

**MÉTODO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LUMINARIAS DE ALTA  
DESCARGA TIPO METAL HALIDE, ANTE HUNDIMIENTOS DE CORTA  
DURACIÓN EN LA SEÑAL DE TENSIÓN (SAGS)**

**HEBER AUGUSTO LÓPEZ OSORIO**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
MAESTRÍA EN GESTIÓN ENERGÉTICA INDUSTRIAL  
MEDELLÍN**

**2014**

**MÉTODO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LUMINARIAS DE ALTA  
DESCARGA TIPO METAL HALIDE, ANTE HUNDIMIENTOS DE CORTA  
DURACIÓN EN LA SEÑAL DE TENSIÓN (SAGS)**

**HEBER AUGUSTO LÓPEZ OSORIO**

**Tesis de grado para optar al título de Magister en Gestión Energética**

**Directora**

**MSc. Bonie Johana Restrepo Cuestas**

**Grupo de Investigación en Materiales Avanzados y Energía**

**Instituto Tecnológico Metropolitano**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
MAESTRÍA EN GESTIÓN ENERGÉTICA INDUSTRIAL  
MEDELLÍN**

**2014**

## **AGRADECIMIENTOS**

## TABLA DE CONTENIDOS

### LISTA DE FIGURAS

### RESUMEN

### ABSTRACT

### GLOSARIO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivos</i> -----	3
1.1.1 <i>Objetivo General</i> -----	3
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> -----	3
1.2 <i>Estructura del Trabajo Realizado</i> -----	4
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Conceptos sobre Calidad de la Energía en Sistemas Eléctricos</i> -----	6
2.2 <i>Eventos que Ocurren en las Redes de Distribución Eléctrica</i> -----	7
2.3 <i>Definición de los eventos Sags</i> -----	12
2.4 <i>Origen del Estudio de los Eventos de Corta Duración en las Señales de Tensión</i> --	15
2.5 <i>Calidad en los Sistemas de Iluminación</i> -----	17
2.6 <i>Estándares Existentes para la Caracterización de Dispositivos ante Eventos de Corta Duración</i> -----	21
2.6.1 <i>Curva CBEMA</i> -----	22
2.6.2 <i>Curva ITIC (CBEMA)</i> -----	24
2.6.3 <i>Estándar SEMI F47</i> -----	26
2.7 <i>Estudios Realizados sobre el Impacto de los Eventos de Corta Duración en Diferentes Sistemas y Aplicaciones</i> -----	27
2.8 <i>Estudios sobre el Efecto de los Eventos de Corta Duración en Sistemas de Iluminación</i> -----	32
2.9 <i>Funcionamiento y Apagones Inesperados en las Luminarias de Alta Descarga Tipo Metal Halide.</i> -----	36
2.10 <i>Selección del Estándar Aplicable para el Análisis de las Luminarias HID Tipo Metal Halide.</i> -----	39
2.11 <i>Generadores de Sag Existentes e Implementados en Estudios Afines</i> -----	40
2.12 <i>Selección de elementos para la implementación del generador de sag utilizado en los ensayos.</i> -----	45
2.12.1 <i>Consideraciones para el circuito de control del generador de sag.</i> -----	46

2.12.2 Consideraciones para el diseño de la carga inductiva -----	46
2.12.3 Consideraciones para la selección y uso del dispositivo de conmutación del generador de sag.-----	50
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>53</b>
3.1 <i>Implementación del generador de sag</i> -----	53
3.1.1 Sistema de control -----	54
3.1.2 Selección de la fuente de alimentación para la luminaria -----	55
3.1.3 Cálculo de la carga inductiva-----	55
3.1.4 Selección del TRIAC -----	57
3.1.5 Acople de los sistemas de control y potencia -----	57
3.2 <i>Ensayos técnicos</i> -----	58
3.3 <i>Medición y toma de registros</i> -----	58
3.4 <i>Método para la caracterización de la luminaria</i> -----	60
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>61</b>
4.1 <i>Implementación del generador de sag</i> -----	61
4.1.1 Sistema de control -----	61
4.1.2 Selección de la fuente de alimentación para la luminaria -----	63
4.1.3 Cálculo de la carga inductiva-----	63
4.1.4 Selección del TRIAC -----	65
4.1.5 Acople de los sistemas de control y potencia -----	66
4.2 <i>Registro de Mediciones y Resultados</i> -----	67
4.3 <i>Interpretación de los datos de la tabla de registros</i> -----	72
4.4 <i>Curva Característica y Regiones de Operación</i> -----	73
Análisis de resultados -----	74
Región de operación segura -----	75
Región de operación con riesgo de apagado -----	75
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>77</b>
<b>6. REFERENCIAS</b>	<b>79</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>84</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de voltaje sag de corta duración causado por una falla remota; este voltaje sag causó el paro de una línea de producción de plásticos (IEEE, 2011) .....	14
Figura 2. Estimación convencional para la medición de los sags (Won et al., 2005).....	17
Figura 3. Método modificado de estimación de ocurrencia de los sags (Won et al., 2005)	17
Figura 4. Regiones características de la Curva CBEMA (Flechas, 2000) .....	22
Figura 5. Regiones características de una Curva ITIC (CBEMA) (Flechas Villamil, 2000)	25
Figura 6. Curva característica, Estándar SEMI F47 (Gas & Company, 2007).....	27
Figura 7. Curva SCBEMA (Yun & Kim, 2003) .....	29
Figura 8. Susceptibilidad a los sags de equipos de un proceso industrial. Curva ISO – SAG. (Raigoza Gil, 2008).....	30
Figura 9. Gráficas de modelos de caracterización de una red eléctrica ante la aparición de sag (De Carvalho Filho et al., 2000) .....	31
Figura 10. Curva de aceptabilidad de potencia para múltiples cargas (Kyei, 1996).....	32
Figura 11. Gráfica de inmunidad de diferentes balastos a los hundimientos de voltaje (sag) con lámparas de alta presión de sodio (Díaz et al., 2007).....	34
Figura 12. Desempeño de luminarias de alta presión de sodio ante condiciones de caídas de tensión (Dorr et al., 1995) .....	36
Figura 13. Sección de un tubo fluorescente (Calleja, 2000) .....	37
Figura 14. Diagrama de bloques de equipo generador de sag patentado (WIPO-OMPI, 2010) .....	41
Figura 15. Topología propuesta para la implementación de un generador de voltaje sag (VSG) utilizando IGBT's (Dongyu et al., 2010).....	42
Figura 16. Generador de voltaje sag aplicado a una carga no lineal (Senturk & Hava, 2010) .....	43
Figura 17. Estructura de generador de voltaje sag (VSG) utilizando autotransformador y relés de estado sólido (SSR's) (Ma&Karady, 2008).....	44
Figura 18. Circuito de control de duración de eventos del VSG .....	45
Figura 19. Circuito RL con fuente de alimentación AC. Elaboración propia.....	47

Figura 20. Red de SNUBBER (R2, C1) como elementos de protección para un TRIAC. Elaboración propia .....	50
Figura 21. Diagrama de bloques del circuito de pruebas para evaluación de sag en una luminaria. ....	54
Figura 22. Montaje completo de equipos para la realización de las pruebas .....	57
Figura 23. Gráfica de registro de tensión y corriente tomados por el equipo FLUKE 435. Elaboración propia .....	59
Figura 24. Diagrama circuito de control, Generador de sag. Elaboración propia.....	62
Figura 25. Imagen circuito de control diseñado con el cual se realizaron los ensayos. Elaboración propia. ....	62
Figura 26. Bobina limitadora de corriente diseñada según cálculos iniciales. Elaboración propia.....	64
Figura 27. VARIAC monofásico, carga inductiva variable utilizada en los ensayos. Elaboración propia. ....	64
Figura 28. TRIAC utilizado para la realización de los ensayos. Elaboración propia .....	65
Figura 29. Circuito de potencia del generador de sag. Elaboración propia. ....	66
Figura 30. Diagrama de conexión completo del circuito para ensayos con etapas acopladas. .....	66
Figura 31. Curva de caracterización de la luminaria tipo Metal Halide de 400 W. Elaboración propia .....	74

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de fenómenos que se producen en las redes eléctricas (IEC, 2006)	9
Tabla 2. Categorías y características típicas de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia (IEEE, 2009)	10
Tabla 3. Límites máximos de Distorsión Total de Voltaje (Reinstein, 2002)	11
Tabla 4. Origen de los sags de voltaje de acuerdo a la falla (Reyes et al,2005)	13
Tabla 5. Probabilidad de ocurrencia de sag de acuerdo a la causa (Reyes et al,2005)	14
Tabla 6. Tipos de fuentes luminosas en función de sus características de temperatura de color e índice de reproducción cromática (Min-MINAS, 2010).	19
Tabla 7. Mediciones de variables eléctricas en luminarias de alta presión de sodio con diferentes horas de operación (Diaz et al., 2007)	34
Tabla 8. Rangos de tolerancia de distintos tipos de equipos según IEEE std. 1346-1998 (Pérez, 2006) y (IEEE, 1998)	38
Tabla 9. Posiciones identificadas en el Variac para la realización de las pruebas con el respectivo valor de inductancia. Elaboración propia	56
Tabla 10. Registro de ensayos realizados a la luminaria 1. Elaboración propia	68
Tabla 11. Registro de ensayos realizados a la luminaria 2. Elaboración propia	68
Tabla 12. Registro de ensayos realizados a la luminaria 3. Elaboración propia	69
Tabla 13. Resultados promedio de los ensayos realizados. Elaboración propia	70
Tabla 14. Registro de eventos con los cuales se construyó la curva. Elaboración propia	71



## RESUMEN

Los sistemas de alumbrado público son de vital importancia para garantizar la seguridad y la movilidad en horario nocturno en sitios de alta circulación de personas. Las luminarias de alta densidad de descarga (HID) son las más utilizadas en alumbrado público dadas sus características de alta emisión de luz y entre ellas, las más usadas son las de tipo Metal Halide y las de Alta Presión de Sodio. Estas luminarias sin embargo, son sensibles a los eventos generados en las redes de distribución eléctrica, dentro de los cuales es importante destacar los hundimientos de corta duración conocidos como sag o dip, los cuales ocasionan apagones súbitos con largo tiempo de re-encendido comprometiendo las condiciones de seguridad de los sitios públicos en horario nocturno.

Las características específicas de los sags que afectan el normal funcionamiento de las luminarias HID no son completamente conocidas, razón por la cual, en este trabajo se planteó el desarrollo de un método para determinar los niveles de sag que ocasionan apagones inesperados en una luminaria de alta descarga tipo Metal Halide de 400W. El desarrollo contempló la revisión de los métodos y estándares existentes para caracterizar otro tipo de dispositivos (computadores y equipos para fabricación de circuitos integrados), de los cuales se determinaron las características experimentales y variables aplicables a la luminaria objeto de estudio. De la experimentación se logró obtener la curva característica para la luminaria, que muestra las regiones de operación y los niveles de eventos sag que ocasionan apagones súbitos.

Dentro de los principales resultados se encontraron los niveles de operación normal y los niveles de operación con riesgo de apagón para la luminaria analizada ante la aparición de sag en la señal de tensión que la alimenta, y se encontró una relación inversamente proporcional entre la duración del tiempo del sag y de su magnitud. Uno de los principales hallazgos se encontró en los sags con duraciones entre 250 ms y 500 ms con porcentajes de hundimiento de 30% del valor RMS, los cuales tienen alta probabilidad de ocasionar apagones imprevistos en la luminaria analizada.

## ABSTRACT

Public lighting systems are vital to ensure the safety and mobility at night in areas of high movement of people. High density discharge luminaries (HID) are the most used in street lighting given its characteristics of high brightness and among them, the most used type is Metal Halide and High Pressure Sodium. This luminaries however, are sensitive to events generated in the power distribution networks, within which is important to emphasize Short duration subsidences, known as sag or dip, which cause sudden blackouts with long re-ignition time, compromising security conditions of public places at night.

The specific characteristics of sag that affects the normal operation of the HID lights are not completely known, in this paper the development of a method was proposed to determine the levels of sag that cause an unexpected fixture in a high blackouts download 400W Metal Halide type. The development of this work contemplated revision of existing standards and methods to characterize other devices (like computers and equipment for manufacturing integrated circuits). Then, experimental features and variables applicable to the luminaire under study were determined. Finally, in the experimental stage, a characteristic curve was obtained, and shows operation regions and sag levels that cause sudden blackouts.

Normal and sudden blackout operational levels were defined for the analyzed luminary, when sag appears in the voltage signal that feeds it. An inverse relationship was found between the sag duration of time and his magnitude. For sag with time durations between 250 ms and 500 ms, with percentages of 30% of the sinking about his RMS value, a high probability of sudden blackout was found.

## GLOSARIO

**CBEMA:** Abreviación que significa “*Computer and Business Equipment Manufacturers Association*”.

**HALOGENO:** Elemento que utiliza para su funcionamiento una mezcla de gases inertes que al ponerlos en contacto con un arco eléctrico se ionizan y emiten alta radiación luminosa la cual es utilizada para la fabricación de luminarias de alta intensidad de descarga (HID).

**HID:** Sigla diminutiva de la palabra “*High Intensity Discharge*” (*Alta Intensidad de descarga*), cuyo nombre reciben algunos tipos de luminarias utilizadas para alumbrado público, uso doméstico o en vehículos.

**HPS:** Sigla diminutiva de la palabra “*High Pressure Sodium*” (*Alta presión de sodio*), cuyo nombre reciben algunos tipos de luminarias utilizadas para alumbrado público.

**ITIC:** Abreviación que significa “*Information Technology Industry Council*”

**LUMINARIA:** Transductor eléctrico capaz de transformar la energía eléctrica en radiación luminosa a frecuencias que se encuentran en el espectro visible humano, son utilizadas principalmente para iluminar espacios abiertos o cerrados durante la noche.

**METAL HALIDE:** Gas compuesto por la mezcla de haluros metálicos principalmente Argón y Mercurio, el cual es utilizado para la construcción de luminarias que llevan el mismo nombre, éstas a su vez están clasificadas en el grupo de las luminarias de alta densidad de descarga luminosa (HID).

**PQ:** Abreviatura de la palabra inglesa “*POWER QUALITY*” que significa calidad de la potencia eléctrica en términos de normativa Internacional.

**RETIE:** Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas de la república de Colombia.

**RETILAP:** Reglamento Técnico de iluminación y Alumbrado Público de la República de Colombia

**SAG:** Término normativo internacional que hace referencia a una disminución de corta duración de tiempo en la magnitud de la señal de tensión, se conoce también como hundimiento o *dip*.

**SEMI:** Abreviación que significa “*Semiconductors Manufacturers International Association*”.

**SWELL:** Término normativo internacional que hace referencia a un Incremento de corta duración de tiempo en la magnitud de la señal de tensión.

**TRIAC:** Dispositivo semiconductor de tres terminales utilizado para controlar el flujo de las corrientes que circulan por un circuito eléctrico, permite el paso de corriente eléctrica en dos sentidos de acuerdo a su polarización y disposición de conexión en el circuito donde opera.

**VARIAC:** Carga eléctrica inductiva variable en su tamaño y magnitud de acuerdo a su uso y aplicación, es utilizado principalmente para regular la tensión eléctrica en un circuito como variador y estabilizador de la tensión eléctrica del mismo.

## 1. INTRODUCCIÓN

Considerando los tipos de luminarias de Alta Densidad de Descarga (high-intensity discharge - HID), las más utilizadas en aplicaciones de alumbrado público o lugares de alta afluencia de personas como centros comerciales y plantas de procesos industriales son las luminarias de Alta Presión de Sodio y las de tipo Metal Halide. Ambos tipos de luminarias presentan alto nivel de sensibilidad ante eventos de corta duración (sag) que se presentan en los circuitos eléctricos que las alimentan o en las redes de distribución, como consecuencia, estas luminarias pueden apagarse y permanecer así entre 5 y 15 minutos mientras se da de nuevo su proceso de ionización para el re-encendido (Diaz et al., 2007) y (Dorr, Mansoor, Morinec, & Worley, 1995).

Los apagones inesperados en luminarias HID representan un problema para lugares donde el nivel de iluminación es relevante para garantizar la seguridad de las personas que circulan por el sitio, o donde el aspecto de los niveles de iluminación es necesario para la adecuada prestación de un servicio.

La gran mayoría de establecimientos públicos como los centros comerciales usan lámparas de alta densidad de descarga para iluminar grandes áreas comunes interiores, siendo las de tipo Metal Halide las más utilizadas en espacios donde es requerida una adecuada representación de los colores y es uno de los tipos de luminarias que se encuentra en el grupo de las más afectadas por los eventos de corta duración en especial por los hundimientos definidos como sag por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) o como dip según la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), (T. and distribution Committee, 2011)(Comisión Internacional de Electrotécnia IEC, 2006).

Una interrupción en el suministro de iluminación que ocurra en un sitio de alta afluencia y circulación de personas puede tener consecuencias negativas teniendo en cuenta que la iluminación es un factor importante para el normal desarrollo de las actividades que allí se desarrollan y en especial para la seguridad en general; de esta forma, el estudio del impacto de los sags o dip sobre las luminarias de alta descarga adquiere importancia debido

a la vulnerabilidad de este tipo de luminarias ante los eventos eléctricos de corta duración y por lo tanto se genera la necesidad de profundizar en el estudio de este problema.

Los centros comerciales demandan altos niveles de iluminación dado el tipo de actividades que allí se desarrollan, parte de la iluminación en algunos casos se usa como componente publicitario, por tal motivo las fallas de energía en los sistemas de iluminación se traducen en pérdidas económicas. En el caso de las plantas de proceso o bodegas donde la movilidad de personas es constante, la ausencia momentánea de la iluminación genera un aumento significativo en los niveles de riesgo de accidentes para el personal que hace uso de las instalaciones, además de impactar directamente el tiempo de ejecución de los procesos, lo que ocasiona de igual forma pérdidas económicas.

En la actualidad no existen parámetros de diseño a tener en cuenta en la normativa nacional o internacional que generen responsabilidad en los prestadores del servicio de energía eléctrica para controlar, evitar o mitigar el impacto de este tipo de eventos en los sistemas de iluminación (Ministerio de Minas y Energía, 2010).

El problema de las interrupciones en luminarias de alta descarga tipo Metal Halide se convierte en un problema de calidad en el suministro eléctrico, las interrupciones en el servicio de iluminación en sitios de alta afluencia de personas se compensan mediante la instalación de sistemas de iluminación de emergencia en cumplimiento del reglamento técnico de iluminación (Ministerio de Minas y Energía, 2010), pero, dichos sistemas de emergencia operan solo ante la ausencia de suministro de energía y no necesariamente ante la ausencia de luz, lo cual es posible que suceda dadas las características de operación de las luminarias de alta presión de descarga, las cuales pueden sufrir apagones por eventos de corta duración sin que ocurra necesariamente una interrupción total en el suministro de energía.

Teniendo en cuenta lo planteado en el párrafo anterior se evidencia la pertinencia de realizar estudios al respecto como tema objeto de análisis desde el punto de vista de la calidad en el suministro del servicio energético, temas al respecto resultan de vital importancia para asegurar y mejorar la calidad del servicio en sistemas eléctricos, hasta el momento éste se

convierte en el primer estudio al respecto que se realiza en los proyectos de investigación del ITM en el área de la Gestión Energética.

## **1.1 Objetivos**

El trabajo realizado pretende el cumplimiento y logro de los siguientes objetivos:

### **1.1.1 Objetivo General**

Diseñar un método de caracterización para luminarias de Metal Halide, que permita la identificación de niveles de hundimiento en la señal de tensión que afectan el adecuado funcionamiento de este tipo de lámparas, y permita el planteamiento de criterios de diseño de redes eléctricas que mejoren la calidad en el suministro del servicio de iluminación pública.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Implementar un equipo que permita generar hundimientos de diferente duración y magnitud en la forma de onda de voltaje en un circuito eléctrico de baja tensión.
- Registrar el comportamiento de un tipo de lámpara de Metal Halide, ante la presencia de hundimientos en la forma de onda de tensión de diferentes magnitudes y duración.
- Encontrar mediante pruebas de laboratorio, las magnitudes y duración de los sags que determinan el límite inferior de hundimiento permisible, en el cual puede operar la lámpara de Metal Halide sin que sufra un apagón.
- Plantear un método para medir el impacto de los sags en la lámpara analizada, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos.

## **1.2 Estructura del Trabajo Realizado**

Con el fin de registrar de manera organizada el trabajo realizado, se define la siguiente estructura para el desarrollo del marco teórico y la metodología del proyecto realizado. Inicialmente se documenta de manera detallada la pertinencia de realizar este trabajo enfocado en las luminarias de alta descarga utilizando como objeto de estudio las luminarias de tipo Metal Halide, además de toda la información relacionada con la normativa existente sobre las perturbaciones en los sistemas de distribución eléctrica que afectan el normal funcionamiento de los dispositivos electrónicos usados en procesos críticos, haciendo énfasis en los sags como objeto de estudio específico pero enunciando eventualmente y de manera general algunos otros eventos como la distorsión total por armónicos (THD) y las sobretensiones de corta duración (swell).

