del dispositivo requieren las siguientes tensiones de polarización:

$$V_{cc}=15V; V_{dd}= -15V; V_{ss}= 5V$$

El valor real de las tensiones V_{cc} y V_{dd} debe de ser lo más cercano al valor teórico para evitar variaciones en el umbral de la red de comparadores.

b) **Conexión del dispositivo a la línea eléctrica:** Este punto es de suma importancia para evitar cortos circuitos al conectar el dispositivo. Se tienen que identificar el positivo y el neutro del contacto a utilizar. Esto se puede realizar con un multímetro colocando una de sus puntas en cada entrada del contacto y la otra en tierra. El positivo marcará 127 V de diferencia de potencial y el neutro un valor muy cercano a 0V. La siguiente figura indica como se conecta la línea eléctrica al divisor de tensión (El punto V_o es la entrada al rectificador):

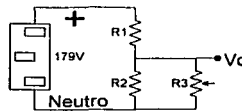


Figura 3.7 Conexión a la línea eléctrica

c) **Tierras:** Todas las referencias en potencial cero o "tierras" van conectadas al mismo punto, es decir, la tierra de la línea eléctrica, la tierra de la fuente de polarización y la tierra del equipo de cómputo utilizado se conectan al punto denominado como neutro de la figura 3.7. De aquí la importancia de la correcta identificación del positivo y neutro del contacto.

d) **Restricciones:** Son características de la instrumentación desarrollada a tomar en cuenta para el buen funcionamiento del dispositivo e interpretación de los eventos registrados.

| Restricción | Valor | Observaciones |
|------------------------|-------------------|---|
| Tiempo de recuperación | 7 μ s | Tiempo mínimo entre eventos |
| Mínima Duración | 2 μ s | Duración mínima de un pico. |
| Máxima Duración | 139,808 μ s | Duración máxima de un pico. |
| Mínima Amplitud | 189 V | Tensión Nominal + 5% |
| Máxima Amplitud | 5.2 < St < 5.6 KV | Tensión pico máxima de un pico. |
| Sistema Operativo | Windows 95,95,ME | No funciona con Win NT, XP (LPT1 protegido) |

Tabla 3.10 Restricciones del dispositivo medidor de sobre tensiones

3.5 Referencias Bibliográficas

1. Martzloff F, "Surge Voltage in Residential and Industrial Power Systems", Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 89 IEEE, July/Aug 1970
2. K. Stimper - G. Ackerman - J. Ehrler, "Transient Overvoltages in Low-Voltage Systems: A Field Study in Germany". DEIS Feature Article Jul/Aug 1998 Vol. 14, No. 4
3. Martzloff F, "Surge Voltage in Residential and Industrial Power Systems", Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 89 IEEE, July/Aug p. 98
4. Norma oficial de suministro de tensión por la CFE.
5. M. Clement - J. Michaud "Overvoltages on the Low Voltage Distribution Networks" Electricité de France, 1992.
6. Microsoft Excel Solver 2002
7. J. Oclina, D. Romero, "Puerto Paralelo: Introducción Norma IEEE 1284" 1999 Eduard Puigdemunt i Gelibert.

CAPÍTULO IV

MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Selección de puntos de estudio

Las mediciones presentadas en el presente trabajo se realizaron en circuitos eléctricos residenciales del Distrito Federal, sin embargo, queda abierta la posibilidad para extender esta investigación en circuitos industriales.

Los resultados presentados a lo largo de este capítulo corresponden a tres circuitos residenciales con diferentes características entre ellos.

El primer circuito se encuentra localizado en una zona residencial donde los servicios de luz y teléfono son subterráneos. La instalación eléctrica del edificio tiene una vida promedio de 20 años.

El segundo y tercer circuito están ubicados en zonas donde la línea del servicio eléctrico es aérea. A diferencia del primer circuito la línea eléctrica está expuesta a las circunstancias ambientales, lo que vuelve a estos circuitos más susceptibles a sobre tensiones debido a fenómenos atmosféricos que sucedan cerca del sitio.

La instalación eléctrica del segundo circuito también tiene una vida promedio de 20 años, mientras que la instalación eléctrica del tercer circuito tiene una vida promedio de 5 años.

Para los tres circuitos la tensión y frecuencia de alimentación son las establecidas por la Compañía de Luz y Fuerza del Centro (127 V, 60 Hz).

El estudio efectuado duró un total de 42 días, con un monitoreo de 14 días en cada circuito

4.2 Mediciones

Todos los resultados registrados por el dispositivo se almacenaron en una Base de Datos para poder ser manipulados y analizados posteriormente.

En los estudios de Martzloff (1970) y Sitmper (1998) se mencionan los valores de magnitud de tensión y duración de los fenómenos, sin embargo, no se hace referencia a su hora y fecha de ocurrencia. En la siguiente sección se presentan en forma resumida los resultados obtenidos en el monitoreo de los tres circuitos residenciales mencionados anteriormente, indicando amplitud, duración y hora de ocurrencia.

Para simplificar la clasificación de cada fenómeno, así como establecer correctos parámetro estadísticos la hora de ocurrencia se ha dividido en tres periodos: el primero comprende desde las 0:01 horas y hasta las 6:00 horas, el segundo desde las 6:01 hasta las 19:00 horas y el tercero de las 19:01 horas a las 0:00 horas. Hemos elegido los rangos anteriores porque en un día típico, éstos son los horarios en los que se conectan y

desconectan cargas al Sistema Eléctrico y cuando se operan interruptores, lo cual puede provocar sobre tensiones, resultando crucial identificar el momento en que se presenta cada fenómeno.

Adicionalmente, se presenta el contenido energético por cada impulso o sobre tensión, el cual ha sido calculado con la magnitud de la tensión, duración del impulso y una resistencia ficticia de 50Ω . Las unidades de medición de éste último parámetro son unidades de energía y están establecidas en Watts-segundo.

4.2.1 Circuito Residencial 1.

a) Características del Circuito

Casa Habitación de 2 plantas con dos circuitos protegidos de forma independiente con interruptores térmicos. Las cargas conectadas al circuito son en su mayoría cargas lineales utilizadas para la iluminación. Existen un par de motores pequeños (refrigerador, lavadora) y algunas cargas no lineales (lámparas ahorradoras de energía, televisión, estéreo, computadora).

Línea de alimentación subterránea. No existen componentes limitadores de tensión instalados en las proximidades.

Vida Promedio de la instalación eléctrica. 20 años.

Alimentación. Luz y Fuerza del Centro, 127 V rms, 60 Hz

Periodo de monitoreo. 14 días

b) Resultados

En la tabla 4.1 se presenta un cuadro resumen con los fenómenos registrados durante el periodo de monitoreo. Los resultados están distribuidos de tal forma que se puede identificar la amplitud, así como la hora en que se registraron.

