

**METODOLOGÍA PARA CARACTERIZAR LOS SAG DE TENSIÓN EN UN  
PUNTO ESTRATÉGICO DEL SISTEMA DE POTENCIA.**

**LUIS RAFAEL CASTRO ALVEAR.  
FRANCISCO ANDRÉS MAZZEO HERNÁNDEZ.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR.  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
CARTAGENA D.T. Y C.**

**2004**

**METODOLOGÍA PARA CARACTERIZAR LOS SAG DE TENSION EN UN  
PUNTO ESTRATÉGICO DEL SISTEMA DE POTENCIA.**

**LUIS RAFAEL CASTRO ALVEAR.  
FRANCISCO ANDRÉS MAZZEO HERNÁNDEZ.**

**Monografía para optar por el título de  
Ingeniero Electricista.**

**Asesor  
HEDIER HUMBERTO LASTRE GÓMEZ  
Ingeniero Electricista  
Magíster En Potencia Eléctrica**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR.  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
CARTAGENA D.T. Y C.**

**2004**

**Nota de aceptación.**

---

---

---

---

**Presidente del jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Cartagena, Mayo de 2004**

## **AUTORIZACIÓN**

**Cartagena D.T. Y C.**

**Yo Luis Rafael Castro Alvear, identificado con cedula de ciudadanía numero 73'577.735, autorizo a la Universidad Tecnológica De Bolívar para hacer uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catalogo online de la Biblioteca.**

---

**LUIS RAFAEL CASTRO ALVEAR**

**Debe registrarse esta autorización ante notario público.**

## **AUTORIZACIÓN**

**Cartagena D.T. Y C.**

**Yo Francisco Andrés Mazzeo Hernández, identificado con cedula de ciudadanía numero 9´022.053, autorizo a la Universidad Tecnológica De Bolívar para hacer uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catalogo online de la Biblioteca.**

---

**FRANCISCO ANDRÉS MAZZEO HERNÁNDEZ**

**Debe registrarse esta autorización ante notario público.**

Cartagena, Mayo de 2004.

Señores

**COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

La ciudad.

Respetados señores.

Anexo a la presente le estamos haciendo entrega de la monografía titulada **“METODOLOGÍA PARA CARACTERIZAR LOS SAG DE TENSIÓN EN UN PUNTO ESTRATÉGICO DEL SISTEMA DE POTENCIA”** como requisito para obtener el título de Ingeniero Electricista.

Cordialmente,

---

**LUIS RAFAEL CASTRO  
ALVEAR**

---

**FRANCISCO ANDRÉS MAZZEO  
HERNÁNDEZ**

Cartagena, Mayo de 2004.

Señores

**COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

La ciudad.

Respetados señores.

Como asesor de la monografía titulada **“METODOLOGÍA PARA CARACTERIZAR LOS SAG DE TENSIÓN EN UN PUNTO ESTRATÉGICO DEL SISTEMA DE POTENCIA”**, hago presentación formal de dicha monografía. La cual fue revisada en su totalidad cumpliendo con los objetivos propuestos.

---

**Ing. HEDIER HUMBERTO LASTRE GÓMEZ**  
**Ingeniero Electricista**  
**Magíster En Potencia Eléctrica**

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Sag de tensión ideal.	12
<b>Figura 2.</b> Argumento del voltaje fundamental para la onda seno ideal y la producida durante el Sag de tensión.	14
<b>Figura 3.</b> Voltaje moderado de un sag de tensión con cambios en el ángulo de la fase.	15
<b>Figura 4.</b> Sag moderado con el punto de iniciación a $90^\circ$ y punto de recuperación a $90^\circ$ .	16
<b>Figura 5.</b> Aclaración de los conceptos de magnitud y duración en un grafica del valor rms de la fundamental de la onda.	17
<b>Figura 6.</b> Sag de tensión en una fase con un cambio negativo en el ángulo de fase.	18
<b>Figura 7.</b> Clasificación de sag de tensión.	21
<b>Figura 8.</b> Subclasificación de sag de tensión.	22
<b>Figura 9.</b> Forma de voltaje durante un sag de tensión en un sistema trifásico provocado por una falla desbalanceada.	26
<b>Figura 10.</b> Forma de onda de un sag de tensión debido al arranque de un motor de inducción.	28
<b>Figura 11.</b> Forma de onda de voltaje durante la energización de un transformador.	29
<b>Figura 12.</b> Flujograma de procedimiento lógico y organizado para la caracterización de sag de tensión.	41
<b>Figura 13.</b> Mapa de Sag dentro del sistema en estudio ocasionados por una falla determinada.	60



<b>Figura 14.</b>	Ejemplo de la curva de CREMA.	65
<b>Figura 15.</b>	Curva ITI.	66
<b>Figura 16.</b>	Curva CBEMA superpuesta con curva ITIC.	67
<b>Figura 17.</b>	Valores típicos de sensibilidad de sag de tensión en los contactores.	68
<b>Figura 18.</b>	Algunos contactores utilizados para prueba.	69
<b>Figura 19.</b>	Lámpara de descarga a gas.	69
<b>Figura 20.</b>	Curvas de sensibilidad de diferentes tipos de lámparas.	71
<b>Figura 21.</b>	Curva de sensibilidad de voltaje para computadores.	72
<b>Figura 22.</b>	Curvas de Inmunidad de voltaje para PLCs	73
<b>Figura 23.</b>	Diagrama de densidad de Sag correspondiente a la tabla 8.	75
<b>Figura 24.</b>	Diagrama de Sag acumulados correspondiente a la tabla 9.	77
<b>Figura 25.</b>	Contornos iso Sag acumulados por año.	79
<b>Figura 26.</b>	Diagrama de contornos iso-Sag, esta recomendado en IEEE Standar 493 y en IEEE Standar 1346.	80
<b>Figura 27.</b>	Grafica recomendada por IEEE Std. 1346-1998 y IEEE Std 1346-1198 Diagrama de contornos.	83
<b>Figura 28.</b>	El diagrama de contornos es superpuesto con la curva de sensibilidad o de voltaje.	84

## LISTA DE TABLAS

		Pág.
<b>Tabla 1.</b>	Clasificación de los fenómenos electromagnéticos según IEC.	6
<b>Tabla 2.</b>	Clasificación de los fenómenos electromagnéticos según IEEE 1159 de 1995.	7
<b>Tabla 3.</b>	Clasificación de los Sag de acuerdo a la duración (IEEE 1159 de 1995).	8
<b>Tabla 4.</b>	Tiempos de operación de dispositivos de protección utilizados en sistemas eléctricos de potencia (influyen en la duración de los sag).	9
<b>Tabla 5.</b>	Resultados numéricos de sag de tensión en una fase.	19
<b>Tabla 6.</b>	Tiempos mínimos de monitoreo para alcanzar resultados con errores determinados.	48
<b>Tabla 7.</b>	Formato para organizar los datos registrados en un monitoreo de calidad de la energía.	52
<b>Tabla 8.</b>	Densidad de Sag en la que se muestran para cada magnitud y duración el número de Sag al año.	75
<b>Tabla 9.</b>	Tabla de Sag acumulados.	77
<b>Tabla 10.</b>	Rangos de tensión tolerada de varios equipos usados frecuentemente.	81

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	1
<b>1. CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA</b>	<b>3</b>
<b>1.1 DESCRIPCIÓN Y DEFINICIÓN DE SAG DE TENSIÓN.</b>	<b>8</b>
<b>1.1.1 Magnitud</b>	<b>9</b>
<b>1.1.2 Valor Efectivo</b>	<b>10</b>
<b>1.1.3 Voltaje Drop</b>	<b>12</b>
<b>1.1.4 Cambio Del Ángulo De Fase (Fenómeno)</b>	<b>12</b>
<b>1.1.5 Cambio Del Ángulo De Fase (Cuántico)</b>	<b>15</b>
<b>1.1.6 Punto De Iniciación Del Sag De Tensión</b>	<b>15</b>
<b>1.1.7 Punto De Recuperación De La Onda De Tensión</b>	<b>16</b>
<b>1.1.8 Duración</b>	<b>16</b>
<b>1.2. EJEMPLO DE CARACTERIZACIÓN DE UN SAG EN UNA SOLA FASE</b>	<b>17</b>
<b>1.3. CLASIFICACIÓN DE SAG DE TENSIÓN EN UN SISTEMA TRIFÁSICO</b>	<b>19</b>
<b>1.3.1 Tipo A</b>	<b>20</b>
<b>1.3.2 Tipo B</b>	<b>20</b>
<b>1.3.3 Tipo C</b>	<b>20</b>
<b>1.3.4 Tipo D</b>	<b>21</b>
<b>1.4 CAUSAS DE SAG DE TENSIÓN</b>	<b>22</b>
<b>1.4.1 Fallas Temporales</b>	<b>24</b>
<b>1.4.2 Arranque De Motores.</b>	<b>26</b>
<b>1.4.3 Energización De Transformadores</b>	<b>27</b>
<b>1.5 EFECTOS DE LOS SAG DE TENSIÓN</b>	<b>30</b>
<b>1.5.1 Computadores Y Cargas Electrónicas.</b>	<b>30</b>

<b>1.5.2</b>	Telecomunicaciones.	31
<b>1.5.3</b>	Contactores De Motores Y Relés Electromecánicos.	31
<b>1.5.3.1</b>	Contactores	31
<b>1.5.3.2</b>	Relés Con Bobinas De Mínima Tensión	31
<b>1.5.3.3</b>	Relés De Baja Tensión	32
<b>1.5.4</b>	Lámparas De Descarga De Alta Intensidad (HID).	32
<b>1.5.5</b>	Controladores Lógicos Programables (PLC's).	32
<b>1.5.6</b>	Motores Eléctricos	33
<b>1.5.6.1</b>	Motores Síncronos	33
<b>1.5.6.2</b>	Motores Asíncronos	33
<b>1.5.6.3</b>	Motores De Corriente Continua Alimentados Por Tiristores	34
<b>2.</b>	<b>PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SAG DE TENSIÓN</b>	<b>37</b>
<b>2.1</b>	Caracterización De Los Sag De Tensión	37
<b>2.2</b>	Inmunidad De Equipo	37
<b>2.3</b>	Mitigación	38
<b>2.4</b>	Obtener El Comportamiento Esperado Del Sistema.	39
<b>2.5</b>	Obtener la tensión tolerada del equipo.	39
<b>2.6</b>	Determinar el impacto esperado.	39
<b>2.7</b>	Flujograma De Procedimiento Lógico Y Organizado Para La Caracterización De Sag De Tensión	40
<b>3.</b>	<b>MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE SAG DE TENSIÓN</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>MONITOREO</b>	<b>45</b>
<b>3.1.1</b>	Identificar Los Puntos Estratégicos Para Realizar El Monitoreo.	45
<b>3.1.2</b>	Calcular El Tiempo Mínimo Necesario Para Realizar El Monitoreo Y Efectuarlo.	46
<b>3.1.3</b>	Organizar Y Tabular Los Datos Obtenidos En El Monitoreo.	50

<b>3.2</b>	<b>SIMULACIÓN O PREDICCIÓN ESTOCÁSTICA</b>	<b>51</b>
<b>3.2.1</b>	Identificar El Problema A Tratar	54
<b>3.2.2</b>	Definir El Plan De Trabajo O El Procedimiento Para Hacer El Estudio.	54
<b>3.2.3</b>	Identificar Las Componentes Y Características De Los Elementos Que Constituyen El Sistema Eléctrico De Potencia En El Cual Se Va A Trabajar.	54
<b>3.2.4</b>	Consultar La Existencia De Estudios Similares Sobre El Mismo Sistema Eléctrico Y La Estadística De Falla De Los Diferentes Elementos Del Sistema.	55
<b>3.2.5</b>	Conocer Las Características De Los Diferentes Tipos De Protecciones Usadas En El Sistema Eléctrico De Potencia En Estudio.	55
<b>3.2.6</b>	Aplicar Un Método De Análisis Para Realizar Una Determinación Estocástica De Los Sag De Tensión, Simular Y Presentar Resultados.	56
<b>3.2.7</b>	Validar Los Resultados Obtenidos.	56
<b>3.3</b>	<b>MÉTODO DE LAS POSICIONES DE FALLA.</b>	<b>57</b>
<b>3.3.1</b>	Bases del método.	57
<b>3.3.2</b>	Múltiples Eventos.	58
<b>3.3.3</b>	Criterios Para La Elección De Una Posición De Falla.	60
<b>3.3.3.1</b>	Distancia Entre Las Posiciones De Falla.	61
<b>3.3.3.2</b>	Extensión Hasta La Posición De Falla (¿Hasta Qué Distancia Se Deben Considerar Las Fallas?).	62
<b>3.3.3.3</b>	Protección Contra Fallas.	62
<b>4.</b>	<b>CURVA DE SENSIBILIDAD O TOLERANCIA DE EQUIPOS</b>	<b>64</b>
<b>4.1</b>	<b>CBEMA e ITIC</b>	<b>64</b>

<b>4.1.1</b>	<b>Contactores Y Relays</b>	<b>68</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Lámparas De Descarga De Gas</b>	<b>69</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Computadoras Personales Y PLC</b>	<b>71</b>
<b>5.</b>	<b>PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN</b>	<b>74</b>
<b>5.1</b>	<b>DIAGRAMA DE DENSIDAD DE SAG</b>	<b>74</b>
<b>5.2</b>	<b>DIAGRAMA DE SAG ACUMULADOS</b>	<b>76</b>
<b>5.3</b>	<b>CONTORNOS ISO-SAG ACUMULADOS</b>	<b>78</b>
<b>6.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>85</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>89</b>

## RESUMEN

La calidad de potencia eléctrica es un tema de gran importancia en el mundo actual, cada día más generadores, transportadores, comercializadores, usuarios y en general todas las entidades que tienen relación con la energía eléctrica están virando sus ojos hacia esta dirección. Un tema de vital importancia dentro de la calidad de potencia eléctrica es el sag de tensión, fenómeno que genera muchos problemas y grandes pérdidas a los usuarios de la energía

Esta monografía describe el procedimiento para realizar un estudio de la calidad de la potencia eléctrica, es en particular un manual de metodología para la caracterización de los SAG de tensión en una sistema de potencia; es fundamental para que los estudiantes, técnicos e ingenieros electricistas, distribuidores de energía, generadores de energía, usuarios industriales, usuarios domésticos, entes reguladores y áreas afines sepan solucionar dicho problema.

Se dice que ha tenido lugar un fenómeno de Sag en un punto de la red eléctrica cuando la tensión de una o más fases cae repentinamente entre los límites de magnitud establecidos (0.9 p.u. y 0.1 p.u. del valor nominal) y se recupera al cabo de un tiempo determinado, generalmente con un rango de duración entre 0.5 - 30 ciclos (IEEE 1159 de 1995). Esta duración está directamente relacionada con la causa que genera los Sag, ya que esta depende del tiempo de operación de las protecciones de los sistemas de distribución o transmisión y del tiempo que tarda el arranque de las máquinas rotativas.

Usualmente, los SAG de tensión son clasificados por su duración y magnitud y representados en gráficos bidimensionales. Esta representación simplificada no considera las diferentes tensiones en cada fase del sistema trifásico y la variación de ángulo de fase que puede ocurrir debido a la propagación del disturbio. Los Sag son decrementos momentáneos típicamente causados por fallas remotas en

el sistema interconectado de transmisión y redes de distribución de energía de la empresa suministradora; usualmente estos fenómenos son asociados a fallas en los equipos o fallas temporales causadas por descargas atmosféricas, animales u otros factores naturales, pero también pueden ser causados por maniobra de grandes cargas o arranque de grandes motores al interior de la industria.

Para llevar a cabo un estudio de **Caracterización de los Sag de voltaje** es indispensable tener una metodología que se debe seguir para obtener una correcta y completa caracterización del fenómeno Sag de tensión. Para obtener esta información correcta y completa se requiere de un estudio, que se compone de tres pasos: **Obtener El Comportamiento Esperado Del Sistema**, es decir "El Número esperado de Sag con determinadas características" por medio del monitoreo y la simulación (método de posiciones de falla); luego **Obtener la tensión tolerada del equipo**, que es información acerca de la respuesta de un equipo ante un Sag determinado que puede ser tomando los valores típicos de tolerancia; finalmente **Determinar el impacto esperado**. Si la tensión tolerada del equipo y el comportamiento esperado del sistema están disponibles en un formato apropiado como lo son diagrama de sag acumulados y los diagramas ISO Sag, es posible determinar la frecuencia con que una pieza de un equipo se verá impactada por un número de eventos al año. Basado en los datos obtenidos en los pasos anteriores es posible tomar decisiones acerca de la fuente y los equipos recomendables para trabajar en un sistema determinado.

Luego de realizar el proceso completo para caracterizar los Sag de tensión es necesario tomar precauciones y tratar de reducir las consecuencias que estos conllevan, para esto se recomienda el uso de algunos dispositivos custom power en las instalaciones del usuario, la repartición de cargas en el circuito, la devolución de equipos a los fabricantes en caso necesario y hasta la exigencia a los operadores de red para que implementen acciones que lleven a la disminución de Sag nocivos a las instalaciones de los usuarios.



## INTRODUCCIÓN

La calidad de potencia eléctrica es un tema de gran importancia en el mundo actual, cada día más generadores, transportadores, comercializadores, usuarios y en general todas las entidades que tienen relación con la energía eléctrica están virando sus ojos hacia esta dirección. Un tema de vital importancia dentro de la calidad de potencia eléctrica es el sag de tensión, fenómeno que genera muchos problemas y grandes pérdidas a los usuarios de la energía

Esta monografía describe el procedimiento para realizar un estudio de la calidad de la potencia eléctrica, es en particular un manual de metodología para la caracterización de los SAG de tensión en una sistema de potencia; es fundamental para que los estudiantes, técnicos e ingenieros electricistas, distribuidores de energía, generadores de energía, usuarios industriales, usuarios domésticos, entes reguladores y áreas afines sepan solucionar dicho problema.

La monografía esta constituida por los siguientes capítulos:

El primer capítulo presenta a un poco de historia sobre calidad de potencia eléctrica, además hace referencia a la definición y descripción de Sag de tensión así como también se definen los principales parámetros que permitirán la correcta clasificación de los sag de tensión, y que son de gran utilidad a la hora de estimar sus posibles repercusiones y las medidas preventivas que se pueden aplicar.

El segundo capítulo hace referencia a las diferentes categorías en que son divididos los estudios de Sag de tensión, además se explica detalladamente la metodología que se

debe seguir para llevar a cabo una correcta y completa caracterización del fenómeno Sag que es la principal finalidad de esta monografía.

El tercer capítulo hace referencia a los métodos de predicción de Sag de tensión, parte muy importante para poder determinar la probabilidad de que ocurra este fenómeno en un determinado punto.

En el cuarto capítulo se describen las curvas de sensibilidad y tolerancia de equipos.

En el quinto capítulo se explica la forma de representar el comportamiento esperado en un punto específico del sistema en lo que tiene que ver con sag de tensión.

La última parte corresponde a los anexos, información de gran importancia para el desarrollo y comprensión de la presente monografía.

## 1. CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA

El término “Calidad De Potencia” fue mencionado por primera vez en el año 1968 en un estudio de la armada americana después de especificar la potencia requerida para un equipo electrónico e incluso el uso del equipo de monitoreo presento una visión global en el campo de calidad de potencia<sup>1</sup>.

Poco después, muchas publicaciones aparecían y aproximadamente al mismo tiempo, el término la calidad de voltaje que hace referencia a las variaciones lentas en la magnitud de voltaje se usó en los países escandinavos<sup>2</sup> y Unión Soviética<sup>3</sup>.

Desde ese entonces cada uno de los agentes involucrados en los procesos de producción, transporte y utilización de la energía eléctrica puede tener una definición diferente del concepto de calidad de la potencia eléctrica, dependiendo de su propio punto de vista.

Sin embargo, el concepto de calidad de la potencia eléctrica debe estar finalmente orientado hacia el cliente, y el punto de vista del mismo tiene prioridad. Por b tanto, haciendo énfasis en el punto de vista del cliente o usuario final, un problema de calidad de la potencia eléctrica puede definirse como:

---

<sup>1</sup> H.H. Kajihara, “*Quality Power For Electronics*”, *Electro-Technology*, Vol. 82, No.5, November 1968, pp. 46.

<sup>2</sup> P.M. Knoller and L. Lonnstam, “*Voltage Quality And Voltage Tendency Recorders*”, *Siemens-Review*, Vol. 36, No.8, August 1969, pp. 302.

<sup>3</sup> B.A. Konstantinov and G.L. Bagiev, “*Financial Losses Due To Deterioration Of Voltage Quality*”, *Electric-Technology-USSR*, Vol.1, pp. 120.

“Cualquier problema en la potencia que se manifiesta en desviaciones en la tensión, la corriente ó la frecuencia y que produce como resultado una falla o una mala operación en los equipos del usuario”<sup>4</sup>

La calidad de la potencia eléctrica es un tema que esta despertando cada vez más el interés no sólo de las compañías de comercialización y distribución de energía sino también en los clientes o usuarios finales. Este concepto no corresponde a un solo tipo de fenómenos que pueden ocurrir en los sistemas de distribución de energía sino 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 potencia eléctrica no son nuevos, 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 razones fundamentales que sustentan el creciente interés en el estudio de la calidad de la potencia eléctrica como se van a mencionar a continuación:

El aumentado actual de los equipos instalados por los usuarios finales y que constituyen la carga de los sistemas de potencia, los equipos nuevos son cada vez más sensibles a las variaciones en la calidad de la potencia eléctrica que 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 disturbios.

---

<sup>4</sup> Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Beaty, H.W., "Electrical Power Systems Quality", New York: McGraw-Hill, pp 65

Actualmente la eficiencia en los componentes generales de los sistemas de potencia, que se manifiesta en la mayor utilización de equipos para reducir las pérdidas en el sistema, tales como controles de velocidad de alta frecuencia para motores y sistemas de control para la compensación del factor de potencia, entre otros. La utilización generalizada de este tipo de equipos está trayendo como resultado un incremento en los niveles de armónicos que se presentan en todo sistema de distribución de energía.

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 consecuencias mucho más generales, produciendo costos muy altos debido a la pérdida de producto dañado y pérdida de tiempo de producción.

Mucho más importante que estas razones, es el interés general por incrementar la productividad, los fabricantes de equipos se esmeran por producir maquinaria cada vez más rápida, más productiva y más eficiente. 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 potencia eléctrica.

El fenómeno que se va a estudiar en este proyecto, es el SAG, el cual será definido a continuación y está catalogado como fenómeno conducido de baja frecuencia según IEC (ver tabla 1) y como una variación (disminución) de corta duración en la onda de tensión (según IEEE Std 1159 ver tabla 2).

