

Caracterización completa de sags de tensión: una alternativa para alcanzar la calidad de energía

*Édgar Andrés Zúñiga Medina**, *Carlos Andrés Vasco García***
(Recibido el 11 de marzo de 2002)

Resumen

Se presenta qué es la calidad de la energía y cómo ésta puede llegar a influir negativamente en los procesos de automatización, en qué consisten los sags de tensión, cuáles son los problemas que estos pueden ocasionar sobre la calidad de energía y la metodología que lleva a una caracterización completa del fenómeno sag. Una vez se identifican los problemas que presentan las diferentes cargas sensibles conectadas a un sistema de potencia, se procede a establecer que la causa es la mala calidad de la energía eléctrica suministrada a las cargas; entre las causas más comunes están los sags de tensión los cuales requieren ser caracterizados para disminuir su impacto negativo sobre los procesos industriales.

----- *Palabras clave:* sags, subtensiones, calidad de la energía, caracterización.

Complete characterization of voltage sags: an alternative to achieve energy quality

Abstract

In this paper, the meaning of the power quality and its negative influence in the automation processes are presented. Voltage sags, the problems they cause and a methodology to characterize the phenomenon are also presented. Once the problems associated with the different sensible loads connected to a power system are identified, the cause of the bad quality of the electrical energy provided those loads is then established; voltage sags are one of the most common phenomenon that requires characterization in order to diminish their negative impact on the industrial processes.

----- *Key words:* voltage sags, under-voltages, power quality, characterization.

* Ingeniero Electricista de la Universidad de Antioquia y miembro activo del GIMEL. eeazm394@udea.edu.co.

** Ingeniero Electricista de la Universidad de Antioquia. cvasco@elektra.udea.edu.co.

Introducción

Hablar de calidad de la energía es hablar de excelencia en la prestación del servicio y en los estándares técnicos de tensión. Para lograr el estado de excelencia en los estándares técnicos, es necesario mantener un control permanente sobre las variables eléctricas del sistema.

Infortunadamente esto no siempre se logra ya que existen varios fenómenos electromagnéticos que atentan contra las condiciones ideales de energía. Uno de estos fenómenos electromagnéticos es el sag o subtensión transitoria, el cual está entre los eventos que hacen que las industrias pierdan anualmente miles de millones de pesos por interrupciones en sus procesos.

Este artículo fue desarrollado a partir del proyecto de grado “Caracterización de sags en una de las subestaciones de la Universidad de Antioquia” y con el procedimiento planteado, es posible tomar decisiones para minimizar el impacto negativo de los sags sobre las cargas sensibles.

Calidad de la energía

Este tema está despertando cada vez más el interés, no sólo de las compañías de comercialización y distribución de energía sino también, de los clientes o usuarios finales [1]. Este concepto no corresponde a un solo tipo de fenómenos que pueden ocurrir en los sistemas de distribución de energía sino, que por el contrario, es un concepto global que encierra una gran cantidad de fenómenos de diferente naturaleza y que pueden ocurrir indistintamente en los sistemas de generación, transmisión, distribución o directamente en las instalaciones del usuario final.

Los temas o fenómenos incluidos en el concepto de calidad de la energía no son nuevos y, por el contrario, muchos de ellos han sido de interés desde la aparición de la misma energía eléctrica como actividad industrial; lo que sí es nuevo, es que en la actualidad todos estos temas son tratados por la ingeniería desde un punto de vista más integral y no como fenómenos aislados.

Existen cuatro razones fundamentales que sustentan el interés creciente en la calidad de la energía eléctrica:

- Los equipos instalados por los usuarios finales y que constituyen la carga de los sistemas de potencia, son cada vez más sensibles a las variaciones en la calidad de la energía eléctrica comparados con los equipos utilizados en el pasado. Muchos de los equipos nuevos contienen sistemas de protección y control basados en microprocesadores y dispositivos de electrónica de potencia que son sensibles a muchos tipos de perturbaciones.
- Actualmente se hace mayor énfasis en la *eficiencia general de los sistemas de potencia*, que se manifiesta en la mayor utilización de equipos para reducir las pérdidas en el sistema, como controles de velocidad de alta frecuencia para motores y condensadores para el mejoramiento del factor de potencia, entre otros. La utilización generalizada de este tipo de equipos está teniendo como resultado un incremento en los niveles de armónicos que se presentan en todo sistema de distribución de energía.
- Los usuarios de los sistemas de distribución se están informando cada vez más acerca de los temas relacionados con la calidad de la energía eléctrica, como interrupciones, depresiones de tensión, armónicos y transitorios debidos a la conmutación de equipos, y está exigiendo a sus operadores de red que mejoren la calidad de la potencia eléctrica suministrada.
- En la actualidad, muchos procesos industriales están automatizados y hacen parte de instalaciones integradas, así como las redes de distribución están interconectadas. Los procesos integrados causan que la falla de un componente tenga vastas consecuencias.

Mucho más importante que estas razones, es el interés general por incrementar la productividad de los clientes de los comercializadores y distri-

buidores. Los fabricantes de equipos se esmeran por producir maquinaria cada vez más rápida, más productiva y más eficiente. Para las compañías que suministran la energía es importante fomentar estos esfuerzos, porque ello significa que sus clientes serán más productivos y ayuda a aplazar grandes inversiones en subestaciones y en generación. Sin embargo, es particularmente cierto que los equipos instalados para mejorar la productividad de los usuarios finales, son también, muy frecuentemente los equipos que más sufren con la mayoría de las perturbaciones comunes en el sistema de potencia, y estos mismos equipos son muchas veces la fuente de problemas adicionales de calidad de la energía eléctrica.

Definición de calidad de la energía eléctrica

Cada uno de los agentes implicados en los procesos de producción, transporte y utilización de la energía eléctrica puede tener una definición diferente del concepto de calidad de la energía eléctrica, dependiendo de su propio punto de vista. Por ejemplo, los distribuidores pueden definir el término en función de la confiabilidad, y pueden exhibir estadísticas con las cuales demuestran una alta confiabilidad de sus sistemas de distribución. Los fabricantes de equipos la pueden definir como aquellas características de la potencia

suministrada que les permiten a sus equipos operar apropiadamente; dichas características pueden ser diferentes para cada tipo de equipo y, más aún, para equipos similares pueden ser diferentes según el fabricante. Sin embargo, el concepto de calidad de la energía eléctrica debe estar finalmente orientado hacia el cliente, y el punto de vista del mismo tiene prioridad. Por tanto, haciendo énfasis en el punto de vista del cliente o usuario final, un problema de calidad de la potencia eléctrica puede definirse como: "Cualquier problema en la potencia que se manifiesta en desviaciones en la tensión, la corriente o la frecuencia y que produce como resultado una falla o una mala operación en los equipos del usuario" [1].

La idea central de calidad de energía es: "entregar o recibir energía siempre en condiciones ideales (de magnitud, frecuencia y forma de onda), que permita el desarrollo y funcionamiento óptimo de los diferentes procesos asociados al sistema eléctrico".

Un fenómeno que está atentando contra ese *desarrollo y funcionamiento óptimo* es el sag de tensión; en qué consiste y cómo se debe caracterizar para obtener herramientas de control sobre el mismo es lo que se tratará a continuación.

En la figura 1 se puede observar un ejemplo de sag de tensión.