Tabla 4.1 Numero de Disturbios en el Circuito Residencial No 1

| Amplitud [Volts] | Hora de ocurrencia | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | Total |
|----------------------------|-----------------------|----|-------------|-----------|-----------|------------|----|---|---|---|----|----|----|-----------|------------|------------|
| < 285 | 12 a.m. | | 7 | | | | 47 | | | | | | | | | 54 |
| | 01 a.m. | | 4 | | | | | | | | | | | | | 4 |
| | 03 a.m. | | | | | | 20 | | | | | | | | | 20 |
| | 04 a.m. | | | | 9 | | | | | | | | | | | 9 |
| | 05 a.m. | | | 14 | | | 32 | | | | | | | | | 46 |
| | 06 a.m. | | 25 | | | | 6 | | | | | | | | | 31 |
| | 07 a.m. | | 6 | | | | | | | | | | | | | 6 |
| | 01 p.m. | | | | | 24 | | | | | | | | | | 24 |
| | 08 p.m. | | 32 | | | | | | | | | | | | | 32 |
| | 09 p.m. | | | | | | | | | | | | | 51 | 50 | 101* |
| | 10 p.m. | | 33 | | | | | | | | | | | 25 | | 58 |
| 11 p.m. | | 17 | | | | | | | | | | | 1 | 51 | 69 | |
| Total < 285 [V] | | | 124 | 23 | 24 | 113 | | | | | | | | 77 | 101 | 462 |
| 285 - 375 | 10 p.m. | | | | | | | | | | | | | 2 | | 2 |
| Total 285 - 375 [V] | | | | | | | | | | | | | | 2 | | 2 |
| Total general | | | 124* | 23 | 24 | 113 | | | | | | | | 79 | 101 | 464 |

El 99.56% de los transitorios registrados durante el periodo de medición no sobrepasaron el umbral de 285 Volts. En dos ocasiones se detectó un pico mayor al primer umbral de 285 Volts pero menor a 375 Volts.

Un aspecto importante a considerar de los resultados obtenidos es la hora de ocurrencia de los impulsos. Entre las 21:00 horas y las 0:00 horas se presentó el 49.7% del total de disturbios. Este es un indicador de que en ese horario el sistema es más propenso a generar sobre tensiones, ruido, o señales no deseadas. Curiosamente, este es el horario de mayor demanda de energía eléctrica en todo el sistema nacional y por consiguiente la apertura y cierre de los diferentes interruptores que permiten la conexión de generadores de energía eléctrica en la red nacional. Como se comentó en los capítulos anteriores este tipo de maniobras se asocia íntimamente con la generación de sobre tensiones y o ruido en la red eléctrica afectando la forma de la onda de tensión y la calidad de la energía eléctrica que el usuario paga a la compañía suministradora.

En la Tabla 4-1 se presentan la duración, días y hora de ocurrencia de los disturbios. El fenómeno no se presentó todos los días, ni con ningún patrón de conducta identificable lo cual reafirma que las sobre tensiones, se originan de forma fortuita y aleatoria. En ocasiones, el origen de una sobre tensión es conocida y puede deberse a fallas eléctricas, apertura y cierre de cuchillas (operación de interruptores) y conexión y desconexión de grandes cargas lineales y no lineales al circuito eléctrico (usuarios del sistema).

El otro parámetro importante en este estudio es la duración del disturbio. La duración de los fenómenos registrados varió entre 12 y 18 microsegundos sin presentar ninguna tendencia clara hacia alguna duración específica. En la Tabla 4-2 se presenta la duración de las sobre tensiones observadas en el periodo de monitoreo.

| Amplitud [Volts] | Hora de ocurrencia | Duración en microsegundos | | | | | | |
|----------------------------|--------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| < 285 | 12 a.m. | 9 | 5 | 11 | 5 | 8 | 7 | 9 |
| | 01 a.m. | 1 | | | 3 | | | |
| | 03 a.m. | 6 | 6 | 2 | 5 | 4 | 1 | 4 |
| | 04 a.m. | | 3 | 1 | | 2 | 3 | |
| | 05 a.m. | 12 | 8 | 6 | 6 | 5 | 5 | 4 |
| | 06 a.m. | 4 | 6 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 |
| | 07 a.m. | 2 | 2 | 1 | | | | 1 |
| | 01 p.m. | 2 | 2 | 4 | 8 | 1 | 4 | 3 |
| | 08 p.m. | 6 | 5 | 5 | 4 | 4 | 2 | 6 |
| | 09 p.m. | 13 | 10 | 17 | 18 | 15 | 12 | 16 |
| | 10 p.m. | 7 | 6 | 7 | 15 | 8 | 7 | 8 |
| 11 p.m. | 6 | 12 | 9 | 8 | 14 | 8 | 12 | |
| Total < 285 [V] | | 68 | 65 | 67 | 77 | 66 | 52 | 67 |
| 285 - 375 | | | | 1 | | | | 1 |
| Total 285 - 375 [V] | | | | 1 | | | | 1 |
| Total general | | 68 | 65 | 68 | 77 | 66 | 52 | 68 |

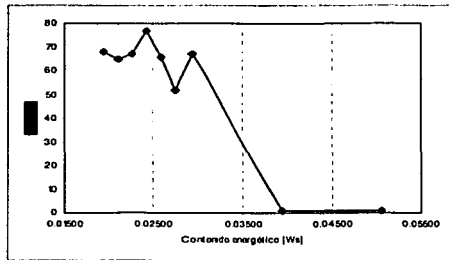


Gráfico 4-1. Ocurrencia de la distribución del contenido energético de las sobre tensiones medidas en el Circuito Residencial I

Los parámetros de medición elegidos para el estudio, así como los resultados obtenidos permiten generar una aproximación del contenido energético disponible en una red de baja tensión, pues a saber, es la energía (disipación, agotamiento térmico) lo que daña equipos electrónicos sensitivos y/o cualquiera de sus componentes más no el pico de tensión en sí mismo.

La afirmación anterior implica considerar parámetros de energía para evidenciar los posibles daños que pueden generar sobre tensiones transitorias con las duraciones y amplitudes mostradas en la Tabla 4-1 y la Tabla 4-2. Con el propósito de establecer el contenido energético de las sobre tensiones encontradas se presenta el Gráfico 4-1.

El 85% de los impulsos tuvieron un contenido energético entre 0.02 y 0.03 Ws. Evidentemente, la breve duración de los impulsos ($12 \mu s - 18 \mu s$) obliga a que el cálculo del contenido energético de los mismos resulte en valores relativamente bajos si consideramos que los varistores empleados para la protección de equipos electrónico-electrónicos pueden soportar hasta 40 Ws.

Los impulsos más severos registrados en este circuito no sobrepasaron de 0.06 Ws.

c) Parámetros Estadísticos.

La finalidad del presente estudio no es realizar un detallado análisis estadístico de los fenómenos observados, sin embargo, en la siguiente sección se presenta algunos parámetros estadísticos útiles para identificar el comportamiento de los impulsos registrados. Cabe recordar que para modelar eventos como sobre tensiones u otras fallas en sistemas eléctricos, dada la naturaleza de los fenómenos, es común utilizar la función de la distribución exponencial debido a que lo que se mide es la ocurrencia de eventos en el tiempo. En este sentido presentamos el parámetro de tasa de ocurrencia (λ) así como la probabilidad de que se presente el fenómeno.

Para la duración de los impulsos puede considerarse una distribución normal por lo se presentan medidas de tendencia central como la media y medidas de dispersión como la desviación estándar.

Amplitud media de los impulsos = 286.6 V
 Contenido energético promedio = 0.02435 Ws

Tasa de ocurrencia (λ)

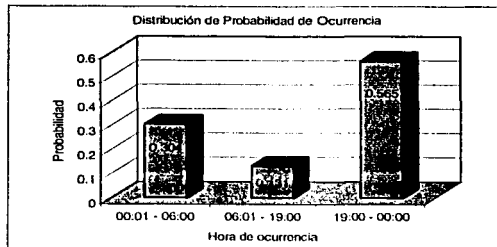
$$\lambda = \frac{\text{Número de eventos}}{\text{tiempo}}$$

$$\lambda = \frac{464}{14 \text{ días} \times 24 \text{ horas}}$$

$$\lambda = 1.38 \text{ impulsos / hora}$$

Probabilidad de Ocurrencia (P)

$$P = \frac{\text{Número de eventos}}{\text{Total de eventos}}$$



Duración de los impulsos.