Una vez descritos y enunciados los principales eventos detallando de manera específica los sags, se analizan trabajos realizados e investigaciones documentadas en otras tesis y en artículos indexados sobre el impacto de los sags en diferentes procesos industriales y sistemas eléctricos, esto permite conocer como desde otros procesos se ha abordado y descrito el problema y analizar las recomendaciones registradas y posibles soluciones para mitigar el impacto causado, paso seguido se analizan los principales estándares internacionales utilizados para caracterización de dispositivos electrónicos ante la aparición de un sag en la señal de tensión que los alimenta.

Conociendo los principales estándares existentes se analiza la posibilidad de adaptar uno de estos a las HID tipo Metal Halide como objeto de estudio particular, una vez se determinen los rangos de operación de la luminaria en cuestión sometiéndola a dichos eventos generados por un dispositivo implementado para tal fin, los criterios para la implementación de este dispositivo se relacionan de manera detallada en este documento. Con los resultados arrojados una vez realizados los ensayos, se desarrollará el análisis de los mismos, discusión de los resultados y se generan las respectivas conclusiones y recomendaciones.



## 2. MARCO TEÓRICO

Los estudios sobre el impacto de los sags en equipos y dispositivos eléctricos o electrónicos tienen pocas publicaciones e investigaciones a nivel histórico, las primeras fuentes o referencias documentadas al respecto datan de inicios de la década de los 80's, dados los nuevos desarrollos en el área de la computación al identificar que dichos eventos afectaban el normal funcionamiento de dichos equipos. Con los avances tecnológicos no solo en la computación sino en el área de los semiconductores se han evidenciado como causa de algunos problemas en dichos dispositivos, la aparición de eventos de corta duración en las señales de tensión, principalmente los sags.

Con el fin de evidenciar la pertinencia de este trabajo se presenta la siguiente sustentación teórica producto de consulta en textos académicos, catálogos de fabricantes de dispositivos electrónicos, normativa técnica nacional e internacional y bases de datos electrónicas científicas como IEEE Explorer, Science-direct y E-libro. Para entender con mayor claridad el contenido del estado del arte, se presentará estructurando la información de una manera secuencial.

En la primera parte del estado de este capítulo se mencionarán algunos antecedentes a nivel institucional de la investigación en el área de gestión energética y se hablará de forma sucinta sobre los fenómenos que ocurren en las redes de distribución eléctrica como los sags y los swells y sobre sus respectivas causas de aparición, definiciones necesarias y normativa nacional e internacional al respecto. La segunda parte de éste capítulo se hablará sobre los estudios realizados a la fecha en cuanto al impacto de los sags sobre diferentes dispositivos electrónicos y los estándares existentes para la caracterización de dispositivos electrónicos ante la aparición de un evento sag.

La tercera parte de este capítulo habla sobre algunos estudios significativos que se han realizado sobre el impacto de los sags en diferentes dispositivos eléctricos y electrónicos, además sobre antecedentes encontrados aplicables a los sistemas de iluminación, con la información recolectada en el estado del arte es posible dejar por escrito algunas conclusiones

y recomendaciones que permitirán adelantar en los capítulos posteriores toda la metodología necesaria para la realización del estudio objeto de éste proyecto.

## **2.1 Conceptos sobre Calidad de la Energía en Sistemas Eléctricos**

La satisfacción de las necesidades básicas de la humanidad está cada vez más ligada a la producción industrial y al uso de diferentes fuentes de energías, por tal motivo se considera una consecuencia normal que con el incremento de la población mundial se requieran de sistemas más productivos, eficientes y por tanto de la búsqueda y uso de nuevas fuentes alternativas de energía para satisfacer dichas necesidades. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario que los sistemas energéticos garanticen su normal operación mediante el establecimiento y cumplimiento de normativas claras y definidas que permitan contar con servicios y sistemas de calidad.

Para el caso de la energía eléctrica, la calidad en el servicio debe evaluarse en las etapas de generación, transporte y distribución; dado que en cualquiera de las tres etapas se producen eventos que alteran la forma de onda y magnitud de la señal, por consecuencia estas alteraciones afectan el normal funcionamiento de los dispositivos y por consiguiente afectan la calidad del producto o servicio prestado. Lo anterior evidencia que en cuanto a energía eléctrica se refiere, el gran reto a asumir es el incremento de la capacidad de generación mediante nuevas fuentes, mejorando de igual forma la calidad en el servicio.

Existen en la actualidad y a nivel mundial dos estándares reconocidos en cuanto a calidad de la potencia eléctrica establecidos por IEC e IEEE respectivamente, ambos enfocan el concepto de calidad de la potencia eléctrica desde diferentes puntos de vista; pero, es posible deducir que el concepto general al respecto es el que relaciona las variables de disponibilidad y calidad del servicio, entendiéndose cualquier evento que altere estas condiciones como perturbación en el sistema o en la red (D. Committee, 2009) y (Comisión Internacional de Electrotécnia IEC, 2006).

## **2.2 Eventos que Ocurren en las Redes de Distribución Eléctrica**

Considerando como parámetro ideal de funcionamiento y diseño para los diferentes equipos y dispositivos electrónicos una señal de tensión eléctrica sinusoidal de frecuencia estable (50Hz o 60Hz de acuerdo a la región), es posible definir por evento toda alteración que modifique o altere por exceso o defecto dichas condiciones y de esta forma pueda afectar el normal funcionamiento de los dispositivos conectados a la red.

Los dispositivos eléctricos y electrónicos en general son diseñados para funcionar bajo condiciones ideales en cuanto a la señal de voltaje que los alimenta, tanto en magnitud como en frecuencia. Cualquier alteración de ésta, puede afectar la calidad del servicio que prestan estos dispositivos; por lo tanto, una característica importante y diferenciadora de la electricidad con respecto a otros productos es que mediante el uso de ésta se ve afectado directamente el funcionamiento normal de otros sistemas y elementos, por consiguiente cambian sus características y condiciones.

La calidad de la electricidad como producto no solo depende de un cliente específico sino de la demanda de la totalidad de los conectados a la red, el tipo de cargas que requieran alimentar, del generador del servicio y del distribuidor del mismo (Pérez, 2006). Los eventos en las redes de distribución eléctrica pueden producirse por factores de tipo ambiental (animales y vegetación), climático, desgaste o daño de componentes del sistema o por condiciones inherentes a la demanda y utilización del servicio.

Las cargas sobre las cuales se observa un nivel de afectación significativo producto de los fenómenos que ocurren en las redes de distribución eléctrica son las cargas que utilizan fuentes lineales como los computadores, ordenadores personales, balastos electrónicos, equipos para medición de variables, entre otros; estos por lo general procesan una gran cantidad de información en tiempos cortos o se utilizan para procesos críticos como pueden ser los relacionados con la producción industrial, lo anterior hace necesaria la utilización de

equipos adicionales que controlen los eventos que puedan afectar su buen funcionamiento (Granados & López, 2010; Perez, 2006).

Un sistema de distribución de energía eléctrica en los niveles de tensión I, II y III, es considerado un sistema dinámico, pues en cualquier instante de tiempo se encuentra permitiendo la conducción de la electricidad en la prestación del servicio de energía eléctrica, en las diferentes categorías de clientes según regulación la vigente: industrial, comercial y residencial.

En épocas anteriores no era necesario tener en cuenta los eventos en las redes eléctricas, como la distorsión total por armónicos (THD), los parpadeos e intermitencias en la señal (Flicker), los hundimientos de corta duración (sag), las sobretensiones de corta duración (swell), y las interrupciones o las variaciones de frecuencia. Hoy en día teniendo en cuenta los problemas que ocasionan, su estudio y el de todos los aspectos concernientes a la calidad de la potencia eléctrica cobran cada día mayor relevancia (Thallam & Heydt, 2000).

La definición de calidad de la potencia es un término que se puede considerar algo ambiguo teniendo en cuenta lo descrito por normas internacionales aplicables al caso, en una de ellas se define el término como...“características de la electricidad en un punto dado de una red de energía eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia”...(IEC, 2006). Otra norma internacional reconocida define el término como...“una gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica”...(IEEE, 2009), dicho lo anterior es posible deducir que los términos expresados por las estas normas adolece de parámetros específicos que definan claramente el concepto.

Publicaciones al respecto expresan de igual forma la ambigüedad del concepto y plantean dicha definición como: “...la combinación de la disponibilidad del suministro eléctrico junto con la calidad de la tensión y la calidad de la corriente suministradas, entendiendo la falta de calidad como la desviación de esas magnitudes de su forma ideal,” (Pérez, 2006), la cual ofrece un punto de vista más ajustado sobre el término de calidad de la potencia (Power Quality).

Los estándares más conocidos a nivel mundial clasifican los fenómenos que ocasionan disturbios en las redes de distribución de la siguiente forma y la clasificación de los sags según su magnitud (ver Tabla 1) y duración (ver Tabla 2). (IEEE, 2009) y (IEC, 2006).

**Tabla 1. Clasificación de fenómenos que se producen en las redes eléctricas (IEC, 2006)**

Grupo	Ejemplos
Fenómeno de conducción a bajas frecuencias	Harmónicos e inter-harmónicos
	Sistemas de señales (Power line Carrier)
	Fluctuaciones de voltaje
	Hundimientos de voltaje e interrupciones (dip/sag)
	Desbalance de voltaje
	Variaciones de potencia o frecuencia
	Voltajes inducidos de baja frecuencia
	Redes de AC o DC
Fenómeno de radiación a baja frecuencia	Campos magnéticos
	Campos eléctricos
Fenómeno de conducción a alta frecuencia	Ondas inducidas continuas (CW) voltajes o corrientes
	Transitorios unidireccionales
	Transitorios oscilatorios
Fenómeno de radiación a baja frecuencia	Campos magnéticos
	Campos eléctricos
	Campos electromagnéticos
	Ondas continuas
	Transitorios
Fenómeno de descarga electrostática (ESD)	_____

La Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG que es el ente encargado en Colombia de regular todas las actividades concernientes a la prestación de los servicios públicos domiciliarios, modificó lo dispuesto en la resolución CREG 070, la cual regula los elementos que definen la calidad de la potencia (CREG, 2005) y (CREG, 2001), básicamente se refiere al voltaje (V), a la frecuencia (F) y la distorsión armónica de la onda de tensión (Total Harmonic Distorsion- THD).

**Tabla 2. Categorías y características típicas de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia (IEEE, 2009)**

Variaciones del valor RMS de corta duración	Duración típica	Magnitud de Voltaje típica
Instantáneos		
Sag	0.5 – 30 ciclos	0.1 - 0.9 <i>pu</i>
Momentáneo		
Interrupción	30 ciclos – 3 s	0.1 - 0.9 <i>pu</i>
Sag		
Temporal		
Interrupción	30 ciclos – 3 s	0.1 - 0.9 <i>pu</i>
Sag		

**Nota:** La cuantificación *pu* expresada en la Tabla 2 hace referencia a unidades totales, entendiéndose 1.0 *pu* como el 100% de la magnitud original (IEEE, 2009).

Para las variables eléctricas de tensión, frecuencia y THD, la CREG mediante el concepto 20452 de 2002 define los rangos de operación en que deben permanecer estas variables para garantizar una adecuada prestación del servicio de energía dentro de rangos aceptables de operación, estos son aplicables a todos los operadores de red en Colombia. Sin embargo, en dicho concepto no se hace referencia a los sags o los swells como factor

importante para la operación normal de los sistemas eléctricos, tampoco manifiesta rangos de operación o apariciones permitidas por unidad de tiempo para este tipo de eventos (Reinstein, 2002) y (CREG, 2002).

Al consultar en el concepto 20452 de la CREG solo se mencionan en los numerales 6.2.1.1 y 6.2.1.2 las desviaciones de la Frecuencia, la magnitud de la Tensión estacionaria y la distorsión armónica de la onda de tensión. Al respecto el concepto menciona que las tensiones en estado estacionario a 60Hz no podrán ser inferiores al 90% de la tensión nominal ni ser superiores al 110% de esta durante un periodo superior a un minuto. En el caso de sistemas con tensión nominal mayor o igual a 500kV, no podrán ser superiores al 105%, durante un periodo superior a un minuto” (Reinstein, 2002) y (CREG, 2002). Con respecto a los límites máximos permitidos para los fenómenos mencionados, la resolución CREG 082 de 2002 define los que aparecen en la Tabla 3, (CREG, 2002).

**Tabla 3. Límites máximos de Distorsión Total de Voltaje (Reinstein, 2002)**

Tensión del sistema	THDV máximo (%)
Niveles de tensión 1, 2 y 3	5.0
Nivel de tensión 4	2.5
STN	1.5

Teniendo claras la definiciones de la resolución CREG 024 en cuanto a los diferentes tipos de eventos asociados a la calidad de la potencia, se puede deducir que no todos los eventos que ocurren en las redes de distribución eléctrica son regulados por ésta comisión nacional; es decir, en cualquier red de transmisión y distribución de energía también se registran otros tipos de eventos asociados a la calidad de potencia conocidos como alteraciones de corta duración en la red, entre ellos los sags y los swells (sobre voltajes de corta duración o picos en la forma de onda de tensión), que en la actualidad no tienen límites de permisividad definidos, posiblemente debido a que aunque se presentan no afectan a todos los dispositivos de igual forma. Así, el nivel de afectación que un evento de este tipo puede causar sobre una carga en particular depende de la sensibilidad, naturaleza y tipo de carga

conectada en la red de distribución, por tal razón no son regulados y se hace necesaria la generación de una regulación o norma particular al respecto (CREG, 2002).

Los eventos antes mencionados suelen afectar directamente a los equipos electrónicos constituidos por semiconductores y que poseen fuentes lineales debido a que sus componentes presentan alta sensibilidad a variaciones mínimas en la señal eléctrica de tensión que ocurren en las redes de distribución (Thallam & Heydt, 2000) y (Department of commerce USA, 1983) y (Cheng, Huang, & Bhattacharya, 2002) y (ECAMEC, 2010). Por motivos de fácil interpretación de la información consignada en éste trabajo es importante especificar que no existe diferencia entre los conceptos sag y dip, la IEC los define como dip y la IEEE los define como sag, para fines de practicidad y mejor entendimiento de éste trabajo estos eventos se seguirán mencionando como sag.

### **2.3 Definición de los eventos Sags**

Los sags o dips son reducciones súbitas de corta duración de tiempo en la magnitud de la señal de tensión estándar, dicha magnitud puede ser entre un 90% y 1% del voltaje nominal (Comisión Internacional de Electrotécnia IEC, 2006) y (Markiewicz & Klajn, 2004); generalmente se producen por fallas de cortocircuito o por la puesta en funcionamiento de grandes cargas como pueden ser motores eléctricos y pueden afectar el funcionamiento de los dispositivos que compartan circuito de conexión con dichas cargas incluso con cuando ocurren con duraciones de tiempo inferiores a los 100ms (Dorr et al., 1995) y (IEEE, 2011) y (Lee, So, & Chow, 2009) y (Sedighnejad & Jalilian, 2010).

Los efectos negativos de este tipo de eventos se evidencian principalmente en dispositivos como computadoras, variadores de velocidad, equipos para el control de procesos industriales y luminarias de alta descarga (Pérez, 2006) y (Vargas, 2005). La Figura 1 ilustra la aparición de un sag en un sistema trifásico.



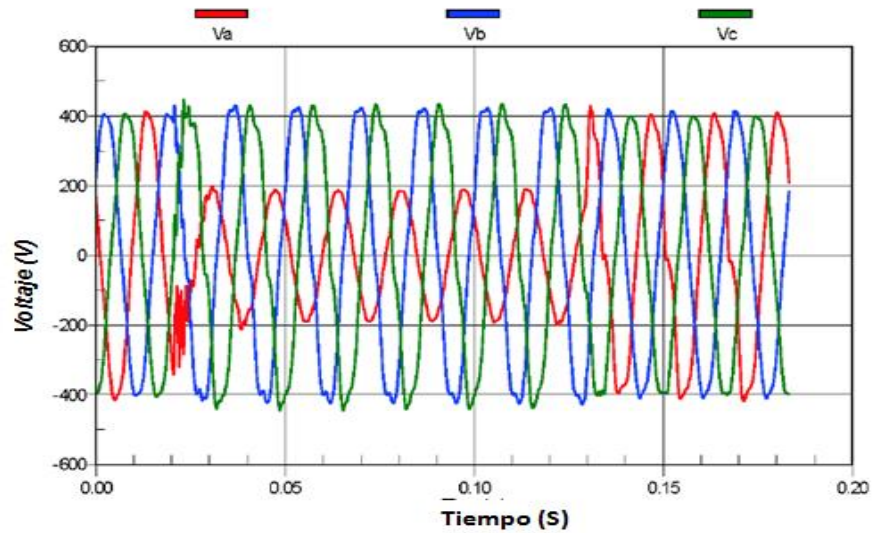
En la Figura 1 se puede observar un voltaje sag que ocurrió en una de las fases de un sistema trifásico con una duración aproximada de 100ms que afectó un proceso industrial (IEEE, 2011). El artículo titulado: “Impacto de los Sag en la seguridad de los sistemas industriales”, se indican la existencia de 7 tipos diferentes de sag clasificados por categorías entre la A y la G de acuerdo al tipo de conexión de las cargas al sistema de distribución, siendo los de tipo A, B, C y D los que ocurren con mayor frecuencia (ver Tabla 4) (Reyes, Torres, & Torres, 2005), de acuerdo a las causas que generan los sags el autor registra los principales factores de manera porcentual que ocasionan sag en las redes de distribución eléctrica (ver Tabla 5).

**Tabla 4. Origen de los sags de voltaje de acuerdo a la falla (Reyes et al, 2005)**

Tipo de falla	Carga (Y)	Carga ( $\Delta$ )
Trifásica	A	A
Bifásica a tierra	E	F
Fase-Fase	C	D
Monofásica	B	C

Existen adicionalmente algunos estudios donde los autores documentan un método para determinar la causa que originó un evento en la red de distribución eléctrica utilizando un algoritmo matemático (Kwang, Kumaran, Fadzil, Siam, & Busrah, 2004).

Cuando se somete un equipo ante un evento de corta duración, en el caso de una lámpara de alta densidad de descarga, no todos los eventos de estas características les afectan de igual forma su normal funcionamiento; incluso estos eventos impactan de forma diferente los diversos tipos de lámpara de alta intensidad de descarga existentes, es decir, si un evento de determinadas características afecta una lámpara de alta presión de sodio, podría no afectar de igual forma a una lámpara de Metal Halide o a una de filamento.



**Figura 1.** Ejemplo de voltaje sag de corta duración causado por una falla remota; este voltaje sag causó el paro de una línea de producción de plásticos (IEEE, 2011)

Un análisis detallado de los eventos de corta duración que ocurren en los sistemas de iluminación que utilizan luminarias de alta descarga puede a futuro arrojar indicadores que permitan determinar niveles de compensación de energía que deben asumir las empresas prestadoras del servicio de energía por afectar el normal funcionamiento de los sistemas en mención; sin embargo, es necesario en primera instancia analizar que tanto y a qué nivel las luminarias de alta descarga se ven afectadas por los eventos de corta duración (Caracterización), en especial los sags.

**Tabla 5. Probabilidad de ocurrencia de sag de acuerdo a la causa (Reyes et al,2005)**

Causa	Porcentaje (%)
Descargas	25.9
Viento	5.2
Accidentes	6.7
Falla infraestructura	6.7
Animales	4.2

Árboles	0.8
Vandalismo	0.5
Fallas equipos	15.0
Arranques de cargas	35.0

---

## 2.4 Origen del Estudio de los Eventos de Corta Duración en las Señales de Tensión

Es importante para dar inicio a la segunda parte del estudio de antecedentes, hablar del origen del estudio de los eventos de corta duración que ocurren en la red de distribución eléctrica. Es posible evidenciar en información consultada estudios al respecto que datan de finales de la década de los 70's, por dicha época se detectó el impacto que este tipo de eventos tenía sobre los equipos de cómputo, dicha industria durante ese momento venía en creciente desarrollo (Thallam & Heydt, 2000).

El impacto de estos eventos en los equipos de cómputo se evidenciaba mediante pérdidas en la transmisión de señales y datos, fallas inesperadas en el funcionamiento de los computadores sin razón aparente, así como en errores en la transmisión de información (Thallam & Heydt, 2000). La particularidad en el estudio del impacto de los eventos de corta duración (sag, swell), es que afectan de mayor forma a los equipos de cómputo que los eventos de larga duración, los cuales con la tecnología existente en la época y en la actualidad en cuanto a reguladores y fuentes alternas de energía son fácilmente superables.

La detección de los sags que ocurren en los sistemas de distribución de potencia son registrados utilizando analizadores de calidad de la potencia orientados al cumplimiento de normas específicas (Markiewicz & Klajn, 2004) y (Comisión Internacional de Electrotécnica IEC, 2006), diversos fabricantes poseen en sus catálogos éste tipo de equipos.

De igual forma se han documentado desarrollos de software con aplicaciones específicas para la detección de puntos de falla que originan sag y sus efectos en las cargas conectadas a la red analizada (Kezunowid, 2001), la información consultada habla de un

análisis realizado utilizando un software llamado “*Tools developed*”, esta herramienta caracteriza los eventos ocurridos en una instalación, lo cual es muy similar a lo planteado en otras publicaciones (de Carvalho Filho, de Abreu, Noronha, & Arango, 2000), observándose que el análisis mediante software se realiza aparentemente de una forma más detallada y eficiente.