<b>Clasificación De La IEC Para Fenómenos Que Causan Perturbaciones Electromagnéticas.</b>
Fenómenos conducidos de baja frecuencia. Armónicos e interarmónicos Sistemas de señal (portadora por línea de potencia) Fluctuaciones de tensión Depresiones (dip/Sag) e interrupciones de tensión Desequilibrio de tensión Variaciones de la frecuencia Tensiones inducidos de baja frecuencia Niveles DC en redes AC
Fenómenos radiados de baja frecuencia Campos magnéticos Campos eléctricos
Tensiones o corrientes inducidas Transitorios unidireccionales Transitorios oscilatorios
Fenómenos radiados de alta frecuencia Campos magnéticos Campos eléctricos Campos electromagnéticos Ondas continuas Transitorio
Fenómenos de descarga electrostática (ESD) Pulsos electromagnéticos nucleares (NEMP)

**Tabla 1.** Clasificación de los fenómenos electromagnéticos según IEC

<b>Categorías</b>	<b>Contenido Espectral Típico</b>	<b>Duración Típica</b>	<b>Magnitud Del Tensión Típica</b>
1. Transitorios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanosegundos	5-ns (cresta)	<50ns	
1.1.2 Microsegundos	ms (cresta)	50ns-1ms	
1.1.3 Milisegundos		>1ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Frecuencia Media	5-500KHZ	20	0-8pu
1.2.2 Alta Frecuencia	0.5-5KHZ	5	0-8pu
2. Variaciones De Corta Duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Sag		0.5-30 ciclos	0.1-0.9p.u.
2.1.2 Swell		0.5-30 ciclos	1.1-1.8pu.
2.2 Momentánea			
2.2.1 Interrupción		0.5 ciclos-3s	<.01p.u.
2.2.2 Sag		30 ciclos-3s	0.1-0.9pu.
2.2.3 Swell		30 ciclos-3s	1.1-1.4p.u.
2.3 Temporal			
2.3.1 Interrupción		3s-1min	<0.1p.u.
2.3.2 Sag		3s-1min	0.1-0.9 p.u.
2.3.3 Swell		3s-1min	1.1-1.2 p.u.
3. Variaciones De Larga Duración			
3.1 Interrupciones Sostenidas		>1min	0.0 p.u.
3.2 Bajos Tensiones		>1min	0.8-0.9 p.u.
3.3 Sobre Tensiones		>1min	1.1-1.2 p.u.
4. Desequilibrio De Tensión		Estado estable	0.5-2%
5. Distorsión En Forma De Onda			
5.1 Nivel DC		Estado estable	0-0.1%
5.2 Armónicos	0-100arm	Estado estable	0-20%
5.3 Interarmónicos	0-6KHZ	Estado estable	0-2%
5.4 Notching		Estado estable	
5.5 Ruido	Banda ancha	Estado estable	0-1%
6. Fluctuaciones De Tensión	<25Hz	Intermitente	0.1-7%
7. Variaciones En La Frecuencia Del Sistema.		<10s	

**Tabla 2.** Clasificación de los fenómenos electromagnéticos según IEEE 1159 de 1995

## 1.1 DESCRIPCIÓN Y DEFINICIÓN DE SAG DE TENSIÓN.

Las definiciones de los sag han evolucionado durante los últimos 20 años así como también los instrumentos de calidad de potencia que los miden. Los Sag, o dip como son definidos en las comunidades europeas, eran inicialmente cualquier reducción en el voltaje del usuario y se definió el límite de tiempo entre un ciclo (para una frecuencia de 60Hz un ciclo:  $1/60 \text{ seg.} = 16.667 \text{ ms.}$  y 2.55 segundos.

En la actualidad la definición de los sag de tensión no varía mucho, se dice que ha tenido lugar un fenómeno de Sag en un punto de la red eléctrica cuando la tensión de una o más fases cae repentinamente entre los límites de magnitud establecidos (0.9 p.u. y 0.1 p.u. del valor nominal) y se recupera al cabo de un tiempo determinado, generalmente con un rango de duración entre 0.5 - 30 ciclos (IEEE 1159 de 1995).

También de acuerdo a la recomendación IEEE 1159 de 1995, en la tabla 3 se resume la clasificación de los sag de tensión, en la cual  $t$  es el tiempo de duración de la subtensión.

Tipo de sag	Instantáneo	Momentáneo	Temporal
1.1.1 Duración	0.5 ciclos < $t$ 30 Ciclos	30 ciclos < $t$ 3 segundos	3 segundos < $t$ 1 minuto

Tabla 3. Clasificación de los Sag de acuerdo a la duración (IEEE 1159 de 1995)<sup>5</sup>.

Esta duración está directamente relacionada con la causa que genera los sag, ya que esta depende del tiempo de operación de las protecciones de los sistemas de distribución o transmisión y del tiempo que tarda el arranque de las máquinas rotativas.

Cada sag dura en tanto que el equipo de protección permita que la corriente de falla fluya en el sistema. Existen muchos tipos de dispositivos de protección y cada uno tiene un tiempo mínimo absoluto que toma para aclarar o despejar la falla. A continuación se

<sup>5</sup> IEEE Std. 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Power Quality (ANSI).



verán los tiempos de despeje típicos para algunos dispositivos de protección comúnmente usados en los sistemas de distribución.

Tipo	Tiempo de aclaramiento en Ciclos		
	Mínimo típico	Retardo típico	Posible No de Recierres
Fusible de expulsión	0.5	0.5 -120	0
Fusible limitador de Corriente	0.25 o menos	0.25 - 6	0
Recloser electrónico	3	1 - 30	0-4
Circuit Breaker en Aceite (Dist)	6	1 - 60	0-4
Circuit Breaker SF6 o Vacío	2 - 3	1 - 60	0-4

**Tabla 4.** Tiempos de operación de dispositivos de protección utilizados en sistemas eléctricos de potencia (influyen en la duración de los sag).

De la tabla 4 se puede concluir, por ejemplo, que el sag ocurrido en un punto determinado de un sistema, generado por una falla en un ramal que está protegido por un recierre (recloser) electrónico, tendrá una duración de entre 1 y 30 ciclos, es decir, mientras este dispositivo despeja la falla en el punto de interés se tendrá un sag instantáneo.

A continuación se definirán los principales parámetros que permitirán la correcta clasificación de los sag de tensión, y que son de gran utilidad a la hora de estimar sus posibles repercusiones y las medidas preventivas que se pueden aplicar, estos son:

### 1.1.1 Magnitud

Es el voltaje en RMS en por ciento o por la unidad del voltaje durante la falla.

### 1.1.2 Valor Efectivo

El valor efectivo o eficaz de una señal es conocido también como valor cuadrático medio o rms. El valor eficaz de una señal periódica se basa en el concepto de potencia media o promedio entregada. En el caso de circuitos eléctricos, con una tensión continua aplicada sobre los terminales de una resistencia, la potencia media se calcula como:

$$P_0 = \frac{V_{DC}^2}{R}$$

Para el caso de una tensión periódica aplicada sobre los terminales de la resistencia, la tensión eficaz o el valor eficaz de la señal se define como la tensión que proporciona la misma potencia media que la tensión de continua. La tensión eficaz se puede calcular utilizando la siguiente expresión.

$$P_0 = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

Si calculamos la potencia media en una resistencia a partir de la expresión de potencia instantánea, se obtiene:

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v(t)^2}{R} \cdot dt = \frac{1}{R} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 \cdot dt \right]$$

Igualando las expresiones de potencia media  $P_0$  de las expresiones (4) y (5) se obtiene:

$$P_0 = \frac{V_{rms}^2}{R} = \frac{1}{R} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 \cdot dt \right]$$

Donde la expresión de la tensión eficaz o rms es:

$$V_{RMS} = \sqrt{\int_0^T v(t)^2 .dt}$$

La formula anterior del valor RMS pierde todo su significado convencional si la forma de onda no es periódica y la expresión que permite calcular el valor eficaz de una señal puede obligar a realizar complejos cálculos, por lo que en algunos casos conviene simplificarla, de forma que en un período, la señal se descompone en  $N$  intervalos de tiempo consecutivos, con tal de que no coincidan en un instante dos o más con valor no nulo y puesto que la mayoría de los datos de la forma de onda está en el formato digital, la integración se reemplaza por una suma en tiempo discreto.

$$V_{RMS}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^{i=k} v(i)^2}$$

Donde:

$N$  es el número total de muestras en un período

$v(i)$  es la forma de onda registrada

$k$ :  $k$ -ésima muestra.

En el ejemplo que siguen, la rata de muestreo es 15,360 muestras por segundo así que un ciclo contiene 256 muestras y cada una de las 256 muestras en la ventana es calculada, se suma juntas, y se promedia encima del número total de muestras en la ventana (256). El tamaño de la ventana siempre permanece el mismo (es decir, el número de muestras siempre es 256).

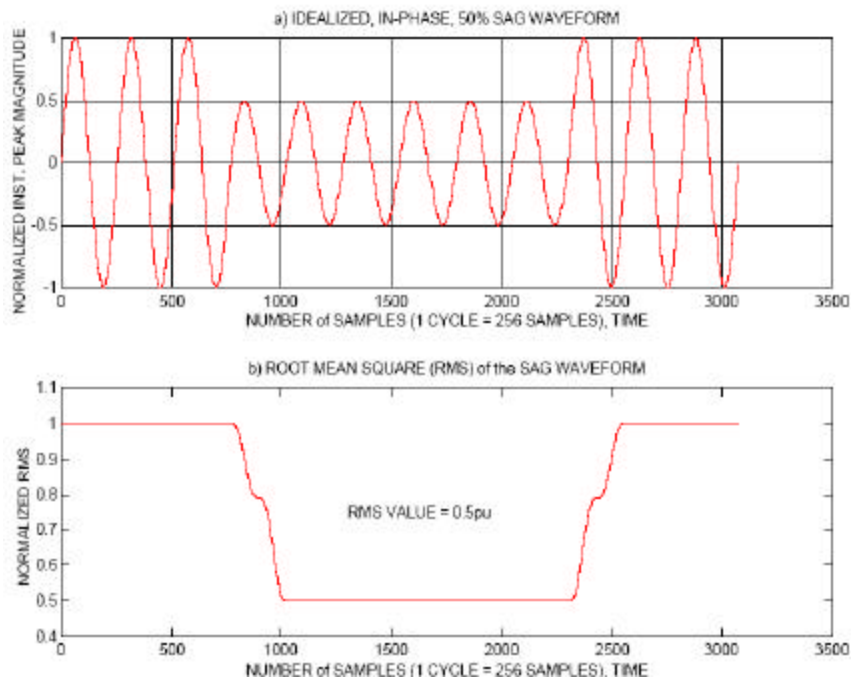


Figura 1a y 1b. Sag de tensión ideal.

Por ejemplo, Figura 1(a) muestra el caso de un sag de tensión ideal donde la transición tiene lugar en el cruce por cero y no hay ninguna distorsión durante la combadura. Este sag de tensión tiene una magnitud restante de 50% del nominal y tiene una duración de 6-ciclos. (Nota que esta grafica se ha normalizado) empleando herramientas de cómputo obteniendo la Figura 1(b). Datos obtenidos del documento “**The Missing Voltage Technique for Evaluating Voltage Sag**”<sup>6</sup>.

### 1.1.3 Caída de Tensión (Drop)

Es la diferencia entre el voltaje RMS antes del evento y el voltaje RMS durante el evento, expresado en voltios, en p.u. o en porcentaje.

### 1.1.4 Cambio Del Ángulo De Fase (Fenómeno)

<sup>6</sup> Paper “The Missing Voltage Technique for Evaluating Voltage Sags”, N. Serdar Tunaboylu, Edward R. (Randy) Collins, Jr., Ruhi Sarikaya and Robert L. (Larry) Morgan,

Un sag de tensión causado por un corto circuito en el sistema no solo produce una caída de tensión (drop) la magnitud sino que también causa un cambio en el ángulo de la fase del voltaje. Ya que existe una diferencia en la relación de X/R entre la fuente y la falla del alimentador, trayendo como resultado un cambio en el ángulo de la fase en el punto de acoplamiento común (PCC) entre la falla y la carga.

El ángulo de impedancia  $\theta$  se define:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_f}{R_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{X_s}{R_s}\right)$$

donde

$Z_S = R_S + jX_S$ , es la impedancia de pre-falla

$Z_F = R_F + jX_F$ , es la impedancia durante el evento.

Otra forma de obtener el cambio del ángulo de fase es comparar el ángulo de la componente fundamental del sag de voltaje (voltaje real) con el voltaje de pre-falla (onda seno ideal),

Para una onda seno ideal (amplitud constante y frecuencia constante) el argumento del voltaje complejo con tiempo:  $2\pi$  radianes por ciclo ( $360^\circ$ ). Es igual a la siguiente ecuación:

$$\theta_0(t) = \arg\{V(0)\} + 2\pi f_0 t$$

Donde  $V(0)$  es el voltaje fundamental obtenido en  $t=0$ , y  $f_0$  la frecuencia fundamental. El cambio del ángulo de fase en función de tiempo se define como la diferencia entre el

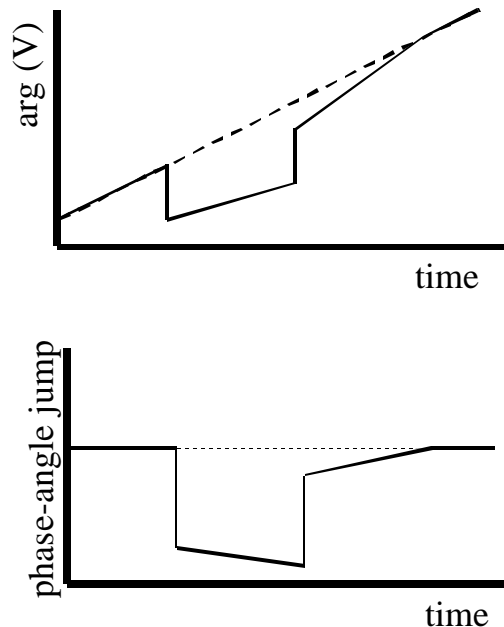
argumento real del voltaje fundamental y el argumento para una onda seno ideal como se dijo anteriormente y esta dada en la siguiente formula:

$$\Delta f(t) = \arg\{V(t)\} - f_0(t)$$

Donde la componente compleja de la fundamental del Sag es obtenida por medio de la Transformada Rápida de Fourier siendo  $v(t)$  el voltaje de la fundamental complejo del Sag en el periodo  $(t, T)$ ; donde  $T$  es un ciclo de la frecuencia fundamental del Sag.

El cambio del ángulo de la fase  $\Delta\phi$  puede ser calculada por la siguiente formula (derivada de las dos expresiones anteriores) puede usarse para asegurar que el ángulo resultante siempre está entre  $-180^\circ$  y  $+180^\circ$ .

$$\Delta f(t) = \arg\left(\frac{V(t)}{V_0 e^{j\omega t}}\right) \quad \Delta f(t) = \arg\left\{\frac{V(t)}{V(0) \exp\{j2\pi f_0 t\}}\right\}$$

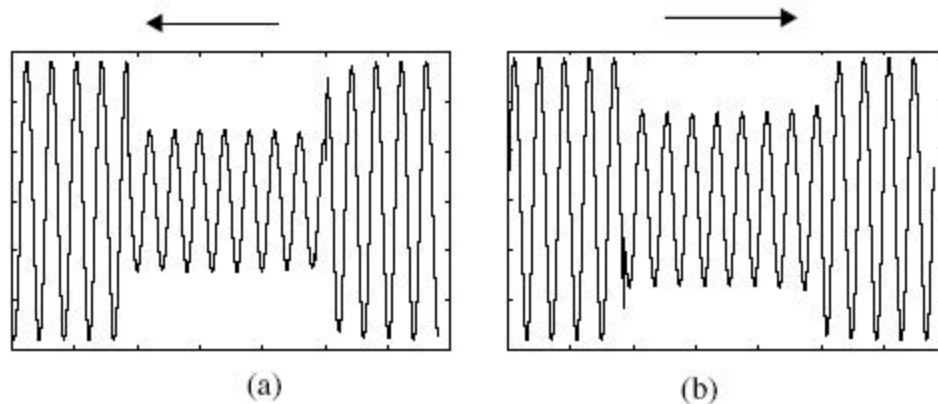


**Figura 2.** Argumento del voltaje fundamental para la onda seno ideal y la producida durante el Sag de tensión

La figura 2 arriba se representa el argumento del voltaje fundamental para la onda seno ideal en línea punteada y en línea sólida es la producida durante el sag de voltaje. La figura abajo: es el cambio del ángulo de fase en función de tiempo obtenida como la diferencia entre las dos curvas<sup>7</sup>.

### 1.1.5 Cambio Del Ángulo De Fase (Cuántico)

Es el desplazamiento en el tiempo de la onda de voltaje durante el evento. Un cambio del ángulo de fase positivo, indica que el ángulo de la fase del voltaje durante el evento se adelanta al voltaje antes del evento. Un cambio de ángulo de fase negativo, indica que el ángulo de la fase del voltaje durante el evento se retrasa con relación al voltaje antes del evento (ver Figura 3a y 3b).



**Figura 3a y 3b.** Voltaje moderado de un sag de tensión con cambios en el ángulo de la fase. a) Un sag con un cambio del ángulo de fase positivo de +280, magnitud 50%, b) Un sag con el cambio del ángulo de fase negativo de -380, magnitud 62%, datos obtuvimos del sistema de potencia escocés.

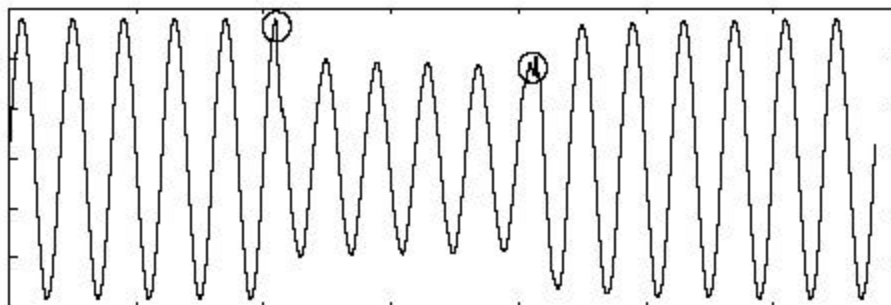
### 1.1.6 Punto De Iniciación Del Sag De Tensión

Es el ángulo en la onda de voltaje en el momento de iniciación del sag. El ángulo de la fase es medido desde el último cruce por cero del voltaje hacia arriba.

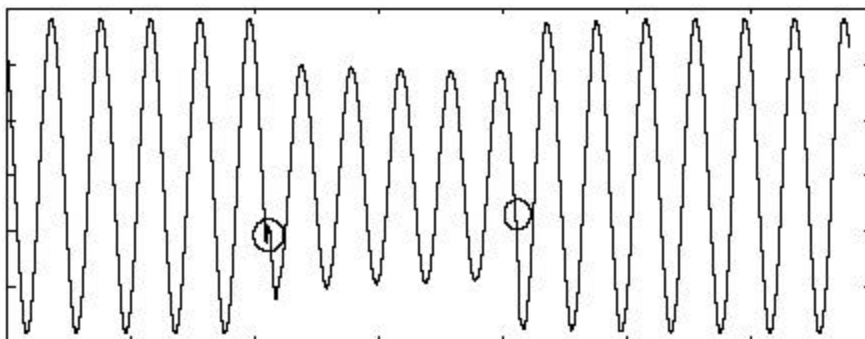
<sup>7</sup> Draft 2 working document for IEEE P1564 November 2001, pag 14-15

### 1.1.7 Punto De Recuperación De La Onda De Tensión

Es el ángulo en la onda de voltaje en el momento donde muestra una recuperación significativa. No quiere decir que a cada sag de tensión sea posible reconocer una punto recuperación y de iniciación del sag de tensión (ver Figura 4a y 4b).



**Figura 4a.** Un sag moderado con el punto de iniciación a  $90^\circ$  y punto de recuperación a  $90^\circ$ , datos obtenidos del sistema de potencia escocés.

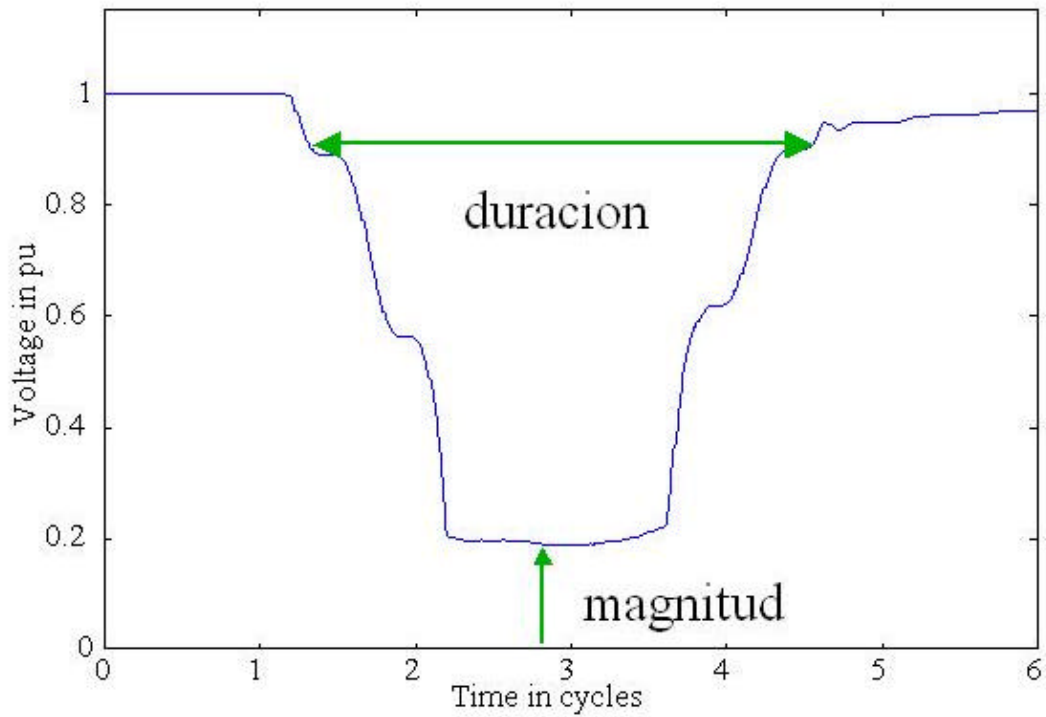


**Figura 4b.** Un sag moderado con el punto de iniciación a  $210^\circ$  y punto de recuperación a  $200^\circ$ , datos obtenidos del sistema de potencia escocés.

### 1.1.8 Duración

Es el tiempo transcurrido entre el Punto de Iniciación del Sag de tensión y el punto de recuperación de la onda de tensión (ver Figura 5).