Duración media (μ) = 14.94 μ s
 Desviación Estándar (σ) = 1.98

Con base en los dos parámetros anteriores se puede calcular la probabilidad de que se presente un impulso de determinada duración empleando para ello la curva de la distribución normal estandarizada como se presenta en el siguiente capítulo.

Durante el periodo de medición no se observaron fenómenos recurrentes, la aparición de sobre tensiones es un fenómeno aleatorio y fortuito. Las sobre tensiones se presentaron en 6 de los 14 días que duró el monitoreo y todas ellas fueron menores a 285 V de pico

a excepción de 2 fenómenos que ocurrieron el mismo día y a la misma hora por lo que ambos disturbios pueden atribuirse a la misma causa.

La hora de ocurrencia de sobre tensiones parece ser una constante, siendo entre las 19:00 y las 0:00 horas, una ventana de tiempo en la que es factible que se presente el fenómeno. En este lapso de tiempo se registró el 57% de los disturbios. Cabe la pena analizar el por qué es en este horario en que el fenómeno sea más susceptible a presentarse. Después de las 19:00 horas es cuando comienza a oscurecer y la gente llega a sus casas, al mismo tiempo, una gran cantidad de cargas lineales y no lineales, se conectan al Sistema Eléctrico. Posteriormente, a partir de las 22:00 horas la gente paulatinamente comienza a apagar luces, el televisor, el radio, etcétera hasta el punto en que la carga en mínima. Esta entrada y salida repentina de cargas en el Sistema Eléctrico puede inducir sobre tensiones en la red eléctrica que se transmiten a lo largo de ésta llegando a las cargas residenciales. De igual forma es en este lapso de tiempo cuando se efectúan una gran cantidad de apertura y cierre de interruptores en el sistema eléctrico. Si bien es cierto que algunas sobre tensiones se originan por la conexión y desconexión de cargas en el sistema ¿no es verdad también que es durante el día cuándo más cargas no lineales se conectan al sistema eléctrico por las cargas eléctricas de industrias y oficinas? Siendo así, por qué es entre las 19:00 y las 0:00 horas cuando se presentaron más sobre tensiones. Parte de la respuesta podría encontrarse en el siguiente razonamiento: Las sobre tensiones se transmiten a lo largo de toda la red eléctrica, sin embargo, será de mayores consecuencias mientras más cercano se encuentre la fuente que originó la sobre tensión [1] ya que durante su propagación el impulso de tensión puede atenuarse por la impedancia propia de la línea de transmisión.

Ninguna de las sobre tensiones pudo asociarse con la conexión o desconexión de cargas en el circuito objeto de estudio, por lo que se atribuyen directamente al sistema de alimentación del mismo el cual está influenciado fuertemente por las situaciones que se presenten en la proximidad del edificio de estudio. Es de destacar, que la línea de alimentación eléctrica al circuito residencial es subterránea.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.2.2 Circuito Residencial 2**a) Características del Circuito**

Casa Habitación de una sola planta. La línea eléctrica es aérea, el transformador de distribución se encuentra a 60 m del edificio. No se detectaron componentes limitadores de tensión conectados al circuito o en las proximidades.

Vida Promedio de la instalación eléctrica. 20 años

Alimentación. Luz y Fuerza del Centro, 127 V rms, 60 Hz

Duración del estudio: 14 días.

b) Resultados

En la Tabla 4-3 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la medición del segundo edificio. Los resultados obtenidos muestran una distribución de ocurrencia mayor a la que se presentó en el circuito residencial 1. El estudio en el segundo edificio refleja mayor propensión a disturbios eléctricos que la que existió en el primer edificio, lo cual puede deberse a factores propios de la instalación eléctrica o a las características de la zona y de la línea de alimentación de energía.

Durante los 14 días de monitoreo se registraron disturbios, a diferencia del primer edificio en el cual se registraron disturbios en solamente 6 de los 14 días de estudio. En el noveno día de medición se presentaron el 44% del total de impulsos. En ese mismo día a las 14:00 horas ocurrieron el 10% del total de eventos, lo cual es claro indicador de alguna falla espontánea en el sistema. No se pudo asociar este disturbio a causas ocurridas dentro de la casa por lo que suponemos alguna falla eléctrica o disturbio transitorio en la proximidad de la misma.

En cuanto a la hora de ocurrencia de los disturbios, el 38.3% del total de impulsos se registraron entre la 19:00 y las 00:00 horas, y el 44.4 % del total de fenómenos ocurrió entre las 7:00 y las 19:00 horas. En este caso la probabilidad de ocurrencia de las sobre tensiones no está relacionada con los horarios de mayor demanda de energía eléctrica como fue el caso del primer circuito residencial; sin embargo, no se localizaron industrias o motores cercanos al edificio que pudieran ser la causa de las sobre tensiones. Se desconoce si existen cargas capacitivas conectadas a este circuito que pudieran estar escondidas dentro de la misma instalación eléctrica.

Las sobre tensiones registradas a las 9:00 horas, las que representan el 6.5% del total coinciden con la puesta en funcionamiento de la máquina lavadora dentro de la casa. Al finalizar el período de estudio se hicieron pruebas aisladas con la lavadora y el 63% de las ocasiones en que se encendió el motor de la misma se registraron sobre tensiones. Se repitió el mismo experimento conectando esta carga en otro punto de la instalación eléctrica y en esta ocasión no se registraron sobre tensiones en el punto de medición.

El número de eventos medidos en este circuito casi triplican el número de eventos encontrados en el primer circuito.

MEDICIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 4-1 Numero de Disturbios en el Circuito Residencial No 2

| Amplitud [Volts] | Hora de ocurrencia | Día de Medición | | | | | | | | | | | | | | Total |
|----------------------|--------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
| < 285 | 12 a.m. | 6 | 4 | | | 10 | | | 5 | 1 | | | | | | 26 |
| | 01 a.m. | 6 | 6 | | | 5 | | 19 | 5 | 3 | | 7 | | | 51 | |
| | 02 a.m. | | | | | 12 | | | 3 | | 4 | | | | 19 | |
| | 03 a.m. | 5 | | | | | | | 3 | | 3 | | | | 11 | |
| | 04 a.m. | 5 | | | | | | | 7 | | 5 | | | | 17 | |
| | 05 a.m. | 8 | 8 | | | | 7 | | 5 | | | | | | 28 | |
| | 06 a.m. | | | | | | 2 | | 6 | 31 | | | | | 39 | |
| | 07 a.m. | 6 | 7 | | | | 4 | | 7 | 14 | | | | | 38 | |
| | 08 a.m. | 1 | | | 14 | | 6 | | 1 | | | | | | 22 | |
| | 09 a.m. | 4 | | 9 | | 33 | 1 | | 4 | 12 | | 14 | | | 77 | |
| | 10 a.m. | | | | | | 4 | 21 | 5 | 2 | | | | | 32 | |
| | 11 a.m. | | | 4 | 2 | | 3 | | 7 | | | | | | 16 | |
| | 12 p.m. | | 7 | | | | 9 | | 4 | | | | | 8 | 28 | |
| | 01 p.m. | 8 | | 22 | | | | | 3 | | | | | | 6 | 39 |
| | 02 p.m. | | | | | | | | 3 | 111 | | | | | 7 | 121 |
| | 03 p.m. | 9 | | | | | 3 | | 7 | | | | | | | 19 |
| | 04 p.m. | | | | | | 1 | | 3 | | | | | | | 4 |
| | 05 p.m. | 4 | | | | | 7 | | 3 | 33 | | | | | 7 | 54 |
| | 06 p.m. | 2 | | | | 2 | | | 3 | 51 | | | 6 | | 10 | 74 |
| | 07 p.m. | | | 8 | | | 8 | 4 | 6 | 88 | | | | | | 114 |
| 08 p.m. | | 13 | 12 | | | 7 | | 10 | 11 | 6 | | | | | 59 | |
| 09 p.m. | | 6 | 2 | 14 | | 6 | 1 | 7 | 44 | 1 | | | | | 81 | |
| 10 p.m. | | 7 | | | | 8 | 4 | 4 | 13 | 92 | 5 | | | | 133 | |
| 11 p.m. | | | | | | 6 | 8 | | 25 | | 10 | | 10 | | 59 | |
| Total 285 | | 64 | 58 | 57 | 30 | 70 | 78 | 57 | 120 | 515 | 27 | 24 | 13 | 18 | 30 | 1161 |
| 285- 375 | 12 a.m. | | | | | 1 | | | | | | | | | | 1 |
| | 05 a.m. | | 1 | | | | | | 1 | | | | | | | 2 |
| | 08 a.m. | | | | 1 | | | | | | | | | | | 1 |
| | 09 a.m. | | | | | | | | | | | 1 | | | | 1 |
| | 10 a.m. | | | | | | | | 2 | | | | | | | 2 |
| | 01 p.m. | | | 1 | | | | | 1 | | | | | | | 2 |
| | 04 p.m. | | | | | | 1 | | | | | | | | | 1 |
| 05 p.m. | 1 | | | | | 1 | | | | | | | | | 2 | |
| 06 p.m. | | | | | | | | | | | | 1 | | | | 1 |
| 10 p.m. | | | | | | 1 | | | | 5 | | | | | | 6 |
| Total 375 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | | 4 | 5 | | 1 | 1 | | 19 | |
| Total general | | 65 | 59 | 58 | 31 | 71 | 81 | 57 | 124 | 520 | 27 | 25 | 14 | 18 | 30 | 1180 |