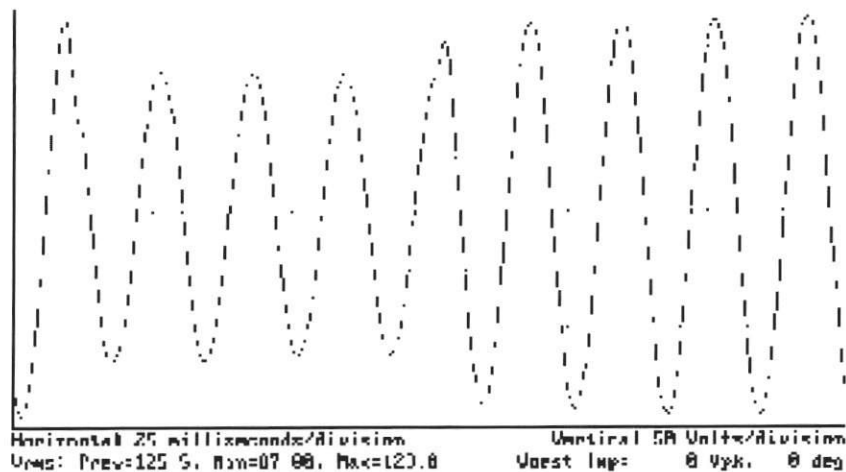


Figura 1 Ejemplo de sag con una magnitud de 73% y una duración 58 ms

Definición

Un sag (dip. para IEC) es una reducción en el valor rms de la tensión que está entre 0,1 p. u. y 0,9 p. u., dura entre 0,5 ciclos y 1 minuto (según IEEE) y se caracteriza porque ocurre a frecuencia industrial (en Colombia 60 Hz) [2].

Clasificación

Se clasifican de acuerdo con la duración (IEEE en la Recomendación 1159 de 1995) y al perfil de tensión del evento (basada principalmente en la causa que genera los sags).

Tabla 1 Clasificación de los sags

Los Sags se clasifican			
Según la duración		Según el perfil de tensión	
Tipo	Duración	Tipo	Característica general
Instantáneo	0,5-30 ciclos	Rectangular	Debidos a fallas
Momentáneo	30 ciclos -3 s		
Temporal	3 s - 1 min	No rectangular	Arranques de motores

Sags rectangulares [3]

Se caracterizan por ser caídas de tensión que presentan un perfil de tensión de forma rectangular. Generalmente, este tipo de sag se da cuando el aumento de la corriente que circula por un sistema eléctrico de potencia (radial o interconectado) en el momento de una falla, hace que la caída de tensión a través de los elementos que componen el circuito aumente, provocándose así subtensiones en diferentes puntos del sistema con una duración igual al tiempo que está sometido el sistema a la corriente de falla. En la figura 2 se presenta un sistema típico de distribución en el que se presenta una falla trifásica transitoria en uno de los alimentadores que lo componen. El interruptor F2 que protege el alimentador fallado, esta controlado por un relé con función de recierre programado para dos disparos.

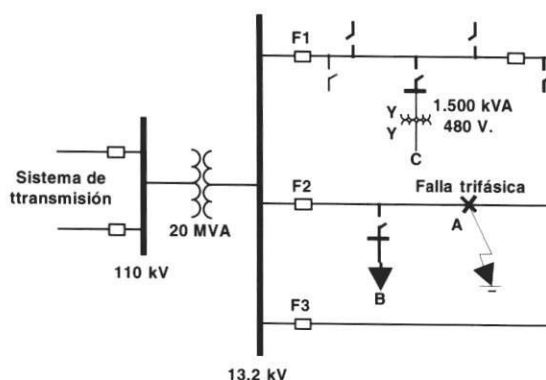


Figura 2 Ubicación de falla en sistema de distribución

En la figura 3 se presenta el perfil de tensión RMS en tres puntos del sistema de la figura 2 durante la evolución y posterior despeje de la falla; esta se aclara antes de F2 efectuar el segundo recierre, lo que hace que una vez se dé el segundo disparo el alimentador quede en operación normal. Despreciando el arco generado en el accionamiento del interruptor, se observa que el sag experimentado en el sistema es rectangular; la magnitud es función de la corriente, de la impedancia de falla y de los elementos del circuito y la duración depende del tiempo programado en el dispositivo de protección.