Algo importante a tener en cuenta son los métodos que utilizan los medidores existentes en el mercado para medir la magnitud y duración de los eventos que ocurren en las redes de distribución, generalmente los fabricantes son algo herméticos con esta información por motivos de derechos de autor, sin embargo fueron encontradas publicaciones donde se exponen los siguientes métodos con el respectivo análisis de aplicaciones y limitaciones: *Método R.M:S*, el método de la *componente fundamental* (SDFT) basado en la transformada discreta de Fourier, el método del *Filtro Kalman* y el método de la *Transformada Wavelet continua*; la cual plantea como eje central el diseño de un método combinado entre el método *filtro Kalman extendido* (EKF) y la *Transformada Wavelet* logrando utilizar las ventajas que tienen cada uno de los métodos con respecto al tiempo de detección del hundimiento y en la duración del evento (Perez, 2006).

Otro aspecto importante está asociado a los perfiles de sag y a la forma como los medidores existentes en el mercado los asumen, pudo encontrarse que algunos medidores de sag asumen dichos eventos como rectangulares y no con forma irregular, lo cual es como generalmente se presentan (Won, Ahn, Member & Moon, 2005) y (Won, Ahn, Chung, Kim, & Moon, 2003) y (Sanchez, Caicedo, & Castro-Aranda, 2008), los artículos consultados plantean una caracterización modificada de dichos eventos utilizando una curva de tolerancia para los análisis de calidad de la potencia en cuanto a los sags.

La medición detallada de los sags y el conocimiento de su perfil, sirven para identificar su origen y por lo tanto generar acciones que disminuyan su probabilidad de ocurrencia (ver Figura 2 y Figura 3), otros autores reafirman la necesidad de hallar nuevas formas de caracterización de los sags luego de analizar los eventos que ocurrían por la puesta

en operación de motores eléctricos, plantean además la necesidad de realizar un análisis por etapas de dichos eventos y caracterizarlos mediante software (Kezunwid, 2001).

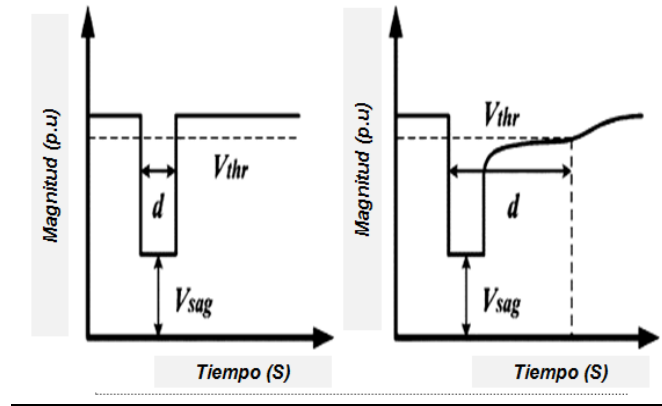


Figura 2. Estimación convencional para la medición de los sags (Won et al., 2005)

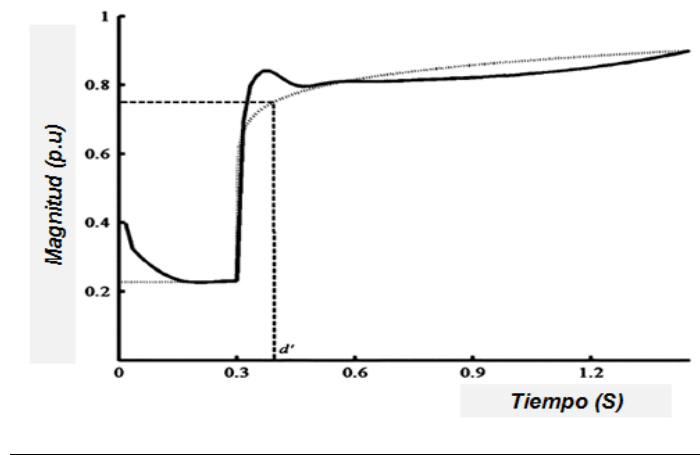


Figura 3. Método modificado de estimación de ocurrencia de los sags (Won et al., 2005)

**Nota:** en la Figura 3 la línea sólida de la gráfica representa el perfil real del sag y la línea punteada su perfil aproximado.

## 2.5 Calidad en los Sistemas de Iluminación

La norma que sirve en Colombia como guía para garantizar la calidad en los sistemas de iluminación residencial, comercial e industrial es el “REGLAMENTO TÉCNICO DE ILUMINACIÓN Y ALUMBRADO PÚBLICO” (RETILAP), (Min-MINAS, 2010), que fue

aprobado por el Ministerio de Minas y Energía bajo Resolución 180540 de 2010 con el título. “ANEXO GENERAL REGLAMENTO TÉCNICO DE ILUMINACIÓN Y ALUMBRADO PÚBLICO”. Esta norma de la república tiene como uno de sus objetos: “...la protección del consumidor y la preservación del medio ambiente; previniendo, minimizando o eliminando los riesgos originados por la instalación y uso de sistemas de iluminación.” (Min-MINAS, 2010).

Los objetivos descritos en el RETIE que aplican a esta tesis son: La protección de la vida y la salud humana, la protección de la vida animal y vegetal y la prevención de prácticas que puedan inducir a error al usuario (Min-MINAS, 2010).

Es posible inferir la importancia y relevancia que tiene el realizar análisis y estudios detallados sobre cualquier aspecto que afecte la calidad y continuidad en los sistemas de iluminación teniendo en cuenta los anteriores aspectos enunciados en el RETILAP, para el caso objeto de esta tesis, se trata de los apagones inesperados y no programados en los sistemas de iluminación, que van en contra de lo estipulado en cuanto a la “Protección de la vida y la salud humana” planteado en el reglamento en mención (Min-MINAS, 2010).

Es necesario tener en cuenta que las luminarias objeto de éste estudio están relacionadas en la tabla de productos numeral 110.2 del RETILAP en la casilla número 11 “Bombillas o lámparas de Halogenuros metálicos” (Min-MINAS, 2010), esto evidencia que el uso de éste tipo de luminarias está regulado por la norma y resalta por defecto la importancia de considerar nuevos aspectos a tener en cuenta en sistemas de iluminación que utilizan este tipo de luminarias.

Teniendo en cuenta el RETILAP, las luminarias de alta descarga tipo Metal Halide están catalogadas en la tabla 200.3.4 b, bajo el criterio de uso aplicado a lugares donde la apreciación del color sea un parámetro crítico (Min-MINAS, 2010), expresado lo anterior es posible reforzar la importancia que tiene el estudio de los factores que afectan el normal funcionamiento de este tipo de luminarias.

El numeral 210.2.1 d. del RETILAP habla de las demandas en cuanto a seguridad para el diseño de iluminación y menciona que éstas deben determinarse en función de los dispositivos de iluminación para la circulación de personas en condiciones normales y de emergencia (Ver Tabla 6) (Min-MINAS, 2010).

**Tabla 6. Tipos de fuentes luminosas en función de sus características de temperatura de color e índice de reproducción cromática (Min-MINAS, 2010).**

Índice de reproducción cromática (ra) o (cri) %	Clase	Cálido < 3.300 k	Neutro 3300 – 5000 k	Frío > 5000 k	Criterio de aplicación
≥ 90	1A	Halógenas  Fluorescente lineal y compacta  Halogenuros metálicos y cerámicos	Fluorescente lineal y compacta  Halogenuros metálicos y cerámicos	Fluorescente lineal y compacta	Principalmente donde la apreciación del color sea un parámetro crítico
80 - 89	1B	Fluorescente lineal y compacta  Halogenuros metálicos y cerámicos  Sodio blanco	Fluorescente lineal y compacta  Halogenuros metálicos y cerámicos	Fluorescente lineal y compacta	En áreas donde la apreciación correcta del color no es una consideración primaria pero donde es esencial una buena reproducción de colores
70 - 79	2A	Halogenuros metálicos	Halogenuros metálicos	Halogenuros metálicos	En áreas donde la apreciación del color es de poca importancia
< 70	2B, 3 y 4	Mercurio  Sodio	Mercurio		

Considerando que los sistemas de iluminación de emergencia trabajan detectando interrupción en el suministro de energía y no en la deficiencia o ausencia de iluminación, teniendo en cuenta lo manifestado en el numeral 470.3 del RETILAP que habla sobre las características de la instalación del alumbrado de emergencia (Min-MINAS, 2010), queda en evidencia que la corta duración de los eventos como los sags o los swells no necesariamente implican una interrupción en el suministro de electricidad; por lo tanto, es posible que suceda un apagón inesperado en las luminarias de alta descarga sin que el sistema de iluminación de emergencia lo detecte como falla.

Es posible que en caso de apagón inesperado producto de un sag en un sistema de iluminación que utilice luminarias de alta descarga el sistema de iluminación de emergencia no funcione, lo cual ocasionaría problemas de seguridad, movilidad y podría estar expuesta en algún momento la integridad de las personas.

El capítulo 7 del RETILAP, en su sección 700 (“INTERVENTORÍA DE LOS CONTRATOS DE SERVICIO DE ALUMBRADO PÚBLICO”) y (Min-MINAS, 2010), enuncia la obligatoriedad que tienen los municipios de contratar un servicio de auditoría aplicable a todo el alumbrado público, la sección 700.2 de la misma norma en el numeral 13, manifiesta que el servicio de auditoría al sistema de alumbrado público debe analizar los resultados del informe de indicadores de calidad del servicio de energía (*DES - FES*) y (Superintendencia delegada para energía y Gas, 2011), el cual cada operador debe entregar a la superintendencia de servicios públicos con el fin de determinar el monto de la energía a descontar o compensar por calidad en el servicio o por interrupciones programadas o no programadas en los circuitos (Min-MINAS, 2010).

Haciendo revisión de algunos informes del 2011 existentes en la página web de la superintendencia, se encuentra en la sección de calidad de la potencia eléctrica análisis sobre el valor RMS de tensión, porcentaje distorsión en la forma de onda de tensión, factor de potencia, desbalance y armónicos impares, así como también se observan las respectivas tablas de duración y frecuencia de interrupciones (Superintendencia delegada para energía y Gas, 2011), siendo estas últimas las más relevantes para los sistemas de iluminación pero en



ningún momento se tienen en cuenta la magnitud ni frecuencia de los eventos de corta duración como los sags o los swells que como ya se ha dicho afectan el normal funcionamiento de los sistemas de alumbrado público que utilizan luminarias de alta intensidad de descarga (Superintendencia delegada para energía y Gas, 2011).

Como se puede entender, el RETIE manifiesta la importancia en cuanto a seguridad que tienen los sistemas de iluminación y recomienda acogerse al Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (Min-MINAS, 2010), este habla en detalle sobre la importancia de los niveles de iluminación dependiendo del tipo de espacio a iluminar y sobre la organización de las redes, pero no se encuentran en el mismo elementos que consideren los eventos de corta duración que pueden generar apagones inesperados en los sistemas de iluminación que utilizan luminarias de alta descarga, para usarlos como parámetros a tener en cuenta para el diseño de sistemas de alumbrado público ni como parámetro a tener en cuenta para los procesos obligatorios de auditorías que deben realizar los municipios a los sistemas de alumbrado público que la norma vigente (Min-MINAS, 2010).

## **2.6 Estándares Existentes para la Caracterización de Dispositivos ante Eventos de Corta Duración**

Desde el año 1977 la asociación Computer Business Equipment Manufacturers Association (CBEMA), ahora llamado: Information Technology Industry Council (ITIC), diseñó un estándar de caracterización de equipos de cómputo ante eventos de corta duración en la señal de tensión eléctrica mediante una curva denominada CBEMA (Department of commerce USA, 1983), esta fue dada a conocer mediante un artículo publicado por el Departamento de comercio de Estados Unidos en el año 1983 cuyo nombre es: “Guía de la energía eléctrica para sistemas automáticos de procesamiento de datos (ADP)” (Department of commerce USA, 1983).

En la guía documentada por CBEMA se enseñan algunas recomendaciones de seguridad para la protección de equipos en instalaciones gubernamentales, y también se explica en detalle la gráfica de sensibilidad de los equipos de cómputo ante distorsiones de corta duración en la señal eléctrica de alimentación representada en una gráfica denominada Curva CBEMA (Department of commerce USA, 1983) (ver Figura 4).

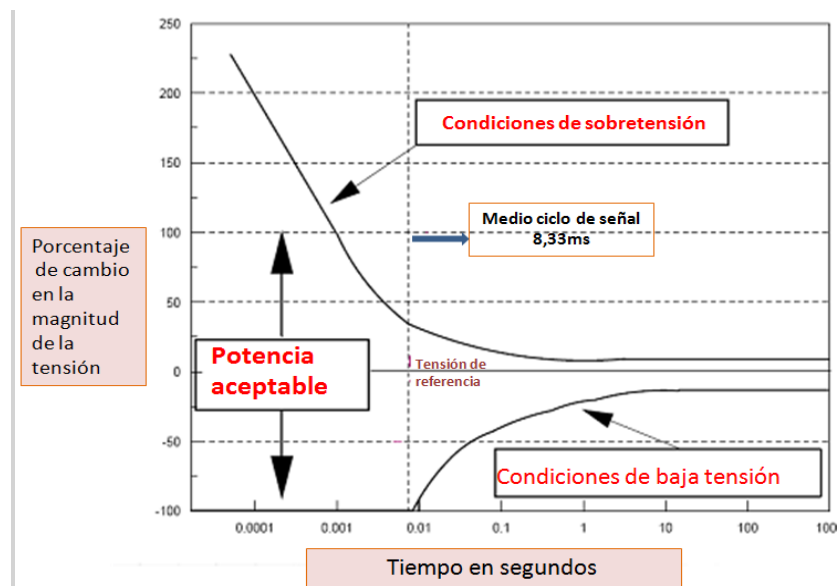


Figura 4. Regiones características de la Curva CBEMA (Flechas, 2000)

Hasta ahora, con la aparición de nuevas tecnologías y nuevos dispositivos se han realizado diferentes análisis del impacto de los eventos de corta duración y por consiguiente han aparecido nuevos estándares para la caracterización de los dispositivos, actualmente los estándares existentes afines son: la curva CBEMA, la curva ITIC (CBEMA) y el Estándar SEMI F-47 (Thallam & Heydt, 2000).

### 2.6.1 Curva CBEMA

La curva CBEMA es el patrón utilizado para evaluar el impacto de los hundimientos (sag) o de los picos (swell) en la forma de onda de tensión sobre los equipos electrónicos que poseen unidad central de procesamiento (CPU), por medio de ésta se logró desarrollar un método para la caracterización de los equipos de cómputo, el cual permite definir de acuerdo a la magnitud y duración los eventos que los afectan el normal funcionamiento de dichos dispositivos. La curva en mención destaca tres regiones en las que puede determinarse el nivel de afectación que pueden causar los eventos sobre los equipos electrónicos (Figura 4). En la curva se muestran las regiones de operación de los equipos de cómputo dependiendo del nivel de tensión al cuales son sometidos (Department of commerce USA, 1983).

- **Región de operación sin interrupción (Potencia aceptable)**

En esta región se encuentran todos los hundimientos (sag) o picos (swell) que no afectan el normal funcionamiento de los equipos de cómputo, los eventos en esta región no generan interrupciones ni daños sobre los computadores y a dicha área delimitada en la curva CBEMA se le denomina Región de potencia aceptable, para mayor claridad, la gráfica indica que mientras el computador opere en dicha región no sufrirá daño o interrupción alguna (ver Figura 4).

- **Región de funcionamiento sin daño (Niveles de baja tensión)**

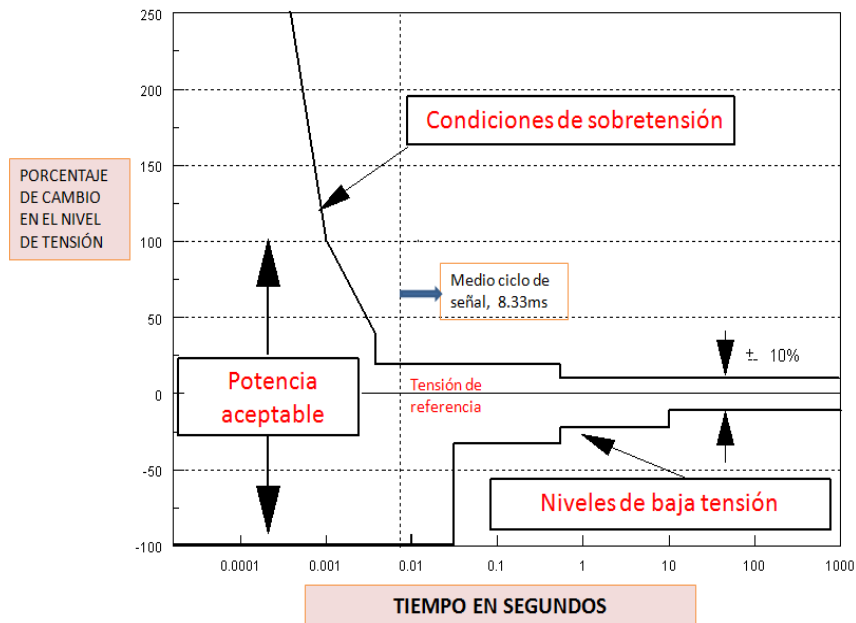
En ésta región se encuentran los eventos que dada su magnitud y duración ocasionan que los equipos de cómputo sufran apagones inesperados, básicamente son efectos producidos por los sags. Teniendo en cuenta las características de estos eventos y a la interpretación de la curva dada por sus diseñadores, estos eventos a pesar de afectar el normal funcionamiento de los computadores no generan daños en ninguno de sus componentes, esta región puede observarse en el límite inferior de la curva CBEMA (ver Figura 4).

- **Región de operación prohibida (Niveles de sobretensión)**

Todos los eventos que se sitúen en el límite superior de la curva CBEMA pueden generar con certeza algún daño en los equipos electrónicos y se debe evitar la generación de este tipo de eventos en el sistema, a esta región se le denomina región de condiciones de sobretensión.

### **2.6.2 Curva ITIC (CBEMA)**

Debido a la detección de eventos de calidad de la potencia que venían afectando a los nuevos equipos de cómputo y otros dispositivos al inicio de los años 90's y dado que el modelo original de la curva CBEMA no se ajustaba con exactitud a las nuevas necesidades como lo fueron el desarrollo y diseño de nuevos tipos de fuentes conmutadas y buscando una mayor exactitud en la información que entregaba la curva CBEMA, se realizaron ajustes en dicha curva y en ocasión del cambio de denominación de CBEMA a "*INFORMACIÓN TECHNOLOGY INDUSTRY COUNCIL –ITIC*"; se ajustó la curva original y se redefinieron rangos de operación más ajustados, por lo que se creó una curva modificada la cual fue nombrada "*CURVA ITIC*", esta fue publicada en el año 1996. En la Figura 5, se observan los límites de las regiones modificadas (Thallam & Heydt, 2000).



**Figura 5.** Regiones características de una Curva ITIC (CBEMA) (Flechas Villamil, 2000)

Este estándar contiene modificaciones con respecto al original en cuanto al plano de duración del evento vs su magnitud, adicionalmente quedan definidas otras tres regiones de operación para análisis estadístico, las cuales son: La zona de sobre tensiones (swell) comprendida entre el 10 y 20% con duraciones inferiores a 0,5s y delimitada por el trazo positivo de la curva, la zona de subtensiones (sag/dip) entre el -10 al -20 con duraciones limitadas por el trazo negativo de la curva, y por último, la zona de eventos con decaimiento oscilatorio de baja frecuencia (low frequency decaying ring wave) (Thallam & Heydt, 2000) (ver Figura 5).

Los demás criterios establecidos por la curva original (CBEMA) siguen siendo los mismos en cuanto al margen de tensión en estado estable en el suministro de tensión ( $\pm 10\%$ ), todo evento que se encuentre dentro de éste rango no será tenido en cuenta como evento o perturbación (Thallam & Heydt, 2000). Teniendo en cuenta la posibilidad de realizar un análisis detallado con una gran cantidad de muestras, la curva ITIC añade una nueva línea que representa la tensión de referencia que permite observar rápidamente la desviación de las

muestras con respecto a éste eje. Otra adición especial de la curva ITIC con respecto a la CBEMA es la posibilidad de realizar análisis a dispositivos cuya fuente de alimentación puede ser de 208Y/120V y 120/240V con frecuencias de 50Hz o 60Hz (Thallam & Heydt, 2000).

### **2.6.3 Estándar SEMI F47**

La evolución en cuanto a nuevos desarrollos en el área de los semiconductores ha permitido grandes avances en las áreas de micro y nanotecnología, por tal motivo la *ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE LA INDUSTRIA DE SEMICONDUCTORES – SEMI*, ha desarrollado diferentes estándares para la caracterización de semiconductores de acuerdo a sus aplicaciones y fenómenos que los afectan. Para el caso en mención se desarrolló el estándar SEMI F-47 en el año 2006: “*Specification for semiconductor processing equipment voltage sag immunity*”(ver Figura 6), que determina los requerimientos de tolerancia de los equipos de producción de semiconductores ante los sags que se presentan en la red de alimentación eléctrica (Thallam & Heydt, 2000) y (Thomas, 2006).