Respecto a la duración de los impulsos se obtuvieron valores similares a los obtenidos en el primer edificio, variando entre 12µs y 18 µs. Los resultados se presentan en la Tabla 4-4.

Aunque la información de la Tabla 4-4 resulta información interesante para el estudio realizado, es más importante definir el contenido energético de los impulsos ya que los datos pueden ser engañosos. Por ejemplo, podemos ver en la Tabla 4-4 que se registraron 165 impulsos con una duración de 18 microsegundos, mientras que impulsos

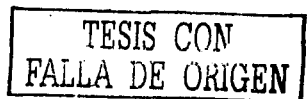
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

de 12 microsegundos se registraron tan solo 159, el lector podría suponer que en el segundo circuito residencial el fenómeno de disturbios eléctricos fue mucho más crítico que en el primer circuito. Sin embargo realizando el cálculo del contenido energético de los impulsos medidos en este circuito residencial, obtenemos resultados muy similares a los del primer circuito. Este comportamiento se muestra en el gráfico 4-2.

Tabla 4-4 Duración de los Disturbios en el Circuito Residencial No. 2

| Amplitud [Volts] | Hora de ocurrencia | Duración en microsegundos | | | | | | | |
|----------------------|--------------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| | | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
| < 285 | 12 a.m. | 4 | 6 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | |
| | 01 a.m. | 8 | 5 | 10 | 7 | 6 | 9 | 6 | |
| | 02 a.m. | 4 | 4 | 2 | 4 | 1 | 3 | 1 | |
| | 03 a.m. | | 2 | 4 | 2 | 2 | | 1 | |
| | 04 a.m. | 1 | 8 | 2 | 1 | 4 | 1 | | |
| | 05 a.m. | 2 | 1 | 5 | 8 | 4 | 5 | 3 | |
| | 06 a.m. | 3 | 8 | 11 | 5 | 5 | 4 | 3 | |
| | 07 a.m. | 1 | 9 | 5 | 5 | 3 | 12 | 3 | |
| | 08 a.m. | | 7 | 2 | 2 | 3 | 3 | 5 | |
| | 09 a.m. | 10 | 14 | 10 | 10 | 10 | 8 | 15 | |
| | 10 a.m. | 5 | 3 | 5 | 6 | 1 | 8 | 4 | |
| | 11 a.m. | 1 | | 3 | 2 | 2 | 5 | 3 | |
| | 12 p.m. | 4 | 4 | 3 | 4 | 1 | 5 | 7 | |
| | 01 p.m. | 5 | 10 | 3 | 9 | 7 | 1 | 4 | |
| | 02 p.m. | 17 | 20 | 14 | 13 | 18 | 15 | 24 | |
| | 03 p.m. | 2 | 4 | 6 | 2 | | 3 | 2 | |
| | 04 p.m. | | 1 | 1 | 2 | | | | |
| | 05 p.m. | 9 | 7 | 9 | 7 | 5 | 9 | 8 | |
| 06 p.m. | 7 | 8 | 6 | 15 | 14 | 13 | 11 | | |
| 07 p.m. | 19 | 17 | 22 | 14 | 15 | 11 | 16 | | |
| 08 p.m. | 7 | 11 | 11 | 10 | 2 | 8 | 10 | | |
| 09 p.m. | 12 | 7 | 17 | 10 | 11 | 17 | 8 | | |
| 10 p.m. | 28 | 21 | 18 | 21 | 15 | 15 | 15 | | |
| 11 p.m. | 10 | 6 | 4 | 7 | 13 | 10 | 8 | | |
| Total 285 | | 159 | 183 | 177 | 168 | 145 | 168 | 161 | |
| 285 - 375 | 12 a.m. | | 1 | | | | | | |
| | 05 a.m. | | 1 | | | | | 1 | |
| | 08 a.m. | | | 1 | | | | | |
| | 09 a.m. | | | | | | | 1 | |
| | 10 a.m. | | 1 | | | 1 | | | |
| | 01 p.m. | | | 1 | | | | 1 | |
| | 04 p.m. | | | 1 | | | | | |
| | 05 p.m. | | | | 1 | | | 1 | |
| 06 p.m. | | | | | | 1 | | | |
| 10 p.m. | | | 2 | | 3 | 1 | | | |
| Total 375 | | | 3 | 5 | 1 | 4 | 2 | 4 | |
| Total general | | 159 | 186 | 182 | 169 | 149 | 170 | 165 | |

El comportamiento del parámetro de energía calculado en las sobre tensiones es muy similar al observado en el primer circuito residencial. En el Gráfico 4-2 podemos observar que el comportamiento es el de una gráfica exponencial decreciente; los



impulsos de bajo contenido energético son más comunes, igual que en el circuito anterior, esto se debe a la breve duración de los disturbios registrados.

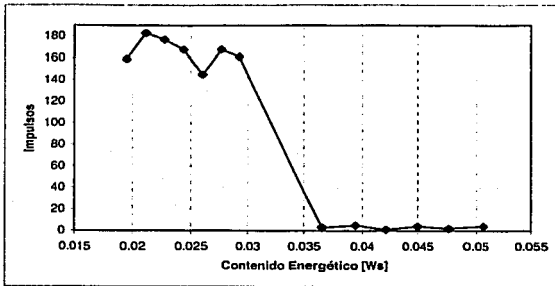


Gráfico 4-2. Ocurrencia de la distribución del contenido energético de las sobre tensiones medidas en el Circuito Residencial 2

El contenido energético de los impulsos en el segundo circuito residencial se encuentra entre 0.02 Ws y 0.052 Ws aunque el 98% del total de fenómenos no sobrepasa de 0.03 Ws.

c) Parámetros Estadísticos

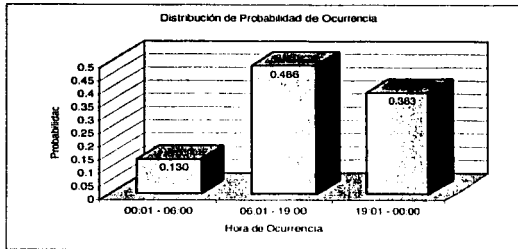
Amplitud media de los impulsos = 286.4 V

Contenido energético promedio = 0.0246 Ws

Tasa de ocurrencia (λ)

$$\lambda = 3.51 \text{ eventos / hora}$$

Probabilidad de Ocurrencia (P)



Duración de los impulsos

Duración media (μ) = 14.96

Desviación estándar (σ) = 1.99



4.2.3 Circuito Residencial 3

a) Características del Circuito

Casa Habitación de dos plantas. La línea de alimentación eléctrica es aérea, el transformador de distribución se encuentra a 200 m del edificio. No se detectaron componentes limitadores de tensión conectados al circuito o en las proximidades.