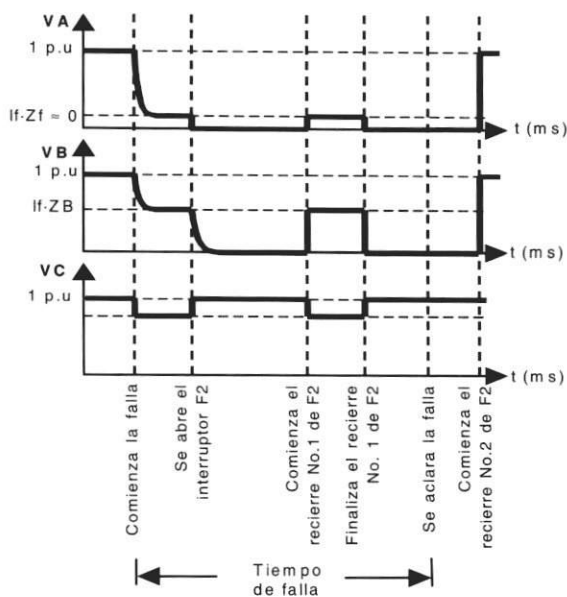


Figura 3 Comportamiento de la tensión RMS

El ejemplo ilustrado en este artículo es aplicado en un sistema de distribución; para un sistema de transmisión, los análisis son un poco más complejos, ya que además se debe tener en cuenta la conexión de generadores y la interconexión entre sí de las subestaciones componentes del sistema.

Sags no rectangulares [3]

Este tipo de sag se debe a dos causas fundamentales; arranques de motores de inducción y fallas en un sistema eléctrico de potencia (SEP) con cargas rotativas.

Durante el arranque de un motor de inducción, este toma de la red una corriente varias veces mayor que la nominal (usualmente de cinco a seis veces) hasta alcanzar la velocidad de régimen permanente. El tiempo que toma este para llegar a la velocidad nominal está, por lo regular, entre algunos segundos y un minuto. La caída de tensión debida a este aumento de corriente depende de los parámetros del SEP.

Todos los tipos de máquinas rotativas, ya sean motores de inducción o motores sincrónicos, sufrirán pérdida de energía cinética durante un sag. Luego de experimentar la subtensión, la máquina entra en un proceso de reacceleración que ocasiona un sag atenuado en el tiempo y que es función de la velocidad del motor. En la figura 5, se muestra la evolución de un sag, influido por la desaceleración de la máquina con impedancia Z_M , debido a una falla en el SEP que alimenta la industria de la figura 4.

La magnitud del sag experimentado por las cargas sensibles en el momento del arranque del motor estará dada por (si no hay transformador dedicado):

$$V_{sag} = \frac{Z_M}{Z_F + Z_M} \quad (1)$$

Si se instala un transformador dedicado para el motor, la impedancia de dicho transformador hace que la magnitud del sag aumente y se haga menos severo para las cargas críticas.

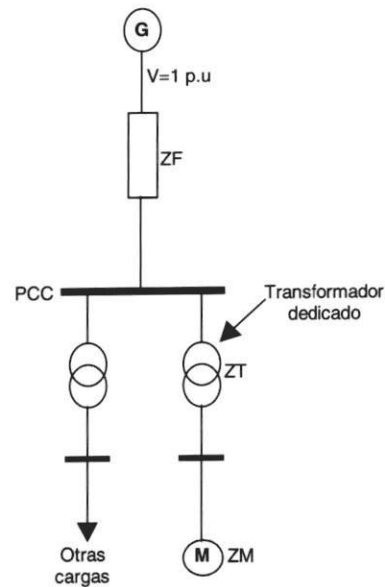


Figura 4 Distribución típica de la carga en una industria

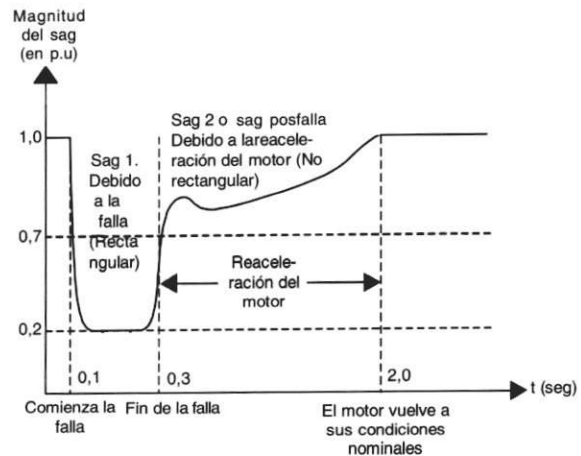


Figura 5 Evolución del sag en el PCC de la figura 4

Caracterización del fenómeno sag

El fenómeno sag es uno de los problemas más comunes y perjudiciales en los SEP. Esto crea la necesidad de implementar una metodología para caracterizar el fenómeno de forma que sea posible controlar el impacto de los eventos electromagnéticos sobre las cargas más sensibles. La metodología planteada consiste en caracterizar no

sólo los sags ocurridos en el SEP sino que además los sags nocivos para las cargas sensibles conectadas a éste. En la figura 6 se ilustran las actividades que se deben realizar en una caracterización completa del fenómeno.