Allí quedó establecido que los equipos utilizados para la fabricación de circuitos integrados y semiconductores deben tolerar huecos de tensión del 50% con duraciones máximas de hasta 200ms, del 70% cuando su duración es de hasta 500ms y del 80% cuando su duración es de hasta 1s (Thallam & Heydt, 2000). Los límites determinan la región de funcionamiento y establecen una zona inferior, como prohibida o de mal funcionamiento, para los intervalos de tiempos que quedan por fuera, es estándar SEMI F47 recomienda umbrales adicionales que no son requisito de la norma; teniendo en cuenta lo anterior quedan incorporados escenarios que incluyen sag del 0% hasta un ciclo de duración, del 80% hasta 10s de duración y continuos del 90% (Thomas, 2006).

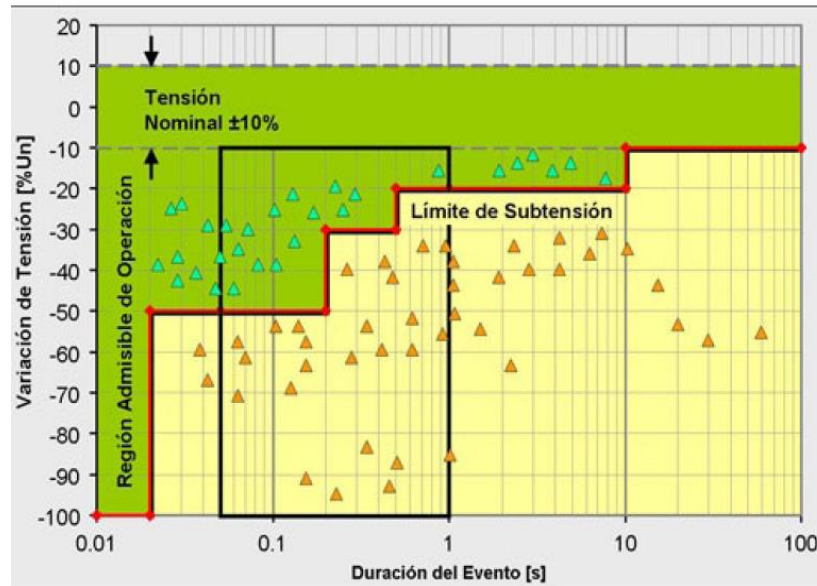


Figura 6. Curva característica, Estándar SEMI F47 (Gas & Company, 2007)

## 2.7 Estudios Realizados sobre el Impacto de los Eventos de Corta Duración en Diferentes Sistemas y Aplicaciones

Para terminar con el análisis de antecedentes de éste trabajo, se hablará en esta tercera parte sobre otros estudios del impacto de los sags realizados en otro tipo de dispositivos, para dejar claras las razones que motivan este estudio en específico. El estudio del impacto de los eventos de corta duración como lo son los sags y los swells ha permeado a otros sistemas eléctricos utilizados para la producción industrial como es el caso de los motores eléctricos y los sistemas de iluminación especialmente en los sistemas de alumbrado público; lo anterior debido a que se han encontrado evidencias de la participación de estos eventos en problemas que se presentan en este tipo de sistemas.

El impacto de los sags en equipos eléctricos o electrónicos ha sido considerado en diferentes equipos eléctricos o electrónicos, artículos consultados muestran estudios realizados donde mediante una simulación con Matlab® se realiza un análisis de los sags en diferentes tipo de motores eléctricos, tanto sincrónicos como asincrónicos conectados como

motores o como generadores (Aguilar et al., 2010) y (Dasilva, Pereira, & Mantovani, 2010). En las simulaciones realizadas los autores lograron mostrar las pérdidas económicas ocasionadas por el funcionamiento de dichas máquinas en un ambiente de voltaje variable; esto infiere en la importancia de este tipo de análisis en casi todos los equipos eléctricos y electrónicos.

Cuando se piensa en el problema de la aparición de los sags en los sistemas de distribución eléctrica y sobre lo que se ha documentado al respecto, se encuentran artículos donde los autores utilizaron el modelo de caracterización planteado por la curva CBEMA como método de evaluación de riesgos a los que pueden estar expuestos los usuarios o clientes de los sistemas de potencia por la aparición de sag (Yun & Kim, 2003), como resultado los autores plantean una curva CBEMA modificada y un modelo basado en lógica difusa, aplicable a los sistemas de distribución la cual denominaron curva “*SCEBEMA*” (ver Figura 7).

Los autores al lograr hacer una propuesta de método de caracterización modificando y ajustando el modelo de la curva CBEMA aplicable a los sistemas de distribución de potencia (Curva SCBEMA), plantean la posibilidad de generar nuevos modelos de caracterización aplicables a sistemas que sean afectados significativamente por la aparición de los sags, tomando como referente los modelos existentes para tal fin (Aguilar et al., 2010).

Los algoritmos utilizados por los equipos medidores de sag han sido usados para dar soluciones a problemas similares, como pudo observarse en artículos consultados. En especial se resalta un modelo que sirve para ubicar problemas en las redes de datos y cuantificar pérdidas en el transporte de información en las redes de datos, lo anterior evidencia la posibilidad de encontrar solución a problemas diferentes a los que se presentan en los sistemas de distribución de potencia por medio de los modelos utilizados actualmente para medir los eventos de corta duración como los sags o los swells (Olguin et al., 2006).



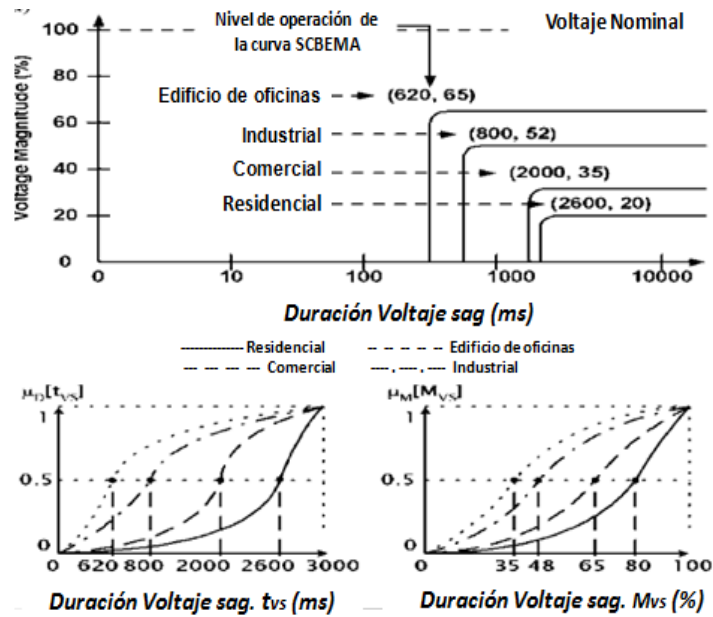
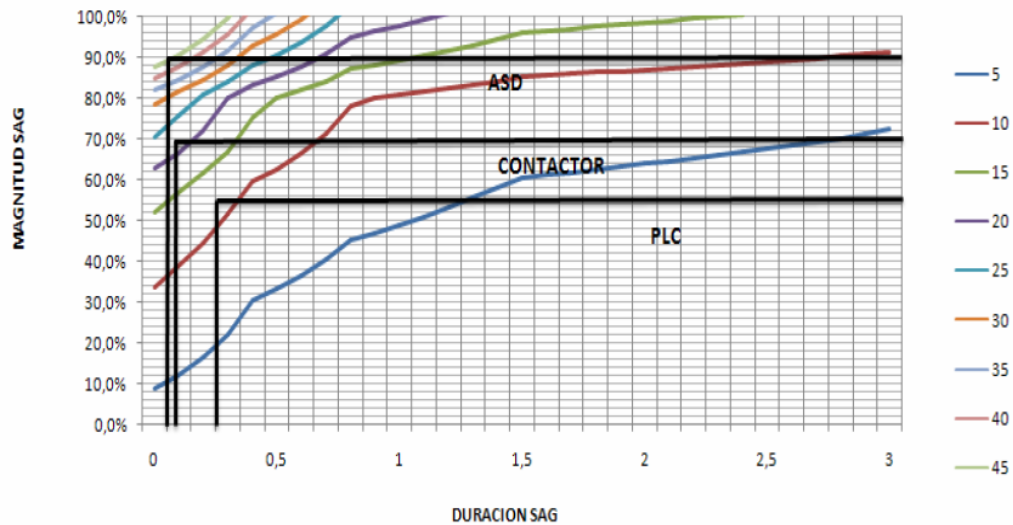


Figura 7. Curva SCBEMA (Yun & Kim, 2003)

Para aplicaciones industriales sobre el análisis de los sags y su impacto en la producción de las empresas se tomaron datos obtenidos en un trabajo de grado (Raigoza Gil, 2008), en donde se presenta la interpretación de las cartas de coordinación o curvas que el autor denominó como “ISO SAGS” obtenidas a partir simulaciones de falla de un circuito industrial y de probabilidades de ocurrencia de dichos eventos. Con dichos resultados se realizó un análisis económico del efecto de los sags en los equipos de una industria y se plantearon alternativas de mejoras para disminuir los costos de pérdidas a causa de la aparición de dichos eventos (ver Figura 8).

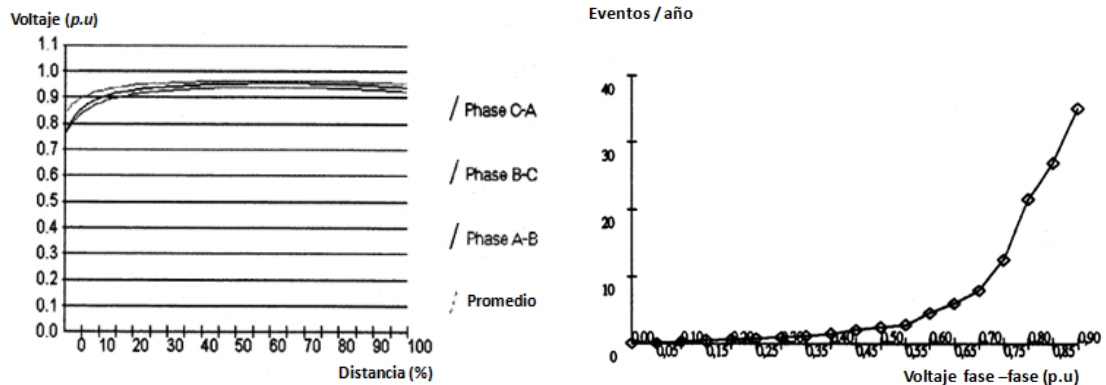


**Figura 8.** Susceptibilidad a los sags de equipos de un proceso industrial. Curva ISO – SAG. (Raigoza Gil, 2008).

En la Figura 8 se muestra el resultado de registros de sag realizados en diferentes dispositivos de un proceso industrial específico obtenidos. Dicho análisis, en conjunto con los resultados obtenidos y los datos analizados permitieron evidenciar pérdidas económicas que ocurren en las empresas por la aparición de sag en las redes eléctricas de los procesos industriales, y adicionalmente permitieron plantear la necesidad de realizar estudios de impacto de los eventos de corta duración en diferentes sistemas eléctricos. El modelo de caracterización empleado para este caso es muy aproximado al modelo SEMI F-47 y aparentemente fue ajustado para la necesidad específica del estudio realizado (Raigoza Gil, 2008).

Si bien es cierto que lo importante en la producción industrial es el logro de la mayor rentabilidad posible, es necesario conocer el comportamiento de un dispositivo o equipo cuando se somete a la aparición de sag y realizar una caracterización detallada al respecto para lograr cuantificar el impacto económico que ocasiona éste problema, esta teoría está sustentada y reforzada por algunos autores consultados (Wagner, Grebe, Kretschmann, Morgan, & Price, 1994).

Pudo encontrarse un artículo donde se plantea una metodología para evaluar el impacto de los sags en cargas conectadas a un sistema de distribución (de Carvalho Filho et al., 2000). Los autores lograron crear un modelo para el análisis del impacto de los sag aplicable a un sistema de distribución de potencia específico el cual permite determinar y medir la magnitud de los eventos que se presentan por año en una instalación, su impacto sobre cada una de las fases instaladas y sobre cada una de las cargas conectadas al circuito objeto de análisis (ver Figura 9).

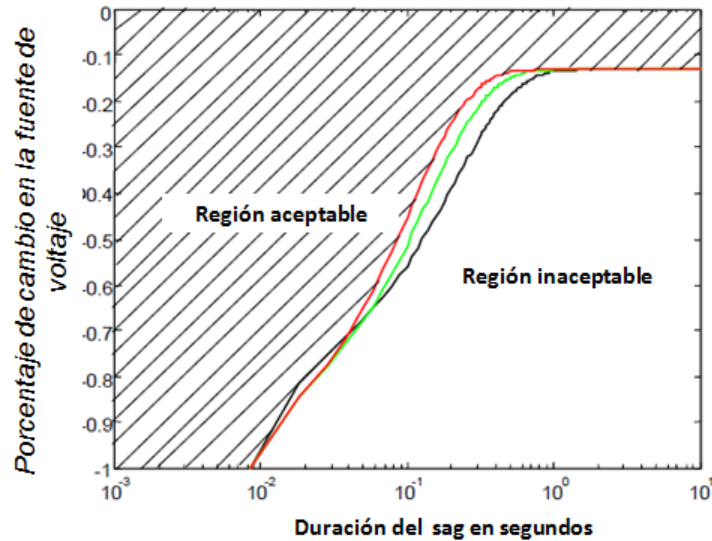


**Figura 9.** Gráficas de modelos de caracterización de una red eléctrica ante la aparición de sag (de Carvalho Filho et al., 2000)

Este estudio permitió obtener datos reales sobre el impacto de los sags en un sistema de distribución de potencia lo cual es una gran ventaja con respecto a los otros modelos encontrados; sin embargo, es un modelo que no es estándar y por lo tanto requiere aplicarse individualmente por instalación para obtener datos significativos con los cuales tomar decisiones para casos completamente particulares, por lo anterior se asimila más a un estudio particular que a un modelo de caracterización.

En (Kyei, 1996) el centro de investigación en ingeniería de sistemas de potencia (Power Systems Engineering Research Center), plantea un método para el diseño de curvas de aceptabilidad para cargas industriales tomando como modelo el ITIC, específicamente

para el análisis de transitorios de voltaje que ocurren en diferentes cargas industriales. El modelo de curva desarrollado por el centro es el que se observa en la Figura 10.



**Figura 10.** Curva de aceptabilidad de potencia para múltiples cargas (Kyei, 1996)

El modelo de la Figura 10 se construyó elaborando curvas similares individuales a diferentes cargas como: una carga trifásica rectificadora con polo a tierra, motor de inducción con torque constante y un contactor AC; observando las regiones de operación planteadas por la curva, se evidencia su relación con el modelo planteado por la curva ITIC y la utilidad de aplicar ésta metodología para caracterización de cualquier tipo de carga.

## **2.8 Estudios sobre el Efecto de los Eventos de Corta Duración en Sistemas de Iluminación**

En la actualidad son pocos los estudios realizados en cuanto al impacto de los eventos de corta duración (sag, swell) aplicados específicamente a sistemas de iluminación, lo anterior se debe aparentemente a la gran variedad y tipos de luminarias que ofrece el mercado

así como también las diversas aplicaciones para las cuales se utilizan estas, por lo tanto, el impacto sobre cada tipo es diferente (Min-MINAS, 2010).

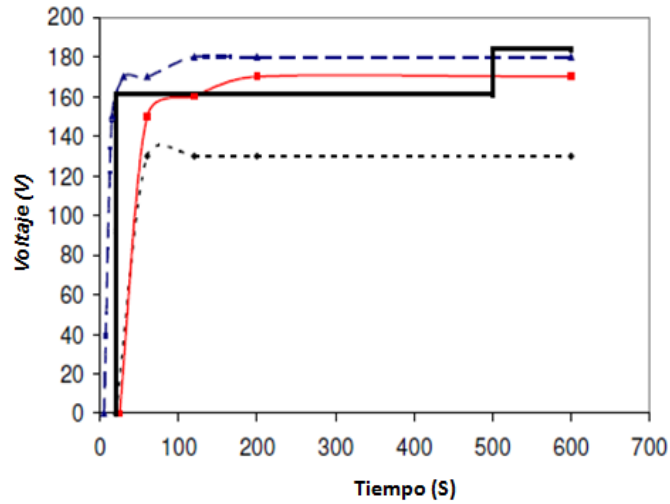
Los impactos más significativos evidenciados en los diferentes sistemas de iluminación se pueden observar en las luminarias alta densidad de descarga debido al funcionamiento de éstas, especialmente en las luminarias de alta Presión de sodio y en las luminarias de alta densidad de descarga tipo Metal Halide, éstas por su uso en sistemas de alumbrado público exterior, vías y sitios de alta circulación de personas como escenarios deportivos y centros comerciales requieren mantener y garantizar estabilidad en su funcionamiento.

Las luminarias de mercurio o fluorescentes también son afectadas por este tipo de eventos pero su uso principal es en espacios privados, para avisos publicitarios o para decoración en general, por lo anterior, los análisis en cuanto al impacto de los sags sobre éste último tipo de luminarias no es significativo desde el punto de vista de la seguridad y la movilidad de las personas.

En un estudio realizado por la Universidad de Cantabria Santander (Diaz et al., 2007), se hizo un análisis sobre el grado de afectación de los sags sobre diferentes tipos de balastos. El trabajo en mención compara en una curva, los resultados obtenidos con respecto a los rangos de operación de los computadores establecido por ITIC. En los ensayos realizados se utilizaron luminarias de alta presión de sodio de 150 W, y se puede evidenciar dados los resultados obtenidos, la alta sensibilidad de los balastos electrónicos de una sola etapa ante la aparición de sag con respecto a los balastos electromagnéticos tradicionales. De igual forma se evidencia la influencia que tiene el tipo de balasto utilizado y el desgaste de la luminaria en el nivel de afectación de la luminaria ante la aparición de un sag (Figura 11), lo anterior teniendo en cuenta el incremento en el voltaje requerido, la impedancia y su potencia que hacen que la circulación de corriente por la luminaria disminuya (ver Tabla 7).

El impacto de los sags en las luminarias de alta presión de sodio (HPS) fue estudiado por (Dorr et al., 1995), allí se expone la alta sensibilidad de este tipo de luminarias ante las caídas de tensión que se presentan en la red eléctrica aplicando un modelo de curva tomando

como referente el planteado por la curva ITIC pero con variables diferentes y usando tres diferentes tipos de balastos (EB1, EB2 y EMB)



**Figura 11.** Gráfica de inmunidad de diferentes balastos a los hundimientos de voltaje (sag) con lámparas de alta presión de sodio (Díaz et al., 2007)

**Tabla 7. Mediciones de variables eléctricas en luminarias de alta presión de sodio con diferentes horas de operación (Díaz et al., 2007)**

Lámpara	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Impedancia ( $\Omega$ )	Horas de operación (h)
HPS1	80	1.738	140	46	1000
HPS2	99.8	1.602	151	59.17	4000
HPS3	95.5	1.593	151	60	5000
HPS4	98.9	1.562	153	43.31	6000
HPS5	105.1	1.488	156	70.63	8000
HPS6	125.2	1.230	153	101.7	15000

Otros estudios manifiestan que el impacto de los eventos de corta duración en las luminarias de alta presión de sodio dependen directamente de: la magnitud del evento, del tipo de balasto que se utiliza y a las horas de servicio que tenga la lámpara, además sugieren que en otros tipos de luminarias como las de Metal Halide el impacto de los eventos de corta duración puede ser similar pero no idéntico que en las HPS. Por este motivo se considera importante realizar este estudio en lámparas de Metal Halide (Dorr et al., 1995) y (Diaz et al., 2007).

En la Figura 12 puede observarse el resultado obtenido después de analizar el desempeño de una luminaria HPS conectadas a tres diferentes tipos de balastos (Lead, Lago, sin regulación), se observa que la luminaria número 2 (HPS 2) alcanzó el mejor desempeño, los autores manifiestan que durante el ensayo en mención la luminaria tardó 1 minuto en re-encender con mínimo de intensidad y tardó 3 minutos en alcanzar de nuevo la máxima emisión de luz (Dorr et al., 1995).

Teniendo en cuenta el análisis de resultados realizado por los autores del artículo: *Applying HID high-pressure sodium lamps in a variable-voltage environment* (Dorr et al., 1995), se puede evidenciar el papel fundamental que tiene el balasto en el impacto que tienen los sags sobre las luminarias de alta presión de sodio (HPS), sin embargo los sags no afectan la vida útil de los balastos pero sí el desempeño de la luminaria por lo que es importante enunciar que los estudios al respecto deben realizarse sobre el desempeño de la luminaria que es la principal afectada.

