

CASO DE ESTUDIO:

Estudio de número de impactos directos e indirectos en un circuito de alimentación

Escrito por Ing. Alexandro Rosales Sandoval, 4-diciembre-2025.

Sinopsis

Este estudio analiza la estadística y probabilidad de impactos directos e indirectos de rayo sobre circuitos de alimentación residencial con el fin de establecer un criterio práctico para seleccionar supresores de sobretensiones transitorias (SPD) en viviendas unifamiliares. El enfoque se basa en relacionar la densidad de descargas atmosféricas (Ng) de una zona con el número estimado de sobretensiones severas que pueden afectar la instalación eléctrica durante los aproximadamente años, para así determinar la capacidad mínima en kiloamperios (kA) y otros parámetros que debe poseer el DPS para brindar protección sostenida durante un periodo alto de tiempo. El modelo considera únicamente los criterios esenciales aplicables en entornos domésticos, como el tipo de acometida, la selección del Tipo 1 o Tipo 2 según IEC 61643, los valores recomendados de I_{imp} o I_n , entre otros, según el nivel de tormentosidad local, con el objetivo de definir una metodología compacta y aplicable para el dimensionamiento correcto de SPDs en viviendas unifamiliares.

Teoría

Una sobretensión por causa de rayo es clasificada como una sobretensión transitoria, donde el SPD tiene su propósito de funcionalidad. El transitorio en este caso se clasifica como el evento de sobretensión con una duración $< 1 \text{ ms}$ (en otras fuentes se dice $< 2\text{ms}$).[1] Las sobretensiones transitorias pueden ser ocasionadas tanto por descargas atmosféricas a como operaciones de conmutación, estas operaciones van desde motores, HVAC, VFD, entre otros, los cuales deben ser considerados en cierta manera para el sector residencial donde esta presencia está en secadoras, lavadoras, aires acondicionados entre otros, por ende, si bien la mayor preocupación es el rayo, para el alcance de este tipo de evento las sobretensiones internas provenientes de este tipo de fuentes deben ser tomadas a consideración. [2]. Dentro de los transitorios se encuentran los de forma oscilatoria, donde sus fuentes provienen de Cargas inductivas como elevadores, copiadoras, soldadoras, equipo de aire acondicionado, accionamiento de fusibles, motores y herramientas en general. Por otro lado, se encuentran los transitorios impulsivo (unidireccional) donde sí, esta forma viene de descargas atmosféricas, conmutación de la red eléctrica, accidentes industriales. Por lo que se resalta que los sistemas SPD van más allá de proteger ante rayos y sus impactos directos e indirectos en la red. Se conoce que solo el 20% de las sobretensiones son causados por rayos y el 80% por conmutaciones internas (motores, lámparas, HVAC, PC, VFD, inversores).[2][3] En resumen, es importante diferenciar esto para saber cuál es el propósito y alcance del SPD en nuestra instalación residencial como parte de la aplicación de la calidad de la energía.[4]

Funcionamiento general del SPD y parámetros esenciales

Un supresor de transitorios atenúa la magnitud del transitorio de tensión dejando una tensión residual U_p , para proteger los equipos, aunque no los elimina por completo. La reducción debe mantenerse por debajo del límite que el equipo puede tolerar, valor que indica el fabricante. [2]

El supresor ofrece un camino alterno (de baja impedancia) a la corriente del transitorio para que no afecte el funcionamiento de la carga como se aprecia en la figura 1. Las normas principales que rigen sobre los supresores y definen sus terminologías son las IEC 61643 y UL 1449.

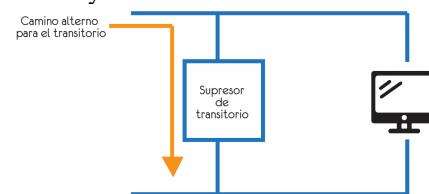


Figura 1: Principio de funcionamiento básico de un SPD. [2]

1- Tipo

Las sobretensiones debidas a descargas directas de rayos, ya sea por una descarga directa sobre un pararrayos o el tejado de un edificio, o por una descarga directa sobre una línea aérea de tendido eléctrico, se caracterizan por impulsos de corriente con forma de onda 10/350 μs . Forma de onda de corriente que fluye a través de equipos cuando éstos están bajo los efectos de una sobretensión producida por la descarga directa de un rayo.[1] Los SPD que se ensayan con ondas 10/350 (Clase I) reciben el nombre de **Tipo 1 o Clase 1**