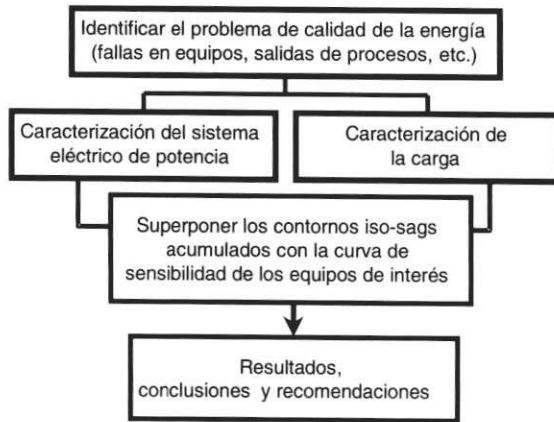


Figura 6 Flujograma para caracterizar completamente el fenómeno sag

Identificación del problema

Se debe tener en cuenta que no sólo la falla de equipos o los problemas en su funcionamiento, indican que se debe realizar un estudio. También antes de conectar un equipo a un SEP se deben inspeccionar las condiciones de la energía para determinar la factibilidad de la conexión.

Caracterización del SEP

Puede hacerse de dos formas: utilizando la simulación basada en análisis estadístico o monitoreando.

Para realizar el estudio por medio de la simulación se deben desarrollar los siguientes pasos:

1. Definir el procedimiento para hacer el estudio.
2. Identificar las componentes y características de los elementos que constituyen el SEP que se va a analizar.

3. Consultar la existencia de estudios similares y la estadística de falla de los diferentes elementos del SEP.
4. Conocer las características de los diferentes tipos de protecciones usadas en el SEP de interés.
5. Aplicar un método de análisis para realizar una determinación estocástica de los sags de tensión, simular y presentar resultados [3].

Para realizar el estudio por medio del monitoreo, es necesario contar con una infraestructura apta para este fin y con el tiempo necesario para conectar los analizadores de redes. Los pasos para realizar el monitoreo son (IEEE 1159 de 1995):

1. Identificar los puntos estratégicos para realizar el monitoreo.
2. Calcular el tiempo mínimo necesario para realizar el monitoreo y efectuarlo [4].
3. Organizar y tabular los datos obtenidos en el monitoreo [5]; para organizarlos se puede seguir el esquema presentado en la tabla 2.

Este último paso es el resultado final de la simulación. En este punto ya se cuenta con la información necesaria para realizar las gráficas caracterizadoras del SEP.

Diagrama de densidad de sags [4]

Se representa generalmente por medio de una gráfica de barras tridimensional. Se realiza a partir de la tabla 3, la cual presenta el número de subtensiones clasificadas en cierto rango de magnitud y duración; cada celda de esta tabla muestra la densidad de sags para un rango de magnitud y duración.

Diagrama de sags acumulados [4]

El diagrama de sags acumulados se basa en la tabla del mismo nombre que se basa en los datos de densidad de sags; el valor de cada celda se calcula utilizando la siguiente fórmula:

Tabla 2 Tabla para organizar los datos registrados en un monitoreo de calidad de la energía [5]

Número	Evento	Amplitud voltios	Duración (seg)	Fecha y tiempo	%Vrms	Causa

Tabla 3 De densidad de sags (estudio de EFI)

Magnitud en p.u	Duración (seg)					
	0-0,1	0,1-0,5	0,5-1	1-3	3-20	20-60
0,7-0,9	22,5	13,5	5,0	2,0	0,1	0,1
0,4-0,7	4,5	2,0	0,1	0,1	0,1	0,1
0,1-0,4	1,0	0,5	0,1	0,3	0,3	0,2
0,0-0,1	0,3	0,1	0,01	0,1	0,2	5,0

$$SAGSACU_{MD} = \sum_{m=0}^M \sum_{d=D}^{dmax} (\#SAGS)_{md} \quad (2)$$

Donde:

$SAGSACU_{MD}$: Número de sags con magnitud menor a M y duración mayor a D.