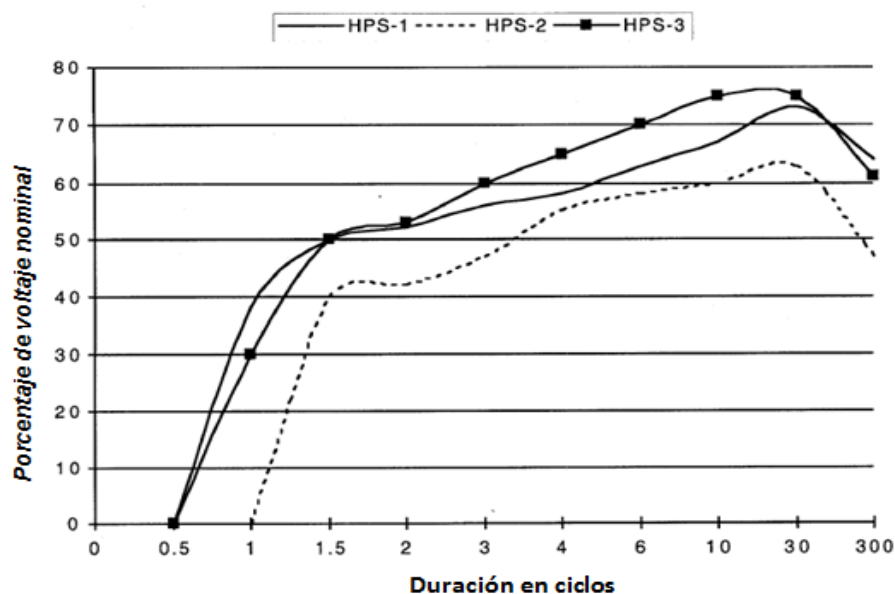


Figura 12. Desempeño de luminarias de alta presión de sodio ante condiciones de caídas de tensión (Dorr et al., 1995)

## 2.9 Funcionamiento y Apagones Inesperados en las Luminarias de Alta Descarga Tipo Metal Halide.

En libros consultados sobre el funcionamiento de los diferentes tipos de luminarias se encontró un detallado análisis sobre luminarias de alta y baja densidad de descarga. Allí se plantea un estudio con balastos de una sola etapa, de tipo Metal Halide y puede concluirse el por qué efectivamente dichas luminarias son afectadas por los sags (Calleja, 2000).

Las luminarias de alta descarga tipo Metal Halide fueron diseñadas teniendo como referente las luminarias de alta presión de vapor de mercurio (ver Figura 13), se diferencian de estas últimas en cuanto a que las de tipo Metal Halide contienen aditivos metálicos (Yoduros) en su tubo de descarga, esta adición permite abarcar zonas del espectro para mejorar la reproducción de los colores y aumentar la eficiencia luminosa (Calleja, 2000).



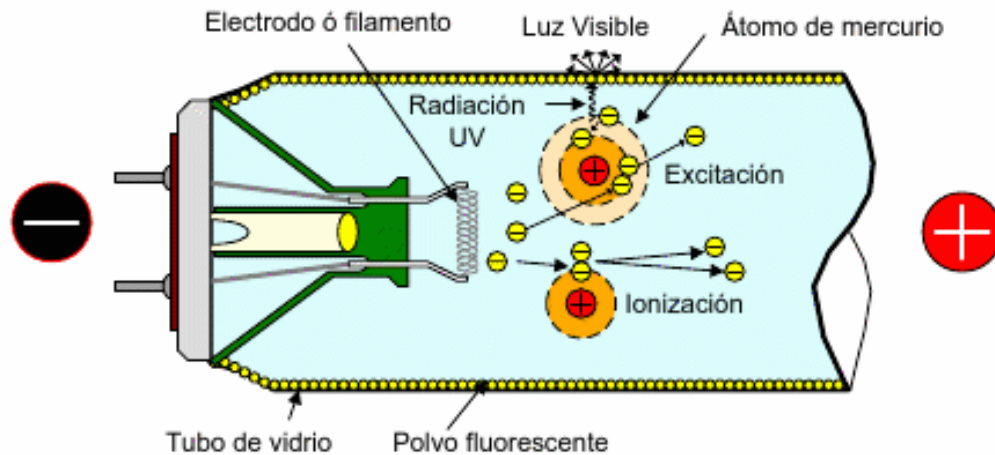


Figura 13. Sección de un tubo fluorescente (Calleja, 2000)

Los elementos adicionados para la construcción de las luminarias son especialmente tierras raras como el Disproseo, Galio, indio, Litio, Escandio, Sodio, Talio, Torio y otros en combinación con un halógeno, con esto se logra que el proceso sea similar al de las lámparas halógenas (Calleja, 2000).

En la vaporización producida por la descarga que genera el arco eléctrico producido por el balasto, el vapor ingresa a la región donde se encuentra el arco eléctrico, cuya temperatura está alrededor de los  $6000^{\circ}\text{K}$ , lo cual permite separar el metal del yodo. La excitación de los átomos generan líneas de emisión de luz que se expanden por el tubo de descarga donde se re-combinan con los átomos libre de yodo reiniciando el proceso (Calleja, 2000) y (Byszewski, Li, Budinger, & Gregor, 1992).

Teniendo en cuenta la importancia de mantener la ionización de los compuestos metálicos de los gases para la continuidad en la emisión de luz en las luminarias de alta descarga tipo Metal Halide, se deduce por qué estas luminarias sufren de apagones debido a la interrupción en el suministro de electricidad que genera el arco eléctrico al interior del tubo de la luminaria, sin importar que en algunas ocasiones dichas interrupciones sean de muy corta duración como ocurre cuando se presenta un sag.

Sobre los rangos de tolerancia ante los sags en dispositivos, el estándar internacional define rangos de operación a cumplir por algunos equipos utilizados en procesos de producción industrial con el fin de evitar pérdidas económicas en las empresas por paros en los procesos (IEEE, 1998), el estándar en mención no incluye en sus criterios o consideraciones los aspectos de seguridad para las personas, los rangos de tolerancia ante variaciones de tensión en las redes eléctricas definidos por éste estándar para algunos equipos se encuentran en la Tabla 8.

**Tabla 8. Rangos de tolerancia de distintos tipos de equipos según IEEE std. 1346-1998 (Pérez, 2006) y (IEEE, 1998)**

Equipo	Tolerancia a las variaciones de tensión		
	Rango Superior	Promedio	Rango Inferior
PLC	20 ms, 75%	260 ms, 60%	620 ms, 45%
Tarjeta de entradas de un PLC	20 ms, 80%	40 ms, 55%	40 ms, 30%
Controlador motor AC de 5 CV	30 ms, 80%	50 ms, 75%	80 ms, 60%
Relé de control de alterna	10 ms, 75%	20 ms, 65%	30 ms, 60%
Arrancador de un motor	20 ms, 60%	50 ms, 50%	80 ms, 40%
Computador personal	30 ms, 80%	50 ms, 60%	70 ms, 50%

La Tabla 8 muestra que para equipos y dispositivos utilizados en procesos críticos de producción industrial, están establecidos rangos de tolerancia a las variaciones de Tensión de operación, sin embargo no se aprecian parámetros aplicables a luminarias de alta descarga, tampoco se tiene en cuenta los sistemas de iluminación como críticos para la seguridad en general y para la continuidad en los procesos (IEEE, 1998).

Después de realizar la búsqueda de documentación sobre estudios realizados en luminarias de alta descarga tipo Metal Halide, se pudo establecer que no existen estudios o artículos que hablen sobre los efectos que sobre éstas tienen los sags, solo se encontraron estudios realizados sobre problemas encontrados en los balastos electrónicos, principalmente

sobre resonancia acústica y la estabilización del arco eléctrico producido por el balasto electrónico para el encendido de este tipos de luminarias (Kezuncwid, 2001)y (Ribas et al., 2005) y (Wang, Xu, & Yang, 2003) y (Co, Resende, Simonetti, Vieira, & Almeida, 2002) y (Ribas et al., 2003)y (Olguin et al., 2006).

Se puede observar la importancia de realizar estudios en cuanto al impacto de los sags en diferentes dispositivos, como factor que afecta el normal funcionamiento de equipos que utilizan especialmente fuentes lineales de alimentación eléctrica. Específicamente, el estudio el impacto de los sags en luminarias de alta descarga; por lo anterior, se plantea realizar el estudio al respecto buscando plantear un método de caracterización aplicable a luminarias de alta descarga tipo Metal Halide, que permita mostrar la respuesta de este tipo de luminarias ante la aparición de hundimientos de corta duración en la señal de tensión (sag).

## **2.10 Selección del Estándar Aplicable para el Análisis de las Luminarias HID Tipo Metal Halide.**

Siendo los estándares CBEMA, ITIC y SEMI los más reconocidos, es válido para este estudio enfocar la metodología en adaptar uno de estos estándares para que sea aplicable al análisis de luminarias HID tipo Metal Halide. Teniendo en cuenta que el estándar SEMI F47 está diseñado para analizar específicamente los sag y que este tipo de perturbaciones son el objeto de estudio de este trabajo, se define este estándar como base para el desarrollo metodológico de este trabajo, por lo tanto los resultados de este trabajo quedarán plasmados en una curva característica específica aplicable a luminarias HID tipo Metal Halide.

Habiendo definido la forma de ilustrar los resultados obtenidos en este trabajo y considerando las variables necesarias para la construcción de una curva según el estándar SEMI F47, se crea la necesidad de un equipo generador de sag que permita realizar los ensayos y lograr la caracterización de la luminaria HID tipo Metal Halide; adicionalmente, se requiere de un equipo capaz de registrar de manera detallada la magnitud de los mismos y

su respectivo tiempo de duración, de esta forma se procede a realizar el análisis de los equipos existentes en el mercado y los que han sido implementados o diseñados para estudios afines.

### **2.11 Generadores de Sag Existentes e Implementados en Estudios Afines**

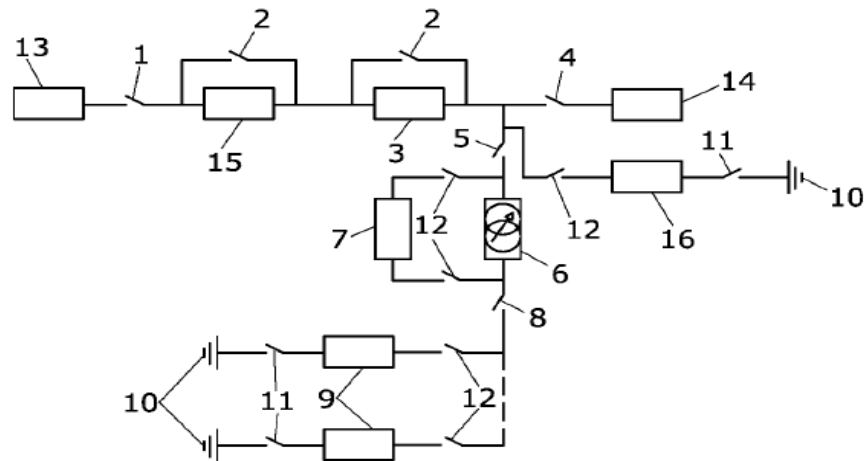
Después de una amplia búsqueda en páginas web de diferentes fabricantes se encontraron algunas marcas que comercializan equipos generadores de eventos sag, swell y otro tipo de interferencias asociadas al estudio de calidad de la potencia eléctrica. El costo del equipo necesario para la pruebas tiene un precio a la fecha en el mercado que oscila entre USD \$13200 y USD\$27500; de acuerdo al fabricante y a las especificaciones de los mismos, algunos de estos requieren de la adquisición de dispositivos complementarios para poder realizar las pruebas requeridas para este estudio. Los principales fabricantes de este tipo de equipos son las Marcas: SCHAFNER, AGILENT y LAPLACE INSTRUMENTS.

Considerando que el presupuesto para este proyecto no es suficiente para realizar la compra de un generador de sag y que el alcance de este trabajo es presentar una propuesta de un método de caracterización, resulta conveniente implementar el equipo de acuerdo al recurso instalado de los laboratorios del Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM. De esta manera se define la necesidad de buscar en documentación científica formas de implementar el equipo generador de sag, para con este realizar los ensayos requeridos (Senturk & Hava, 2010).

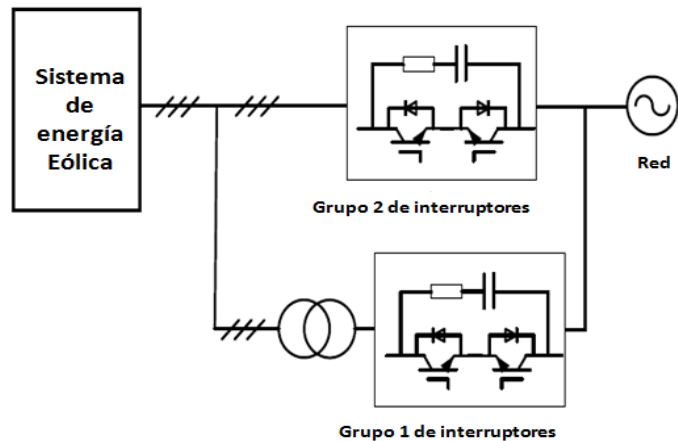
Los documentos consultados en cuanto al análisis y estudios realizados sobre los sags, muestran que los autores realizaron sus pruebas en la gran mayoría de los casos diseñando el equipo, implementándolo o en su defecto como es el caso de ITIC y SEMI se ordenó su construcción sobre pedido con especificidades para cada requerimiento, en la información consultada para el caso de ITIC y SEMI no se encuentran detalles de diseño asociados al equipo generador de sag utilizado o sus especificaciones (Thallam & Heydt, 2000) y (Department of commerce USA, 1983).

Realizando consultas sobre patentes se encontró que el equipo generador de sag evidencia una patente mediante documento publicado el 23 de Octubre de 2008 avalado por la OMPI y la WIPO (WIPO-OMPI, 2008). Dicho equipo manifiesta ser capaz de generar huecos en sistemas de tensión superiores a 500V y potencias nominales superiores a 100W, en el documento se muestran dos diagramas de bloques del funcionamiento del equipo pero ningún dato matemático del diseño del mismo (ver Figura 14).

En (Dongyu, Honglin, Shuai, & Geng, 2010), se muestra el diseño y construcción de un dispositivo “*Generador de Voltaje sag*” - (VSG), para redes de baja tensión trifásica como herramienta para verificar la fiabilidad y estabilidad de generadores eólicos ante la presencia de sag, siendo éstos una de las causas principales que ocasionan deficiencias en el funcionamiento de dichos generadores. Para la construcción de este, se utilizaron como referencia generadores construidos con transformador bajo la topología “*Back to Back*” y los VSG construidos con base en dispositivos electrónicos de potencia (ver Figura 15).



**Figura 14.** Diagrama de bloques de equipo generador de sag patentado (WIPO-OMPI, 2008)



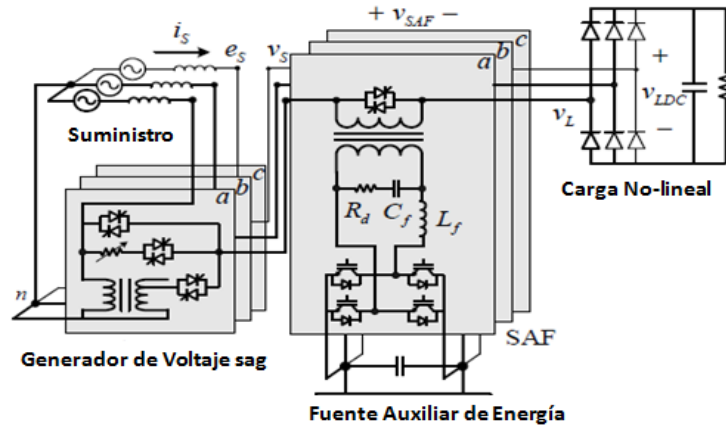
**Figura 15.** Topología propuesta para la implementación de un generador de voltaje sag (VSG) utilizando IGBT's (Dongyu et al., 2010)

El generador implementado por estos autores muestra cómo se puede producir un sag incrementando temporalmente la corriente y controlando los disparos realizados con un IGBT e implementando una red de Snubber; sin embargo, la aplicación de cargas resistivas e inductivas se realizaron mediante simulación generando magnitudes de hundimientos iguales y en los resultados obtenidos por los autores manifiestan con simplicidad que fueron buenos (Dongyu et al., 2010).

Senturk & Hava (2010), muestran el diseño e ilustran gráficos de resultados obtenidos mediante simulación y se expresan algunas posibles aplicaciones de un generador de sag construido utilizando Relés de estado sólido (SSR's), (Senturk & Hava, 2010) y (Ma & Karady, 2008), algunas aplicaciones posibles según las características de éste dispositivo pueden ser:

- Chequeo de funcionamiento de contactores ante la ocurrencia de sag.
- Comportamiento de variadores de velocidad de motores de inducción ante la aparición de sag.
- Análisis del comportamiento de generadores de energía eléctrica ante la aparición de sag en redes de distribución eléctrica.

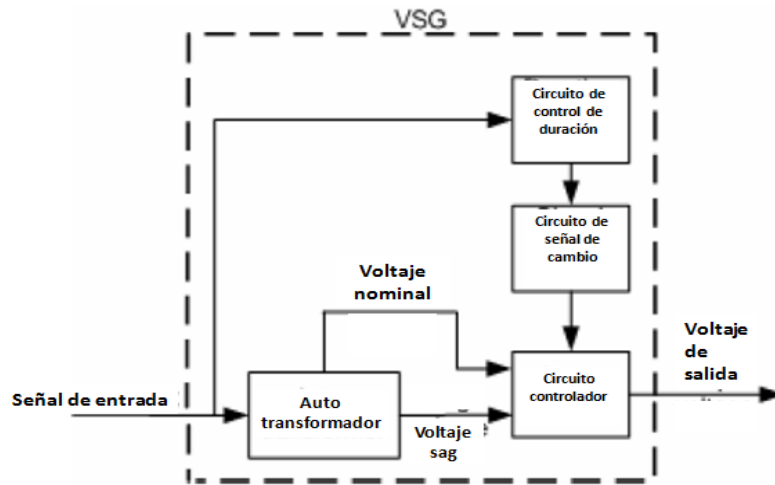
Para la construcción del mismo, los autores utilizaron un Variac para generar diferentes magnitudes de hundimientos, con el fin de lograr realizar pruebas que permitan determinar el impacto de dichos eventos en equipos electrónicos (ver Figura 16).



**Figura 16.** Generador de voltaje sag aplicado a una carga no lineal (Senturk & Hava, 2010)

Los resultados obtenidos plantean como utilizando una carga inductiva variable (Variac), es posible generar diferentes niveles de hundimientos, mostrando como implementar de forma simple un equipo que sirva para pruebas de éste estilo (Senturk & Hava, 2010), lo anterior generó en gran parte la idea del uso en este proyecto de un Variac para mejorar las especificaciones del dispositivo implementado.

En (Ma & Karady, 2008), se presenta el diseño de un prototipo de generador de sag monofásico que sirve para la caracterización de dispositivos electrónicos ante este tipo de eventos (Figura 17), al igual que (Senturk & Hava, 2010), utilizaron relés de estado sólido pero agregaron un auto-transformador. Como valor agregado, el dispositivo presentado permite la generación de alteraciones de múltiples tipos en la onda de tensión, así como también generar interrupciones más prolongadas. Allí se muestra un diseño de un circuito de control lógico que regula la duración de los eventos generados por el VSG (ver Figura 18).



**Figura 17.** Estructura de generador de voltaje sag (VSG) utilizando autotransformador y relés de estado sólido (SSR's) (Ma&Karady, 2008)

Teniendo en cuenta la documentación existente en cuanto al diseño o implementación de generadores de sag, se logró evidenciar en el año 2010 la construcción de un generador de sag monofásico simple que produce éste tipo de eventos con una duración de tiempo variable mediante la introducción de un corto circuito temporizado, aplicado en una fuente de alimentación eléctrica de baja tensión, el cual es generado por una carga inductiva que ocasiona el hundimiento en la señal de voltaje (Dongyu et al., 2010) y (Senturk & Hava, 2010) y (Ma & Karady, 2008).

El control del tiempo de aplicación del corto circuito se realizó mediante el diseño de un circuito de control que funciona como interruptor temporizado, que limita el tiempo de exposición de la carga inductiva a la corriente de cortocircuito, generando interrupciones de duración entre 1ms y 800 ms.