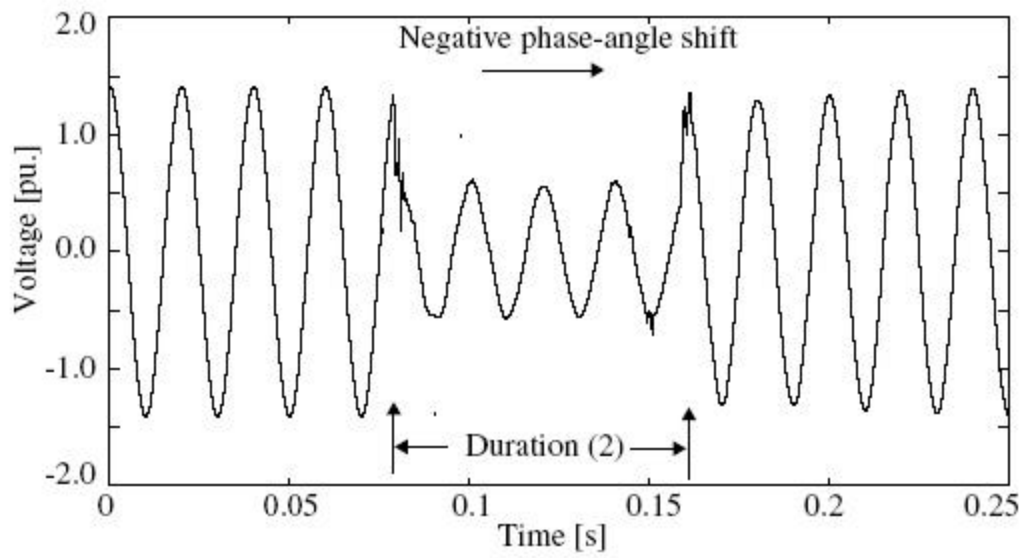




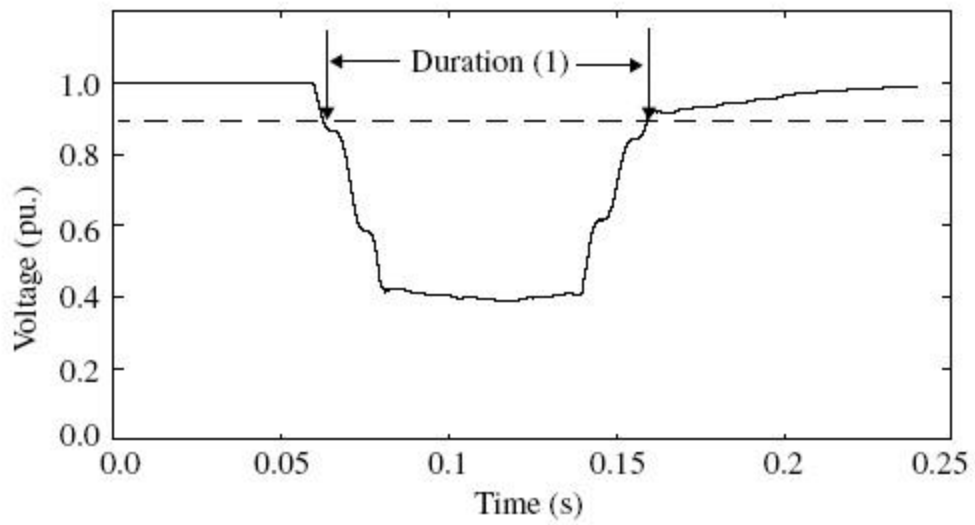
**Figura 5.** En la grafica anterior se aclara el concepto de magnitud y duraci3n en un grafica del valor rms de la fundamental de la onda.

## 1.2. EJEMPLO DE CARACTERIZACI3N DE UN SAG EN UNA SOLA FASE

La figura 6a muestra un sag de tensi3n en una fase con un cambio negativo en el 3ngulo de fase. La figura 6b y figura 6c se representa la magnitud y cambio del 3ngulo de fase. En la tabla 5 se dan los resultados num3ricos de cada una de estas graficas.



**Figura 6a**



**Figura 6b**

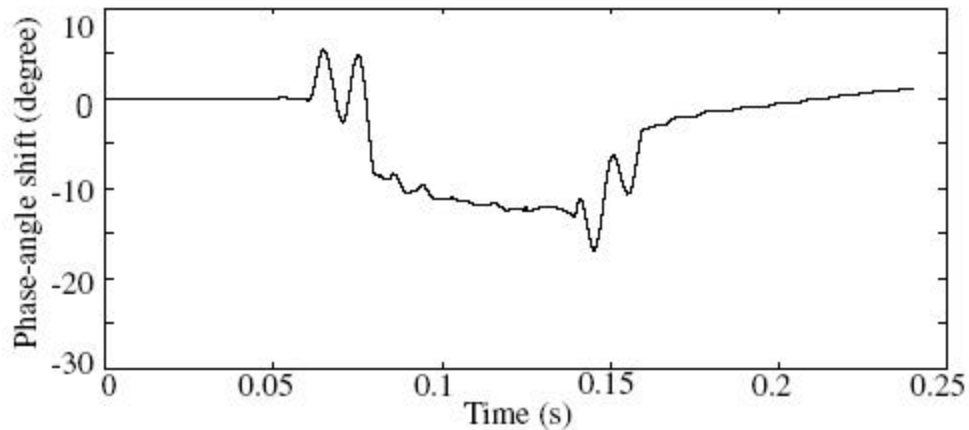


Figura 6c

Definicion	Valor
Magnitud del sag (p.u)	0,3884
Voltage drop (p.u)	0,6116
Cambio del angulo de fase (grados)	-13
duracion (seg)	0,097
Punto de iniciación del sag (angulo, grados)	86
Punto de iniciación del sag (tiempo,seg)	0,079
Punto de recuperación (angulo, grados)	75
Punto de recuperación (tiempo,seg)	0,176

Tabla 5 Resultados numéricos.

### 1.3 CLASIFICACIÓN DE SAG DE TENSIÓN EN UN SISTEMA TRIFÁSICO

Usualmente, los SAG de tensión son clasificados por su duración y magnitud y representados en gráficos bidimensionales. Esta representación simplificada no considera las diferentes tensiones en cada fase del sistema trifásico y la variación de ángulo de fase que puede ocurrir debido a la propagación del disturbio.

Los sag de tensión pueden ser equilibrados o desequilibrados, dependiendo de las causas, si los voltajes de la fase individuales son iguales, el sag es equilibrado, si los

voltajes de la fase individuales son diferentes o la relación de la fase está de otra manera que  $120^\circ$ , el sag está desequilibrado. Un corto circuito trifásico o un arranque de un motor de gran potencia pueden producir sag simétricos. Mientras una falla de solo una línea a tierra, o de fase a fase o de dos-fases a tierra o debido a la caída de un rayo, animales, accidentes y otros, puede causar sag de tensión asimétricos. A causa de estas variaciones en la magnitud y el ángulo de fase fueron tomadas en cuenta por Bollen 1997, el propone la siguiente clasificación básica para caracterizar los sag de tensión en un sistema trifásico:

### **1.3.1 Tipo A**

Es equilibrado y se produce por un corto circuito trifásico o por carga excesiva. Todos los fasores dejan caer la misma cantidad en la magnitud.

### **1.3.2 Tipo B**

Apenas una tensión sufre un decremento en magnitud y es causado por las componentes de la secuencia cero, aunque este tipo de sag no es muy común ya que hay dos razones para esto:

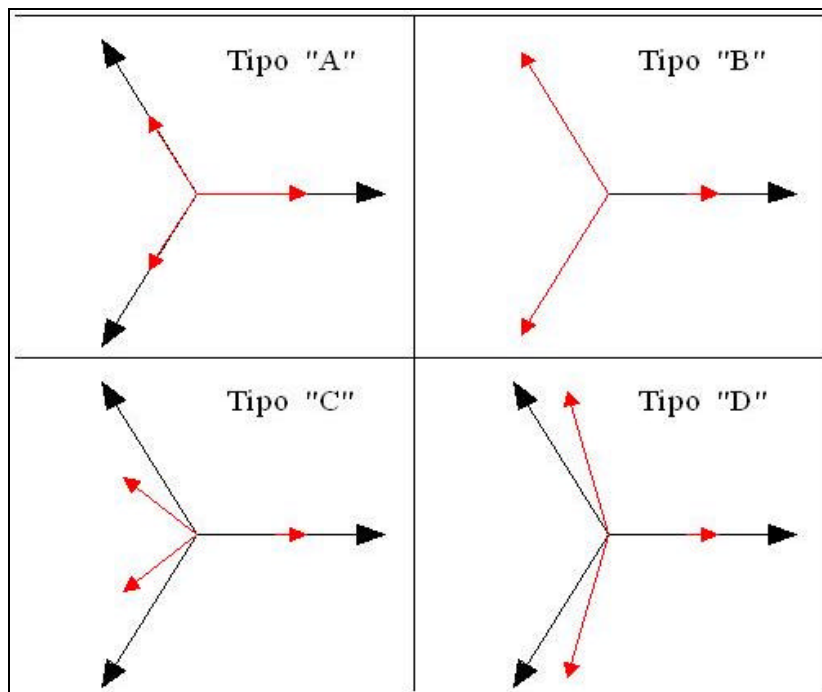
- 1) El voltaje de secuencia cero normalmente es igual a cero en los terminales de los equipos, ya que queda atrapado en las conexiones de los transformadores delta-estrella, delta-delta, o estrella-estrella aterrizado.
- 2) El equipo trifásico normalmente es conectado en estrella aterrizada, para que el voltaje de secuencia cero en los terminales del equipo sea cero.

### **1.3.3 Tipo C**

Únicamente dos fase de tensión decaen en magnitud y sufren alteración en el ángulo de fase. La tercera fase no se altera y son debido a las fallas de línea a línea y doble línea a tierra

### 1.3.4 Tipo D

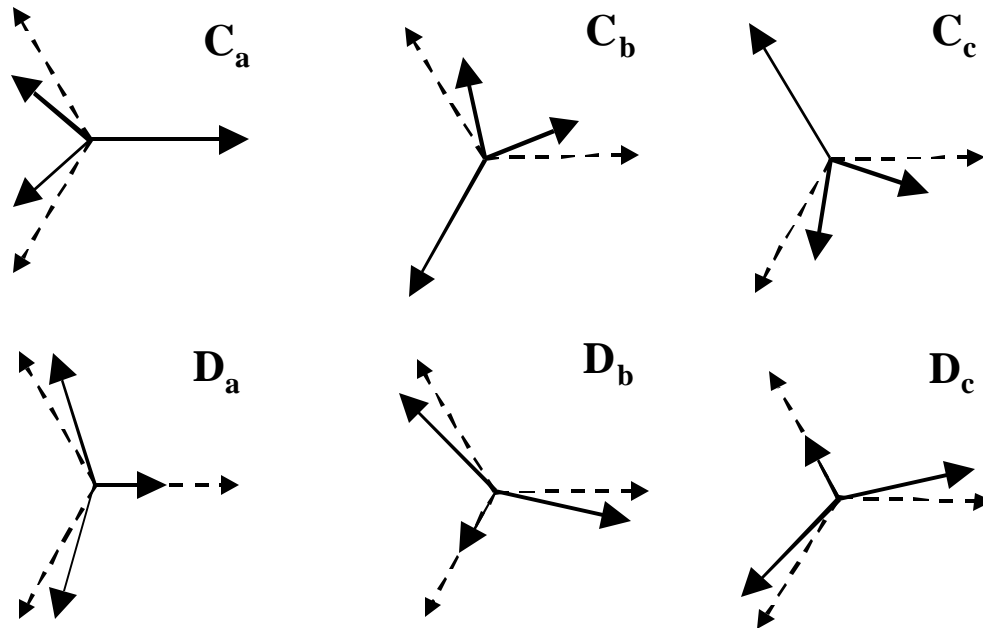
Dos fases decaen en magnitud y sufren alteración en el ángulo de fase, pero la tercera fase solo sufre cambio en la magnitud y son debidos a fallas de solo una línea a tierra



**Figura 7.** Clasificación de sag de tensión.

Al ser los tipo C y D mas comunes reciben una subclasificación que se presenta en la siguiente grafica.(Figura 8) <sup>8</sup>

<sup>8</sup> M.H.J. Bollen: Characterisation of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 4, October 1997, pp. 1669.



**Figura 8** Subclasificación de sag de tensión.

#### 1.4 CAUSAS DE SAG DE TENSIÓN

Los Sag de tensión son uno de los más importantes problemas de calidad de potencia que impacta a muchas de las industrias de nuestro medio, ya que los equipos actualmente usados en las plantas industriales modernas (controladores de procesos, PLC's, variadores de velocidad, equipos robóticos, inversores, etc.) se están convirtiendo cada vez más sensibles a los sag de tensión a medida que la complejidad de estos aumenta. Aún los relés y contactores que hacen parte de los arrancadores de motores pueden ser sensibles a los Sag de tensión resultando sus fallas en paros no programados en los procesos.

Los Sag son decrementos momentáneos típicamente causados por fallas remotas en el sistema interconectado de transmisión y redes de distribución de energía de la empresa suministradora; usualmente estos fenómenos son asociados a fallas en los equipos o fallas temporales causadas por descargas atmosféricas, animales u otros factores naturales, pero también pueden ser causados por maniobra de grandes cargas o arranque de grandes motores al interior de la industria.

Las fallas resultantes en Sag pueden ocurrir dentro de la planta o industria o en el sistema de distribución y transmisión de la empresa suministradora de energía. La condición de sag dura hasta que la falla es aclarada por un dispositivo de protección. En la industria este dispositivo típicamente será un fusible o un interruptor, en la empresa de energía la falla podría ser despejada por un fusible de ramal o un interruptor de subestación. Si el recierre (recloser) es usado la condición de sag puede ocurrir múltiples veces.

La magnitud del Sag de tensión debido a fallas remotas depende de muchos factores tales como las impedancias del sistema y del punto de falla, localización de la falla, tipo de falla, conexión de transformadores, aterrizamiento del sistema y la tensión de prefalla. También dependiendo sobre cual sistema ocurra la falla (transmisión o Distribución), esta puede afectar una gran o relativamente pequeña cantidad de usuarios. Para una falla sobre una línea de transmisión a 230 kV, un sag podría afectar equipos sensibles ubicados a cientos de kilómetros lejos de la falla, ya que la sobrecorriente generada a partir del evento, puede ocasionar caídas de tensión que pueden ser experimentadas en todo el anillo interconectado debido a la topología del sistema.

Los sag de tensión producidos en un sistema de distribución tienden alrededor de varios ciclos ya que basan en los esquemas de las protecciones de despeje de la falla ejemplo: 6-20 ciclos es la duración típica de despeje de una falla en un sistema de

distribución, 30-60 ciclos es la duración típica de los reclosing instantáneos o 120-600 ciclos para los reclosing temporizados.

Los sag de tensión en el sistema de transmisión son normalmente más cortos en duración que los sag de tensión producidos en el sistema de distribución. Esto se atribuye a los mecanismos de protección utilizados en el sistema de distribución como son los relay/breaker no actúan tan rápidamente debido a su principio de funcionamiento, en cambio en el sistema de transmisión el tiempo total para el funcionamiento del sistema de protección es 3-6 ciclos en los sistemas más viejos y con nuevas tecnología se puede lograr que funcione en menos de un ciclo.

Otra razón para que la duración sea más corta en un sistema de transmisión que en un sistema de distribución, es la conexión de una red de computadoras, ya sea vía microondas, fibra óptica, etc. contra la radial en los sistemas de la distribución sin ningún tipo de comunicación, ni control.

En general los sag de tensión son causados por múltiples factores, dentro de los cuales se destacan los siguientes:

#### **1.4.1 Fallas Temporales**

Las fallas temporales pueden ser debidas a flameos por descargas directas, contacto de animales, viento, etc. Cuando la falla ocurre, la línea debe ser desenergizada para detener el flujo de sobrecorriente, mientras pasa el tiempo suficiente para que la falla sea despejada. Para hacer esta operación es necesario tener un fusible o un interruptor con recierre (recloser) que abra el circuito y despeje la falla teniendo en cuenta el tiempo de retardo. El recierre puede ocurrir varias veces, dependiendo del dispositivo, con el fin de reestablecer la continuidad del servicio luego de una falla temporal.

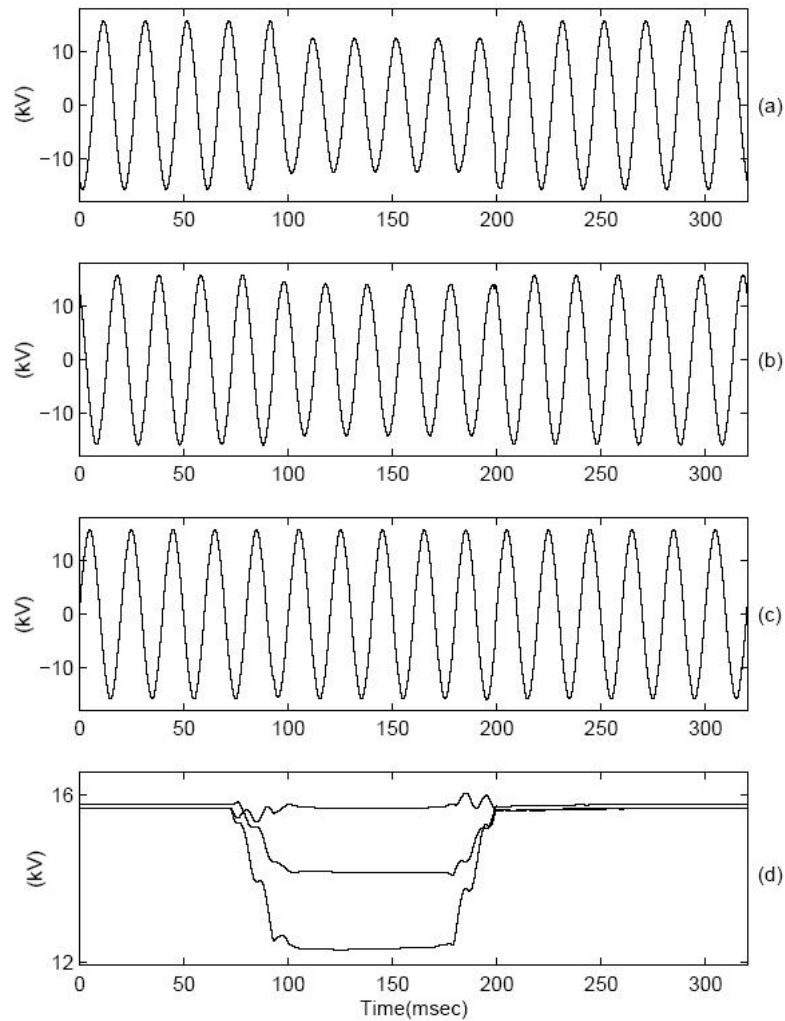


A las descargas atmosféricas se le atribuyen a menudo como las causas más comunes de las fallas en las líneas de transmisión y distribución. Los rayos se relacionan con sobretensiones en sistemas de baja tensión que pueden ocurrir por impactos directos o por descargas inducidas desde otra parte. Pueden causar sobretensiones (surges) y llevar a Sag o interrupciones cortas como resultado de fallas temporales (incluyendo paro de operación) iniciadas por el rayo. Algunos rayos inducen transitorios que causan el mal funcionamiento de los equipos y el recierre automático de los aparatos de protección. Cada una de estas operaciones es similar a la causada por una falla línea tierra, ocasionada por ramas de árboles, otros objetos o cortocircuitos en líneas de transmisión o distribución. La falla es detectada y momentáneamente aislada por medio del dispositivo de protección durante un tiempo determinado mientras se extingue el arco de la falla y entonces el circuito es automáticamente reconectado en un intervalo que se encuentra entre 0.5 seg. hasta unos pocos segundos. Esto resulta en una total pérdida de la tensión en el circuito que falló y muy posiblemente en un sag de tensión sobre una parte de los otros circuitos ramales alimentados por la misma fuente del circuito fallado. Al mismo tiempo que ocurre la falla línea-tierra, sobre sistemas de distribución con el neutro aterrizado, las fases no falladas pueden experimentar swells de tensión.

En la figura 9 se muestra la forma de voltaje durante un sag de tensión en un sistema trifásico provocado por una falla desbalanceada en este caso una falla bifásica. La medida se realizó en una red de 11 kV, la duración del sag es aproximadamente 5 ciclos que son el tiempo típico en que un cortacircuitos o breaker actúa. La recuperación de voltaje es rápida y crea una forma casi rectangular<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Conrad, K. Little, C. Grigg: Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no.1, January-February 1991, pp. 167 –172.



**Figura 9.** Forma de voltaje durante un sag de tensión en un sistema trifásico provocado por una falla desbalanceada

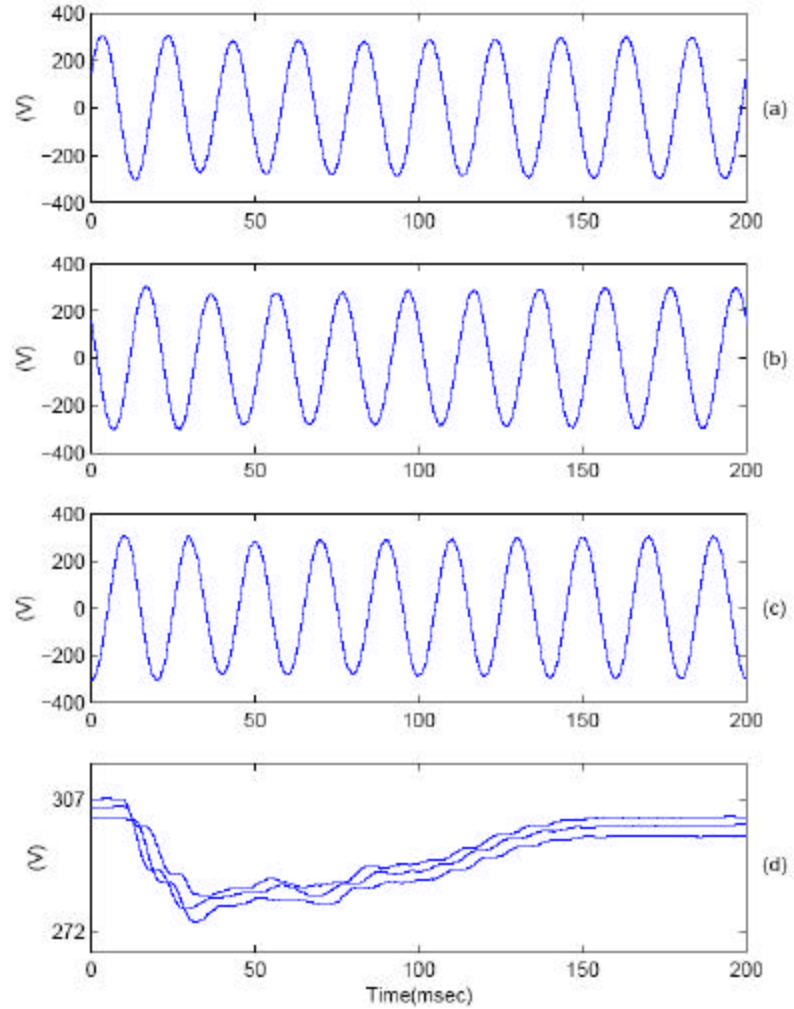
### 1.4.2 Arranque De Motores.

El arranque de motores es una fuente común de Sag de tensión, debido a las altas corrientes de energización que fluyen a través de las impedancias del sistema. El sag más severo, ocurre en las terminales del motor y puede tener un notable efecto sobre los usuarios cercanos al motor o sobre las cargas sensibles ubicadas en el área de influencia, pero ellos son generalmente menos severos, el valor del voltaje raramente está por debajo del 80% de nominal pero puede ser de duración mas larga (30 ciclos)

que los causados por fallas en el sistema de potencia. En cuanto a la duración de Sag está determinada por el tiempo programado en el tipo de arranque o por la magnitud del sag que ocasiona la desaceleración. Con un arranque Ye - Delta, por ejemplo, el sag que se debe experimentar es momentáneo, ya que por lo general, en el arranque de un motor de inducción con este método (ver figura 10).