Las sobretensiones debidas a los efectos indirectos de las descargas de rayos se originan por el incremento del potencial de tierra en las inmediaciones del punto de impacto y por los campos electromagnéticos asociados, cuyo acoplamiento inductivo y capacitivo genera perturbaciones adicionales; estas sobretensiones se caracterizan típicamente por impulsos con forma de onda 8/20 μ s.[1] Los que se ensayan con ondas 8/20 (Clase II) reciben el nombre de **Tipo 2 o Clase 2**

Para equipos terminales se añade al sistema regletas con supresores u otros sistemas que se instalan directamente junto con el equipo final, estos son definidos como **Tipo 3 o clase 3**.

2- U_c o MCOV:

La Tensión de Operación Continua Máxima (MCOV) es la tensión RMS máxima de operación continua que puede aplicarse al SPD sin causar daño o deterioro a los MOV internos. Para aplicaciones residenciales, se recomienda un MCOV de aproximadamente 150 V para sistemas de 120 V y de 300 V para sistemas de 240 V.[2]

3- U_p o VPR

La tensión residual (U_p) es la tensión máxima que alcanzará la carga protegida mientras el SPD está actuando. Corresponde a la tensión de anclaje o de corte más la suma de las caídas de tensión por impedancias de línea, es decir, el nivel a partir del cual el supresor inicia la conducción para reducir el transitorio (Cuando pasa a baja impedancia). Este valor no debe ser demasiado bajo, ya que en presencia de variaciones como swells (8,32 ms hasta 60 s) o sobrevoltajes prolongados, el SPD entraría y saldría de operación repetidamente, disminuyendo de manera significativa su vida útil. Para electrónica de casa como electrodomésticos, TV, computadores basta con un máximo U_p de 1.8 - 1.5 KV [1], [2], [5] [6]

4- I_{imp} y I_{Max}

I_{imp} :Corriente de impulso máxima que soporta el SPD con onda 10/350 μ s, asociada a descargas directas de rayo. (Concepto sin equivalente directo en UL 1449.)

I_{Max} : Corriente máxima de descarga con onda 8/20 μ s que el SPD puede manejar sin fallar, indicando su robustez frente a transitorios severos. (Equivalente en UL: Single Surge Current Rating.)

Estas corrientes son muy importantes debido a que están directamente relacionadas con el tamaño de los varistores y este tamaño esta directamente reflejado con la vida útil del SPD durante el tiempo (según los eventos que el afronte).[1] Por otro lado, es importante resaltar que estas corrientes máximas se venden por fase ya que es la manera más fácil de asimilar la capacidad de drenaje, esto en vez de hablar por modo, donde se pueden tomar SPD de 7, 10 modos.[1]

5- I_n o I_N

Esto como prueba de desempeño es el reflejo de la robustez del SPD, debido a que este valor según norma se define mediante 15 ensayos distribuidos en 15 minutos y separados por un minuto donde el valor del I_n del SPD indica que ese es el valor de cada corriente máxima aplicada en cada ensayo que logra aguantar el SPD para pasar la prueba completa de los 15 ensayos. Se encuentran modelos en el mercado de 3KA, 10KA y entre otros, entre mayor el valor, mejor la robustez del SPD.

6-ISCCR

Esta es la corriente de corto circuito máxima que puede aguantar el SPD sin destruirse. Esto es importante en caso de falla de este tipo en la red.

7-Indicadores de estado

Por último, es muy importante considerar que el SPD tenga un indicador luminoso del estado de vida del SPD, ya que a como se vio anteriormente la variedad de eventos que desgastan su vida útil es amplia por lo que puede llegar a ser difícil dar un estimado exacto de tiempo de vida útil.