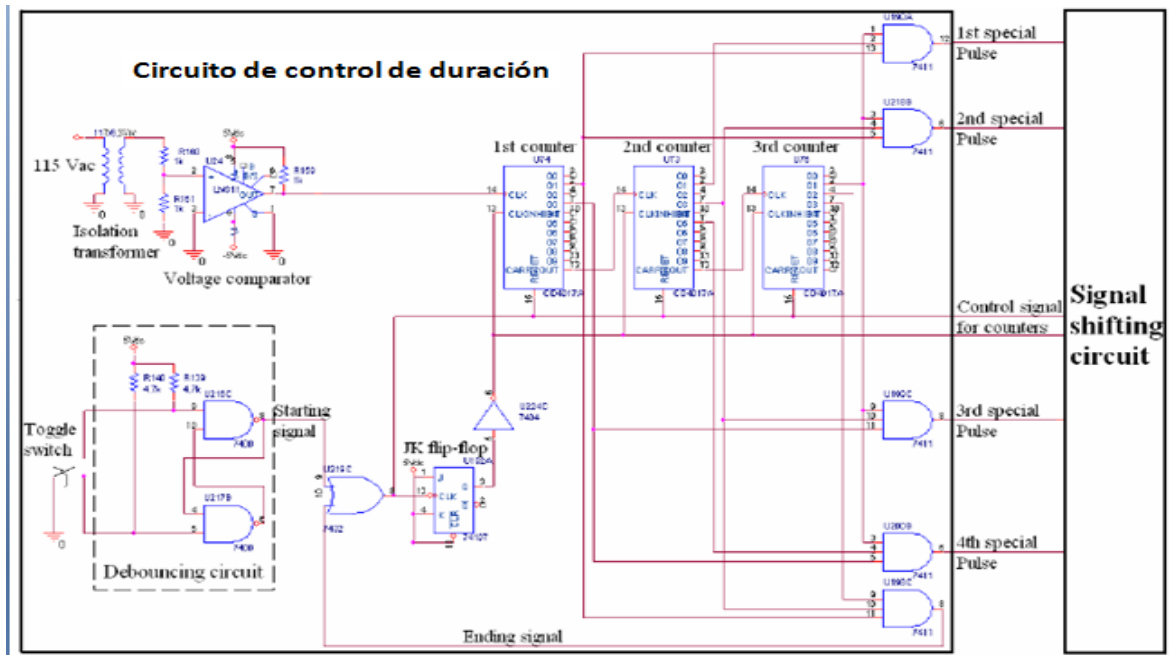


Figura 18. Circuito de control de duración de eventos del VSG

## 2.12 Selección de elementos para la implementación del generador de sag utilizado en los ensayos.

Con la información encontrada se determinaron los requerimientos para la construcción e implementación del generador de sag. Esto con el fin de realizar los ensayos que permitirán desarrollar la caracterización. Los principales dispositivos que se requieren son los siguientes:

- Un microcontrolador como elemento principal del circuito de control con características afines a las variables a tratar durante los ensayos.
- Diseño de una carga inductiva que al introducirla temporalmente de manera conmutada en el circuito de la luminaria provoque el hundimiento (sag) en la señal eléctrica.

- Selección de un dispositivo para conmutar de manera rápida la entrada temporal de la carga inductiva en el circuito de alimentación eléctrica de la luminaria con su respectivo circuito de protección.

### **2.12.1 Consideraciones para el circuito de control del generador de sag.**

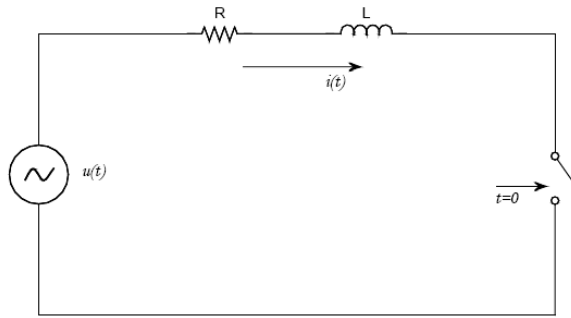
Teniendo en cuenta que el circuito de control actúa como un interruptor que determina la duración de los sags mediante la entrada temporal de una carga inductiva, se concluye que solo es necesario el uso de un microcontrolador que posea al menos una entrada digital y una salida digital, esta característica es muy común en todas las familias existentes de este tipo de dispositivo programable, dicho lo anterior éste es posible seleccionarlo de acuerdo al recurso existente y a las herramientas de programación disponibles.

### **2.12.2 Consideraciones para el diseño de la carga inductiva**

La inductancia de la carga limitadora determina el nivel de corriente generado, que ocasionará el hundimiento (sag). Inicialmente, el diseño fue concebido para un alto nivel de corriente pico, tratando de lograr un sag lo suficientemente considerable, que pudiera apagar la lámpara en el menor tiempo posible. Teniendo en cuenta datos técnicos importantes para el cálculo de la carga inductiva como lo son: la corriente instantánea que soporta el transformador (fuente), la potencia de operación de la luminaria y el voltaje de operación del balasto electrónico se realizaron los siguientes cálculos.

Supóngase un voltaje en la fuente de alimentación  $[U(t)]$  como se muestra en la Figura 19 y un valor de resistencia  $R = 0$ , con estos parámetros el circuito se comporta como un circuito inductivo puro. El voltaje alimentación  $[U(t)]$  está dado por la ecuación (1).

$$U(t) = V_0 \text{sen}(wt) \tag{1}$$



**Figura 19.** Circuito RL con fuente de alimentación AC. Elaboración propia

De igual forma, el voltaje que experimenta la bobina está dado por la ecuación (2):

$$V_l = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Considerando que la fuente de alimentación está en paralelo con la bobina limitadora de corriente, el voltaje es igual en ambos casos, por lo tanto es posible realizar la igualación que se muestra en la ecuación (3):

$$U(t) = V_0 \text{sen}(wt) = V_l = L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

Por lo tanto el voltaje de alimentación con relación al valor de la inductancia con respecto al tiempo se muestra en el resultado de la ecuación (4)

$$V_0 \text{sen}(wt) = L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

Resolviendo la ecuación diferencial (4), se tiene que:

$$- \frac{V_0 \cos(wt)}{w} = Li + C \quad (5)$$

Despejando  $L$  de la ecuación y omitiendo la constante de integración que es un número entero que no debe generar indeterminación en la división (5) se obtiene el valor de la inductancia como se muestra en la ecuación (6):

$$L = \left| -\frac{V_0 \cos(\omega t)}{\omega i} \right| \quad (6)$$

Considerando que el valor de inductancia está dado en términos de una función cosenoidal y que la fuente está dada por una función sinusoidal, se puede decir que una función cosenoidal se puede expresar en términos de una función sinusoidal si se considera un desfase de  $90^\circ$ , de esta forma es posible igualar de la forma como lo muestra la ecuación (7):

$$\cos(\omega t) = \text{sen}(\omega t - 90) \quad (7)$$

Por lo tanto el valor final para calcular la inductancia de la bobina en función de la corriente que circula por ella, la frecuencia de operación del sistema de distribución y la fuente de alimentación, está representado por la ecuación (8)

$$L = \left| -\frac{V_0 \text{sen}(\omega t - 90)}{\omega i} \right| \quad (8)$$

Considerando que  $V_0$  corresponde a la amplitud o valor pico de la forma de onda sinusoidal, el valor RMS está dado por la ecuación (9):

$$V_{rms} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

Por lo tanto en la ecuación (10) se encuentra que el valor de la inductancia

$$L = \frac{V_{rms} \sqrt{2} \times \text{sen}(\omega t - 90)}{\omega i} \quad (10)$$

Otro elemento a tener en cuenta en el diseño de la carga inductiva son las dimensiones del núcleo de la misma, para esto es necesario tener en cuenta la potencia de operación de la carga, por lo tanto es importante tener en cuenta que la potencia que se requiere para el diseño de la bobina está dada por la ecuación (11).

$$P = V I \quad (11)$$

Donde:  $V = 220\text{Vrms}$ ,  $I = 40\text{Arms}$  y  $P = 220\text{Vrms} * 40\text{Arms}$ . Por lo tanto la potencia que debe ser capaz de asumir el sistema cuando le atraviesa una corriente de falla de 40A debe ser de 8400W. El área del núcleo sobre el cual se arrollen las espiras de cobre se calcula teniendo en cuenta la ecuación (12).

$$A = K \times \sqrt{P} \quad (12)$$

Donde:  $A$  es la superficie de arrollamiento de las espiras ( $\text{cm}^2$ );  $K$  es un coeficiente que se otorga en relación a la calidad de la coraza, el cual se encuentra entre 0,8 y 1; y  $P$  es la potencia calculada para el sistema.

Para el cálculo del número de espiras de la carga es importante recordar que la inductancia de una bobina también está representada en función de la geometría de su construcción y tipo de núcleo usado, de acuerdo a esto es necesario tener en cuenta la siguiente ecuación (13):

$$L = \frac{U_0 U_r N^2 A}{l} \quad (13)$$

Donde:  $L$  es la inductancia de la bobina que se desea construir;  $U_0$  es el coeficiente de permeabilidad en el vacío;  $U_r$  es el coeficiente de permeabilidad relativa del material del núcleo;  $l$  es la longitud de la superficie donde irán arrolladas las espiras;  $N$  es el número de espiras; y  $A$  es el área que encierra el bobinado.

Para efectos prácticos y con el propósito de realizar una prueba preliminar, se usará un nucleó de hierro existente cuyas dimensiones se indican en la Figura 26, el núcleo tiene un  $U_r = 7,159$ , la constante de permeabilidad en el vacío está dada por  $U_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Tm/A}$  (5),

con este núcleo la potencia que se puede disipar es de 5000W. Por lo tanto si de la ecuación (14) se despeja N, se obtiene que:

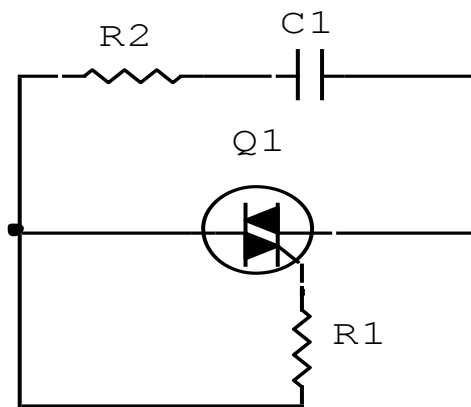
$$N = \sqrt{\frac{L * I}{U_0 U_r A}} \quad (14)$$

### 2.12.3 Consideraciones para la selección y uso del dispositivo de conmutación del generador de sag.

Las velocidades de conmutación del circuito de control son altas considerando que el tiempo de los hundimientos generados está en el orden de los milisegundos, por tal motivo se requiere de un tiristor capaz de realizar este trabajo

Para realizar una protección adecuada para el circuito de conmutación es necesario el diseño de una red de SNUBBER como se muestra en la Figura 20. El cálculo del condensador SNUBBER usando el criterio de resonancia se realiza utilizando la ecuación (16).

$$\left(\text{spec} \frac{dV}{dt}\right) = 10 * 10^6 \frac{V}{s} \quad (15)$$



**Figura 20.** Red de SNUBBER (R2, C1) como elementos de protección para un TRIAC. Elaboración propia

Donde ( $spec\ dV/dt$ ) es la medida de la capacidad del TRIAC para mantener su estado operativo ante la presencia de un transitorio de voltaje, este parámetro está dado en la hoja de datos del dispositivo. La medida del voltaje pico de la fuente de alimentación está dada por la ecuación (16).

$$E = 240 * \sqrt{2} \quad (16)$$

El factor de amortiguamiento específico del Triac está dado por la ecuación (17):

$$\frac{dV}{dt(\rho = 0.6)} = 1 \quad (17)$$

Con  $dV/dt(\rho = 0,6)$  factor de amortiguamiento y  $\rho = 0,6$  es un valor específico del el Triac dado por el fabricante.

$$w_0 = \frac{(spec\ \frac{dV}{dt})}{\frac{dV}{dt(\rho)} E} \quad (18)$$

Siendo  $w_0$  en la ecuación (18), un criterio de resonancia necesario para determinar el valor del condensador, Snubber, Así:  $w_0 = 10 * 10^6\ V/s / 1 \times 240 * \sqrt{2} = 29462.78$ .

El condensador para la red de Snubber está dado por la ecuación (19)

$$C_1 = \frac{1}{L(w_0)^2} \quad (19)$$

El cálculo de la resistencia SNUBBER se realiza con la ecuación (20)

$$R_{s=} = 2\rho \sqrt{\frac{L}{C_1}} \quad (20)$$

La implementación del dispositivo usado para los ensayos se llevó a cabo en el laboratorio de Máquinas Eléctricas del ITM usando algunos de los recursos y equipos de dicho espacio, lo anterior quedó documentado en un trabajo de grado (Granados& López, 2010). En éste quedó planteada como posibilidad de mejora del dispositivo en mención la incorporación de una carga inductiva variable para lograr la generación de sag, no solo de intervalos de tiempo variable sino también de magnitud variable como posible herramienta que sirva para realizar caracterización de múltiples dispositivos eléctricos y electrónicos tal cual como lo lograron otros autores (Senturk & Hava, 2010).



### 3. METODOLOGÍA

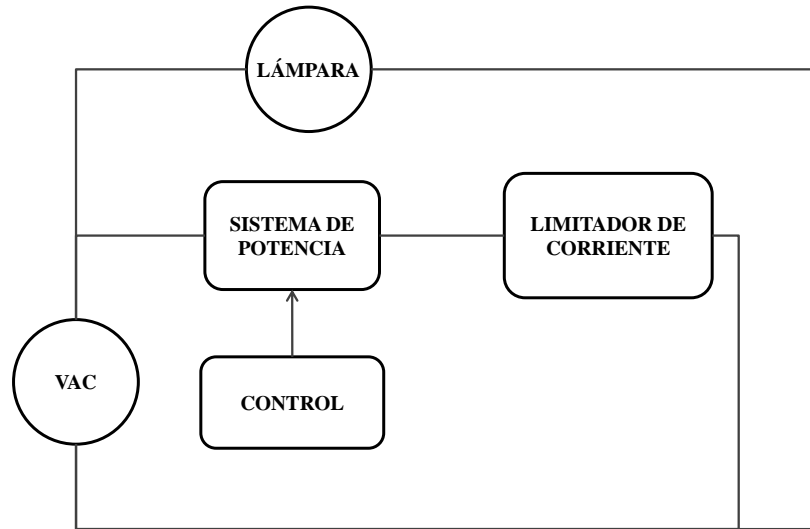
Inicialmente se documentó el diseño y construcción de un generador sag en sus etapas de control y potencia, para la realización de pruebas experimentales sobre una luminaria Metal Halide. Con el dispositivo construido y un analizador de calidad de potencia, fueron obtenidos los registros de duración y magnitud de los sags generados. Una vez obtenidas las características de esta fuente se elaboró un protocolo metodológico para la caracterización de la luminaria HID tipo Metal Halide. El montaje para la implementación de los ensayos se compuso de cuatro (4) bloques: un circuito de control de duración y magnitud de los sags, una etapa de potencia para introducir el corto circuito en el circuito de alimentación eléctrica de la luminaria, un dispositivo para medición de duración e intensidad de los sags y por último, una luminaria HID tipo Metal Halide de 400W conectada a su respectivo balasto electrónico. A continuación se detalla cada uno de los bloques implementados.

#### 3.1 Implementación del generador de sag

Para la implementación del equipo generador de sag, se construyeron los bloques de operación en un diagrama guía, encargado de generar las órdenes de forma coherente para los diferentes bloques. En la Figura 21, se muestra el esquema del circuito implementado para la evaluación de los sag sobre la luminaria. Los elementos incluidos fueron:

- *Sistema de Control:* Implementado con un micro controlador Motorola MC68HC08JL3
- *Sistema de potencia:* Tiristor TRIAC de potencia, Referencia KS200A (Sistema de potencia, Ver Anexo E); Balasto electrónico estándar Marca PHILIPS, Referencia ICF2S26H1LD (Lámpara, Ver Anexo C).
- *Fuente VAC:* Transformador Elevador 1:2, 500VA, Marca OMEGA, Sin referencia específica (Ver Anexo D).

- *Limitador de corriente:* Variac Monofásico *CIEFFEGI*, Referencia EPa 2200 (Limitador de corriente, Ver Anexo A);
- *Luminaria:* Luminaria de alta descarga tipo Metal Halide, 400 W, marca PHILIPS, Referencia PL344150 (Lámpara, Ver Anexo B).



**Figura 21.** Diagrama de bloques del circuito de pruebas para evaluación de sag en una luminaria.

### 3.1.1 Sistema de control

El circuito de control se diseñó para definir los tiempos de las interrupciones que se inyectan en la fuente de alimentación eléctrica de la luminaria, es decir, hace las veces de un interruptor temporizado. El usuario puede manipular aumentando o disminuyendo el tiempo de exposición de la carga inductiva a la tensión del circuito, lo cual produce el cortocircuito que genera el sag a diferentes intervalos de tiempo.

El control para el equipo generador de sag se basó en el principio de funcionamiento de un interruptor con tiempos de conmutación variable. El propósito y función principal del circuito de control, es introducir temporalmente una carga de tipo inductivo para generar una sobrecorriente en la fuente de alimentación. La carga inductiva conectada al transformador de la fuente provoca una disminución de corta duración en su señal de tensión, mientras el circuito de control introduce la carga en intervalos que van entre 1 - 800 ms. De acuerdo a

la norma IEEE 1159 un sag se define como todo hundimiento que tiene una duración inferior a 500ms (30 ciclos a 60 Hz), permitiendo al intervalo considerado en el circuito de control definirse como *sag* (IEEE, 2009).

La conmutación del circuito de control se realizó mediante un tiristor de potencia, en este caso fue utilizado un TRIAC con especificaciones para operar hasta una corriente máxima de 200A (las especificaciones técnicas pueden observarse en el Anexo E). Las características necesarias para la operación del dispositivo central del circuito de control deben cumplir con un mínimo de 3 entradas digitales, 1 salida digital y un temporizador interno con capacidad de hacer conmutaciones de hasta 1 ms. En el estudio se utilizó un microcontrolador MC68HC08JL3 (MOTOROLA, 2005), que cumple con los requerimientos necesarios.

### **3.1.2 Selección de la fuente de alimentación para la luminaria**

El hundimiento (sag), es generado por una sobrecorriente en la fuente a través de un cortocircuito controlado que exceda la capacidad de esta, ocasionando por consecuencia una caída de tensión; por lo tanto, mientras menor sea la capacidad de la fuente, menor será la magnitud de cortocircuito necesario para generar el sag. Esta fue definida de tal forma que no contara con circuitos de proyección eléctrica entre la fuente y la luminaria para lograr introducir el cortocircuito.

### **3.1.3 Cálculo de la carga inductiva**

La metodología de cálculo para la carga inductiva, partió de las ecuaciones descritas en el numeral 2.12.1. Asumiendo una fuente de alimentación de corriente alterna a 240Vrms, 60Hz que soporte corrientes instantáneas de hasta 40A.

La carga inductiva se calcula a partir de la ecuación (21):

$$L = \frac{240\sqrt{2} \times \text{sen}(2\pi 60t - 90)}{(2\pi 60)40} \quad (21)$$

El área del núcleo (A) de la carga inductiva fue calculada a partir de la ecuación (22), y considerando baja calidad de la coraza se obtiene a partir de:

$$A = 0.8 \times \sqrt{8400} = 75.04 \text{ cm}^2 \quad (22)$$

El número de espiras, de acuerdo a la ecuación (23) es:

$$N = \sqrt{\frac{(22.5 \times 10^{-3} \text{ H})(9.5 \times 10^{-2} \text{ m})}{(8.99 \times 10^{-6})(58.4 \times 10^{-4} \text{ m})}} = 202 \text{ Espiras.} \quad (23)$$

Con la bobina construida se evaluó el funcionamiento inicial del generador de sag. Sin embargo, se encontró que los niveles de hundimiento fueron limitados, debido principalmente al valor de inductancia constante que retarda al cortocircuito en alcanzar la corriente máxima. La opción fue entonces, utilizar un Variac monofásico como carga inductiva variable para realizar mayor cantidad de pruebas y por consiguiente mayor cantidad de datos para la realización de la caracterización.

El Variac utilizado cuenta con 18 posiciones variables de carga (ver Tabla 9), cuyas magnitudes de cortocircuito producirían un nivel de hundimiento en la señal de tensión que logra apagar la luminaria analizada.

**Tabla 9. Posiciones identificadas en el Variac para la realización de las pruebas con el respectivo valor de inductancia. Elaboración propia**

Posiciones definidas en el Variac para la realización de ensayos	
Posición	Valor de inductancia (mH)
1	5,0
2	10,9
3	14,9
4	20,0
5	25,6
6	36,0
7	50,9
8	82,5
9	100,0
10	114,3
11	138,0
12	153,0
13	171,3
14	184,0

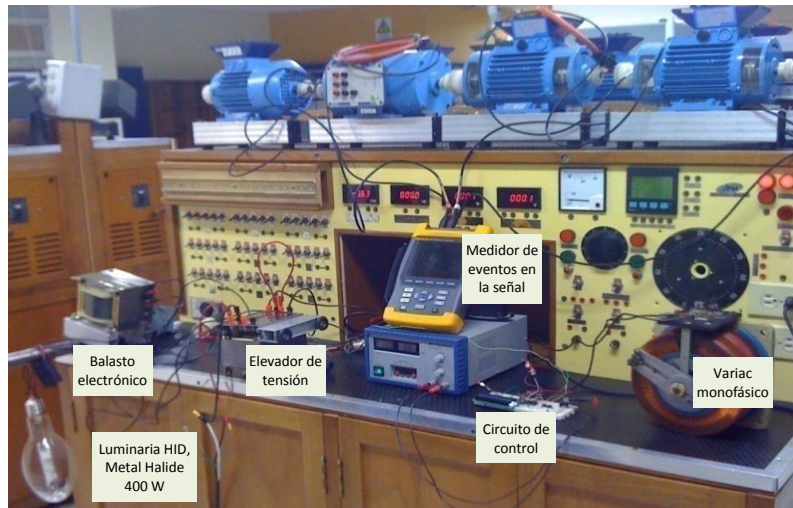
15	210,0
16	225,0
17	250,0
18	280,0

### 3.1.4 Selección del TRIAC

El TRIAC es el encargado en la etapa de potencia de conmutar la entrada y salida temporal de la carga inductiva que genera el hundimiento en la señal de tensión eléctrica, sus características se definen de acuerdo a los valores máximos de corriente en los que puede operar el circuito limitador de corriente de falla, para nuestro caso utilizamos uno existente en el laboratorio que soporta corrientes instantáneas superiores a los 5000A (Ver Anexo E). El sistema de protección del TRIAC para el circuito de conmutación se realizó a partir de la red de SNUBBER de acuerdo a la Figura 20. El cálculo del condensador SNUBBER se realizó usando el criterio de resonancia presentado en las ecuaciones (16) a (20) del numeral 2.12.3.