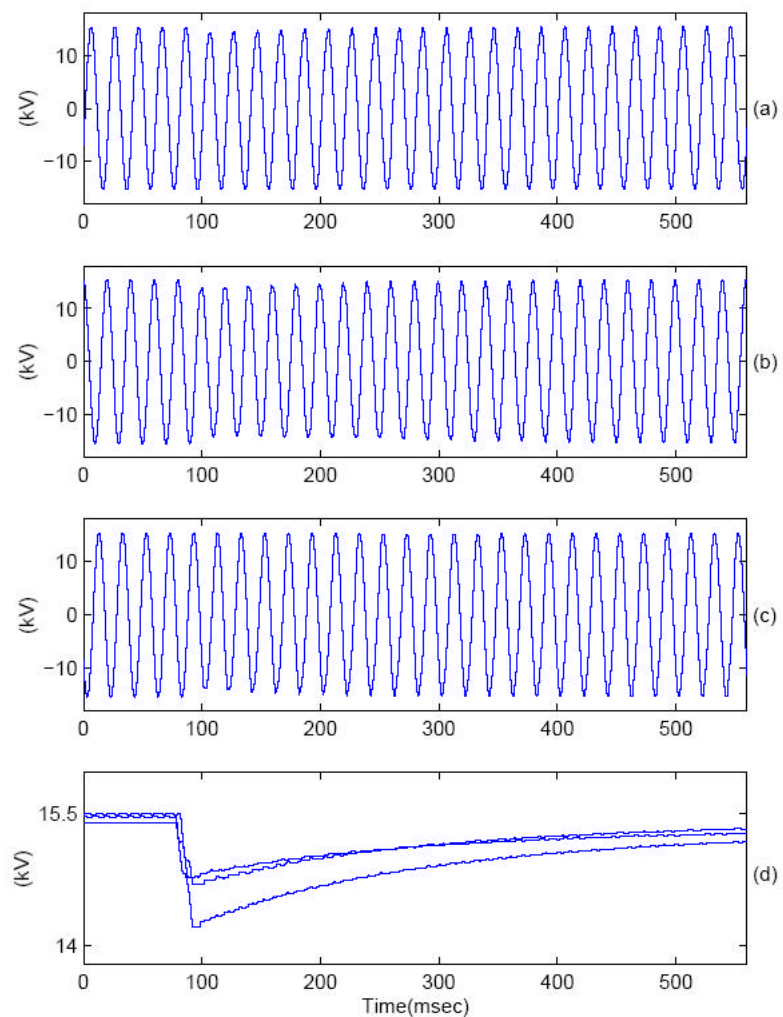
### **1.4.3 Energización De Transformadores**

Los sag de tensión debido a la energización de transformador tienen magnitud similar y duración como los sag debido al arranque del motor. Sin embargo estos sag de tensión en la energización de un transformador son asociados con una gran cantidad de distorsión armónica que podría llevar a interferencia con el los equipos que contengan elementos de electrónica de potencia. Una saturación de transformador de caso después de un sag de voltaje también puede causar interferencia, estos disturbios pueden consistir en una distorsión armónica con amplitudes hasta del 10% de nominal y una duración de varios segundos (ver figura11).



**Figura 10.** Muestra la forma de onda de un sag de tensión debido al arranque de un motor de inducción. La medida se realizó en una red de 400V. La magnitud de voltaje de todas las fases cae 10% del valor del pre-evento aproximadamente y entonces recupera gradualmente<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> M.H.J. Bollen: Characterisation of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 4, October 1997, pp. 1666-1671.



**Figura 11.**

Figura 11. En la figura muestra la forma de onda de voltaje durante la energización de un transformador. La medida se realizó en una red del 11kV. La magnitud de voltaje cae durante un tiempo muy corto y recupera gradualmente, el drop más grande es aproximadamente 8% del voltaje antes del evento<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> K.S. Smith, L. Ran, B. Leyman: Analysis of transformer inrush transients in offshore electrical systems, IEE Proceedings in Generation, Transmission, Distribution, vol. 146, no. 1, January 1999, pp. 132-139.

## **1.5 EFECTOS DE LOS SAG DE TENSION**

Los Sag de tensión no son un problema a menos que ellos causen una mala operación en los equipos, esto depende de la sensibilidad que estos posean (Ride trough Characteristics).

A continuación se hará una descripción los diferentes efectos producidos por la aparición de un sag de tensión:

### **1.5.1 Computadores Y Cargas Electrónicas.**

La fuente de alimentación de un computador y demás cargas electrónicas, consiste normalmente en un diodo rectificador (convertidor ac/dc) colocado dentro un regulador electrónico de voltaje; la fuente de potencia de estos aparatos electrónicos es similar, luego en todos ellos, la sensibilidad a los Sag de tensión es la misma. Las cargas electrónicas pueden sufrir averías por culpa de los Sag de tensión, por ejemplo, un televisor puede mostrar un "black screen" de un instante hasta unos pocos segundos; un reproductor de discos compactos puede reiniciarse el mismo y arrancará de nuevo desde el inicio del disco o esperará una nueva orden de mando. Televisores y videograbadoras poseen normalmente baterías de alta duración para mantener la memoria que contiene los canales locales, esto es para prevenir la pérdida de la memoria cuando un televisor es afectado por una caída de tensión. Si la batería no está provista de la energía suficiente, el sag o la interrupción causarán la pérdida de la memoria del aparato. Lo mismo puede ocurrir con la memoria de un horno microondas el cual generalmente no está provisto de una batería.

El efecto de un sag de tensión en las computadoras personales es a menudo la pérdida de datos guardada en la memoria volátil (como la RAM). Este problema no es muy prevaeciente en las más nuevas computadoras del lap-top que a menudo se escapan de los efectos de los sag ya que tiene una batería interior haciéndolos inmune.

## **1.5.2 Telecomunicaciones.**

Cuando se considera la sensibilidad de los equipos de telecomunicaciones, debe distinguirse entre equipos comunes en redes públicas de telecomunicación y equipos con terminal individual conectados a la red. La mayoría de los equipos críticos comunes utilizan baterías de respaldo para los disturbios de corta duración, lo que hace que este tipo de eventos no tenga efectos nocivos significativos sobre ellos; sin embargo, los equipos individuales conectados directamente a la red pública, no poseen, muchas veces, dispositivos de respaldo para mitigar los efectos de estos disturbios, lo que los hace vulnerables a los fenómenos que se presentan en la red de alimentación.

## **1.5.3 Contactores De Motores Y Relés Electromecánicos.**

### **1.5.3.1 Contactores**

Muchos motores de baja potencia (y algunos de mediana también) son accionados por este tipo de dispositivo, fundamentalmente por su sencillez y economía. Debe tenerse en cuenta sin embargo que para reducciones de tensión de entre el 30 y el 50 % estos contactores “caen” desconectando el equipo asociado. El tiempo de “caída” es sumamente breve, entre 20 y 40 milisegundos., y a menos que estén provistos de algún tipo de automatismo de reconexión dejarán desconectado al equipo permanentemente, hasta su rearme manual.

### **1.5.3.2 Relés Con Bobinas De Mínima Tensión**

Este tipo de interruptor posee incorporada una bobina de mínima tensión que manda la apertura cuando esta disminuye por debajo de un cierto valor (generalmente no

ajustable). Esta apertura puede ser temporizada o instantánea, dependiendo del tipo de bobina utilizada.

### **1.5.3.3 Relés De Baja Tensión**

Están normalmente ubicados en numerosos equipamientos y su función primordial es proteger más al proceso productivo que al propio elemento que desconectan de la red. Si se encuentran adecuadamente coordinados, desconectarán los equipos secuencialmente, empezando por los menos críticos, dando así posibilidades a la tensión de recuperarse. La experiencia indica sin embargo que no siempre es así, y muchas veces es su actuación intempestiva la que interrumpe el proceso productivo.

### **1.5.4 Lámparas De Descarga De Alta Intensidad (HID).**

Las lámparas de mercurio extinguen su arco al rededor del 80% de la tensión nominal y requieren un tiempo de re arranque de varios minutos; por tanto un Sag de tensión que extingue este tipo de lámparas es confundido como una interrupción de larga duración por el personal de planta.

### **1.5.5 Controladores Lógicos Programables (PLC's).**

Esta es una categoría importante de equipos para procesos industriales, puesto que todo un proceso está generalmente bajo el control de estos dispositivos. La sensibilidad a Sag de tensión varía ampliamente, pero se han hallado porciones de un sistema total de PLC's extremadamente sensibles a variaciones en la tensión; por ejemplo, las unidades remotas I/O tienen salida de proceso por tensión entre 0.9 y 1 p.u. por unos pocos ciclos de duración.

Es importante tener en cuenta que un proceso completo en una planta industrial puede depender de la sensibilidad de una sola pieza de un equipo. Todo el proceso envuelve



controles, drives, contactores de motores, robots, etc., que son todos integrales en la operación completa de la planta. Esto puede hacer difícil identificar la pieza sensible del equipo después de que todo un proceso se ha disparado.

## **1.5.6 Motores Eléctricos**

### **1.5.6.1 Motores Síncronos**

Las consecuencias de un sag de tensión en el suministro de una máquina eléctrica son la disminución par motor, que es proporcional a la tensión, la pérdida de velocidad puede llegar a caer fuera del sincronismo si su duración es elevada y la inercia del motor pequeña.

Los sag de tensión pueden causar daño al rotor de un motor sincrónico, esto se debe a la subida drástica de la corriente causado por el sag de tensión, aumentando el flujo magnético en el estator llevándolo a un estado de saturación en un lapso de tiempo muy corto y así experimentando un troqué que es directamente dependiente a la magnitud y duración del sag de tensión, éstos dará como resultado un esfuerzo mecánico en el rotor y un envejecimiento de la máquina.

La probabilidad de que esto ocurra no es alta, a no ser que el sag de tensión supere el 50%, dado que la gran masa inerte de estos motores generalmente poseen y sus posibilidades de sobreexcitación. Sin embargo, si se produce, sus consecuencias suelen ser importantes.

### **1.5.6.2 Motores Asíncronos**

Cuando se produce un sag de tensión disminuye el par motor, que es aproximadamente proporcional al cuadrado de la tensión, dando lugar a una ralentización que se prolonga hasta que se recupera la tensión o incluso, a la propia parada del motor.

El comportamiento entre la máquina asíncrona durante y después de un sag de tensión es similar a la máquina síncrona. La diferencia es principalmente que el troqué es menor debido a que el flujo del rotor se disminuye más rápidamente en una máquina asíncrona.

Cuanto mayor sea el valor y la duración del sag, mayor será la ralentización del motor; en general, sag menores de un 30% no originan parada, independientemente de cuál sea su duración, ya que se alcanza en ellos un nuevo equilibrio par motor-par resistente a velocidad inferior.

Si la profundidad del sag supera el 30%, se producirá o no la parada del mismo dependiendo de su duración y de la constante de inercia del motor; este proceso tiene lugar de forma simultánea en todos los motores de la instalación industrial afectado por el sag. Si la duración del sag es mayor de 1 segundo, la corriente de reaceleración de los motores será de orden semejante a la del arranque, es decir, aproximadamente de cinco a seis veces la intensidad nominal ello puede dar lugar a un nuevo sag de tensión que, en el peor de los casos, impediría la reaceleración.

### **1.5.6.3 Motores De Corriente Continua Alimentados Por Tiristores**

Normalmente estos equipos funcionan regulando la velocidad del equipo accionado, controlando indirectamente la corriente que absorben los motores de c.c; el control se realiza variando el ángulo de disparo de los tiristores de modo de modificar el valor medio de la tensión rectificadora.

El control electrónico de procesos actúa en tiempo real. Por consiguiente, los sag de tensión pueden inducir en ellos órdenes erróneas que alteren el funcionamiento de estos sistemas y se puede suponer la pérdida de control.

En principio, si existiese una disminución de la tensión primaria de alimentación, la misma se reflejaría inmediatamente en la tensión rectificada. Esto traería aparejado una disminución casi instantánea de la corriente demandada por los motores (al menos los más comunes que presentan una inductancia de armadura normalmente baja). El equipo de control, al detectar esta disminución de corriente reaccionará disminuyendo el ángulo de disparo y aumentando la tensión y restableciendo, al menos parcialmente, la corriente de armadura.

La posibilidad de re-equilibrar el proceso durante la duración del sag de tensión estará directamente vinculada con el “margen” que posea el regulador para mantener el valor medio de la tensión rectificada con tensiones de alimentación más bajas. En efecto, si en el momento de producirse el sag de tensión, el rectificador ya se encontraba operando con ángulos de disparo mínimos, no podrá restablecer la tensión. Sin embargo, si antes de la perturbación estaba operando con ángulos de disparo elevados, simplemente reduciéndolos elevará la tensión.

Generalmente es difícil conocer cual es el ángulo de disparo con que están funcionando los tiristores antes del disturbio. Sin embargo, ya que el ángulo de disparo está directamente relacionado con el  $\cos \phi$  del conjunto convertidor-motor, puede afirmarse que, en la mayoría de los casos existe amplio margen. Prueba de ello es la elevada cantidad de condensadores que normalmente se asocian a estos dispositivos para que el factor de potencia no sea excesivamente bajo.

El proceso real resulta un tanto más complejo, especialmente porque las disminuciones de tensión no se producen de igual modo en cada fase, y por lo tanto aparecen asimetrías en las tensiones y corrientes, dado que el ángulo de disparo por lo general es el mismo para cada fase. El efecto global sin embargo es básicamente el mismo.

Cuando el motor está alimentado por un puente de rectificación controlada, con inversión de marcha mediante frenado por recuperación, se pueden producir problemas importantes.

En tal caso, si se quiere cambiar el sentido de giro del motor, hay que actuar sobre la intensidad de alimentación y la corriente de excitación, de forma que el motor, conservando aún su primitivo sentido de giro, actúa así como generador. A continuación, se ralentiza y, posteriormente, el control vuelve a convertirlo en motor, sólo que girando en sentido contrario al inicial.

Si en el tiempo de frenado se origina un sag de tensión, se produce la fusión de los fusibles de protección de ciertos tiristores. Si es de larga duración, la fusión de los fusibles tendrá lugar en los instantes iniciales del proceso.

## **2. PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SAG DE TENSIÓN**

Durante los últimos diez años, los sag de tensión se han vuelto uno de los temas principales acerca de la calidad de potencia entre los clientes y fabricantes de equipo.

Los estudios de los sag de tensión pueden ser divididos en las siguientes categorías:

### **2.1 Caracterización De Los Sag De Tensión**

Estos estudios apuntan a adquirir un conocimiento de las características de los sag de voltaje usando la metodología de predicción de Sag, obteniendo de este estudio los datos moderados para esto como son: La reducción en el voltaje rms y la duración del evento como las características principales. Un sag de voltaje normalmente se caracteriza por una magnitud y una duración, sin embargo, varios estudios han demostrado que algunas otras características se asocian con los sag, como el cambio del ángulo fase, el punto de iniciación y recuperación de la onda y el desequilibrio de la magnitud de las fase, también puede causar los problemas para el equipo sensible. Últimamente estos últimos datos relacionados con las características propias de la onda de sag están recibiendo una atención adecuada.

### **2.2 Inmunidad De Equipo**

La sensibilidad del equipo es una parte de gran importancia en el estudio de los sag de tensión; en este estudio se recopila información acerca de la respuesta de un equipo ante un sag determinado. Esta información puede ser suministrada directamente por el fabricante pero hasta ahora, esto se hace sólo con la magnitud y duración de los sag de tensión y se hace necesario realizar una prueba de inmunidad contra sag. Se han hechos estudios sobre los efectos relacionando las diferentes características de los sag de tensión como el cambio del ángulo fase para algunos equipos, pero no existe ninguna norma internacional que los halla considerado todavía.

## 2.3 Mitigación

Es el estudio que se hace para mitigar el problema de los sag de tensión, es decir reducir el número de sag de tensión que produzca problemas en un equipo, se han puesto en práctica varios métodos y se han estado estandarizando en el uso de estos, ejemplo:

- 1) Mejoras en la calidad de suministro de potencia para reducir el número de sag.
- 2) Instalación de equipo de compensación en el sistema de potencia o en el equipo sensible.
- 3) Modificaciones en la topología del Equipo, para reducir su susceptibilidad a los sag de tensión.

Estas tres categorías diferentes de estudios son bastante dependientes entre si, pero la caracterización de los sag es la plataforma básica para los otros estudios. Antes de tomar una decisión sobre que método de la mitigación se va a escoger, se hace necesario saber el número real de perturbaciones, los sag de tensión y sobre todo la efectividad de los diferentes métodos de la mitigación. La prueba de inmunidad de equipo, es una manera de testificar la susceptibilidad del equipo en un cierto ambiente electromagnético. La mayoría de todos estos estudios se hacen necesarios para resolver un problema de sag de tensión específico.

Para llevar a cabo un estudio de **Caracterización de los sag de voltaje** es indispensable tener una metodología que se debe seguir para obtener una correcta y completa caracterización del fenómeno sag de tensión. Para obtener esta información correcta y completa se requiere de un estudio, que se compone de tres pasos:

#### **2.4 Obtener El Comportamiento Esperado Del Sistema.**

Esta información debe ser obtenida de las condiciones del suministro de energía en un punto específico del sistema eléctrico de potencia, es decir *"El Número esperado de Sag con determinadas características"*. Existen varias formas de obtener esta información como contactando directamente a la empresa de energía, monitoreando la fuente de energía por un periodo de tiempo dado o haciendo un estudio de predicción estocástico empleando la simulación. Es necesario contactar a la empresa de energía directamente para realizar cualquiera de los procedimientos indicados, ya que esta es la que puede proporcionar los parámetros necesarios para el estudio.

#### **2.5 Obtener la tensión tolerada del equipo.**

Es la información acerca de la respuesta de un equipo ante un sag determinado. Esta información puede ser suministrada directamente por el fabricante, obtenida mediante la realización de pruebas o, simplemente, tomando los valores típicos de tolerancia.

#### **2.6 Determinar el impacto esperado.**

Sí la tensión tolerada del equipo y el comportamiento esperado del sistema están disponibles en un formato apropiado, es posible determinar la frecuencia con que una pieza de un equipo se verá impactada por un número de eventos al año. Basado en los datos obtenidos en los pasos anteriores es posible tomar decisiones acerca de la fuente y los equipos recomendables para trabajar en un sistema determinado.

## **2.7 Flujograma De Procedimiento Lógico Y Organizado Para La Caracterización De Sag De Tensión**

Para cumplir los anteriores tres pasos, Es posible planear un flujograma que represente todo el proceso, aplicando un procedimiento lógico y organizado (representando en el diagrama de flujo de la figura 12) que sirve para determinar la actividad de Sag de tensión utilizando la predicción estocástica y monitoreo.

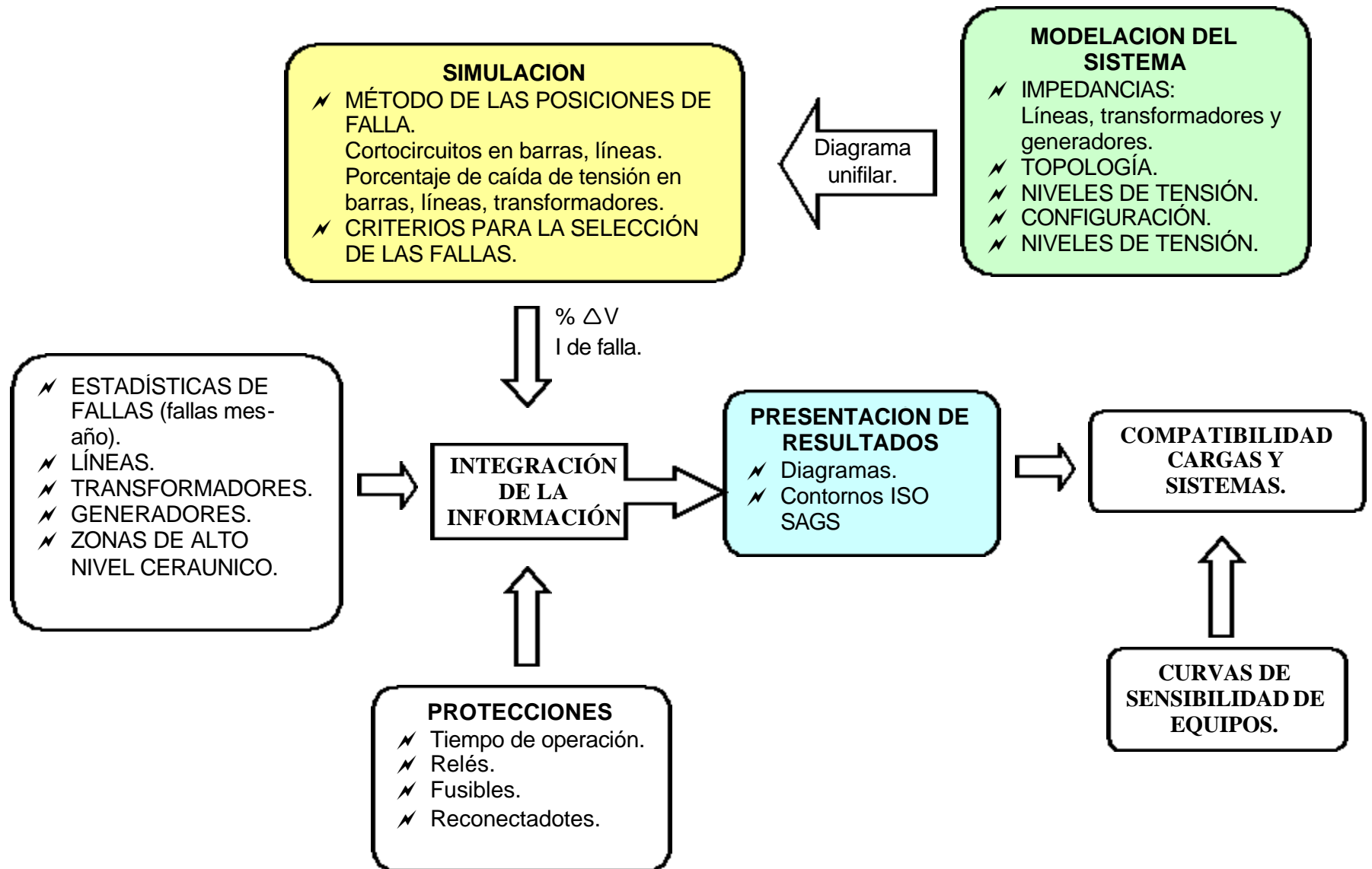
Cada bloque que compone el diagrama de flujo representa un conjunto de actividades a realizar en la caracterización. Se explicará a continuación en que consiste cada bloque y como se debe llevar a cabo, entonces, una caracterización completa del fenómeno sag.

- 1) La primera parte del proceso consiste en recopilar la información necesaria que permita modelar el sistema de potencia y realizar la caracterización completa. La información necesaria se divide básicamente en tres grupos.

### **Modelación del sistema de potencia.**

Para realizar este modelo, el cual debe ser lo más aproximado a la realidad, es necesario saber del sistema las impedancias propias de los diferentes elementos que lo componen, su topología, los niveles de tensión que maneja, la configuración (radial o interconectado) y las condiciones de operación.





**Figura 12.** Flujoograma De Procedimiento Lógico Y Organizado Para La Caracterización De Sag De Tensión

## **Datos de confiabilidad.**

Es principalmente la información estadística de las fallas ocurridas en los diferentes elementos que componen el sistema de potencia; esta información es utilizada para calcular la frecuencia esperada de ocurrencia de eventos Sag. Tal como se indica en el flujograma, se debe tener muy en cuenta el nivel cerámico de las zonas en estudio.

## **Protecciones.**

Como se dijo anteriormente, estos dispositivos tienen mucha influencia en las características de los Sag experimentados en un punto de un sistema de potencia. Se debe saber de ellos el tiempo de operación, el tipo de relés y fusibles utilizados y si emplean o no reconectores.

**2)** La segunda parte del proceso consiste en realizar la simulación de las fallas sobre el modelo realizado en la primera parte.

**3)** Se integra toda la información con los datos obtenidos en la simulación y se organiza de manera tal que sea posible utilizarla para la correcta presentación de los resultados de la caracterización.

Es muy importante anotar que si se utiliza el monitoreo de la calidad de la energía como herramienta para registrar los Sag, las etapas 1, 2 Y 3 del flujograma se ven reducidas a dos, las cuales son, en primer lugar, el monitoreo propiamente dicho y, en segundo lugar, la organización de los eventos registrados. Con estas dos etapas, en caso de utilizar el monitoreo, se tiene la información necesaria para pasar a la cuarta etapa del proceso, la cual consiste en la presentación de resultados.