Vida Promedio de la instalación eléctrica. 5 años

Alimentación. Luz y Fuerza del Centro, 127 V rms, 60 Hz

Duración del estudio: 14 días.

b) Resultados

La Tabla 4-5 presenta la ocurrencia de disturbios por día de monitoreo en el edificio.

Tabla 4-5 Numero de Disturbios en el Circuito Residencial No. 3

| Amplitud [Volts] | Hora de Ocurrencia | Día de Medición | | | | | | | | | | | | | | General |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|----------|-----------|------------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
| 285 | 12 a.m. | 10 | | | 12 | 5 | 16 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 28 |
| | 01 a.m. | 10 | | | | | | | | | 7 | | | | | 17 |
| | 02 a.m. | 23 | | | | | | | 2 | | | | | | 20 | 45 |
| | 03 a.m. | | | | 2 | | | | | | | | | | | 2 |
| | 05 a.m. | | | | | | | | | | | 10 | | | | 10 |
| | 06 a.m. | | 10 | | | | | | | | | 18 | | | | 28 |
| | 07 a.m. | | | | | | | | | | 54 | | | | 1 | 58 |
| | 08 a.m. | | | | | | | | | | | | 2 | | 3 | 5 |
| | 09 a.m. | | 2 | 3 | | | | | | | | 1 | | 1 | | 7 |
| | 10 a.m. | | | | | | 10 | | | | | 8 | 3 | | | 21 |
| | 11 a.m. | | | | | | | | | 4 | | | 1 | | 18 | 23 |
| | 12 p.m. | | | | | 17 | | | | | | | | | | 17 |
| | 01 p.m. | 4 | | | | | | | | | | | 2 | | | 6 |
| | 02 p.m. | | | | | | | | | | | | | | 5 | 5 |
| | 03 p.m. | | | | | | | | | | | | 2 | | | 2 |
| | 04 p.m. | | | | | | | | 9 | | | | | | | 9 |
| | 05 p.m. | | | 6 | | | 1 | | | | | | 6 | | 2 | 15 |
| | 06 p.m. | | | | | | 1 | | | | | | | | | 1 |
| | 07 p.m. | | | | | 9 | 1 | | | 2 | 28 | | | | | 40 |
| | 08 p.m. | | | 2 | | 1 | 4 | 5 | 3 | 9 | 32 | | | 2 | 7 | 65 |
| | 09 p.m. | | 8 | 6 | | 11 | 1 | | 1 | | | | | | | 27 |
| 10 p.m. | | | 6 | | | 9 | | | | 10 | 13 | | | | 39 | |
| 11 p.m. | | | | | 20 | | | 2 | 3 | 9 | | | | | 56 | |
| Total 285 | 47 | 20 | 23 | 32 | 54 | 18 | 5 | 19 | 18 | 158 | 32 | 29 | 3 | 68 | 526 | |
| 375 | 07 a.m. | | | | | | | | | 1 | | | | | 1 | |
| | 05 p.m. | | | | | | | | | | | 1 | | | 1 | |
| | 10 p.m. | | | | | | | | | | 2 | | | | 2 | |
| | 11 p.m. | | | | | | | | | | | | | | 1 | |
| Total 375 | | | | | | | | | 1 | 1 | 2 | 1 | | 6 | | |
| Total general | 47 | 20 | 23 | 32 | 54 | 18 | 5 | 20 | 18 | 159 | 34 | 30 | 3 | 68 | 531 | |

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

En este circuito residencial se registraron 531 impulsos en total, un valor muy parecido al obtenido en el primer circuito y casi la mitad de los que se presentaron en el Circuito 2.

Se registraron fenómenos todos los días que duró el estudio sin ningún patrón de ocurrencia observable. En un solo día, el décimo del estudio, ocurrieron 159 sobre tensiones que representan el 30% del total registradas. El 99% de los disturbios no sobrepasaron el umbral de 375 Volts.

La duración de los impulsos registrados se presenta en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6 Duración de los Disturbios en el Circuito Residencial No. 3

| Amplitud (Volts) | Hora de Ocurrencia | Duración en microsegundos | | | | | | | |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|----|-----|-----|----|----|----|----|
| | | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 21 |
| 285 | 12 a.m. | 7 | 8 | 6 | 4 | 2 | 1 | | |
| | 01 a.m. | | 2 | 4 | 7 | 2 | 1 | 1 | |
| | 02 a.m. | 3 | 3 | 13 | 11 | 7 | 6 | 2 | |
| | 03 a.m. | | 1 | | | 1 | | | |
| | 05 a.m. | | 2 | 2 | 6 | | | | |
| | 06 a.m. | 2 | 6 | 6 | 7 | 3 | 1 | 3 | |
| | 07 a.m. | 9 | 13 | 11 | 11 | 4 | 9 | 1 | |
| | 08 a.m. | 2 | | | | 1 | 2 | | |
| | 09 a.m. | | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | |
| | 10 a.m. | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | |
| | 11 a.m. | | 6 | 3 | 5 | 2 | 3 | 3 | 1 |
| | 12 p.m. | 1 | 2 | 7 | 4 | 3 | | | |
| | 01 p.m. | 3 | 1 | | 1 | | 1 | | |
| | 02 p.m. | | 3 | 1 | 1 | | | | |
| | 03 p.m. | | | | | 1 | 1 | | |
| | 04 p.m. | 2 | 3 | 2 | 2 | | | | |
| 05 p.m. | 3 | 2 | 2 | 4 | | | | 4 | |
| 06 p.m. | | | | | | 1 | | | |
| 07 p.m. | 5 | 8 | 8 | 10 | 5 | 4 | | | |
| 08 p.m. | 11 | 12 | 16 | 15 | 7 | 3 | 1 | | |
| 09 p.m. | 6 | 6 | 6 | 3 | 2 | 2 | 2 | | |
| 10 p.m. | 7 | 7 | 6 | 12 | | | 4 | 3 | |
| 11 p.m. | 3 | 6 | 20 | 19 | 1 | 3 | 4 | | |
| Total 285 | | 67 | 95 | 118 | 127 | 44 | 46 | 28 | 1 |
| 375 | 07 a.m. | | | | 1 | | | | |
| | 05 p.m. | | | | | | 1 | | |
| | 10 p.m. | | | 1 | 1 | | | | |
| | 11 p.m. | | | | | 1 | | | |
| Total 375 | | | | 1 | 2 | 1 | 1 | | |
| Total general | | 67 | 95 | 119 | 129 | 45 | 47 | 28 | 1 |

La duración de los impulsos no varió mucho respecto a las mediciones anteriores, se encontraron valores ente 12 μ s y 18 μ s y una sola lectura de 21 μ s, siendo ésta última la lectura de más larga duración de todas las mediciones del estudio.