### 3.1.5 Acople de los sistemas de control y potencia

Los sistemas de control y potencia fueron acopladas para obtener el generador de sag con la conexión del VARIAC y el TRIAC. El registro fotográfico del montaje se observa en la Figura 22.



**Figura 22.** Montaje completo de equipos para la realización de las pruebas

### **3.2 Ensayos técnicos**

El generador de sag, la luminaria y el analizador de calidad de la potencia son conectados para la realización de las pruebas. La luminaria se deja encendida durante 30 minutos, tiempo requerido para obtener la máxima intensidad luminosa (OBRA-LUX, 2008).

La prueba se inicia seleccionando la primera posición de carga del Variac y se ajusta en 1ms el tiempo de duración de la interrupción del circuito de control. Al pulsar el botón S3 del circuito de control (ver Figura 29), se ejecuta la introducción temporal de la carga inductiva que genera el cortocircuito y el evento es registrado por el analizador de calidad de la potencia. Una vez se verifica el registro en la pantalla del analizador se incrementa el tiempo de duración del evento pulsando S1 (ver Figura 29) del circuito de control y se realiza la siguiente muestra pulsando S3. Es importante que entre muestras se deje un espacio de tiempo no inferior a 1 minuto, en el cual la luminaria estabiliza su ionización en caso de que no suceda un apagón de la misma. El tiempo de duración de la interrupción se incrementa en pasos de 1ms hasta que la luminaria se apague producto de alguno de los eventos, y se debe registrar el tiempo de la interrupción predeterminado en el analizador de calidad de la potencia y la magnitud del hundimiento registrado, con el valor final de cada secuencia de ensayos se obtiene uno de los puntos con los cuales se construye la curva.

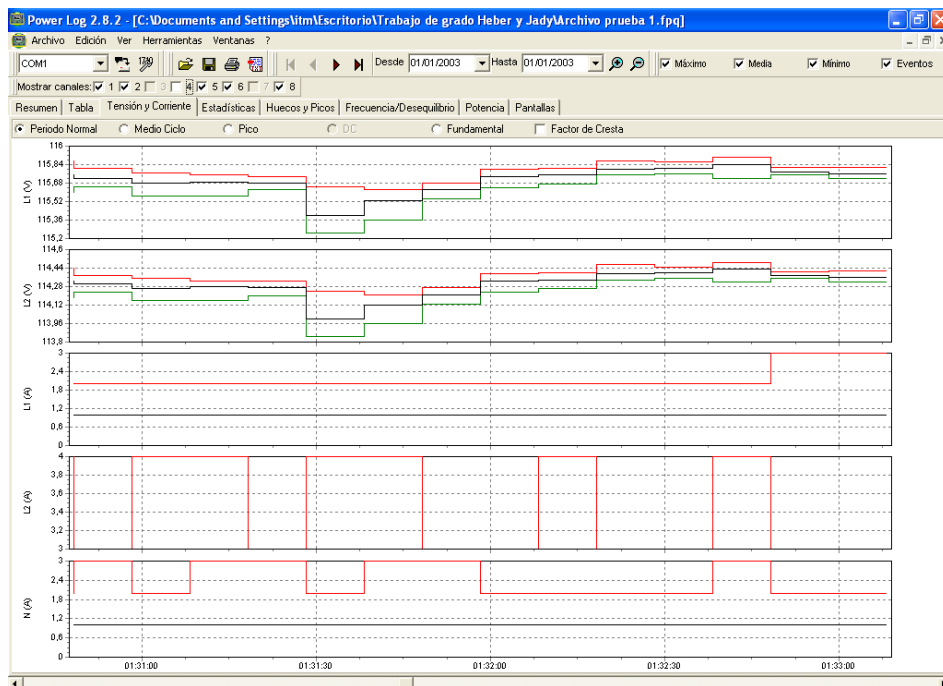
Después de terminada la secuencia de ensayos se lleva el Variac a la siguiente posición, esto modifica el valor de la carga inductiva y se ajusta de nuevo el tiempo de interrupción del circuito de control en 1ms para iniciar de ésta forma una nueva prueba. Los datos obtenidos de las 18 posiciones y los diferentes tiempos de duración del evento, generan la curva de comportamiento de la luminaria ante los eventos generados.

Luego de cada apagón de la luminaria, para cada nueva prueba se esperó un tiempo no inferior a 10 minutos. Esto con el fin de estabilizar el funcionamiento y permitir un restablecimiento de la ionización e intensidad luminosa.

### **3.3 Medición y toma de registros**

Para la medición de la duración de los eventos generados y la magnitud de los mismos se utilizó un equipo analizador de calidad de la potencia eléctrica Clase A, referencia FLUKE 435 que cuenta con un software de registro, visualización y almacenamiento de datos (la ficha técnica encuentra en el Anexo G).

La totalidad de las pruebas se realizaron ejecutando una rutina de tiempos de duración de perturbación desde 1ms pre-establecidos desde el circuito de control del generador de sag, hasta alcanzar una duración de perturbación que lograra que la lámpara se apagara, momento en el cual es registrado el evento y la magnitud del hundimiento en el valor eficaz del voltaje. El software POWER LOG para este caso muestra la gráfica de registro de tensión y corriente almacenada en el analizador como se muestra en la Figura 23.



**Figura 23.** Gráfica de registro de tensión y corriente tomados por el equipo FLUKE 435. Elaboración propia

Los gráficos que muestra el software POWER LOG en cuanto a la totalidad de los eventos registrados en los ensayos no es posible visualizarlos con claridad desde éste, por tal motivo la totalidad de datos registrados fueron extraídos en la Tabla 14.

### **3.4 Método para la caracterización de la luminaria**

Finalmente, para medir el impacto de los sag en la luminaria es necesario identificar los niveles de hundimiento y duración de los eventos que ocasionan el apagón súbito de la luminaria tipo Metal Halide de 400 W. El método que se planteó en este trabajo se basa en:

- Partir de un generador que cumpla especificaciones tales que generen hundimientos de corta duración en la señal de tensión inyectada a la luminaria (metodología extendida en el numeral 3.1).
- Realizar las pruebas técnicas y registrar los resultados que determinen diferentes niveles de hundimiento y duración de sag, que ocasionen apagones súbitos en la luminaria (extendida en el numeral 3.2 y 3.3).
- Obtener una curva característica de los niveles y duración de sag que ocasionan apagones súbitos y los de normal funcionamiento, en una luminaria tipo Metal Halide de 400W.

La curva característica se encontró a partir de los datos registrados en la Tabla 14. Aunque el análisis de hundimientos y sag partieron de los estándares CBEMA, ITIC o SEMI F47 (ver Figuras 4, 5 y 6), dichas normativas no cumplen de manera específica para luminarias, de donde el método propuesto es guía para la evaluación del impacto de los sag en luminarias tipo Metal Halide de 400W. Es sin embargo importante resaltar que las variables utilizadas para el análisis de este método coinciden con las establecidas en el estándar SEMI F47.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Implementación del generador de sag

Los resultados a continuación son divididos en las etapas de: implementación del generador de sag, los ensayos técnicos, medición y toma de registros, y método para la caracterización de la luminaria.

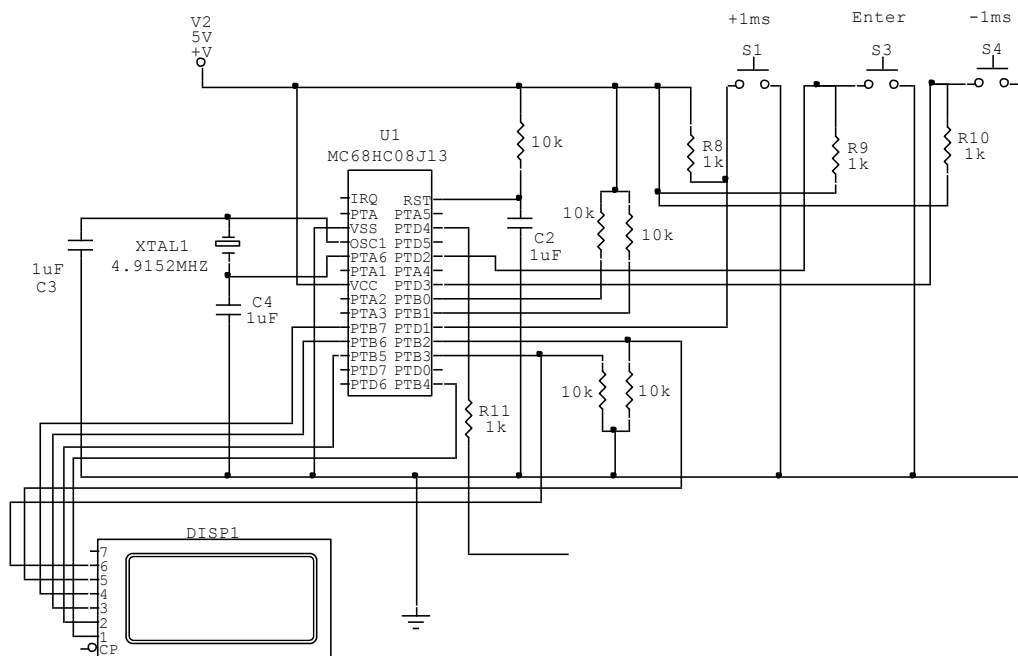
#### 4.1.1 Sistema de control

El programa que utilizó el generador de sag fue diseñado en lenguaje C usando como compilador el software CODE-WARRIOR, el microcontrolador utilizado se destaca por su alta velocidad de conmutación en sus salidas, lo cual beneficia el propósito del proyecto. La operación del circuito de control permite:

*Aumentar o disminuir el tiempo de duración del sag*, para esto son usados pulsadores de ajuste del circuito de control S1 o S4 (ver Figura 24), encargados de predefinir la duración del pulso que incorporará la carga inductiva generadora del sag (los valores de tiempo pueden establecerse entre 1ms y 800ms). El pulsador S1 incrementa el valor de la duración de la interrupción y S4 lo disminuye.

*Visualizar los registros* de los cambios de tiempos en un display de cristal líquido (LCD, DISP1), el programa estará enviando cualquier actualización que se haga sobre la temporización en cualquier momento (Ver Figura 24).

*Incorporar temporalmente la carga inductiva en el circuito*, una vez el usuario acciona el pulsador S3, el programa, de acuerdo a un cambio registrado en uno de los pines de entrada inicia el proceso de temporización para accionar la etapa de potencia. Es de aclarar que el usuario es quien activa la ejecución de la interrupción cuando pulsa S3 y esta finalizará automáticamente cuando se haya cumplido el tiempo definido por el usuario, el tiempo establecido se visualiza en todo momento en el display (DISP 1) del circuito de control.



**Figura 24.** Diagrama circuito de control, Generador de sag. Elaboración propia.

El circuito de control impreso, puede observarse en la figura 25.



**Figura 25.** Imagen circuito de control diseñado con el cual se realizaron los ensayos. Elaboración propia.

#### 4.1.2 Selección de la fuente de alimentación para la luminaria

Como fuente de alimentación para la luminaria fue establecido un transformador de 600 W, configurado como elevador de tensión 1:2 (110V a 220V), con corriente nominal de operación de 2 A y que puede soportar corrientes instantáneas de hasta 40A con duraciones inferiores a 3 segundos (ver Anexo D). Dado que la potencia de la luminaria es cercana a los 400W, el transformador logró operar en un rango muy cercano a su máximo, obteniendo los niveles necesarios de corriente de cortocircuito de una manera más fácil y segura para la generación de hundimiento en la señal. Con los datos de corriente fue calculada la carga inductiva utilizada para la generación del cortocircuito controlado.

Teniendo en cuenta el principio de operación con el cual se diseñó el generador de Sag, es importante que la potencia de la fuente de alimentación de la luminaria tenga una potencia nominal muy cercana a la potencia de la lámpara, esto con el fin de lograr hundimientos en la señal introduciendo cortocircuitos de la menor magnitud posible.

#### 4.1.3 Cálculo de la carga inductiva

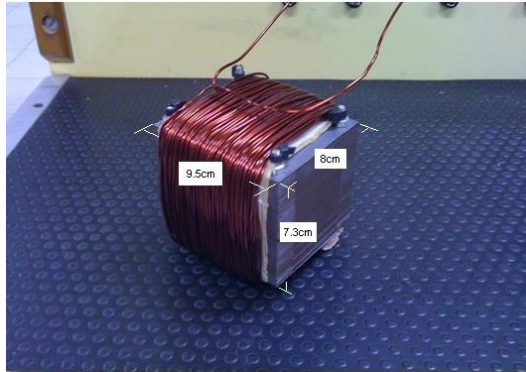
El valor máximo que se puede esperar de la ecuación (11) descrita en la metodología, es  $\text{sen}(2\pi 60t - 90) = 1$ . Este valor fue asumido para obtener la mayor inductancia requerida de acuerdo al nivel de corriente, el valor de la inductancia encontrado fue  $L = 22,5 \text{ mH}$  con el cual fue diseñada la bobina capaz de soportar corrientes hasta 40A, durante periodos de tiempo inferiores a 1s.

A partir del área del núcleo ( $A=75.04 \text{ cm}^2$ ) y del número de espiras ( $N=202$ ), calculado de la ecuación (13), fue construida la bobina para la evaluación del funcionamiento inicial del generador. La Figura 26 muestra la bobina construida.

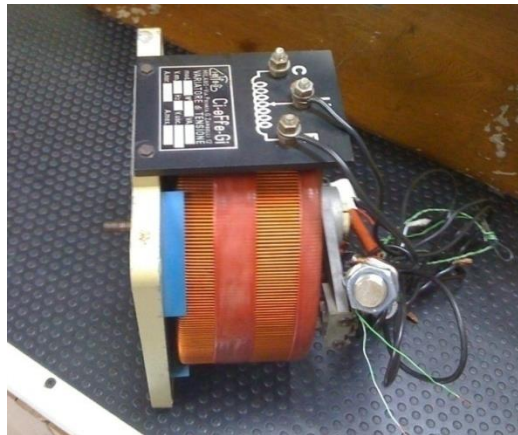
El valor medido de la bobina fue de 25,6mH, con una diferencia de 12% con respecto al valor calculado (22,5mH). Este porcentaje no es considerado significativo dado que la relevancia principal del proyecto se centra en los hundimientos de tensión.

Ante las limitaciones de la bobina descritas en la metodología, fue necesaria la selección del Variac monofásico (ver Figura 27), el cual permitió trabajar diferentes

magnitudes de corriente y hundimientos necesarios para las pruebas en la luminaria. Las características relevantes del Variac están detalladas en el Anexo A.



**Figura 26.** Bobina limitadora de corriente diseñada según cálculos iniciales. Elaboración propia.



**Figura 27.** VARIAC monofásico, carga inductiva variable utilizada en los ensayos. Elaboración propia.

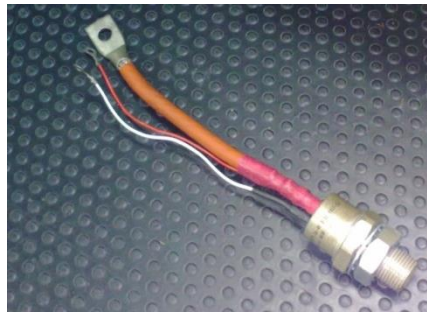
La funcionalidad original del Variac como regulador de tensión eléctrica presenta un alto rango de impedancia, que para carga inductiva tiene un bajo nivel de desplazamiento (entre el 3% y el 20% de su perímetro de desplazamiento total). Los ensayos fueron realizados en este rango. Las posiciones del Variac permiten contar con magnitudes de carga inductiva entre 5mH y 280mH, siendo estas respectivamente la posición número 1 (5mH) y

la posición número 18 (280mH), las demás posiciones se presentan en la Tabla 9 del numeral 3.1.3 de este documento.

#### 4.1.4 Selección del TRIAC

El trabajo utilizó un TRIAC con corriente de operación igual o superior a 150A, una inductancia  $L$  mínima de 5mH y voltaje de operación igual o superior al voltaje pico de la fuente de alimentación (240VAC), en la Figura 28 se muestra el TRIAC.

La corriente pico de operación del TRIAC durante los ensayos fue de 40A.



**Figura 28.** TRIAC utilizado para la realización de los ensayos. Elaboración propia

Partiendo de las ecuaciones (16) a la (20), con:

$$\omega_0 = 10 \cdot 10^6 \text{ V/s} / 1 \times 240 \cdot \sqrt{2} = 29462.78$$

El condensador para la red SNUBBER es:

$$C_1 = \frac{1}{(\omega_0)^2 L} = \frac{1}{(29462.78)^2 \times 0.0225} = 0.0512 \mu\text{F}$$

Y la resistencia SNUBBER es dada por:

$$R_s = 2\rho \sqrt{\frac{L}{C_1}} = 2 \times 0.6 \sqrt{\frac{0.0225}{0.0512 \times 10^{-6}}} = 1.041 \text{ k}\Omega$$

### 4.1.5 Acople de los sistemas de control y potencia

El esquema del circuito de potencia con los valores calculados para la carga inductiva y los valores de resistencia y condensador para la red de Snubber se muestra en la Figura 29.

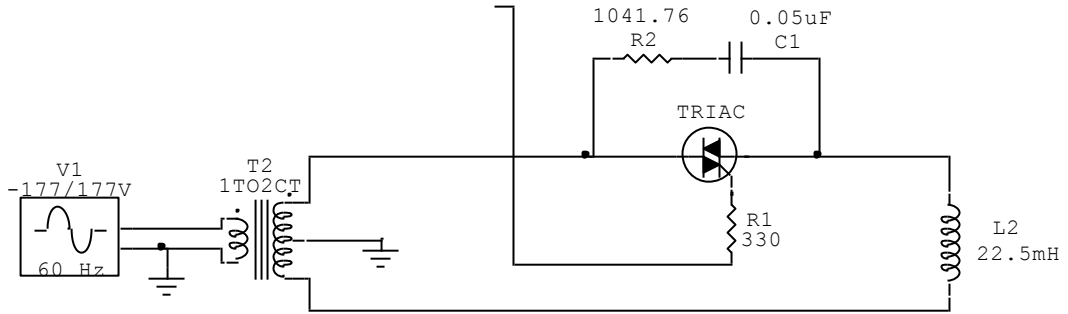


Figura 29. Circuito de potencia del generador de sag. Elaboración propia.

El acople entre las etapas de control y potencia y que constituyen el generador de sag utilizado para la realización de los ensayos puede observarse en la Figura 30. Como elemento adicional en el esquema, se insertó la luminaria tipo Metal Halide utilizada, la cual se encuentra relacionada en el esquema como L1.

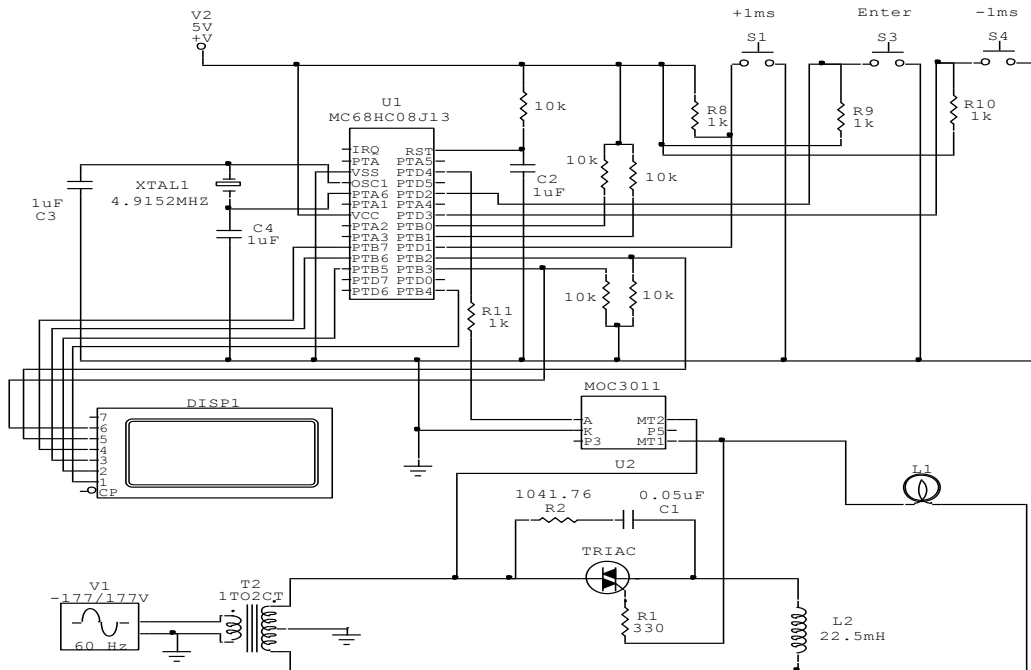


Figura 30. Diagrama de conexión completo del circuito para ensayos con etapas acopladas.