**4)** Presentación de resultados. Esta etapa consiste básicamente en realizar las gráficas caracterizadoras del sistema de potencia en lo que tiene que ver con las características de los Sag de tensión presentados. La importancia de esta etapa radica en que ella permite observar de una manera práctica y ágil los resultados arrojados por el monitoreo o proyectados por la predicción estadística.

Se debe tener cuidado con los diagrama de resultados, ya que este es el resultado final de la caracterización del sistema de potencia y partir de esta etapa y con base a este diagrama se sigue el proceso hasta la etapa de entrega de resultados.

**5)** Identificar y obtener las curvas de sensibilidad de los equipos conectados a la red. Después de que se sabe que hay problemas con la calidad de la energía, se deben identificar los equipos alimentados en este punto y se deben determinar las consecuencias negativas que se pueden presentar por estar estos equipos sometidos a un suministro de energía de baja calidad.

Para este paso es muy recomendable hacer un chequeo para revisar si en la instalación que se está evaluando existen equipos sensibles al fenómeno de los Sag de tensión y si tienen problema de funcionamiento por causa de estos. Los equipos sensibles a sag de tensión podrían ser los computadores, equipos de telecomunicaciones, contactores de motores y relés electromecánicos, lámparas HID, variadores de velocidad y PLC's.

Una vez se tengan identificados los equipos sensibles, se deben obtener las curvas de sensibilidad o de tensión tolerada de estos equipos. Como en el caso de la CBEMA o ITIC, estas curvas están dadas de forma muy estandarizada por algunos organismos autorizados para expedirlas. En el caso de que no estén en la literatura internacional o no haya una curva de sensibilidad estándar, se debe conseguir esta curva o construirla con la información que el fabricante entregue del equipo.

**6)** Determinar la compatibilidad entre las cargas y el sistema y entregar los

resultados. Ahora que 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 cual es el impacto que tiene las condiciones del sistema de potencia sobre el equipo sensible.

Con este paso se da por terminada la caracterización. Aquí se entrega por escrito el impacto que puede tener el sistema de potencia sobre las cargas sensibles. Se puede además entregar una serie de recomendaciones a implementar para mitigar los efectos negativos de la mala calidad de la energía.

Entre estas recomendaciones puede estar el uso de algunos dispositivos custom power en las instalaciones del usuario, la repartición de cargas en el circuito, la devolución de equipos a los fabricantes en caso necesario y hasta la exigencia a los operadores de red para que implementen acciones que lleven a la disminución de Sag nocivos a las instalaciones de los usuarios.

No olvidemos que la importancia de obtener el comportamiento esperado del sistema, obtener la tensión tolerada del equipo y determinar el impacto esperado, con todo esto es posible saber que tan compatible es el equipo a conectar con la fuente de alimentación. La metodología para llevar a cabo estos tres pasos y procedimiento lógico y organizado para la Caracterización de sag de tensión es lo que se estudiará en esta Monografía.

### **3. MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE SAG DE TENSIÓN**

Los dos métodos existentes para la predicción de fenómenos Sag son “La simulación y el monitoreo”, aunque generalmente se utilizan ambos en las predicciones.

#### **3.1 MONITOREO**

El monitoreo de la fuente es uno de los métodos para caracterizar el comportamiento esperado del sistema, por tal motivo es necesario tenerlo en cuenta si se poseen herramientas de computo altamente sofisticadas, pues el monitoreo se constituye en ocasiones como una fuente de información de datos con alto grado de confiabilidad, precisión y calidad en el desarrollo de los estudios. Para hacer un monitoreo se debe contar con equipos de alta tecnología para el registro de los eventos, de mucho tiempo para realizarlo y de una estrategia clara para la instalación de los equipos.

Las partes que componen el monitoreo se describen a continuación:

##### **3.1.1 Identificar Los Puntos Estratégicos Para Realizar El Monitoreo.**

Este punto amerita un amplio estudio de la topología del sistema eléctrico, el conociendo de la configuración de este, los niveles de tensión y los puntos de distribución de circuitos, se puede determinar cuales de los puntos del circuito son mas representativos para instalar los analizadores de redes. En esta selección de los puntos se debe tener muy en cuenta la recomendación IEEE STD 1159 de 1995, en la cual aparecen los parámetros que se deben tener en cuenta para escoger los puntos de conexión de los analizadores de redes en un estudio de calidad de la energía. Entre

estos parámetros cabe destacar la facilidad de acceso al punto de monitoreo, la ubicación y la compatibilidad del punto de conexión y del analizador en cuanto a implementos de medida y nivel de tensión. Para efectuar el monitoreo, además de tener en cuenta la norma mencionada, se debe establecer el tiempo necesario para realizarlo, de manera que se puedan garantizar resultados confiables.

### 3.1.2 Calcular El Tiempo Mínimo Necesario Para Realizar El Monitoreo Y Efectuarlo.

Este punto es de mucha importancia en la caracterización empleando el monitoreo, ya que aquí se define la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Para estimar cuanto tiempo es necesario monitorear, debemos suponer que los sag de tensión se dan de forma independiente entre sí; el número de eventos ocurridos durante todo el periodo de monitorización ( $K$  eventos en  $n$  años) se puede aproximar por una variable estadística discreta que obedece a la ley de Poisson o ley de los sucesos raros.

La siguiente expresión corresponde a la función densidad de probabilidad de esta ley.

$$P_r \{K = k\} = e^{-nm} * \frac{(nm)^k}{k!}$$

siendo

$\langle K \rangle = n \cdot \mu$  La esperanza matemática del número de eventos,  $K$ , en  $n$  años

$s = \sqrt{n \cdot m}$  La desviación estándar de la variable aleatoria  $K$

$i$  Es la media de sag de tensión anual

$n$  El periodo de monitorización, en años.

Sea  $\mu$  el número de eventos Sag esperados en un año, entonces, el número esperado de eventos K en un periodo de monitoreo de n años, es una variable estocástica discreta

Teniendo en cuenta que, para un número de eventos total (K) suficientemente elevado, la ley de Poisson se puede aproximar por una distribución normal, se puede estimar la media de sag de tensión por año, así como el error cometido. La estimación del número medio de sag de tensión anual se puede realizar mediante la siguiente expresión

$$m_{est} = \frac{K}{n}$$

siendo

$m_{est}$  Esperanza matemática de la variable aleatoria o valores esperados

$s = \sqrt{\frac{m}{n}}$  Desviación estándar de la variable aleatoria  $m_{est}$

Para un intervalo de confianza del 95%, y suponiendo una distribución Normal, el valor de  $m_{est}$  se hallaría en el intervalo  $[\mu + 1.96s, \mu - 1.96s]$ . De aquí se puede obtener el periodo de monitorización necesario, en función del error relativo y de la frecuencia de aparición de los sag de tensión y estará dado por la siguiente formula:

$$\frac{2}{\sqrt{nm}} \leq e \quad n \geq \frac{4}{ne^2}$$

Para un evento con una frecuencia de  $\mu$  veces por año, el periodo de monitoreo deberá ser como mínimo  $\frac{4}{ne^2}$  años para obtener un error  $\hat{a}$

La tabla 6 muestra el resultado de aplicar esta expresión para distintas hipótesis sobre la frecuencia de aparición de huecos de tensión<sup>12</sup>.

FRECUENCIA DE EVENTO	50% DE ERROR	10% DE ERROR	2% DE ERROR
1 Por día	2 Semanas	1 Año	25 Años
1 Por Semana	4 Meses	2 Años	200 Años
1 Por Mes	1 Año	30 Años	800 Años
1 Por Año	1 6 Años	400 Años	1 0000 Años

**Tabla 6.** Tiempos mínimos de monitoreo para alcanzar resultados con errores determinados.

La anterior tabla entrega el mínimo periodo de monitoreo necesario para caracterizar eventos con determinadas frecuencias de ocurrencia esperadas. Se observa que mientras mayor sea la frecuencia de ocurrencia esperada de los eventos, mayor será la precisión de los resultados recogidos en la medición en periodos de tiempo mucho más cortos.

Cuando los Sag tienen una frecuencia de ocurrencia esperada muy menor, el método del monitoreo no debe ser usado para predecir el número de eventos, como mencionamos antes, la aproximación de una distribución de Poisson a una distribución normal, se hace para muestras de gran tamaño.

También la tabla anterior se debe tener muy en cuenta cuando se vaya a realizar la caracterización de, no sólo Sag, sino también de cualquier fenómeno electromagnético. También se observó con el anterior análisis, que para adelantar una caracterización utilizando esta metodología, se debe contar con una buena infraestructura en equipos

---

<sup>12</sup> M.H.J. Bollen: Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions, New York, IEEE Press, 2000



de medición y se debe disponer del tiempo suficiente y necesario para realizar un correcto monitoreo.

Es muy importante asumir para el análisis que en un sistema estacionario la aparición de los eventos se acomoda a una distribución exponencial, así estos aparezcan completamente al azar. Para un sistema estacionario, es posible obtener la frecuencia con la que aparecen los eventos, de una manera precisa haciendo largos periodos de monitoreo. Como la situación es diferente, y los sistemas de potencia en su dinámica hacen que los eventos sean impredecibles, se deben tener muy en cuenta todos los fenómenos que se oponen a una predicción segura de los eventos.

Una gran parte de los Sag son debidos al mal tiempo: rayos, vientos fuertes, nieve, etc. La frecuencia de los Sag no es constante, pero sin embargo, es posible alcanzar un modelo del comportamiento del tiempo a lo largo de un año, teniendo muy en cuenta que las condiciones de este varían de año a año. Debido a la relación existente entre los Sag y las adversidades del tiempo, se puede realizar una predicción de los Sag que se espera ocurran debido a fallas en sistemas de potencia; este dato podría utilizarse como  $\mu$  en el cálculo del tiempo de monitoreo, pero de esta forma se hace más práctico utilizar la simulación como herramienta de predicción, apoyada en las estadísticas de fallas que se tienen del sistema eléctrico de potencia.

## **Ejemplo**

Supongamos para este ejemplo, no existe registros anteriores sobre monitoreos de Sag, entonces es necesario realizar un premonitoreo del cual se obtenga el valor para  $\lambda$ , como premonitoreo se tomara un espacio de 30 días. En este periodo se obtendrá un número determinado de Sag que dividido entre el número de días del premonitoreo (30), dará una buena aproximación del valor esperado de eventos por día; obviamente,

lo ideal es realizar el premonitoreo por mucho más tiempo y respaldado con más información.

Supongamos que el número de Sag capturados en nuestro ejemplo en los 30 días (n/l) fueron 25.

$$m_{est} = \frac{K}{n} = \frac{25}{30} = 0.8333 \text{ sag/día}$$

Se calculará ahora el tiempo mínimo requerido para obtener resultados confiables

$$n \geq \frac{4}{ne^2} \geq \frac{4}{(0.8333) * (0.1)^2} \geq 480.019 \text{ días}$$

Esto significa que para realizar una caracterización completa utilizando el monitoreo de la calidad de energía y obtener unos resultados con el 10% de error se debe monitorear por lo menos 481 días.

### **3.1.3 Organizar Y Tabular Los Datos Obtenidos En El Monitoreo.**

Este paso es de simple logística, se recomienda para efectos de la caracterización seguir el formato mostrado en la tabla 7 para organizar los datos registrados por el analizador.

Siguiendo esta tabla se garantiza que se tienen todos los datos suficientes para realizar las gráficas propias de la caracterización.

A pesar de todo, los resultados obtenidos mediante monitorización no dejan de ser una herramienta útil que puede ayudar a entender el comportamiento de la red de una forma más precisa. Además, las estadísticas obtenidas mediante la monitorización pueden ser

tenidas en cuenta en la toma de decisiones siempre y cuando se sea consciente del amplio margen de error que se puede cometer con estos valores.

### **3.2 SIMULACIÓN O PREDICCIÓN ESTOCÁSTICA**

Con este método es posible predecir la magnitud de los Sag que experimentará un punto de interés en el sistema debido a fallas en puntos determinados del mismo. Se utiliza un computador y un programa de simulación como el ATP, DGSILENT POWER FACTORY, CYME y ETAP. Consiste en suministrarle al programa la información que caracterice el sistema como registro estadístico de fallas, impedancia de las líneas, de los barrajes y conexión de los transformadores. Con esta información y con la simulación de la falla se calcula la magnitud del sag en los puntos de interés.

La predicción estocástica presenta grandes ventajas respecto al análisis realizado con el monitoreo. Es sumamente precisa gracias a que se realiza mediante el uso de programas computacionales que permiten elegir el grado de exactitud con el que se requiere trabajar y posibilitan el acceso a redes inexistentes o a puntos del sistema donde es casi imposible monitorear. Los modelos estocásticos usan diferentes técnicas de predicción de eventos en un punto determinado, caracterizando matemáticamente las diferentes variables que hacen parte del evento en estudio (media, desviación estándar, moda, etc.).

Los métodos de predicción estadística requieren por lo general dos tipos de datos: datos del sistema de potencia y datos de las componentes de confiabilidad, siendo este último el más importante; la componente de confiabilidad del sistema es obtenida a través de la observación del comportamiento del sistema.

Evento	Fecha	Hora	Magnitud del Sag (P.U)	Cambio del Angulo de Fase (Grados)	Voltaje Drop (P.U)	Duración (seg.)	Punto De Iniciación del Sag (Ángulo, Grados)	Punto De Iniciación del Sag (Tiempo, seg.)	Punto de Recuperación (Ángulo, Grados)	Punto de Recuperación (Tiempo, seg.)	Tipo de Sag	Causa

1)

**Tabla 7** para organizar los datos registrados en un monitoreo de calidad de la energía.

En el análisis de sistemas de potencia se tienen algunos problemas, como que los métodos de mantenimiento están cambiando constantemente, la rata de fallas de componentes nuevos es difícil de establecer, el patrón del comportamiento de las cargas puede cambiar, el estado del tiempo esta inclinado hacia un cambio permanente. Dentro de la predicción estadística se presentan las mismas incertidumbres que en el monitoreo de la calidad de la energía, pero con la evaluación estadística se hace posible introducir el efecto de esta incertidumbre y realizar un análisis más confiable.

Para realizar una predicción estadística se requiere seguir un procedimiento adecuado que permita realizar un procesamiento de los datos de una forma correcta haciendo posible la optimización del software que se utiliza, pues a partir de un buen modelo es posible hacer una predicción del comportamiento futuro de un sistema para determinadas condiciones de estudio. Es de esta forma como se visualiza la importancia del empleo de herramientas estocásticas para el planeamiento operativo de un sistema de potencia y para el estudio de las características de los diferentes eventos que pueden presentarse dentro del mismo.

El método que se pretende brindar información en este trabajo es el denominado "MÉTODO DE LAS POSICIONES DE FALLA", el cual, está encuadrado dentro de una metodología propuesta para llevar a cabo una acertada predicción estocástica de los Sag de tensión dentro de un sistema de potencia, dicha propuesta no tendrá como objeto ser de tipo único ni de carácter autoritario.

En el análisis de sistemas de potencia es prioritario conocer el problema que afecta al mismo o determinar el tipo de fenómeno que se va estudiar. Esto se puede lograr en el instante que se plantean las necesidades de operación y uso de los diferentes sectores de cada sistema, de esta forma es posible determinar cuales tipos de cargas son instalables, que industrias pueden constituirse dentro

del sistema en estudio, o que soluciones implementar (en sistemas ya existentes) para los diferentes usuarios.

Cuando se va a realizar un estudio de la actividad de Sag dentro de un sistema de potencia (con configuración radial o interconectada), es importante definir un esquema de trabajo que permita obtener las diferentes características de los eventos que se podrán presentar dentro del sistema en estudio. Dicho esquema de trabajo se plantea a continuación y está dividido en siete etapas.

### **3.2.1 Identificar El Problema A Tratar**

Indica la necesidad de establecer el tipo de problema que se va a trabajar y con esto ubicarlo dentro del contexto de la normatividad existente sobre el tema y aplicar la que rige al tipo de fenómeno en estudio; para el presente caso se estudian los Sag de tensión.

### **3.2.2 Definir El Plan De Trabajo O El Procedimiento Para Hacer El Estudio.**

Esta es una parte imperativa y básica del estudio a realizar, ya que del desarrollo de esta etapa es posible o no conseguir una caracterización exitosa del fenómeno sag.

### **3.2.3 Identificar Las Componentes Y Características De Los Elementos Que Constituyen El Sistema Eléctrico De Potencia En El Cual Se Va A Trabajar.**

En este paso se obtienen todos los elementos necesarios para realizar una modelación correcta del sistema eléctrico de potencia. En la modelación de este se incluyen las características de los diferentes elementos que hacen parte del mismo. Es por esto que se deben conocer las impedancias de las líneas de transmisión, transformadores, barrajes de las diferentes subestaciones,

generadores y las diferentes configuraciones de cada uno de los elementos.

### **3.2.4 Consultar La Existencia De Estudios Similares Sobre El Mismo Sistema Eléctrico Y La Estadística De Falla De Los Diferentes Elementos Del Sistema.**

Si se cuenta con un banco de datos de estudios similares anteriores, es posible ahorrar mucho tiempo respecto al tema de la simulación de Sag dentro del sistema eléctrico de potencia, pues de estos puede resultar gran parte de la información necesaria para analizar el sistema en estudio. En caso de no tener ningún tipo de información se hace necesario realizar un estudio completo, lo cual exige poseer información estadística acerca de la expectativa de fallas por año de las líneas, generadores, transformadores y de más elementos que hacen parte de la red eléctrica. Esta información se convierte en el soporte técnico para que el analista haga una elección correcta del tipo y número de fallas a usar en la simulación y del método para obtener la actividad de Sag para un sistema. Dentro de estos datos estadísticos se incluyen también los estudios de fallas causados por descargas atmosféricas, ya que estas son gran causal de Sag de tensión; por tal motivo en el momento de realizar el estudio se hace necesario tener en cuenta donde está ubicado geográficamente el sistema eléctrico de potencia (se procede a trabajar con el nivel cerámico de la zona).

### **3.2.5 Conocer Las Características De Los Diferentes Tipos De Protecciones Usadas En El Sistema Eléctrico De Potencia En Estudio.**

Dentro de la topología y funcionamiento de una red de potencia es de vital importancia el estudio de los diferentes dispositivos de protección, ya que estos pueden ser determinantes en la compatibilidad de un equipo con la fuente que lo alimenta; además, conociendo el funcionamiento de las protecciones puede determinarse la duración de los diferentes fenómenos electromagnéticos a los que van estar sometidas las cargas conectadas a la red. Como se mencionó

anteriormente, un sag dura mientras la falla es aclarada por el dispositivo de protección, razón suficiente para incluir las características de los diferentes elementos de protección en el proceso de estudio de la actividad de Sag usando herramientas estadísticas.

### **3.2.6 Aplicar Un Método De Análisis Para Realizar Una Determinación Estocástica De Los Sag De Tensión, Simular Y Presentar Resultados.**

En esta etapa el analista juega un gran papel, pues es él quien define que método usar, según su criterio, para lograr una determinación adecuada de la actividad de Sag dentro del sistema de potencia en estudio. Dentro de estos métodos se encuentra el conocido como "Método de las posiciones de falla" del cual se mencionarán las principales características mas adelante.

### **3.2.7 Validar Los Resultados Obtenidos.**

Este paso permite reconocer y comprobar la existencia de Sag dentro de la red en estudio, estableciendo de esta forma una conexión directa entre la teoría desarrollada mediante la simulación y la práctica hecha mediante la medición.

Durante la simulación se cuenta con los parámetros reales de las componentes, pero en la mayoría de los casos es muy difícil contar con los valores reales de las variables de los sistemas; esto hace necesario que para el análisis de Sag en un sistema existente, se deba realizar un monitoreo que permita confrontar la realidad del problema en estudio con la simulación realizada, para darle, de esta manera, un alto grado de certidumbre al trabajo realizado.



### **3.3 MÉTODO DE LAS POSICIONES DE FALLA.**

Los métodos de predicción estocástica están fundamentados en los datos adquiridos durante el monitoreo (experiencias anteriores), estudios realizados y algunos datos suministrados por el fabricante de los equipos que hacen parte de la red en estudio. Esto hace que el método de las posiciones de falla use las siete etapas mencionadas anteriormente para la determinación de la actividad de Sag dentro de un sistema de potencia, tomando este como un conjunto o definiendo un punto específico del mismo. Es esta última parte, un factor decisivo en la elección de la cantidad y distribución de las fallas a introducirle al método<sup>13</sup>.

Este método es aplicable tanto a sistemas de potencia radiales, como a sistemas interconectados, variando en dicha aplicación, solamente la configuración de la red en estudio y la posición del observador.

Respecto a la posición del observador, es posible afirmar que es determinante en la elección de la metodología a seguir y en la posición de las fallas; no es lo mismo realizar una predicción estocástica para un punto del sistema sometiéndolo a fallas en alimentadores y circuitos vecinos a diferentes niveles de tensión (influencia del sistema sobre un punto), que observar el efecto de una falla sobre diferentes puntos en el sistema (influencia de una falla sobre el sistema).

#### **3.3.1 Bases del método.**

El método de las posiciones de falla es usado generalmente para determinar el número de Sag esperados en una red eléctrica de potencia, este procede de la siguiente forma:

- 1. Determina el área del sistema, en la cual los cortocircuitos serán considerados.**

---

<sup>13</sup> M.H.J. Bollen: Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions, New York, IEEE Press, 2000

2. Divide al área en pequeñas partes. Cortocircuitos dentro de cada una de estas partes podrán llevar a Sag con características iguales. Cada parte de estas es representada por una posición de falla dentro del circuito que modela el sistema eléctrico.

3. Para cada posición de falla, la frecuencia del cortocircuito es determinada (es decir entregada al programa). Se entiende como frecuencia de cortocircuito el número de fallas (cortocircuitos) esperadas por año en una pequeña parte del sistema representada por una posición de falla.

4. Mediante el uso del circuito modelo de potencia, las características del sag son calculadas para cada posición de falla, dependiendo de las herramientas disponibles para hacerlo (medios computacionales que se poseen para procesar la información y entregar resultados altamente confiables).

5. El resultado de los pasos previos (características de los Sag y frecuencia de ocurrencia de los eventos) son combinados para obtener la información estocástica suficiente para caracterizar y clasificar el fenómeno dentro de los rangos establecidos.

La elección de la ubicación de las fallas dentro del modelo del sistema eléctrico de potencia depende de donde se desean registrar los Sag, pues resulta que según la ubicación de las fallas las características fundamentales de los eventos cambian (magnitud y duración); por otro lado el número de fallas varía para cada posición, dependiendo este número de la estadística que se posea de la ocurrencia de fallas en diferentes puntos del sistema.