$(\#SAGS)_{md}$: Número de sags con magnitud m y duración d.

Se toman los sags con magnitud menor a M y con duración mayor a D ya que mientras los sags sean de menor magnitud y mayor duración serán más nocivos (ver figuras 7 y 8).

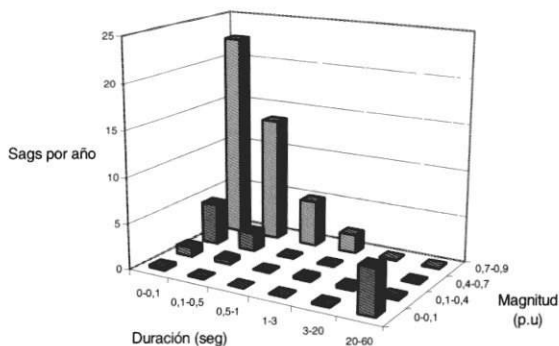


Figura 7 Diagrama de densidad de sags correspondiente a la tabla 3

Tabla 4 De sags acumulados (estudio de EFI)

Magnitud en p.u.	Duración (seg)					
	0	0.1	0.5	1	3	20
0,9	58,21	29,91	13,81	8,6	6,1	5,4
0,7	15,01	9,21	6,61	6,4	5,9	5,3
0,4	8,11	6,81	6,21	6,1	5,7	5,2
0,1	5,71	5,41	5,31	5,3	5,2	5,0

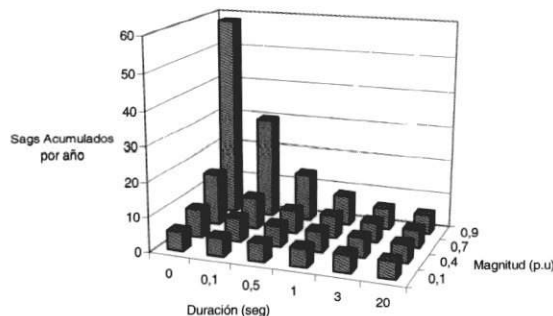


Figura 8 Diagrama de sags acumulados correspondiente a la tabla 4

Diagrama contornos ISOSAGS acumulados [6]

Los valores mostrados en la tabla 4 pueden verse como una función bidimensional de número de sags contra magnitud y duración. Para realizar este gráfico es necesario convertir la tabla 4 (o la

figura 8) en un conjunto de líneas o contornos similares a una curva de nivel en un mapa geográfico (ver figura 9).

Caracterización de las cargas

La caracterización de las cargas se realiza en dos partes:

1. Identificar los equipos sensibles al fenómeno sag.
2. Obtener las curvas de sensibilidad de los equipos sensibles. En estas se encuentra la información de cuáles sags son más nocivos para el equipo. (Ver figura 10)

Superponer contornos ISOSAGS con las curvas de sensibilidad

Una vez están caracterizados el equipo sensible y el sistema de potencia, es posible obtener información valiosa de la combinación de las gráficas obtenidas anteriormente. Simplemente se deben superponer ambas gráficas, en la misma escala, para determinar cuál es el impacto que tienen las condiciones del sistema de potencia sobre el equipo sensible.

Resultados, conclusiones y recomendaciones de la caracterización completa

Con la superposición de las gráficas ya realizada, es posible recomendar al operador de red determinadas prácticas de protección y, a los usuarios, nuevas distribuciones de la carga y adquisición de dispositivos custom power para mitigar los efectos nocivos de los sags sobre las cargas más sensibles.