Determinación del poder de derivación necesario

La determinación del poder de derivación de un dispositivo de protección (I_{max} y I_{imp}) se basa en un análisis de riesgo que considera tres grupos de parámetros: el entorno, donde se evalúa la densidad de descargas a tierra (N_g), expresada como número de rayos por km^2 por año, y el nivel ceráunico (N_k), relacionado mediante la fórmula aproximada $N_g = N_k/10$; las condiciones de conexión de la instalación a la red eléctrica; y los aspectos de seguridad, que incluyen costos por reparaciones, tiempos improductivos y riesgos para las personas. Todo este análisis el fabricante lo hace y ofrece una manera simple para elegir según el N_g de la ubicación de la instalación. [1]

Densidad de descargas atmosféricas en Costa Rica

En el 2020 el CNFL determino que en su área de concesión existe una densidad **anual** de descargas atmosféricas de $10 \frac{impactos}{km^2}$ ($N_g=10$) y una intensidad de corriente pico promedio de 15 KA, refiérase a la figura 2, a su vez también se estimo que el 80% de las sobretensiones generadas sobre el sistema es inferior a los 50 KV.[7] Esto varia

significativamente en el área de Costa Rica, donde en Puntarenas ronda entre los 20 a 30 rayos por kilómetro cuadrado, o la zona Caribe entre 0 y 5 (ver la figura 3).[8][9]

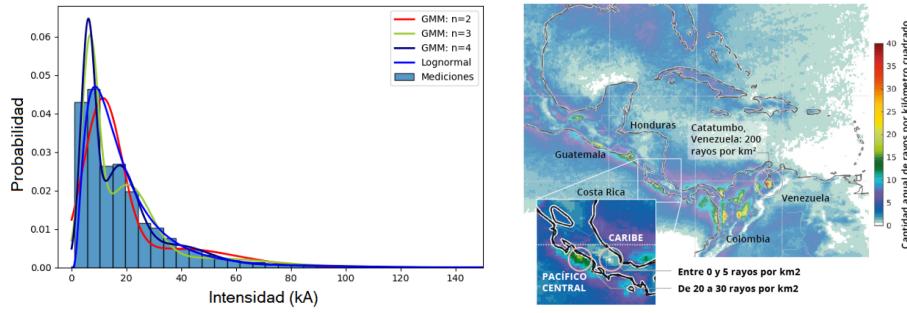


Figura 2: Intensidad de descargas atmosféricas: CNFL- 2010-2017 [7]
2016.[8]

Figura 3: Densidad de rayos caídos en Centroamérica 2006-

Ejemplo de Diseño de sistema de SPD para la vivienda unifamiliar costarricense.

Como la mayoría de los transitorios se originan dentro de las instalaciones del cliente (80%), es necesario implementar protección en todos los niveles: desde el tablero principal hasta los puntos de uso final, ya que pueden generarse en cualquier etapa del sistema.[2], [3]

Siguiendo el NEC 230.67, y su correcta interpretación se propone un caso particular para una casa unifamiliar en Vargas Araya, San Jose, Costa Rica con una red de 120/240 V RMS, esta no se encuentra cerca de casas con pararrayos, ni de edificios, ni posee pararrayos, tampoco arboles altos cercanos, postes etc.[6] Entonces por ende no está propensa a impactos directos de rayo, por ende, se opta por un SPD tipo 2 instalado en el tablero principal, monofásico de 2 polos (2 fases y neutro) con modos de protección LL y L-N, donde siguiendo la tabla de recomendaciones de ABB de la figura 4 y sabiendo que para esta localización se tiene un $Ng = 10$ se escoge una I_{MAX} de 70 KA, asegurando que se tenga $Up < 1.8$ KV para proteger la gran variedad de electrodomésticos, Uc de 150 V/300 V y con indicador del estado de vida útil del SPD, demás características serán identificadas fácilmente por la pericia del ingeniero eléctrico.[5] Adicionalmente, es recomendado aguas abajo en equipos que el usuario considere sensibles regletas que funcionen como SPD tipo 3.