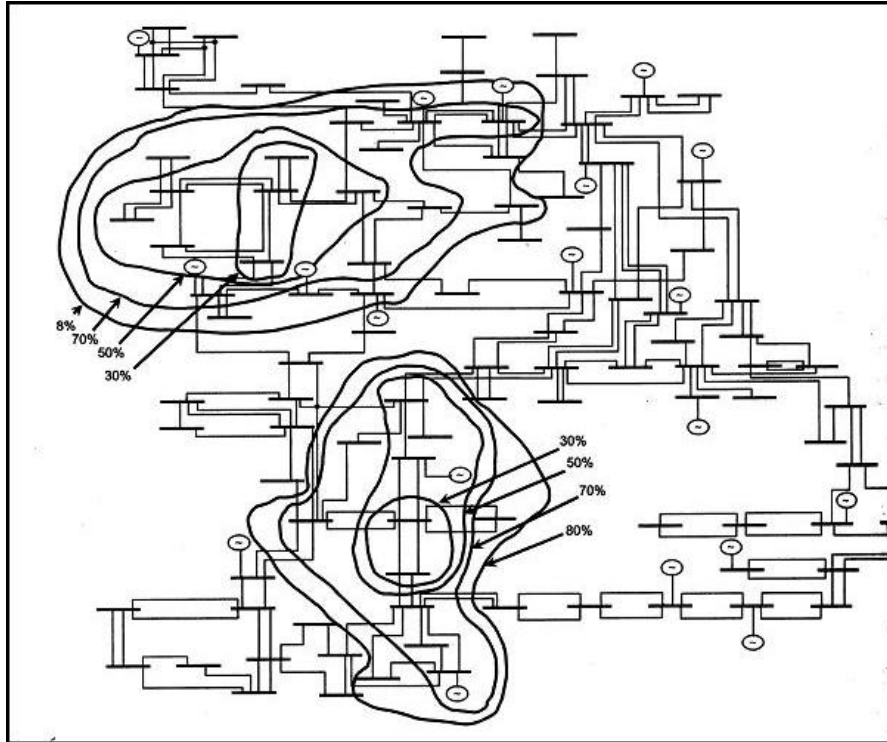
### **3.3.2 Múltiples Eventos.**

El método de las posiciones de falla considera esencialmente sólo cortocircuitos,

los demás eventos que ocurren durante una falla no son tomados en cuenta. La introducción de tales eventos complicaría en gran parte los cálculos a realizarse y tampoco mejoraría la exactitud de los cálculos.

La posición del observador juega un gran papel ya que, dependiendo de esta, el área de estudio se hace más o menos extensa. Para realizar un estudio de la incidencia de una falla sobre un punto específico del sistema eléctrico de potencia, se prueban diferentes posiciones de falla para dicho punto (el cual se establece como sitio de prueba) y se registran las magnitudes de los Sag causados por cada falla. Por otro lado, cuando se estudia el efecto de una falla sobre el sistema en general, la posición de la falla es establecida y la medición se efectúa sobre diferentes puntos del sistema eléctrico de potencia, determinando así el mapa de Sag dentro del sistema en estudio ocasionados por una falla determinada (ver Figura 13)

En la aplicación del método se deben tener en cuenta varios factores que pueden afectar de forma directa las características de los Sag registrados en la simulación; entre estos factores están los diferentes generadores que están conectados al sistema, las características de las líneas, la ubicación de los transformadores, la existencia de bancos de compensación, etc. El método al inicio realiza pruebas de confiabilidad del sistema, sigue con la determinación de los Sag debidos a diferentes fallas en el sistema (según el analista y el tipo de estudio a realizar), luego se define el área influenciada por las fallas y se concluye con la determinación de la frecuencia de Sag en el tiempo.



**Figura 13.** Mapa de Sag dentro del sistema en estudio ocasionados por una falla determinada

La figura 13 muestra un ejemplo de una de ellas para un sistema interconectado, estas se obtuvieron utilizando el programa PSAF para simulaciones de fallas eléctricas.

### 3.3.3 Criterios Para La Elección De Una Posición De Falla.

El primer paso en la aplicación de este método es la elección de la(s) posición(es) de falla ó falla(s) incidente(s). Resulta obvio decir que a mayor número de fallas simuladas más exactitud se obtiene en la predicción, pero la elección al azar de posiciones de falla no mejora la exactitud del método, por el contrario, disminuye la rapidez de los cálculos.

Aplicar fallas solamente a un alimentador no es suficiente y aplicar fallas a todos los alimentadores del sistema puede resultar redundante; por tal motivo, es

necesario realizar algún tipo de relación entre el sistema y las fallas y evaluar el nivel de tensión sobre el cual se realiza el estudio.

En este método para cada posición de falla, pueden considerarse diferentes tipos de falla y es el analista quien decide cuales fallas elige (monofásicas, bifásicas o trifásicas). Es necesario además considerar diferentes impedancias de falla, diferentes tiempos de aclaración de falla, ubicación de generadores y cada una de las fallas con su propia frecuencia de ocurrencia y características.

El principal criterio para la elección de la posición de la falla es "Una posición de falla, es representada por un cortocircuito que lleva a Sag de tensión con iguales características". Es importante tener en cuenta los siguientes tres aspectos que se deben aplicar en la elección de la(s) posición(es) de falla y que serán descritos a continuación.

### **3.3.3.1 Distancia Entre Las Posiciones De Falla.**

Para entender como la distancia (entre la falla y la subestación de la cual se alimenta la carga) afecta el resultado de la simulación, es necesario considerar la magnitud del sag como función de dicha distancia. Respecto al número de fallas a simular, es recomendable en sistema radiales aplicar dos (2) por cada línea que alimente la subestación; para sistemas, interconectados, el número de fallas a aplicar es mucho mayor y depende en gran medida del nivel de tensión en el cual se ubicará la falla, pues, como se dijo, las fallas ubicadas en niveles de tensión bajos no afectan significativamente los niveles de tensión altos. La distancia entre las posiciones de falla determina la precisión del método y hace posible diferenciar los distintos niveles de magnitud de Sag según su valor (contornos iso-Sag). De acuerdo a esto, si se desea mayor exactitud para diferenciar los contornos iso-Sag, se debe aumentar el número de fallas a simular ya su vez disminuir la distancia entre ellas.

### 3.3.3.2 Extensión Hasta La Posición De Falla (¿Hasta Qué Distancia Se Deben Considerar Las Fallas?).

La respuesta a esta pregunta depende en gran parte del nivel de tensión, del nivel de falla (corriente de falla) y de la magnitud de sag que se desea registrar. La distancia eléctrica desde un punto determinado hasta el punto fallado para un sistema radial es:

$$x = \frac{V_{nom}}{\sqrt{3} * I_{falla}} * \frac{V_{sag}}{1 - V_{sag}}$$

donde:

x: distancia desde el punto de interés hasta el punto de falla.

$V_{nom}$ : Tensión nominal del sistema.

$I_{falla}$ : Corriente de cortocircuito en el punto de falla.

$V_{sag}$ : Magnitud del sag de tensión experimentado en el punto de interés.

En la formula anterior se utiliza (en un sistema de configuración radial) como valor inicial un sag del 90% para delimitar la longitud requerida para realizar el estudio. Para sistemas interconectados, se hace necesario delimitar el área de ubicación de fallas, comenzando con un ensayo donde se inicializa el proceso con una falla y se examina según su efecto si es necesario disminuir o aumentar el área de trabajo (el efecto lo determina la magnitud del sag obtenido); un valor mayor al 90 % del valor nominal de la tensión indica que la ubicación de la falla actual no causa Sag a esa distancia, por lo que no se hace necesario registrar la tensión en sectores más alejados.

### 3.3.3.3 Protección Contra Fallas.

Los dispositivos de protección se deben considerar en la elección de la posición de falla debido a que el accionamiento de estos introduce dos eventos en una sola

operación; el primero de ellos mediante la acción del lado primario y el segundo al accionarse la protección de respaldo (backup). Los dos tipos de eventos son diferentes tanto en duración como en frecuencia de ocurrencia, ya que el respaldo no siempre opera.

Para la determinación de la actividad de Sag de tensión dentro de un sistema eléctrico de potencia existe otro método denominado método de las distancias críticas, el cual no calcula propiamente la magnitud del sag para una posición determinada sino que, por el contrario, para una magnitud conocida de un sag de tensión entrega la posición de la falla que lo ocasiona. Este método se fundamenta en algunas expresiones básicas del divisor de tensión utilizado para sistemas radiales de distribución y tiene en cuenta la impedancia propia de las líneas que hacen parte del sistema, de los transformadores y de las cargas que se encuentran entre el punto de estudio y el punto de falla.

## 4. CURVA DE SENSIBILIDAD O TOLERANCIA DE EQUIPOS

Generalmente los equipos eléctricos operan mejor cuando el voltaje rms es constante e igual al valor nominal, en caso de que el voltaje sea cero por cierto periodo de tiempo, el equipo simplemente sale de operación, mientras que piezas no eléctricas de equipos eléctricos pueden operar indefinidamente sin suministro de energía. Algunos equipos dejan de operar instantáneamente como los computadores de oficina, mientras que otros equipos pueden soportar interrupciones largas, como lo son los computadores personales, los cuales están provistos desde el diseño de baterías que mantienen el equipo por un periodo de tiempo determinado.

El concepto de curva de tensión tolerada para un equipo electrónico sensible fue introducido en 1978 por Thomas Key cuando estudiando la confiabilidad de una fuente para instalaciones militares observó que los voltajes Sag causaban mala operación en los computadores y podrían ser tan amenazantes para la seguridad nacional como una interrupción completa. Por consiguiente Key cuestionó a algunos fabricantes por sus criterios de diseño y desarrolló algunas pruebas propias, resultando la curva de voltaje de sensibilidad, la cual se convirtió varios años después en la conocida "Curva CBEMA".

### **4.1 CBEMA (Computer Business Equipment Manufactures Association ) e ITIC (The Information Thecnogy Industry Council)**

La primera curva moderna de voltaje de sensibilidad fue introducida para verificar la operación de computadores, esta curva es mostrada como una línea sólida en la figura 14, donde se ve que su perfil no corresponde con los perfiles de la curva



de voltaje de sensibilidad de los diferentes equipos de cómputo<sup>14</sup>

Esto puede ser entendido si se reconoce que las curvas del voltaje de sensibilidad para un equipo dan el desempeño de una pieza del mismo para un tiempo determinado, mientras que la curva CBEMA muestra el voltaje requerido para un rango de operación completo del equipo. El requerimiento de las curvas de sensibilidad de los equipos es que ellas estén en todo momento por encima de la curva CBEMA.

La curva CBEMA fue dada a conocer por "Computer Business Equipment Manufactures Association" al iniciar su uso mediante una recomendación de los propios socios. Subsecuentemente la curva fue adoptada por la norma IEEE Std. 493 de 1995 y se convirtió en una referencia para la tensión tolerada de todos los equipos por su severidad respecto a los Sag de tensión. Un variado número de paquetes de computo usados para analizar la calidad de la potencia eléctrica grafican la magnitud y duración de los Sag en superposición a la curva CBEMA.

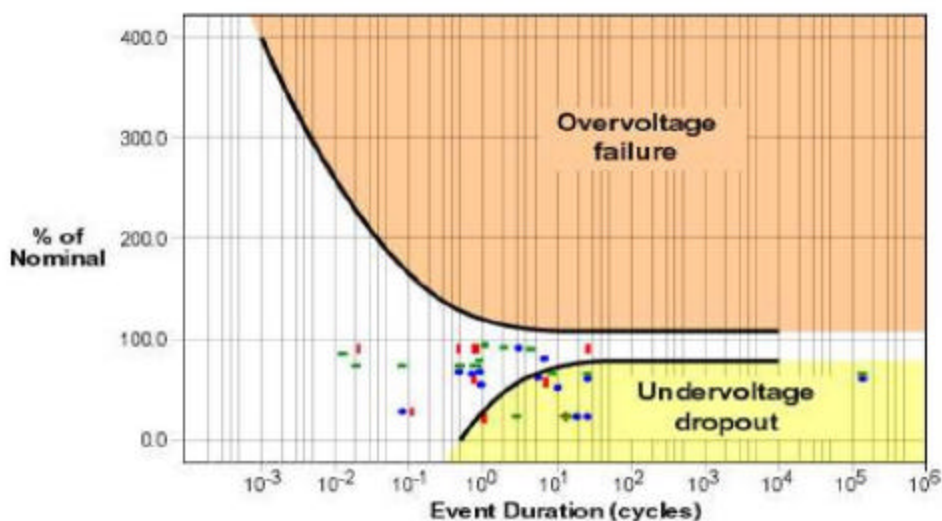


Figura 14. Ilustra un ejemplo de la curva de CBEMA<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> M.H.J. Bollen: Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions, New York, IEEE Press, 2000

<sup>15</sup> Dowe Mueller, Mark McGranaghan, "Effect of Voltage Sags in Process Industry Applications", PQ Network, Electrotek Concepts, Inc

Una reciente revisión a la curva CBEMA ha sido adoptada por "The Information Thecnogy Industry Council (ITIC)", el cual es el sucesor del CBEMA; la nueva curva, conocida como la ITIC, esta dibujada en la figura 15 con un perfil no continuo y de carácter rectangular.

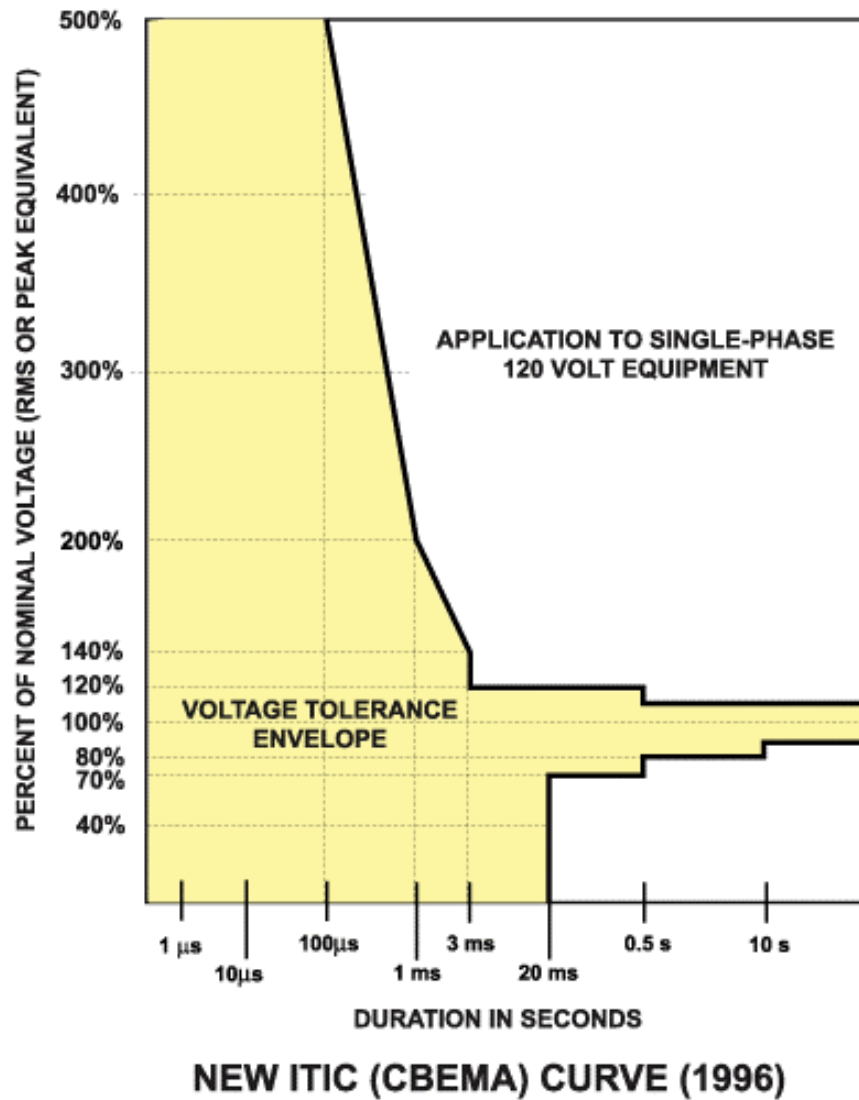
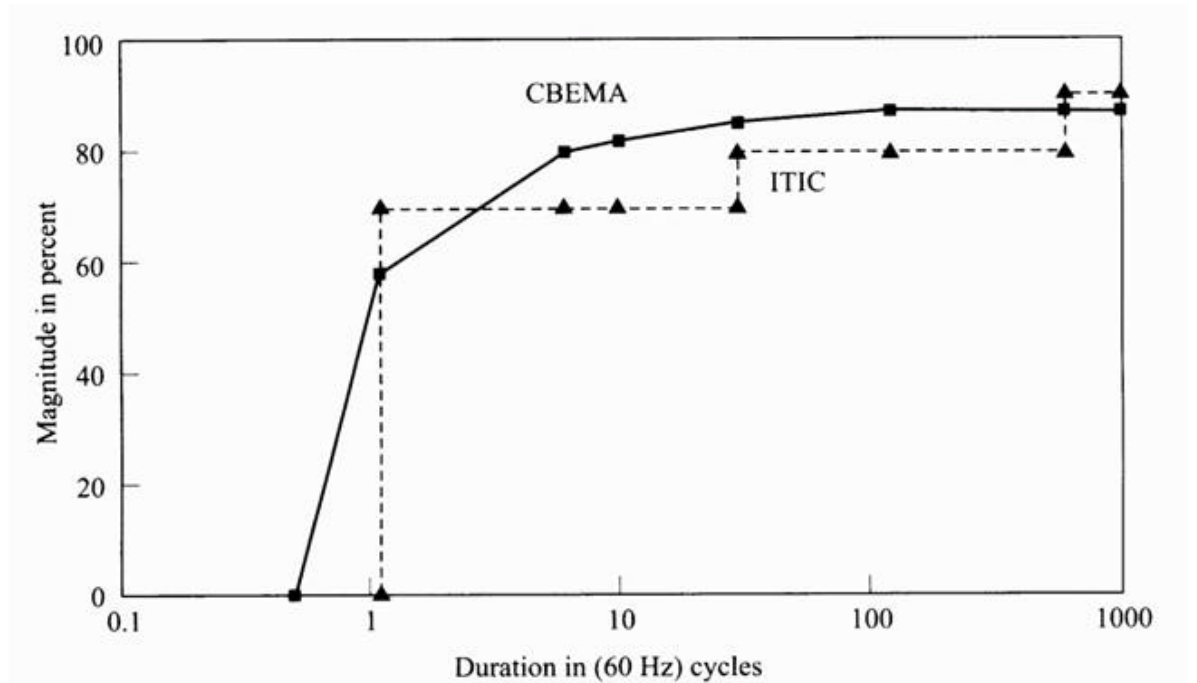


Figura 15. Curva ITI<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> ITI curve. Information Technology Industry Council, Washington D 2000. (<http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf>)

La curva ITIC muestra algunos requerimientos más severos que la curva CBEMA, gracias a que recientes monitoreos han mostrado la existencia de un alarmante número de Sag por fuera del alcance de la curva CBEMA.



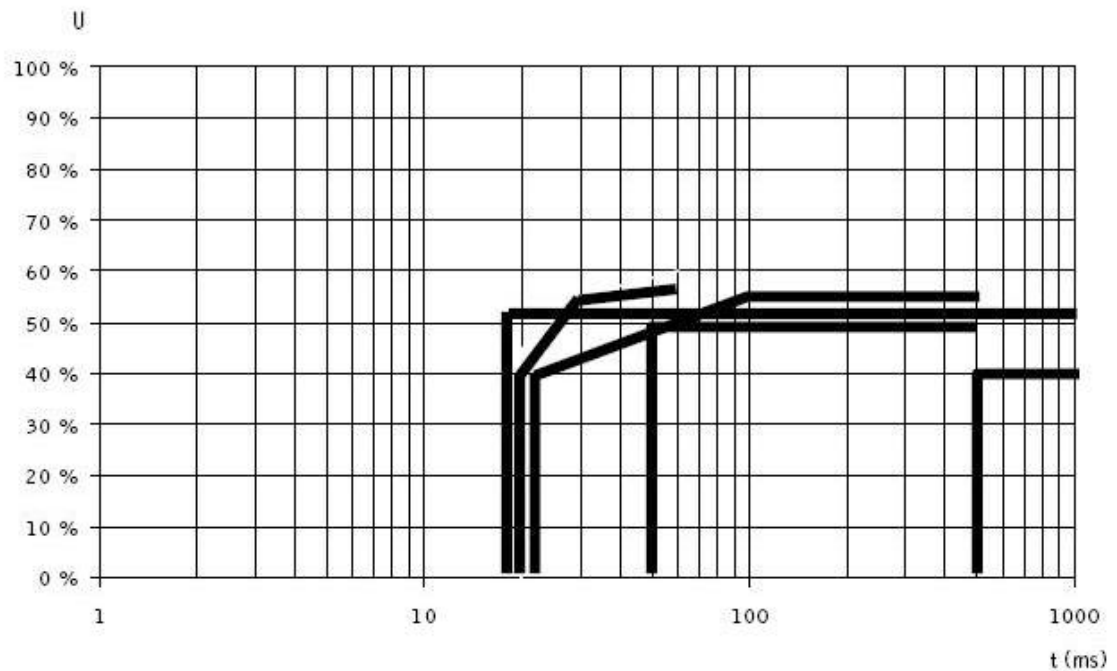
**Figura 16.** Curva CBEMA superpuesta con la curva ITIC

Los sag de tensión pueden causar daño económico serio a los clientes finales, antes de determinar la severidad del impacto económico tenemos que determinar el impacto técnico de los sag de tensión en un punto de sistema de distribución. Más allá, después de predecir el impacto de los sag de voltaje en un proceso completo, planta o servicio, nosotros tenemos que predecir la sensibilidad de voltaje de cada tipo de carga; porque cada tipo de equipo tiene una curva propia y, además, se podrá establecer las predicciones categorizadas razonablemente. Las curvas de sensibilidad de varios equipos electrónicos industriales y comerciales se han medido y se presentaran a continuación:

### 4.1.1 Contactores Y Relays

Se han llevado a cabo varios estudios y publicaciones sobre los valores típicos de sensibilidad de sag de tensión en los contactores<sup>17</sup> y relays, usados típicamente para conectar los circuitos primarios y control en los motores; los resultados se combinan en figura 17 como un promedio de los dispositivos probados en cada referencia.

Los contactores se probaron también en el laboratorio de calidad de potencia de la universidad Helsinki. La prueba fue realizada con 28 contactores entre 9 a 900 A<sub>dc</sub> (CA-3) de 5 fabricantes diferentes. Algunas unidades eran nuevas mientras otros habían estado en el funcionamiento durante varios años. Algunos de los dispositivos probados se muestran en figura 18.



**Figura 17.** Valores típicos de sensibilidad de sag de tensión en los contactores.

<sup>17</sup> Collins, E. R. Jr., Zapardiel, F. An experimental assessment of AC contactor behavior during voltage sags. ISIE '97, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Volume 2, 1997, pp. 440.



**Figura 18.** Algunos contactores utilizados en la prueba.

#### 4.1.2 Lámparas De Descarga a Gas



**Figura 19.** Lámpara de descarga a gas.

Las lámparas de descarga a gas se usan ampliamente en lugares dónde se necesita una cantidad significativa de iluminación, es decir la iluminación de vías, iluminación deportiva, iluminación industrial y comercial, etc. Ellas proporcionan una manera muy rentable de transformar electricidad en la luz visible, los ejemplos más representativos de este tipo de dispositivos son las lámparas de arco rellenas con vapor de mercurio (lámparas de vapor de mercurio), que generan una intensa luz azul verdosa y que se emplean para fotografía e iluminación de carreteras. Las lámparas de descarga eléctrica dependen de la ionización y de la descarga eléctrica resultante en vapores o gases a bajas presiones en caso de ser atravesados por una corriente eléctrica. Una imagen de la lámpara de sodio se muestra en la figura 19.