Conclusiones

La caracterización completa de sags es una metodología que deben instaurar las empresas de energía y usuarios finales con el fin de crear una compatibilidad electromagnética adecuada entre las cargas y el SEP.

Con la realización de este trabajo queda explícito que un problema tan grave y que puede causar grandes pérdidas económicas, como es el fenómeno sag, debe ser tratado con una metodología que permita detectar sus particularidades y tomar medidas para solucionarlo en cualquier nivel.

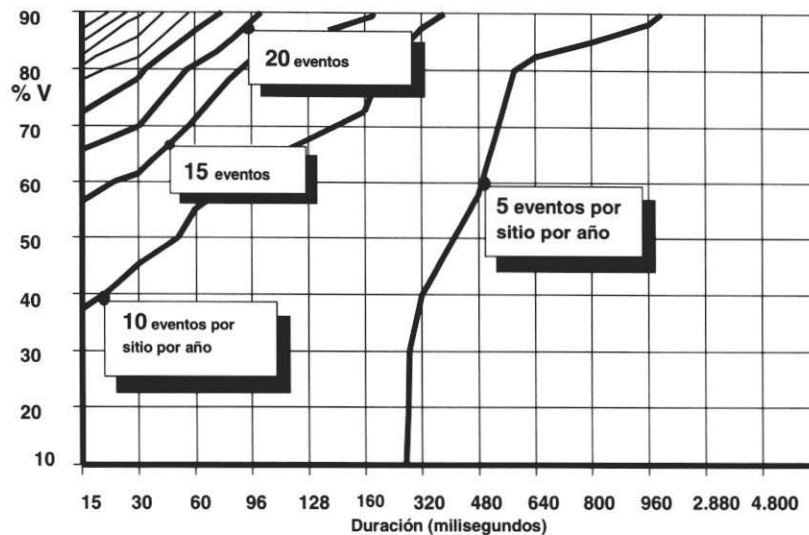


Figura 9 Contornos ISOSAGS acumulados [6]

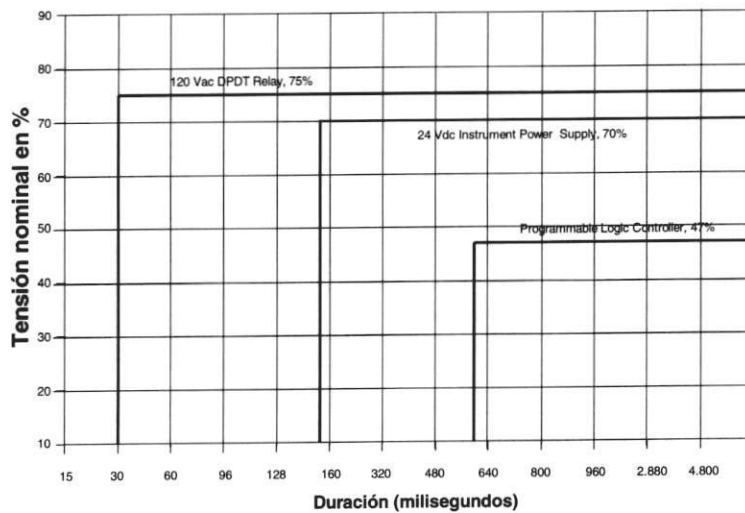


Figura 10 Curvas de sensibilidad de cargas críticas [6]

La calidad de la energía eléctrica es fundamental para cualquier proceso industrial y como tal deben adoptarse medidas que procuren la excelencia y disminuyan los problemas en el servicio eléctrico.

Referencias

1. Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Beaty, H.W. *Electrical Power Systems Quality*. New York: McGraw-Hill. 1996.
2. IEEE Standar 1159 de 1995. *Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality*.
3. IEEE Standar 493 de 1997. *Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*.
4. M.H.J. Bollen, *Understanding power quality problems – voltage sags and interruptions*, New York: IEEE Press. 2000.
5. W.H. Zapata, L. Cardona. *Planeamiento y análisis de estudios de calidad de potencia eléctrica*. Tesis Maestría. 1997.
6. IEEE Standar Draft P1346 de 1997. *Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment*.