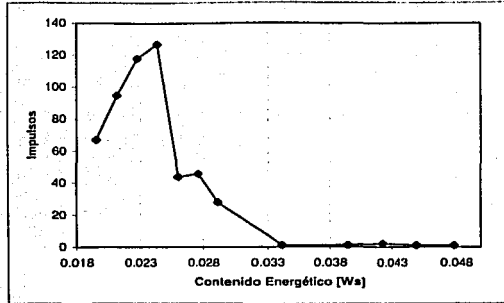


Gráfico 4-3. Ocurrencia de la distribución del contenido energético de las sobre tensiones registradas en el Circuito Residencial 3

b) Parámetros estadísticos

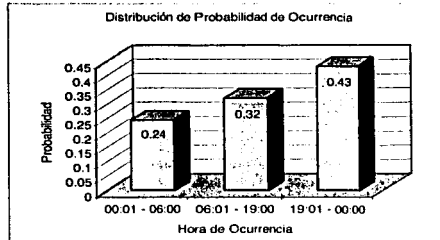
Amplitud media de los impulsos = 285.84 V

Contenido energético promedio = 0.0236 Ws

Tasa de ocurrencia (λ)

$$\lambda = 1.58 \text{ eventos/hora}$$

Probabilidad de Ocurrencia (P)



Duración de los impulsos

$$\text{Duración media } (\mu) = 14.47$$

$$\text{Desviación estándar } (\sigma) = 1.66$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3 Análisis Comparativo de los circuitos estudiados

En la siguiente sección se expone un análisis comparativo entre los tres circuitos monitoreados en el estudio y a partir de éste se resaltan las coincidencias y diferencias observadas.

| | Circuito 1 | Circuito 2 | Circuito 3 | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|------------|
| Características del Suministro Eléctrico | Subterránea | Aérea | Aérea | |
| Edificio | Residencial | Residencial | Residencial | |
| Vida promedio de la instalación eléctrica | 20 años | 20 años | 5 años | |
| Periodo de medición | 14 días | 14 días | 14 días | |
| Impulsos registrados | 464 | 1180 | 531 | |
| Amplitud promedio de la sobre tensión (V) | 286.6 | 286.4 | 285.84 | |
| Amplitud mayor registrada (V) | 375 | 375 | 375 | |
| Contenido energético promedio (Ws) | 0.02435 | 0.0246 | 0.0236 | |
| Contenido energético mayor (Ws) | 0.05063 | 0.0506 | 0.0478 | |
| Duración media de la sobre tensión (μs) | 14.9396552 | 14.9601695 | 14.47 | |
| Duración mayor registrada (μs) | 18 | 18 | 21 | |
| Desviación Estándar de la duración | 1.98499248 | 1.99003624 | 1.66 | |
| Tasa de ocurrencia (λ) | 1.38 | 3.51 | 1.58 | |
| Probabilidad de Ocurrencia | 00:01 - 06:00 hrs | 0.30387931 | 0.12966102 | 0.24482109 |
| | 06:01 - 19:00 hrs | 0.13146552 | 0.48559322 | 0.3220339 |
| | 19:01 - 00:00 hrs | 0.56465517 | 0.38305085 | 0.43314501 |

Las sobre tensiones son la mayoría de las veces un fenómeno inevitable y aleatorio que depende de las características propias del sistema eléctrico en el que se presentan, de las circunstancias de operación a las que se somete el sistema eléctrico, o bien, atribuible a fenómenos atmosféricos.

Por tal motivo cuando se conduce un estudio como el que se presenta aquí es necesario aislar el sistema que se quiere conocer, en este caso cada uno de los circuitos residenciales analizados, sin embargo, el circuito analizado debe compararse contra un estándar o patrón conocido. En ausencia de tal comportamiento estándar comparamos cada circuito contra los otros dos.

Podemos encontrar diferencias en el comportamiento de las sobre tensiones por diferencias en el tipo de alimentación y por la vida que tiene la instalación eléctrica de los edificios. En el primer circuito, cuya alimentación es subterránea se presentó la menor cantidad de sobre tensiones, sin embargo, en el tercer circuito cuya alimentación al igual que el "circuito 2" es aérea, ocurrió un número de sobre tensiones similar a las del "circuito 1" probablemente debido a que la instalación eléctrica en el tercer edificio es relativamente nueva.

En el segundo circuito se registraron el triple de disturbios que en el resto de los circuitos analizados. En este mismo circuito se encontraron algunas fallas propias de la instalación eléctrica donde las sobre tensiones se propagaban dentro del mismo circuito (como el caso de la lavadora) atribuible a la reactancia misma de la instalación.

El 99% del total de los disturbios tuvo una amplitud en el intervalo de 186 Vpico a 285 Vpico, únicamente 26 impulsos de los 2185 registrados, sobrepasaron el umbral de 285 Vpico.

La duración de los fenómenos permaneció relativamente constante en cada uno de los circuitos con una duración promedio de 15 μ s. El parámetro importante a observar en este aspecto son las desviaciones estándar calculadas. En los dos primeros circuitos la desviación estándar resultó con un valor cercano a 2, mientras que en el "circuito 3" la desviación estándar fue de 1.6. Esta medida de dispersión nos da una idea del comportamiento de las sobre tensiones e indica que en los circuitos 1 y 2 los valores pueden alejarse más de la media, la duración de los impulsos puede variar más. No así en el circuito 3 donde el valor de la duración de las sobre tensiones siempre estará más cercano al valor medio.

El contenido energético de cada sobre tensión fue muy similar en los tres circuitos y en ningún caso alarmante si suponemos que cada impulso se presentó de manera aislada. No obstante, los resultados del estudio muestran en la mayoría de los casos un tren de pulsos, una sobre tensión que oscila mientras decae a una frecuencia aproximada de 66 KHz.

Como una consecuencia de la ocurrencia de impulsos se establece una tasa de ocurrencia (λ) mucho mayor en el circuito 2. La probabilidad de ocurrencia en cada circuito está dada por el parámetro anterior y la distribución de probabilidad presentada. No existe una verdad absoluta en cuanto al momento en que ocurrirá una sobre tensión. Por observación podemos esperar que entre las 07:00 hrs y las 19:00 hrs. ocurrirán muy pocos disturbios en el primer circuito, no así en el circuito 2 donde la probabilidad de una sobre tensión en esta ventana de tiempo es 4 veces mayor.

4.4 Comportamiento de las sobre tensiones observadas en el estudio

Generalmente se produjeron más de dos impulsos de baja energía en un mismo periodo de medición. Las sobre tensiones no ocurrieron de manera aislada, siempre que existía una sobre tensión era precedida por al menos otra de duración similar. Esta repetición de sobre tensiones podía presentarse incluso durante dos o tres segundos.

Con la información registrada en la Base de Datos es posible generar un gráfico del comportamiento de las sobre tensiones, Figura 4-1. Dadas las restricciones de frecuencia de muestreo del diseño del instrumento de medición sólo podemos especular sobre el comportamiento de la sobre tensión.