Algunos estudios hechos a estas lámparas se han llevado a cabo en el extranjero<sup>18</sup>, en ellos se observó que con una disminución de 50% a 80% del valor nominal de la tensión y en un tiempo tan corto como un 0,5 ciclos, se puede causar la extinción de la lámpara. Según Dorr & al., la sensibilidad de la lámpara a las variaciones depende mucho de la edad de la lámpara. Entre mas vieja la lámpara será más sensible al sag.

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de calidad de potencia de la universidad Helsinki, 7 lámparas de descarga a gas de marca diferente, tipo y potencia.

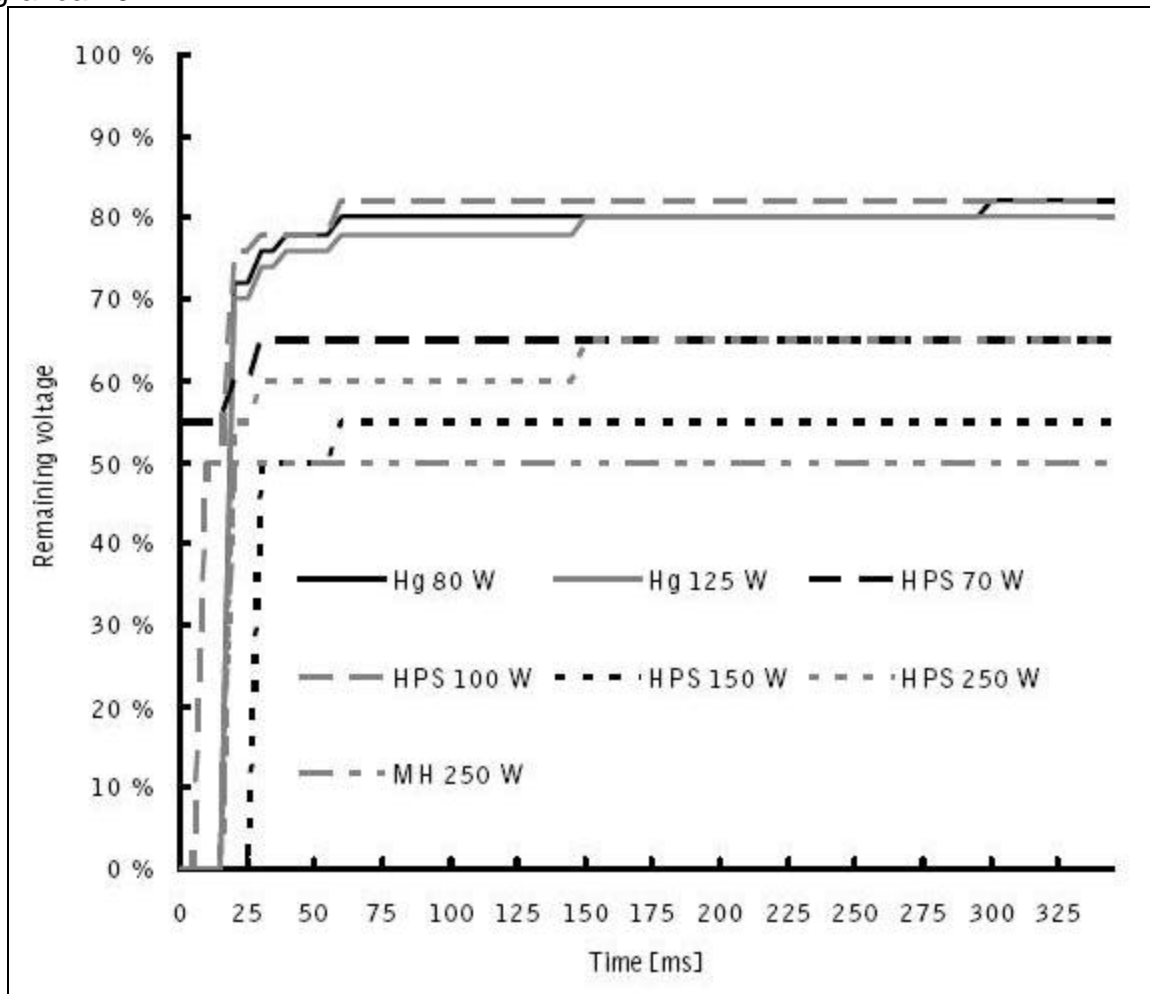
La muestra incluyó las siguientes bombillas de 230V:

- De mercurio 80 W
- De mercurio 125 W
- De sodio a alta presión 70 W
- De sodio a alta presión 100 W
- De sodio a alta presión 150 W
- De sodio a alta presión 250 W
- De Metal Halide 250 W

---

<sup>18</sup> Dorr D. S., Mansoor A., Morinec A. G., Worley J. C. Effects of power line volt-age variations on different types of 400-W high-pressure sodium ballasts IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 33 Issue 2, March-April 1997. pp. 472-476.

Todas las lámparas habían sido usadas durante 100 horas antes de someterlas a la prueba, Se aplicaron las combaduras a las lámparas bajo el nivel de tensión normal y a las condiciones de operación estable, es decir después de un período del precalentamiento apropiado. La sensibilidad que se obtuvo se muestra en la grafica 20.



**Figura 20.** Curvas de sensibilidad de diferentes tipos de lámparas. Hg =Mercurio, HPS = Sodio a alta presión., MH = metal halide).

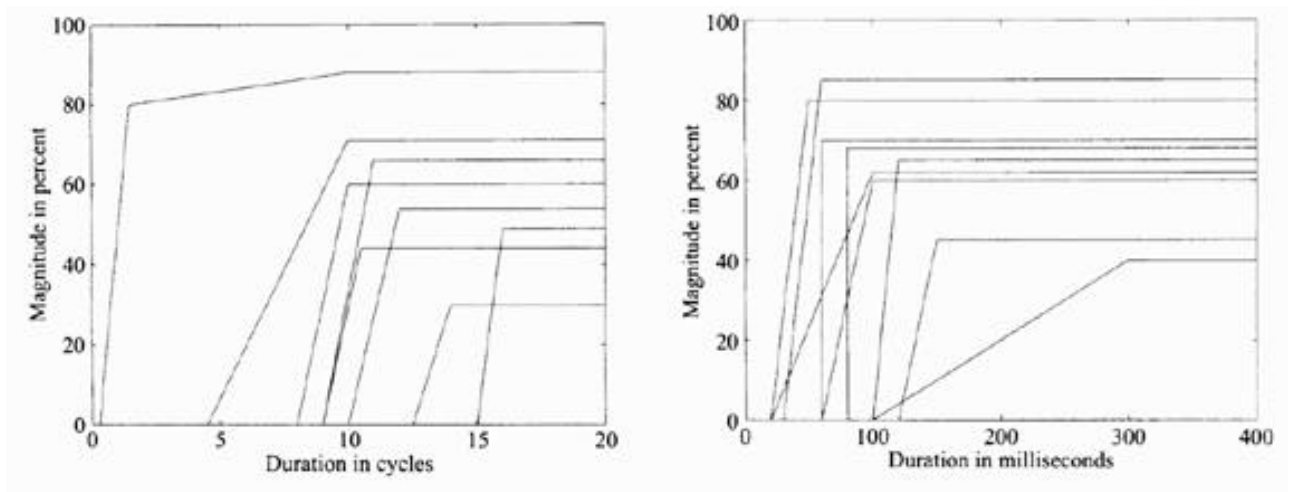
#### 4.1.3 Computadoras Personales y PLC's

Las curvas de sensibilidad de voltaje para las computadoras personales se muestra en la figura 21; la figura del lado izquierdo muestra los resultados de un ensayo de computadores fabricados en los EE.UU. y la figura derecha muestra

los resultados de pruebas con computadores japoneses.

Los resultados son increíblemente diferentes ya que los diseños en la fuente de alimentación son diferentes; las fuentes de alimentación emplean un condensador cuyo propósito es filtrar la forma de onda del voltaje y la mantiene constante, cuanto más grande es el condensador se podrá almacenar mas cantidad de energía que puede ser usada para suministrar energía en el caso de un sag de tensión momentáneo.

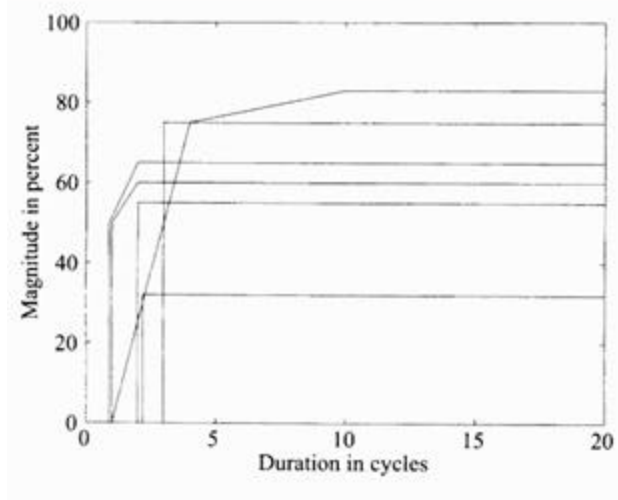
No obstante los diseñadores intentarán siempre reducir el tamaño del condensador, con el fin de disminuir el tamaño, el peso y los costos de la fuente de alimentación, mientras que la carga almacenada alcanza apenas para mantener el voltaje de fuente mínimo y a la carga máxima.



**Figura 21.** Curva de sensibilidad de voltaje para computadores personales [Bollen, 2000].

Las curvas de sensibilidad de voltaje para los reguladores de lógica programables se demuestran en la figura 22; estos resultados varían otra vez, por las mismas razones que los ordenadores personales.





**Figura 22.** Curvas de Inmunidad de voltaje para PLCs [Bollen, 2000].

## **5. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN**

Aquí se explicará la forma de representar el comportamiento esperado en un punto específico del sistema en lo que tiene que ver con Sag de tensión [8], dicho comportamiento se determina a partir del proceso de monitoreo y simulación realizado en el punto de interés y se representa utilizando los siguientes diagramas.

### **5.1 DIAGRAMA DE DENSIDAD DE SAG**

Es generalmente representado por medio de una gráfica de barras tridimensional, se realiza a partir de la tabla de densidad de Sag, la cual presenta, de una manera organizada, el número de subtensiones clasificadas en cierto rango de magnitud y duración, por ejemplo, con una magnitud entre 0.4 y 0.5 p.u. y una duración entre 400 y 600 ms.; cada celda de esta tabla muestra la densidad de Sag para un rango de magnitud y duración.

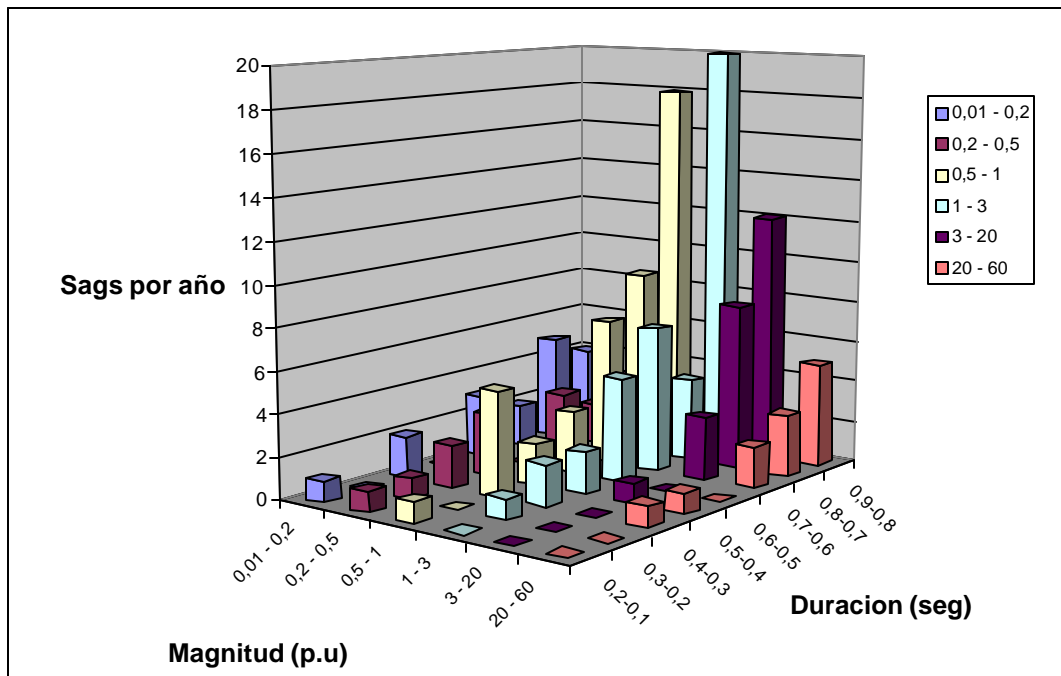
En el diagrama de densidad de Sag, la longitud de cada barra es proporcional al número de Sag en los rangos de magnitud y duración correspondientes. De este gráfico de barras es fácil hacerse a una idea global de cómo están distribuidos los Sag que ocurren en un punto del suministro de tensión, aunque para valores numéricos, sin lugar a dudas, es mucho más práctica la tabla de densidad que será explicada posteriormente.

Para ilustrar este punto, utilizaremos un ejemplo, considerando que los resultados de la magnitud y la duración de los Sag son presentados a continuación:

Magnitud	Duracion					
	Instantaneo		Momentáneo		Temporal	
	0,01 - 0,2	0,2 - 0,5	0,5 - 1	1 - 3	3 - 20	20 - 60
0,9-0,8	4	3	18	20	12	5
0,8-0,7	5	2	9	4	8	3
0,7-0,6	2	3	7	7	3	2
0,6-0,5	3	0	3	5	0	0
0,5-0,4	0	3	2	2	1	1
0,4-0,3	2	2	5	2	0	1
0,3-0,2	0	1	0	1	0	0
0,2-0,1	1	1	1	0	0	0

**Tabla 8** Densidad de Sag en la que se muestran para cada magnitud y duración el número de Sag al año

La tabla 8, muestra la forma básica de organizar los datos obtenidos en los monitoreos y en la simulación, se muestran el número de Sag al año en un punto específico del sistema, organizados por magnitud y duración de evento. Por ejemplo, de esta tabla se puede concluir, que se estima ocurran aproximadamente 13 Sag al año con una magnitud entre 0.7 y 0.6 p.u. y con una duración entre 0.5 y 1s.



**Figura 23.** Diagrama de densidad de Sag PERMITE percibir el estado de un sistema en cuanto a Sag y se fundamenta en los datos de la tabla 8.

La densidad de Sag es la base de la caracterización y la confiabilidad de la información que se entregan con esta tabla y este diagrama depende del buen desempeño en la etapa de monitoreo.

## 5.2 DIAGRAMA DE SAG ACUMULADOS

Para un usuario en particular no es tan importante saber el número de Sag que ocurrirán de determinada magnitud y duración en el suministro de tensión para el equipo sensible, es más importante saber el número de veces que ocurrirán Sag que ocasionaran fallas en sus equipos o en piezas de estos. En las especificaciones de los equipos sensibles, se determina a partir de que magnitud, duración y número de veces de ocurrencia de un sag, el equipo va a comenzar a fallar. Esta información debe ser comparada con la caracterización hecha del fenómeno y para esto sólo es posible utilizar el diagrama de Sag acumulados, ya que, en este se muestra el número de eventos existentes menores e iguales en unos umbrales ya establecidos. Esta es la razón para realizar este diagrama.

Al igual que el gráfico de densidad se basa en al tabla de densidad, el diagrama de Sag acumulados se basa en la tabla del mismo nombre, la cual se calcula con base en los datos de densidad de Sag. El valor de cada celda de la tabla de Sag acumulados, se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$SAG_{ACUMD} = \sum_{m=0}^M \sum_{d=D}^{d_{\max}} (SAGS)_{md}$$

Donde:

$SAG_{ACUMD}$  es el número de Sag con magnitud menor a M y duración mayor a D.

$(\#SAG)_{md}$  es el número de Sag con magnitud m y duración d (de la tabla de densidad de

Sag).

Se toman los Sag con magnitud menor a M y con duración mayor a D ya que mientras los Sag sean de menor magnitud y mayor duración son más dañinos y esto es lo que interesa controlar en el estudio.

Magnitud	Duracion					
	Instantaneo		Momentáneo		Temporal	
	> 0,01	> 0,2	> 0,5	> 1	> 3	> 20
< 0,9	154	137	122	77	36	12
< 0,8	92	79	67	40	19	7
< 0,7	61	53	43	25	8	4
< 0,6	37	31	24	13	3	2
< 0,5	26	23	16	8	3	2
< 0,4	17	14	10	4	1	1
< 0,3	5	4	2	1	0	0
< 0,2	3	2	1	0	0	0

Tabla 9. Tabla de Sag acumulados

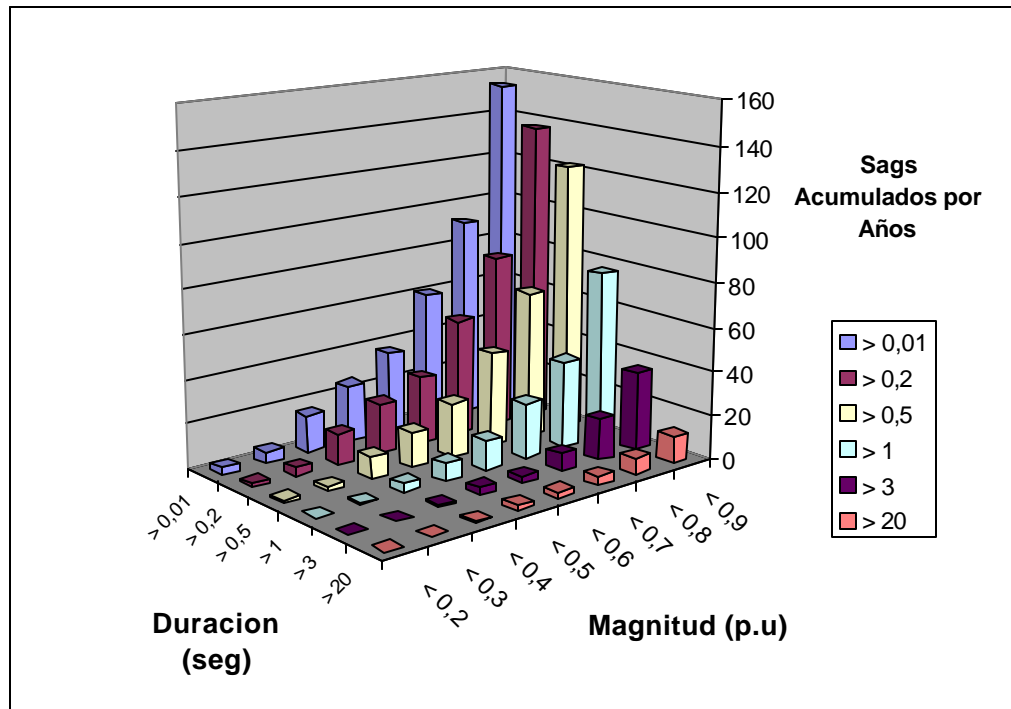


Figura 24. Diagrama de Sag acumulados correspondiente a la tabla 9.

De este gráfico se puede apreciar que una carga sensible que comienza a fallar

cuando es sometida a subtensiones menores que 0.7 p.u. y con una duración mayor a 0.5 s, no se puede conectar directamente en el punto de análisis, ya que la gráfica muestra que se espera en dicho punto hayan 71 Sag al año con magnitud inferior a 0.7 p.u. y con duración mayor a 0.5 s. Una vez se tiene este diagnóstico, el procedimiento que se debe seguir es adquirir los equipos adecuados para mitigar los efectos que estas subtensiones puedan tener sobre la carga sensible; la tecnología Custom Power puede ser una buena solución, ya que una UPS con las especificaciones apropiadas, puede mantener el suministro de energía adecuado al equipo sensible.

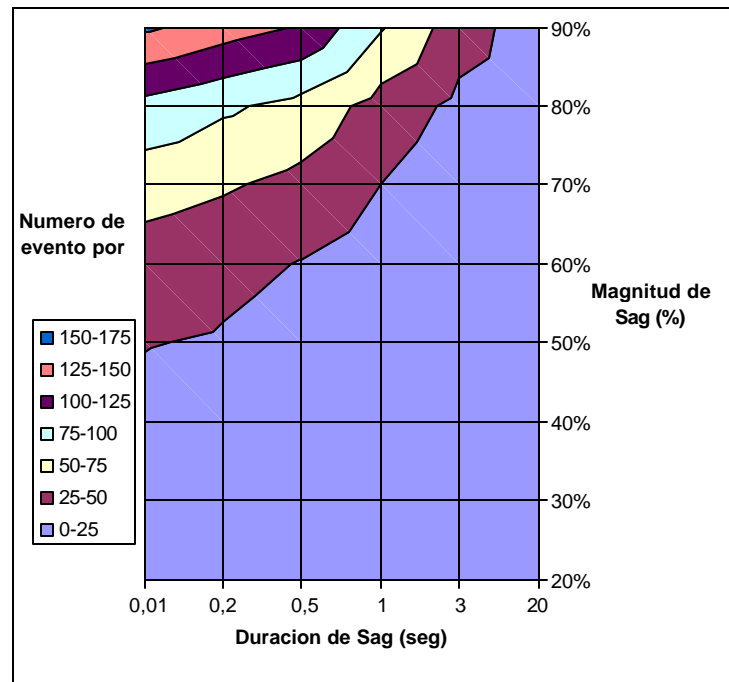
### **5.3 CONTORNOS ISO-SAG ACUMULADOS**

Se puede considerar el gráfico más importante de la caracterización, ya que este permite conocer que tan compatibles son el equipo a conectar y las condiciones de energía del punto de conexión. La tabla 9 es la base del figura 25, y los valores en esta tabla corresponden a una función continua y monotonona, es decir, los valores van aumentando a medida que las barras se aproximan a la esquina derecha posterior. Los valores mostrados en la tabla 9 pueden ser vistos como una función bidimensional de número de Sag contra magnitud y duración. Este tipo de función es la llamada de contornos iso-Sag acumulados y matemáticamente hablando, está definida para todo el plano magnitud -duración.

Cuando se obtiene de un monitoreo de la calidad de la energía, la función no es continua, pero cuando se utilizan técnicas de predicción estocásticas, normalmente se llega a funciones continuas. De todas formas, sea la función continua o no, la manera más práctica de presentar la función en forma bidimensional es a través de los contornos iso-Sag acumulados.