Optimización de I_n para DPS Tipo 2, conforme a las recomendaciones de ABB, sobre la base de la densidad de descargas Ng			
Ng	< 2	$2 \leq Ng < 3$	$3 \leq Ng$
I_n (kA)	5	20	30
I_{max} (kA)	15	40	70

Figura 4: Criterios de selección de ABB.[8]

Caso Real

En este caso real, un centro de datos bancario en Florida, ubicado en una zona con altísima incidencia de rayos, recibió un impacto directo en su acometida eléctrica de 480 V. El rayo destruyó el medidor del servicio, pero ningún equipo interno resultó dañado y el centro de datos continuó operando sin interrupciones. Esto fue posible gracias a un sistema de puesta a tierra en cobre de baja resistencia y una protección en capas con SPDs dimensionados para cada nivel: un SPD principal en la entrada de 200 kA que derivó el grueso del impulso, SPD en los paneles de distribución de 100 KA que protegieron los circuitos alimentando los UPS y las cargas críticas, y unidades más pequeñas de 20 KA en circuitos como alarmas y líneas secundarias, además de supresores tipo regleta y protección local en los puestos de trabajo. Cada dispositivo absorbió y derivó parte de la corriente de impulso, reduciendo progresivamente la tensión residual antes de que la sobretensión llegara a los equipos sensibles. Además, las conexiones en cobre grueso (4/0) y las uniones exotérmicas mantuvieron baja la resistencia a tierra ($< 5 \Omega$), lo que permitió que los SPDs funcionaran correctamente. [10]

Conclusión

El SPD da un tratamiento funcional al transitorio, este debe entenderse como unidad para luego poder integrarlo en la instalación eléctrica como un sistema, es un dispositivo en donde su vida útil depende de ciertos factores en donde varios pueden llegar a ser aleatorios, se recurre a la estadística y probabilidad de eventos para su dimensionamiento mas predomina la incertidumbre, por lo que es un dispositivo que su indicador de estado de vida útil y su continua revisión es esencial para asegurar un correcto funcionamiento durante el tiempo.

Referencias

- [1] ABB, “No escucho, ¿Qué hago?”, Consultado: el 1 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/default-document-library/supresores-de-sobretensiones-conceptos-y-gu%C3%A3Das-de-selecci%C3%B3n-\(002\).pdf?sfvrsn=20a19808_2](https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/default-document-library/supresores-de-sobretensiones-conceptos-y-gu%C3%A3Das-de-selecci%C3%B3n-(002).pdf?sfvrsn=20a19808_2)
- [2] “Tensiones Transitorias Principios Básicos”, Consultado: el 1 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.cnfl.go.cr/contenido/documentos/eficiencia/tensiones_transitorias.pdf
- [3] “Protege tu hogar de rayos y sobretensiones eléctricas | SmartEnergy”. Consultado: el 1 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://smartenergy.com/energyguides/protect-your-home-against-power-surges/?lang=es>
- [4] Esteban Josué Araya Porras, ““Diagnóstico de la calidad de la energía y evaluación de las instalaciones eléctricas en la Represa Hidroeléctrica Pirrís”. Consultado: el 1 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/7357/Diagnostico_calidad_energia_evaluacion_instalaciones_electricas_rempresa_hidroelectrica_pirris.pdf?sequence=1&isAllowed=true
- [5] A. Por, I. Cesar, y A. Morales Massella, “Análisis de la protección contra impactos directos de rayos y la coordinación de aislamiento en subestaciones modulares de distribución ROMULO ETDUARDO OROZCO MIRANDA”, Consultado: el 1 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0537_EA.pdf
- [6] F. Javier y G. Moreno, “UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO”, Consultado: el 1 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/RepoFi/18821/1/Tesis.pdf>
- [7] S. De, E. De Posgrado, G. G. God’, y G. Zamora, “UNIVERSIDAD DE COSTA RICA”, 2020. Consultado: el 1 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://share.google/2nBGXRLGx5SKHLIR8>
- [8] “Pacífico central es la zona con más rayería en Costa Rica | La Nación”. Consultado: el 1 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nacion.com/ciencia/aplicaciones-cientificas/pacifico-central-es-la-zona-con-mas-rayeria-en-costa-rica/M5B6PALB3ZEXHJBDQIPISQMWWU/story/>
- [9] “When Lightning Strikes: Understanding Power Surge Damage – Insurance Claim Recovery Support-Public Insurance Adjusters”. Consultado: el 1 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://insuranceclaimrecoverysupport.com/lightning-causing-power-surges/>
- [10] “Electrical: Power Quality - Florida Credit Union Data Center Shrugs Off Direct Lightning Hit”. Consultado: el 1 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://copper.org/applications/electrical/pq/casestudy/suncoast.html>