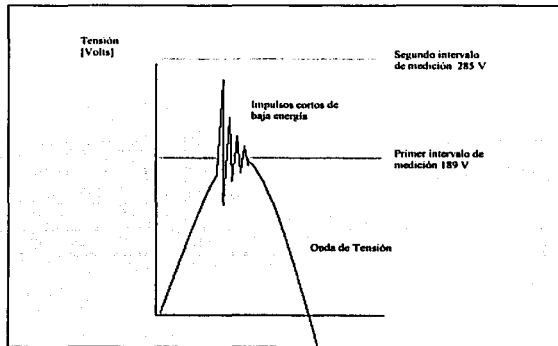


Figura 4-1. Comportamiento típico de la sobre tensión

Para efectos prácticos, en la Figura 4-1 hemos visualizado las sobre tensiones como una onda que decae mientras oscila a una frecuencia de 66 KHz. Lo anterior es una suposición teórica puesto que la máxima resolución para la hora de ocurrencia del disturbio que brinda el instrumento de medición combinado con la programación en la computadora es de segundos. En un segundo existen 60 ciclos, cuando se registran dos o más sobre tensiones a la misma hora (hh:mm:ss) no es posible discriminar si ambas corresponden al mismo ciclo o a ciclos diferentes.

4.5 Referencias Bibliográficas

1. Martzloff F, "Surge Voltage in Residential and Industrial Power Systems", Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 89 IEEE, July/Aug 1970
2. K. Stimper - G. Ackerman - J. Ehrler, "Transient Overvoltages in Low- Voltage Systems: A Field Study in Germany", DEIS Feature Article Jul/Aug 1998 Vol. 14, No. 4

Los objetivos en el campo de investigación descrito en esta tesis eran diseñar instrumentación especial para la medición de sobre tensiones y conducir un estudio para registrar los valores máximos, duración de impulsos y frecuencia de ocurrencia de las sobre tensiones transitorias en circuitos residenciales de baja tensión.

Al final de este estudio, se efectuaron mediciones en 3 distintos puntos de la Ciudad de México durante un periodo de 42 días. En los valores obtenidos en 2185 disturbios se observa cierta regularidad en el patrón de magnitud de tensión, forma de onda y duración pero no así en ocurrencia debido a que un transitorio, originado por un cambio en la configuración del sistema (fallas, operación de interruptores, conexión y desconexión de cargas), se propaga a través del mismo afectado por los parámetros eléctricos del circuito ocasionando que la medición del disturbio sea diferente en el punto de origen que en cualquier otro punto del sistema eléctrico de potencia en un instante determinado.

Los parámetros eléctricos del sistema dependen del tipo de sistema de distribución, tipo de conductores y su resistencia serie, capacitancia e inductancia, tipos de cargas conectadas, la presencia de fallas en el sistema y su capacidad de potencia. A su vez se tendría que considerar el efecto piel para altas frecuencias, las pérdidas en el medio dieléctrico entre conductores y la influencia de la resistencia a tierra.

Las principales causas de sobre tensiones transitorias son las descargas atmosféricas y la operación de interruptores. Con base en los resultados obtenidos determinamos que la causa de las sobre tensiones registradas en este estudio es la operación de interruptores que interconectan las diferentes cargas del sistema, dejando a las condiciones atmosféricas como una causa menos probable de los eventos registrados, esta afirmación se fortalece considerando adicionalmente que el periodo de medición no concuerda con la temporada de lluvias y tormentas eléctricas.

El problema de las sobre tensiones transitorias desde el punto de vista de las redes de baja tensión está relacionado con el daño que ocasionan a equipos electrónicos sensibles. Este daño está relacionado con la capacidad de disipación del contenido energético de los picos eléctricos por parte de los dispositivos electrónicos y/o sus componentes, dicho en otras palabras, lo que determina que un componente se destruya es su temperatura interna la cual depende de la rapidez con que el elemento pueda deshacerse del calor interno (energía). El contenido energético que un transitorio puede entregar a un dispositivo electrónico está en función de la duración, forma de onda y amplitud del transitorio y la impedancia del circuito.

Dado que es imposible prevenir la propagación de sobre tensiones transitorias hacia una instalación, o bien, que se generen desde la misma, se utiliza la protección contra sobre tensiones cuya función es detener o al menos limitar sus efectos en dispositivos electrónicos de estado sólido.

La parte que más frecuentemente presenta daños en dispositivos electrónicos sensibles (computadoras, teléfonos, maquinas de FAX, televisores, equipos de audio y video, entre otros) es la fuente de corriente continua compuesta por diodos rectificadores, capacitores y en la mayoría de los casos varistores. De los fabricantes de estos componentes solamente los que producen varistores tienen en su hoja de especificaciones el concepto de energía que el elemento es capaz de disipar mientras que los diodos están especificados en unidades de disipación de potencia [Semiconductores Fairchild] y los capacitores en límite de corriente continua aplicable, o bien, horas de vida operando a cierta temperatura (FaradNET).

En las siguientes dos tablas se presentan las especificaciones de diodos rectificadores de propósito general y varistores de propósito general más encontrados en fuentes de corriente directa y reguladores de tensión:

| Diodo | Tension Inversa | Disipacion de Potencia |
|----------------|------------------------------|------------------------|
| 1N914/916/4148 | 100 V | 500 mW |
| 1N4001-1N4007 | 50,100,200,400,600,800,1000V | 3 Watts |

Tabla 5.1 Diodos Rectificadores

El dato de disipación de potencia de los diodos listado en la tabla no es útil en cuanto a disipación de energía ya que las hojas de especificaciones no indican el tiempo que puede fluir una potencia igual a la potencia de disipación por los diodos. Con esta información no es posible saber el contenido energético de una sobre tensión que puede soportar este dispositivo.

| Diámetro | Tension Inversa (V) | Tension de Abatido | Energía |
|----------|---------------------|--------------------|------------|
| 5 mm | 130 V | 310 V | 4 Joules |
| 10 mm | 130 V | 340 V | 20 Joules |
| 20 mm | 130 V | 350 V | 70 Joules |
| 40 mm | 130 V | 360 V | 310 Joules |

Tabla 5.2 Varistores de Disco: Es el tipo más utilizado. El disco cerámico es envuelto en alambre de cobre y posteriormente cubierto con resina epóxica. Su tensión depende del ancho del disco e influye en sus parámetros de corriente y absorción de energía. Fuente: EMC

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

La principal aplicación de los varistores es en dispositivos de protección contra disturbios eléctricos como son los reguladores de tensión. Conociendo su parámetro de energía es posible realizar una mejor aplicación de los varistores en reguladores para protección contra sobre tensiones transitorias. Bajo estas condiciones es posible saber ante cuales magnitudes y duraciones de sobre tensiones el equipo electrónico sensible se encuentra protegido y ante cuales vulnerable. Por tal motivo, para diseñar una buena aplicación de protecciones se requiere el completo conocimiento de las características técnicas de los componentes electrónicos comercialmente disponibles.

El entendimiento de las limitaciones de los componentes electrónicos es un buen principio para la aplicación de una protección básica contra sobre tensiones en circuitos residenciales de baja tensión.

Una solución de protección completa requiere de un análisis de ingeniería de las sobre tensiones transitorias y ruidos de alta frecuencia presentes en la instalación que se desea proteger para evitar la especulación y una mala aplicación.

Existen dispositivos de protección comercialmente disponibles para cada parte específica del sistema eléctrico de potencia. Algunos fabricantes, promueven sus supresores de picos meramente por el valor de la sobre tensión que interrumpen y su capacidad de absorción de energía sin una propia guía y criterio de aplicación. El estándar UL 1449 para seguridad de supresores de picos establece una serie de pruebas que no todos los supresores de picos cumplen.

Con un entendimiento de los estándares aplicables, y conocimiento de la propagación de los picos eléctricos en el sistema de potencia de distribución, el ingeniero de diseño puede hacer una selección adecuada de dispositivos de protección para una aplicación correcta.