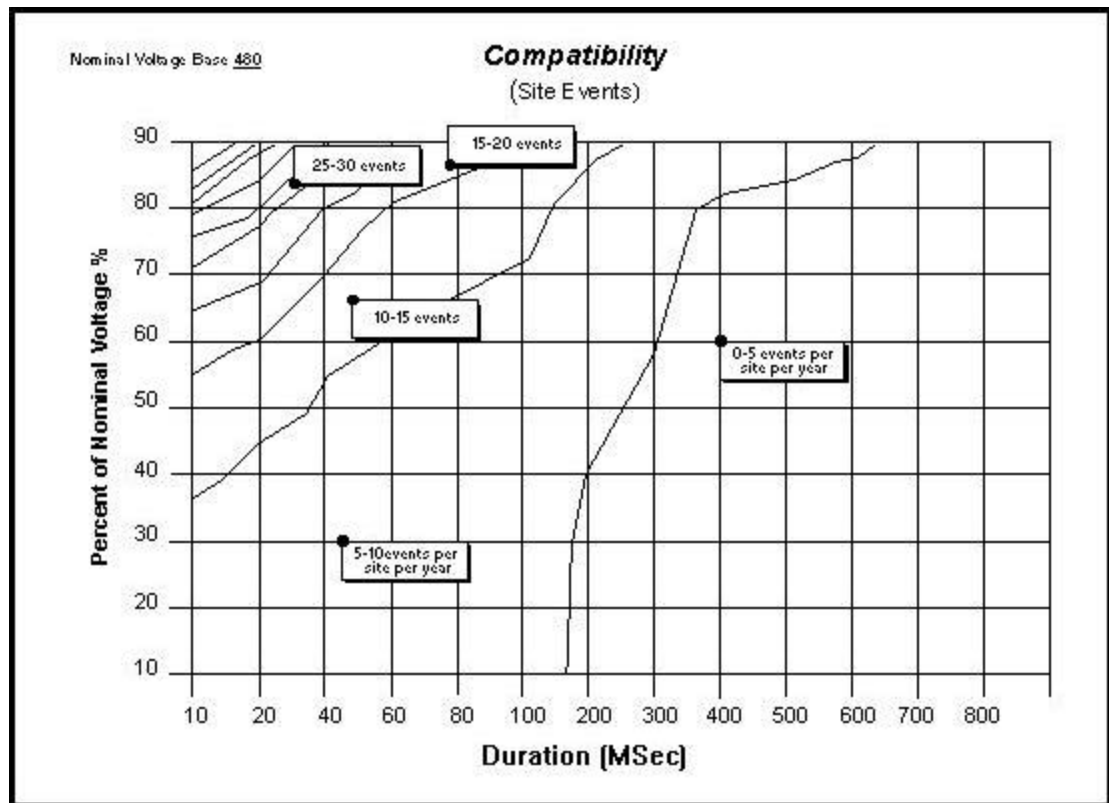
Para realizar este gráfico es necesario convertir la tabla 9 (ó la figura 25) en un

conjunto de líneas o contornos similares a una curva de nivel en un mapa geográfico. Se utilizan programas computacionales para crear los contornos a partir de las gráficas ya estudiadas y un ejemplo de este gráfico es el siguiente:



**Figura 25.** Contornos iso Sag acumulados por año.

El diagrama de contornos iso-Sag, esta recomendado en IEEE Standar 493 y en IEEE Standar 1346. Un ejemplo claro de como se presentan los resultados de la caracterización del sistema de potencia es la figura 26, la cual, también llamada curva de comportamiento del sistema, entrega la información de cómo se espera que el sistema de potencia se comporte desde el punto de vista de fenómenos Sag de tensión.



**Figura 26.** Diagrama de contornos iso-Sag, esta recomendado en IEEE Standar 493 y en IEEE Standar 1346. Curva de comportamiento del sistema

Para cada pieza de un equipo es posible determinar por cuanto tiempo puede operar después de una interrupción en el servicio de energía, mediante la realización de una simple prueba. Dicha prueba es posible realizarla para una tensión del 10% (de la nominal), o para el 20% y 30%. Si el valor de la tensión es el apropiado el equipo operará sin ningún inconveniente. Uniendo los puntos obtenidos durante el desarrollo de esta prueba se obtiene la denominada "curva de voltaje de sensibilidad".

La curva de tensión tolerada (ó curva de sensibilidad) es una parte importante del estándar IEEE 1346, el cual recomienda un método de comparación entre el funcionamiento del equipo y las condiciones de la fuente de alimentación. La curva de tensión tolerada es recomendada para presentar el funcionamiento del equipo y muestra la sensibilidad del mismo ante variaciones de tensión de corta duración,



es decir, muestra la mínima magnitud a la cual el equipo puede funcionar (sin fallar) para una duración dada del evento.

Cuando se describe el funcionamiento de los equipos a través de la curva de tensión tolerada, deben realizarse varias suposiciones, la principal de ellas es que el sag puede ser caracterizado solamente con la magnitud y la duración, lo cual lleva a que "Si dos Sag tienen la misma magnitud y duración, entonces, ambos guiarán al mal funcionamiento del equipo o ninguno causará mal funcionamiento del equipo."

Una visión general acerca del voltaje de sensibilidad por los equipos es mostrado en la tabla 10, donde la tensión tolerada es debida en gran parte a la diferencia entre los equipos y otra parte ocasionada por la incertidumbre de las piezas que componen el equipo.

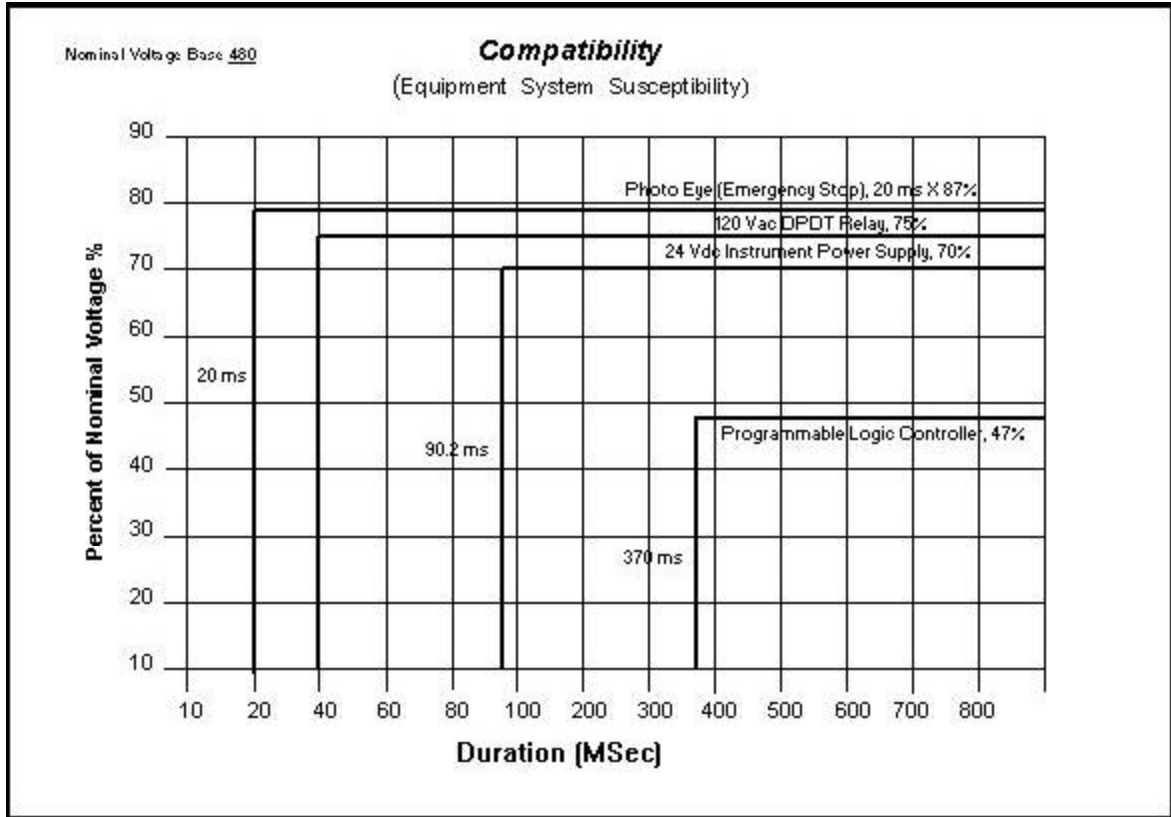
EQUIPO	VOLTAJE TOLERADO		
	RANGO SUPERIO Rms, %	PROMEDIO ms,%	RANGO INFERIOR ms,%
PLC	20,75	260,60	620,45
PLC con tarjeta de entrada	20,80	40,55	40,30
Drive ac de 5 h.p.	30,80	50,75	80,60
Relés de control ac	10,75	20,65	30,60
Arrancadores de motores	20,60	50,50	80,40
Computadores Personales	30,80	50,60	70,50

**Tabla 10.** Tabla de Rangos de tensión tolerada de varios equipos usados frecuentemente.

Fuente: Datos obtenidos de IEEE Std. 1346. Este dato no debe ser usado como base de diseño para instalaciones.

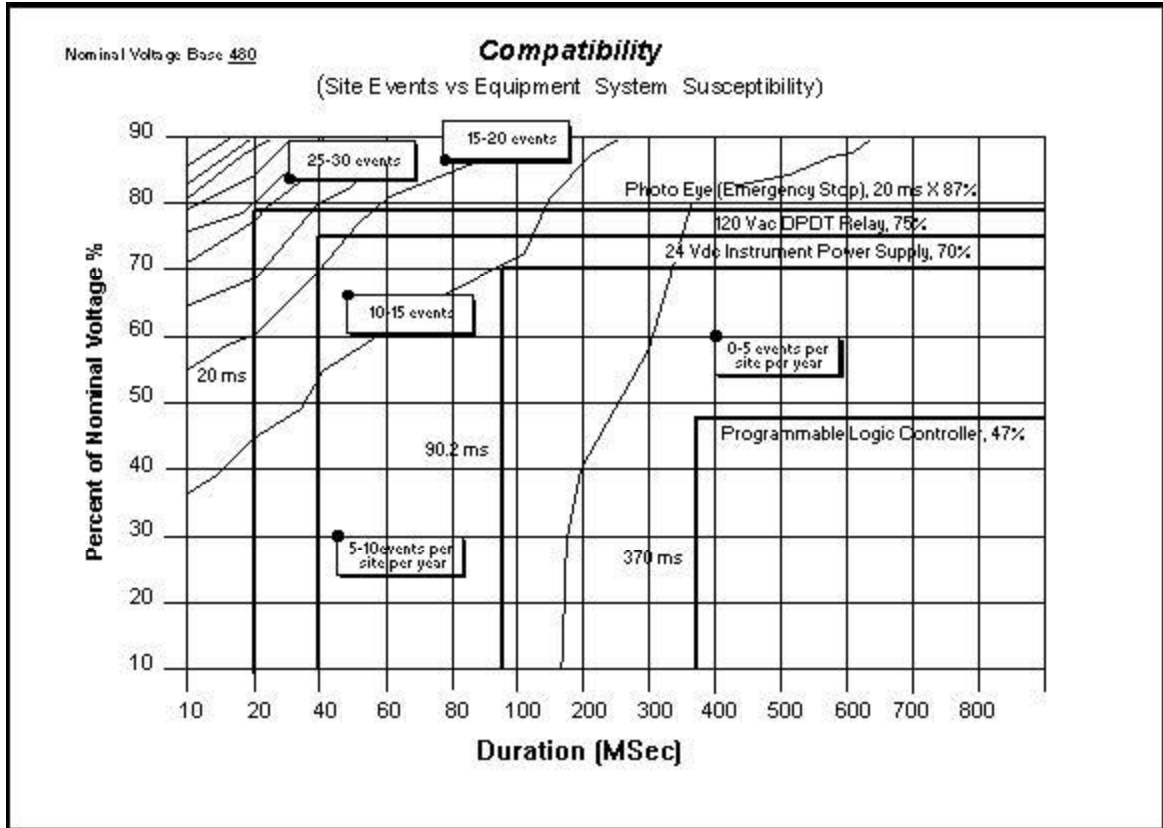
Los valores de la tabla anterior pueden ser leídos de la siguiente forma: un voltaje de tolerancia de **a** ms, **b%** implica que el equipo puede tolerar una tensión de cero voltios durante **a** ms y un voltaje de **b%** del nominal indefinidamente. Cualquier sag más duradero que **a** ms y más bajo de **b%** llevará al mal funcionamiento del equipo ó a la detención del mismo. En otras palabras: la curva de voltaje de tolerancia es rectangular con una "característica" de a ms, b% .

Una vez se tengan identificados los equipos sensibles, se deben obtener las curvas de sensibilidad o de tensión tolerada de estos equipos. Como en el caso de la CBEMA o ITIC, estas curvas están dadas de forma muy estandarizada por algunos organismos autorizados para expedirlas. En el caso de que no estén en la literatura internacional o no haya una curva de sensibilidad estándar, se debe conseguir esta curva o construirla con la información que el fabricante entregue del equipo. Así como los contornos iso Sag son el resultado del proceso de caracterizar el sistema de potencia, la curva de sensibilidad es el resultado del proceso de caracterizar los equipos de esta forma se realizara la identificación y obtención de las curvas de sensibilidad de los equipos conectados a la red.



**Figura 27.** Grafica recomendada por IEEE Std. 1346-1998 y IEEE Std 1346-1198 Diagrama de contornos.

En una caracterización de Sag, el diagrama de contornos es superpuesto con la curva de sensibilidad de los equipos mas críticos o sensibles para estimar el número de veces que se espera el equipo falle por las características, en cuanto a subtensiones, del punto de conexión.



**Figura 28.** El diagrama de contornos es superpuesto con la curva de sensibilidad o de voltaje

En la figura anterior se muestran los resultados, por ejemplo, que las condiciones esperadas de energía no van a afectar al controlador lógico programable, mientras que el relé de 120 Vac, se verá afectado en su funcionamiento, ya que se espera ocurran 15 eventos Sag de magnitud 75% y duración 45 ms.

Del resultado de estos dos estudios, el diseñador del sistema o analista debe poder evaluar el costo de compatibilidad entre el proceso y sistema de poder así como para encontrar las alternativas para corregir los problemas.

## 6. RECOMENDACIONES

Como ha quedado expuesto anteriormente, el problema de los Sags tensión afecta principalmente al usuario industrial final, pero involucra a todos los agentes vinculados con el negocio eléctrico.(suministradores, fabricantes de equipos e incluso organismos reguladores). Se resumen a continuación algunas sugerencias y recomendaciones tendientes a: Mejorar la calidad del producto eléctrico (compañía suministradora). Evitar la excesiva sensibilidad de los equipos (fabricantes). “Defenderse” de las perturbaciones y equipos sensibles (planta industrial).

✎ Compañía eléctrica suministradora: Como ya se ha mencionado, es prácticamente imposible eliminar las faltas en las redes de transporte y distribución, y por lo tanto los Sags tensión seguirán existiendo. Por supuesto es cierto que un adecuado trabajo de mantenimiento preventivo puede disminuir mucho la cantidad de faltas que aparezcan, pero también lo es que este tipo de trabajos lo realizan las compañías en forma rutinaria y por lo tanto no cabe esperar una sustancial reducción en las tasas de falta (excluyendo por supuesto algunos casos puntuales donde esta tasa de fallos son anormalmente elevadas). Puede sin embargo reducirse su impacto en gran medida, si se limita la duración. Con la tecnología actual una falta puede eliminarse correctamente entre 3 y 4 ciclos. Una gran cantidad de los equipos de utilización sería insensible a Sags de esta duración. Sin embargo son muchos (quizás demasiados) los casos en los cuales la duración efectiva de la falta es sensiblemente superior a este tiempo, Las razones hay que buscarlas en un funcionamiento inadecuado los dispositivos de protección y/o en los

requerimientos de coordinación de los mismos. El trabajo en este sentido es doble:

**En el corto plazo:** Análisis riguroso de los dispositivos de protección existentes, ya sea desde el punto de vista de sus ajustes y coordinación como de revisión y ensayo de sus características, para lograr que las faltas que se produzcan en el sistema eléctrico sean correctamente detectadas y eliminadas en el menor tiempo posible.

**En el mediano y largo plazo:** Reevaluar tanto la filosofía como la concepción de los sistemas de protección (teniendo muy en cuenta los nuevos requerimientos de sus clientes) para que las faltas sean despejadas en mínimo tiempo. En este sentido, el progresivo traslado de las tecnologías utilizadas en las grandes redes de transporte a las redes de subtransporte y distribución no debe considerarse descabellado.

- ✎ **Fabricante de equipos:** Los fabricantes de equipos para uso industrial, deberán reconocer que sus equipos serán utilizados muchas veces en sistemas de producción continuos muchas veces muy automatizados, y que por lo tanto pasarán a tener la condición de críticos. Dado que como ya se ha dicho, es imposible eliminar los Sags, deberán tratar de adaptar sus diseños tanto como sea posible para no ver perturbado su normal funcionamiento ante los mismos.

Esto resulta de gran importancia en aquellos tipos de equipamiento que presentan simultáneamente funciones de potencia y control, con una única alimentación (rectificadores, “drivers” de motores, etc.). Como se ha indicado, la etapa de potencia es bastante menos sensible que la de control (que paralelamente consume mucho menos potencia) por lo que el tratamiento diferenciado (excluyendo por supuesto algunos casos de ambas etapas parece ampliamente factible. Intentar esta modificación al nivel del usuario final resulta muchas veces extremadamente complicado puesto que es imposible conocer

(y garantizar) que existe adecuada correlación de señales cuando el control y la etapa de potencia se alimentan de fuentes separadas. Otra actividad a la que los fabricantes de equipos deberán prestar especial atención es a la especificación precisa de sus equipos, indicando no solamente los rangos de tensión entre los cuales este funciona adecuadamente, sino también los Sags de tensión que el mismo puede soportar (tanto en profundidad como en duración). El “conocimiento” de estas características por parte del usuario (aún cuando sean tan sólo indicativas y el fabricante no deba garantizarlas) le permitirá diseñar adecuadamente su sistema de protección y control para defenderse de las perturbaciones de la red.

- ✍ Usuario Final: Resulta evidente que, independientemente de la mejor o peor buena voluntad que puedan tener fabricantes y compañías suministradoras, una mejora en la insensibilidad de los equipos y/o reducción de las perturbaciones es un proceso que tomará tiempo. Para el usuario final con procesos críticos o continuos el problema es sin embargo actual (no futuro), y deberá convivir con Sags y equipos “sensibles” durante bastante tiempo. Dado que es también quien sufre las consecuencias en forma directa deberá ser el quien tenga que “defenderse” de las perturbaciones tanto como sea posible.

En la actualidad la calidad de potencia eléctrica y en particular los Sag de tensión son tema de gran importancia, todas las partes que conforman el sistema eléctrico (generadores, transportadores, comercializadores y usuarios) y también las universidades están interesándose cada día mas en estos temas, la Universidad Tecnológica de Bolívar no puede ser la excepción, por tal razón recomendamos que se cree un grupo de investigación ya que la universidad y en particular el programa de ingeniería eléctrica cuenta con una planta de profesores de gran calidad y un estudiantado con alta capacidad de investigación.

En el país existen grupos de investigación en sistemas de potencia con los cuales se puede intercambiar información como por ejemplo en la Universidad Del Norte en la ciudad de Barranquilla, que entre sus líneas de investigación se encuentra la calidad de energía eléctrica y se encuentra a cargo del Ing. Gabriel Soto ([isoto@uninorte.edu.co](mailto:isoto@uninorte.edu.co)).



## 7. CONCLUSIONES

El concepto de calidad de la potencia eléctrica no corresponde a un solo tipo de fenómeno que pueden ocurrir en los sistemas de distribución de energía sino 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. Por esta razón los estudios deben estar orientados hacia el bienestar de este último y el punto de vista del mismo tiene prioridad ya que finalmente este es quien sale afectado.

La existencia de Sags tensión en las redes eléctricas están comenzando a ser percibidos por el usuario final como una disminución seria de la calidad de servicio. En el caso de industrias continuas o críticas las perturbaciones al proceso productivo son incluso superiores a las de un corte prolongado, aspecto este al que las compañías eléctricas han dedicado importantes esfuerzos a lo largo del tiempo.

Esta criticidad es producto fundamentalmente de la introducción de nuevas tecnologías al proceso productivo. Los sistemas eléctricos (tanto de las compañías suministradoras como de los propios usuarios) deberán adaptarse forzosamente a esta nueva situación. Las acciones de corto plazo, por fuerza, serán mayoritariamente “defensivas” y en las propias instalaciones del usuario final; a más largo plazo sin embargo tanto fabricantes como suministradores tendrán la responsabilidad de actuar sobre las “causas” de esta criticidad.

La metodología descrita en esta monografía permite la caracterización de Sag de tensión en un punto dentro del sistema eléctrico de potencia, de acuerdo a los resultados que se obtengan se deben tomar decisiones futuras para prevenir y

disminuir este fenómeno y de esta forma evitar daños a equipos sensibles. Para esto se recomienda el uso de algunos dispositivos custom power en las instalaciones del usuario, la repartición de cargas en el circuito, la devolución de equipos a los fabricantes en caso necesario y hasta la exigencia a los operadores de red para que implementen acciones que lleven a la disminución de sags nocivos a las instalaciones de los usuarios.

Esta monografía es de gran importancia a nivel académico y también de gran aplicación en la industria, ya que permite al estudiantado y en general a toda la comunidad alrededor de la energía eléctrica estudiar y predecir los sags de tensión en un determinado punto del sistema de potencia.

## BIBLIOGRAFÍA

H.H. Kajihara, "Quality Power For Electronics", *Electro-Technology*, Vol. 82, No.5, November 1968, pp. 46.

P.M. Knoller and L. Lonnstam, "Voltage Quality And Voltage Tendency Recorders", *Siemens-Review*, Vol. 36, No.8, August 1969, pp. 302-303.

B.A. Konstantinov and G.L. Bagiev, "Financial Losses Due To Deterioration Of Voltage Quality", *Electric-Technology-USSR*, Vol.1, pp. 119-123, 1990.

Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Beaty, H.W., "Electrical Power Systems Quality", New York: McGraw-Hill, 1996.

IEEE Std. 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Power Quality (ANSI).

K.S. Smith; L. Ran; B. Leyman, Analysis of transformer inrush transients in offshore electrical systems, *IEEE Proceedings in Generation, Transmission, Distribution*, vol. 146, no. 1, January 1999, pp. 132-139.

L.D. Zhang, M.H.J. Bollen, A method for characterizing unbalanced voltage dips (sags) with symmetrical components, *IEEE Power Engineering Letters*, July 1998.

Conrad, K. Little, C. Grigg, Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 27, no.1, January-February 1991, pp. 167 –172.

M.H.J. Bollen, Characterisation of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 4, October 1997, pp. 1666-1671.

M.H.J. Bollen, "Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions", New York, IEEE Press Series On Power Engineering, 2000

Dowe Mueller; Mark McGranaghan, *"Effect of Voltage Sags in Process Industry Applications"*, PQ Network, Electrotek Concepts, Inc

IEEE Std. 1346-1998. IEEE recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment. IEEE, July 1998.

Draft 2 working document for IEEE P1564 November 2001, pag 14-15

Collins, E. R. Jr.; Zapardiel, F. An experimental assessment of AC contactor behavior during voltage sags. ISIE '97, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Volume 2, 1997, pp. 439-444.

Dorr D. S., Mansoor A., Morinec A. G., Worley J. C. Effects of power line voltage variations on different types of 400-W high-pressure sodium ballasts IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 33 Issue 2, March-April 1997. pp. 472-476.

Brauner G., Hennerbichler C. Voltage dips and sensitivity of consumers in low voltage networks. CIRED 2001, 18-22 June 2001, Amsterdam, The Netherlands. IEE Conference Publication No. 482, 2.31, 5 p.

Bollen, M. H. J., "Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 32, no 6, pp.1414-1432, Nov./Dec. 1996.

Yalcinkata, G., Bollen, M. H. J., Crassley, P., Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems, IEEE Transaction on Industry Applications , Vol. 34, no 4, Jul./Aug. 1998.

Bollen, M. H. J., The Influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 31, no. 4, pp. 667-674, Jul./Aug. 1995.

N. Serdar Tunaboynu, Edward R. (Randy) Collins, Jr., Ruhi Sarikaya and Robert L. (Larry) Morgan, "The Missing Voltage Technique for Evaluating Voltage Sags", Aug. 1999

ITI curve. Information Technology Industry Council, Washington D 2000.  
(<http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf>)

Memorias Minor De Sistemas De Potencia, Modulo Calidad De Energía y Modulo de Subestaciones y Protecciones. Universidad Tecnológica De Bolívar, Abril 2004.