Tal aplicación puede requerir de todas o una combinación de las siguientes consideraciones:

- 1) Aplicar supresores de picos al primario y al secundario del transformador principal.
- 2) Implementar supresores de picos integrados en el panel principal.
- 3) Aplicar el acercamiento de protección en cascada.
- 4) Aplicar la pirámide de calidad de la energía para el diseño de la protección del sistema de distribución.
- 5) Utilizar dispositivos electrónicos con protección contra sobre tensiones incluida.
- 6) Proveer a los equipos electrónicos sensibles de una referencia a la red de tierra.
- 7) Los fusibles aplicados a supresores de picos deben de tener una capacidad interruptiva tal que el supresor quede aislado en caso de que falle por un pico de corriente mayor que su capacidad. Sin embargo, en condiciones de un agotamiento térmico del dispositivo supresor de pico, la corriente es todavía muy baja para accionar el fusible, solamente un interruptor térmico in proximidad al dispositivo supresor de picos puede eliminar esta falla.
- 8) Instalar equipo de protección contra picos en todas las líneas de comunicaciones, especialmente dispositivos supresores de ruido.
- 9) En cargas no críticas, que generan disturbios como armónicos y ruido, la instalación de un eliminador de picos económico puede ser adecuada.

- 10) El sistema de tierra de los dispositivos supresores de picos deberá tener, de ser posible, una resistencia mínima con el fin de minimiza el potencial a tierra sobre la tierra virtual que actúa como tierra de referencia para otros equipos electrónicos sensibles en el mismo edificio.

La instrumentación especial para la medición de sobre tensiones transitorias en esta tesis fue diseñada y desarrollada después de la investigación y entendimiento del los parámetros eléctricos del fenómeno y los resultados de los estudios similares conducidos en otros países.

El dispositivo desarrollado está compuesto por una parte electrónica y otra de ingeniería de programación. Ambas partes son susceptibles de mejoras en caso de que se desee medir picos eléctricos de mayores frecuencias, interpretación más detallada de registros o simplemente reducir sus dimensiones.

En cuanto a medir transitorios más rápidos (frecuencias mayores) el dispositivo está limitado por la frecuencia máxima de reloj del oscilador estable 4047BC (1MHz), la velocidad de transferencia del puerto paralelo (1.2 μ s) obtenida experimentalmente con un analizador lógico y el tiempo de restablecimiento que requiere el dispositivo para efectuar mediciones nuevas. Las modificaciones que se pueden hacer en este respecto pueden ser: cambiar el oscilador por otro capaz de manejar mayores frecuencias, utilizar al puerto paralelo LPT1 en su forma bidireccional, es decir, transmitir a la computadora 8 bits al mismo tiempo en lugar de cuatro, reduciendo en forma considerable las rutinas de muestreo y por ende el tiempo de restablecimiento del dispositivo. Otra alternativa puede ser utilizar otro tipo de interfase con la computadora como podría ser el protocolo del Bus Universal Seric (USB).

El programa que controla el dispositivo y registra eventos es el que brinda la mayor oportunidad de mejoras. El punto de partida puede ser una depuración del algoritmo, las estructuras de datos y el manejo de archivos para una utilización óptima de la memoria y el procesador de la computadora personal buscando minimizar las escrituras a disco duro. Otro aspecto de mejora es utilizar un lenguaje de programación visual que presente un ambiente gráfico con mayor interacción con el usuario. Se pueden agregar módulos de avisos de medición, total de registros capturados, errores de comunicación y consulta de datos en tiempo real, así como también, reportes de registros acumulados en el tiempo y graficas de los disturbios ya que los datos que se capturan por evento brindan esta posibilidad.

En lo que se refiere a reducir las dimensiones del dispositivo la mejora no es conceptual, es simplemente de integración de tecnologías, la utilización de arreglos de compuertas lógicas o arreglos lógicos programables brinda la oportunidad de reducir los sistemas de control y selección de señales registradas por el dispositivo de manera considerable.

El dispositivo desarrollado no solamente puede ser aplicado a la línea eléctrica de baja tensión, sino también, por medio de modificaciones menores a la línea telefónica y otras líneas de comunicación.

A la fecha se han realizado pocos estudios de campo de sobre tensiones en redes de baja de tensión: Alemania, Austria, Francia y el estudio de Martzloff en Estados Unidos. Estos estudios se llevaron a cabo con la idea principal de establecer estándares regulatorios para las compañías suministradoras y los fabricantes de equipo eléctrico-electrónico, basados en mediciones reales más que en la experiencia operativa de éstos.

Los estudios anteriormente citados se llevaron a cabo en periodos de tiempo superiores a un año y para detectar sobre tensiones mayores a 500 V en redes europeas de baja tensión (220 / 400 V @ 50 Hz), a excepción del trabajo de Martzloff para detectar picos eléctricos mayores a 200 V efectuado en redes con una tensión de 127 V @ 60 Hz. En este sentido, y para efectuar una valoración más justa de los resultados presentados en esta tesis se realiza una comparación con el estudio de Martzloff en Estados Unidos ya que las características de suministro de energía eléctrica son iguales a las que existen en México. Con el entendimiento de que la diferencia en la duración de las etapas de muestreo entre los estudios arroja comportamientos estadísticos diferentes.

En el estudio de Martzloff la tasa de ocurrencia de disturbios menores a 500 V varía desde 0.07 impulsos / hora hasta 0.4 impulsos / hora con duraciones que van desde 10 μ s hasta 4 ciclos. En el estudio presentado en este trabajo la tasa de ocurrencia promedio fue de 2.1 impulsos / hora con una duración promedio de 15 μ s. Aunque se registraron más impulsos en este estudio que en el estudio efectuado por Martzloff, la duración de los disturbios fue más constante, el de mayor duración fue de 21 μ s mientras que en el otro estudio se registraron sobre tensiones que duraron hasta 4 ciclos.

Cabe resaltar que el estudio de Martzloff se realizó en 1970, desde entonces a la fecha las condiciones y configuración de los sistemas eléctricos se han visto modificadas con la creciente popularidad de equipos electrónicos de estado sólido que ha crecido dramáticamente en las últimas dos décadas en circuitos residenciales.

La presencia de transitorios en la red eléctrica es un fenómeno conocido y ha sido estudiado y medido en redes de altas tensión; sin embargo, existe un trabajo incipiente en el estudio de éste fenómeno en redes de baja tensión, en las que existe una mayor preocupación del usuario que posee equipos sensibles y susceptibles de falla en presencia de disturbios en la red. La aplicación de dispositivos de protección contra sobre tensiones resulta entonces necesario. Si se añade que este fenómeno es aleatorio e inevitable es también necesario recurrir a mediciones sensibles y precisas para entender el proceso físico que está ocurriendo.

Con estudios similares al presentado en este trabajo de investigación se podrían establecer las bases de un método probabilístico para dimensionar el problema de las sobre tensiones transitorias en redes de baja tensión y determinar en su caso el tipo de protecciones adecuadas. Así mismo, estudios de este tipo, se deberían conducir no sólo en circuitos residenciales sino también en circuitos industriales donde las condiciones son totalmente distintas a las que existen en un edificio residencial por las características particulares de las cargas que existen en cada uno, y de igual manera deben aplicarse mediciones en líneas telefónicas, cable y otras líneas de comunicación que pueden conducir sobre tensiones transitorias.

Finalmente, la intención más allá de los objetivos planteados en esta investigación es evidenciar la importancia del fenómeno de las sobre tensiones, despertar el interés por su estudio tanto por comunidades académicas como compañías suministradoras e incitar a la generación de normas aplicables a las condiciones y características del sistema eléctrico mexicano de distribución a nivel residencial e industrial.

Con el fin de de que se continúe estudiando el fenómeno de las sobre tensiones transitorias, el dispositivo desarrollado en este trabajo de investigación ha sido donado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.