## **Análisis de resultados**

Se logró la implementación de un equipo generador de sag de magnitudes y tiempo variables, este no solo sirvió para la realización de las pruebas sino que también es posible adaptarlo para caracterizar cualquier dispositivo eléctrico o electrónico que sea afectado por la aparición de sag en la señal de tensión. El número de muestras que es posible tomar está determinado por las características del Variac utilizado; es decir, es posible a futuro mejorar esta característica en el prototipo implementado, utilizando un Variac con características diferentes.

Los elementos utilizados para la implementación del equipo generador de sag son de fácil adquisición y su diseño es simple, por lo tanto con una inversión económica en elementos como: el Variac, El Triac y el microcontrolador utilizado, es posible adecuar el equipo para otras aplicaciones o proyectos.

### **4.2 Registro de Mediciones y Resultados**

Se realizaron ensayos a tres (3) luminarias de alta descarga tipo Metal Halide de 400 W, a cada luminaria se le realizaron 3 series de ensayos, cada serie de ensayos consta de 18 niveles de carga delimitadas por las posiciones del Variac.

La Tabla 10 muestra los registros de las 3 series de ensayos realizados a la luminaria 1 con el respectivo promedio, las cifras se encuentran en porcentajes de hundimiento con respecto al nivel de voltaje de alimentación de la lámpara.

**Tabla 10. Registro de ensayos realizados a la luminaria 1. Elaboración propia**

LUMINARIA 1				
Posición	Prueba 1 (%)	Prueba 2 (%)	Prueba 3 (%)	Promedio
1	58.3	58.9	58.2	58.4666667
2	53.1	53.2	53.8	53.3666667
3	48.8	49.2	49.3	49.1
4	47.3	46.9	46.7	46.9666667
5	46.9	47.3	47.1	47.1
6	43.4	43.9	44.1	43.8
7	36.8	37.2	37	37
8	29.8	30.5	29.7	30
9	33.6	33.6	33.7	33.6333333
10	26.6	26.5	26.2	26.4333333
11	26.3	26.7	26.3	26.4333333
12	19.4	19.5	19.6	19.5
13	16.4	16.3	16.3	16.3333333
14	16.7	16.6	17.2	16.8333333
15	16.3	16.6	16.2	16.3666667
16	14.1	14.4	14.4	14.3
17	12.8	12.5	12.4	12.5666667
18	13.2	12.9	13.4	13.1666667

La Tabla 11 muestra los registros de las 3 series de ensayos realizados a la luminaria 2 con el respectivo promedio, las cifras se encuentran en porcentajes de hundimiento con respecto al nivel de voltaje de alimentación de la lámpara.

**Tabla 11. Registro de ensayos realizados a la luminaria 2. Elaboración propia**

LUMINARIA 2				
Posición	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
1	58.9	58.3	61.01	59.4033333
2	53.6	53.3	53.4	53.4333333
3	49	48.9	49.3	49.0666667
4	47.1	47.3	46.9	47.1
5	46.7	46.9	47.3	46.9666667



6	43.7	43.6	43.6	43.6333333
7	36.9	36.8	37.2	36.9666667
8	30.3	30.2	30.2	30.2333333
9	33.9	33.6	33.5	33.6666667
10	26.4	26.6	26.1	26.3666667
11	26.8	26.4	26.6	26.6
12	19.5	19.4	19.6	19.5
13	16.1	16.2	16.2	16.1666667
14	16.8	17.1	17.3	17.0666667
15	16.8	16.6	16.3	16.5666667
16	14.3	14.3	14.4	14.3333333
17	12.7	12.4	12.8	12.6333333
18	13.3	13.2	13.2	13.2333333

La Tabla 12 muestra los registros de las 3 series de ensayos realizados a la luminaria 3 con el respectivo promedio, las cifras se encuentran en porcentajes de hundimiento con respecto al nivel de voltaje de alimentación de la lámpara.

**Tabla 12. Registro de ensayos realizados a la luminaria 3. Elaboración propia**

LUMINARIA 3				
Posición	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
1	59.1	57.9	58.6	58.5333333
2	52.7	54.3	53.9	53.6333333
3	48.7	50.2	48.4	49.1
4	47.1	46.8	46.9	46.9333333
5	46.8	46.9	46.8	46.8333333
6	43.9	44	43.9	43.9333333
7	37.4	37.3	37.2	37.3
8	29.6	30.7	29.9	30.0666667
9	33.9	33.4	33.9	33.7333333
10	26.6	26.1	25.9	26.2
11	26.4	26.8	26.4	26.5333333
12	19.3	19.6	19.6	19.5
13	16.3	16.1	16.1	16.1666667
14	16.8	16.9	16.8	16.8333333

15	16.2	16.8	16.7	16.5666667
16	14.2	14.1	13.9	14.0666667
17	12.7	12.5	12.4	12.5333333
18	12.8	13.2	12.9	12.9666667

Los datos registrados en cada una de las series de ensayos realizados a las 3 luminarias fueron promediados y el resultado queda registrado en la Tabla 13, los datos de porcentaje de hundimiento quedan con valor negativo dado que se trata de un sag que ocasionó caída de tensión en la señal con respecto al nivel de voltaje de alimentación de las luminarias con la respectivo valor de desviación promedio para cada uno de los datos.

**Tabla 13. Resultados promedio de los ensayos realizados. Elaboración propia**

Posición	Promedio de Hundimiento (%)	Desviación Promedio
1	-58,8	0.21213203
2	-53,5	0.56568542
3	-49,1	0.28284271
4	-47,0	0.28284271
5	-47,0	0.07071068
6	-43,8	0.35355339
7	-37,1	0.28284271
8	-30,1	0.07071068
9	-33,7	0.21213203
10	-26,3	0.49497475
11	-26,5	0.07071068
12	-19,5	0.14142136
13	-16,2	0.21213203
14	-16,9	0.07071068
15	-16,5	0.28284271
16	-14,2	0.14142136
17	-12,6	0.28284271
18	-13,1	0.21213203

La Tabla 13 relaciona el promedio de los valores de los eventos registrados por el equipo de medición en los cuales se presentó apagón en la luminaria HID tipo Metal Halide de 400W durante las pruebas realizadas. La Tabla 14 muestra la tensión promedio medida durante el evento, el porcentaje promedio de caída de tensión y la duración del sag.

**Tabla 14. Registro de eventos con los cuales se construyó la curva. Elaboración propia**

Prueba	Carga inductiva (mH)	Tensión medida durante el evento (V)	Caída de tensión durante el evento (%)	Duración del sag (ms)
1	5,0	90,6	-58,8	42
2	10,9	102,4	-53,5	42
3	14,9	116,6	-49,1	42
4	20,0	112,0	-47,0	42
5	25,6	116,6	-47,0	59
6	36,0	123,6	-43,8	59
7	50,9	138,4	-37,1	75
8	82,5	153,8	-30,1	91
9	100,0	145,8	-33,7	107
10	114,3	162,2	-26,3	109
11	138,0	161,6	-26,5	174
12	153,0	177,0	-19,5	175
13	171,3	184,4	-16,2	183
14	184,0	182,8	-16,9	276
15	210,0	188,8	-16,5	408
16	225,0	183,8	-14,2	517
17	250,0	192,2	-12,6	549
18	280,0	191,2	-13,1	633

### **Análisis de resultados**

Teniendo en cuenta las características del generador de sag implementado fue posible realizar 18 series de ensayos que permitieron registrar los eventos que ocasionaron apagones inesperados en la luminaria de alta descarga tipo Metal Halide de 400W, de cada uno de los

registros fue posible medir el nivel de hundimiento logrado y la duración de tiempo de cada uno de los eventos.

Las series de ensayos realizados (18), están determinados por el número de posiciones en el Variac, que ocasionaron cortocircuitos capaces de generar los hundimientos en las luminarias objeto de estudio; por lo tanto, es importante entonces dejar claramente documentada la posibilidad de hacer adecuaciones en el equipo adquiriendo un Variac que permita más posiciones válidas, para obtener una mayor cantidad de muestras. Sin embargo, la cantidad de muestras obtenidas en los ensayos realizados permite un análisis preliminar del comportamiento de la luminaria ante la aparición de sag, en su señal de alimentación y por lo tanto dar cumplimiento al alcance planteado para este trabajo.

#### **4.3 Interpretación de los datos de la tabla de registros**

De los registros en la los datos para la construcción de la curva son tomados a partir de la magnitud de la carga configurada desde el Variac, la tensión medida en el momento del evento y el tiempo de duración de cada uno de los sag que ocasionaron el apagón de la luminaria, la desviación promedio en los datos registrados de los diferentes ensayos es muy baja (0.248), por lo tanto se evidencia un comportamiento homogéneo de las luminarias durante los ensayos, esto fortalece la elección de una curva como método para la representación del comportamiento de las luminarias y por consiguiente se convierte en el resultado principal de este trabajo.

Haciendo una diferencia entre el voltaje nominal de alimentación de la luminaria (220V) y el voltaje medido en el momento del evento, se encuentra la caída de voltaje y por consiguiente es posible determinar el porcentaje de hundimiento que ocurrió en la señal durante el sag, de esta forma se hallan los datos correspondientes al eje Y de la curva característica construida, los datos de duración de sag registrados en el analizador de calidad de la potencia se convierten en las cifras correspondientes al eje X de la curva característica elaborada.

A partir de los resultados obtenidos durante los ensayos se establecieron como variables relevantes y susceptibles de analizar en el estudio planteado el porcentaje de hundimiento en la señal de tensión que ocurre durante el sag generado vs el tiempo de duración del mismo.

#### **4.4 Curva Característica y Regiones de Operación**

Para la construcción de la curva característica son considerados los datos de caída de tensión durante cada evento vs el tiempo de duración del sag, dando cumplimiento a los parámetros establecidos en el estándar SEMI F47 y en la curva CBEMA. Es importante aclarar que el Variac utilizado en el equipo no presenta condiciones de tipo lineal en cuanto al porcentaje de desplazamiento de la perilla en función del valor de inductancia, por lo tanto, no es posible elaborar gráficos adicionales que asocien el nivel de hundimiento de la señal con la posición de la perilla del Variac. La Figura 31 muestra la curva característica obtenida, en dicha figura se observa las regiones de operación con y sin apagado para las luminarias de alta densidad de descarga tipo Metal Halide de 400W delimitadas por la curva resultante de la unión de los puntos obtenidos durante los ensayos realizados.

La Figura 31 muestra la línea de operación de la luminaria como referente para separar las regiones de operación entre operación segura y operación con riesgo de apagado. Los nombres de las regiones de operación se definieron tomando como referente las planteadas por los estándares CBEMA, ITIC y SEMI F47.

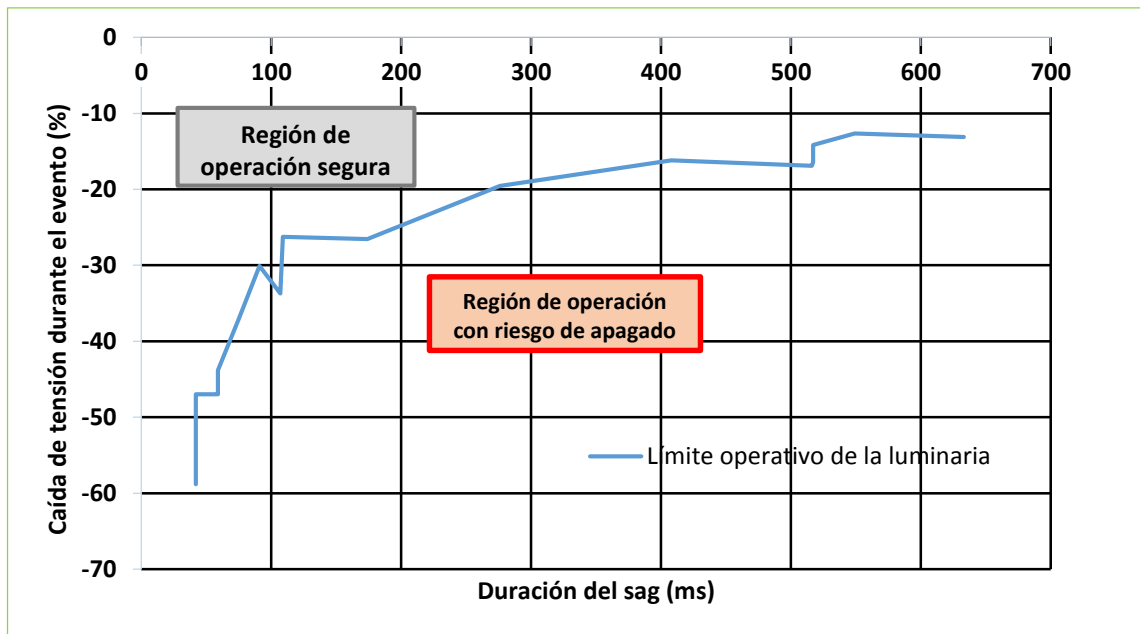


Figura 31. Curva de caracterización de la luminaria tipo Metal Halide de 400 W. Elaboración propia

### Análisis de resultados

De los resultados obtenidos en la curva es posible deducir que el apagado temporal de las luminarias en mención depende de la magnitud del hundimiento y la duración del mismo en relación inversamente proporcional, es decir, dentro del rango de tiempo que comprenden los eventos de corta duración ( $\text{Evento} \leq 500\text{ms}$ ), a mayor duración del evento la luminaria es más propensa al apagado por causa de la aparición de un sag.

Analizando en detalle la curva, se observa que para cortas duraciones es necesaria una magnitud de hundimiento mayor para que la luminaria se apague, lo anterior se deduce teniendo en cuenta la característica logarítmica de la curva y teniendo en cuenta dos puntos de la curva como la prueba 1, donde con una duración de 42ms registrados en el equipo, se necesitó de una magnitud de hundimiento en la señal de tensión del 58% para que se apagara, mientras que en la muestra 15 con una duración del evento de 408ms solo bastó con un hundimiento equivalente al 16,5% para que la luminaria se apagara.

Considerando que al igual que en estudios similares aplicados a otros tipos de dispositivos, es posible definir como lo más relevante, el conocimiento de los rangos de operación de la luminaria ante la aparición de un sag, en la curva característica presentada se delimitaron regiones tal como se definen en el estándar SEMI F47 y en la Curva CBEMA (ver Figura 31). La línea de la curva se constituye en el límite operativo de la luminaria de alta descarga tipo Metal Halide de 400W. Las regiones de operación por su parte definen con claridad el significado de una operación de la luminaria segura o con riesgo de apagado.

### **Región de operación segura**

Esta región es la señalada en color verde (ver Figura 31), indica que la lámpara puede funcionar ante la presencia de sag cuyas características de magnitud y duración estén por encima de la línea que indica el límite operativo de la luminaria. Los sag que aparezcan que tengan una magnitud y duración que se encuentren en esta región no ocasionarán apagones inesperados en la luminaria, por lo tanto, en el momento de elegir o diseñar protecciones contra eventos de corta duración para las redes eléctricas que alimentan a estas luminarias es necesario tener en cuenta estos valores y catalogarlos como eventos manejables y asumibles por la red eléctrica.

### **Región de operación con riesgo de apagado**

La región de operación con riesgo de apagón es la señalada en color rojo (Figura 31), se entiende que todo evento con duración de tiempo y magnitud de tensión que ocurra por encima de la línea que indica el límite operativo de la luminaria puede ocasionar un apagón inesperado en la luminaria de Metal Halide de 400W, estos valores son necesarios catalogarlos como de alto riesgo para el normal funcionamiento de los sistemas de iluminación que utilizan este tipo de lámparas, por lo tanto el diseño redes eléctricas y de protecciones contra hundimientos de corta duración deben considerar estos valores.

De la curva característica obtenida (Figura 31), se puede observar la existencia de una relación inversamente proporcional entre la duración de tiempo del sag y su porcentaje de hundimiento, es decir, la luminaria utilizada tiene la capacidad de soportar hundimientos grandes pero que sean de duraciones cortas, mientras que cuando las duraciones de tiempo

de los eventos son largos un porcentaje de hundimiento leve ocasiona un apagón en la luminaria.

Teniendo en cuenta los datos registrados por los equipos de medición, los sag que se presentan en la red y que se caracterizan por tener un tiempo de duración menor a 42ms no fue posible analizarlos con mayor detalle debido a que la carga inductiva utilizada en los ensayos no permitió generar sobre-corrientes mayores que dejaran observar en detalle el comportamiento de la luminaria en dicho rango de duración de tiempo. Por el momento y dada la tendencia logarítmica de la curva característica construida se puede suponer que los sags que ocurran con una duración de tiempo inferior no generan perturbación ni apagado de la luminaria, sin embargo, la gráfica se ilustra abierta desde el inicio con el fin de evidenciar y registrar solo los resultados obtenidos.

La gráfica obtenida permite determinar la posibilidad de que un sag ocasione un apagón inesperado en una luminaria de alta descarga tipo Metal Halide conociendo la magnitud y la duración de tiempo del evento, lo anterior se determina si el punto correspondiente queda ubicado en la “*Región de operación segura*” o en la “*Región de operación con riesgo de apagón*” (ver Figura 31). Para realizar caracterización de otros tipos de carga con el equipo diseñado, es necesario tener en cuenta la potencia de la red donde está conectada la carga, con el fin de diseñar adecuadamente la fuente del equipo según los criterios de diseño planteados en éste documento.



## 5. CONCLUSIONES

El trabajo realizado logró la implementación de un equipo generador de sag con valores variables en magnitud de voltaje y de tiempo de duración del sag. El uso del Variac monofásico como carga inductiva permitió generar diferentes niveles de hundimiento y por lo tanto un mayor número de muestras para evaluar el impacto de los sags en la luminaria objeto de estudio. De igual forma se deja planteada una Metodología que permite implementar un sistema generador de sag simple y de bajo costo, dado que los elementos utilizados son de fácil adquisición.

Se logró obtener una curva característica que determina el comportamiento de una luminaria tipo Metal Halide de 400W, ante la aparición de sag en la señal de tensión de alimentación. La curva utiliza las variables del estándar SEMI F47 (duración del evento vs el porcentaje de hundimiento); sin embargo, el rango de dicho estándar no cubre los valores obtenidos en los ensayos realizados, por lo tanto fue necesario construir una curva específica aplicable a la luminaria objeto de estudio. El procedimiento de ensayos realizados y la metodología de caracterización planteada en este trabajo es replicable en otros dispositivos eléctricos y electrónicos que sean afectados por eventos como los sags.

Los datos obtenidos se convierten en el registro del comportamiento de una luminaria tipo Metal Halide de 400W ante la aparición de sag en la señal que proviene de su fuente de alimentación eléctrica, dichos eventos producidos permitieron observar el comportamiento de la luminaria en mención ante eventos de diferentes magnitudes y duraciones. El análisis realizado a la curva característica construida, permite evidenciar la influencia conjunta entre las variables de duración del evento y su magnitud en la ocurrencia de apagones en el tipo de luminaria analizada, quedan registrados para nuestro caso de estudio como eventos críticos para el funcionamiento de la luminaria analizada los sags con duraciones entre 10ms y

300ms, con magnitudes de hundimiento superiores al 40% de la señal nominal del tensión, es decir, un sag que tenga características dentro de este rango que se produzca en una red eléctrica que alimente una luminaria tipo Metal Halide de 400W ocasionará muy seguramente un apagón inesperado en esta.

La curva construida constituye la propuesta para la caracterización del comportamiento de las luminarias de alta densidad de descarga tipo Metal Halide de 400 W ante la aparición de hundimientos de corta duración en la señal de tensión denominados como *sag* o dip. Teniendo como objeto de análisis para este estudio las luminarias de alta descarga tipo Metal Halide y deduciendo el riesgo que implica para la seguridad y la integridad de las personas cualquier apagón que se presente en las luminarias de éste tipo dado su uso en sistemas de alumbrado público, se pudo evidenciar que el estudio del impacto de los sags en las luminarias de alta descarga es efectivamente un caso pertinente relacionado directamente con la gestión energética, ya que tiene implícitos aspectos como: calidad del servicio en sistemas de alumbrado público y la seguridad e integridad en el desplazamiento nocturno de las personas en espacios de circulación masiva

## 6 REFERENCIAS

- Aguilar, D., Vazquez, G., Rolan, a, Rocabert, J., Córcoles, F., & Rodríguez, P. (2010). Simulation of Wound Rotor Synchronous Machine under voltage sags. *Industrial Electronics ISIE 2010 IEEE International Symposium on*, 2626–2631.
- Byszewski, W. W., Li, Y. M., Budinger, A. B., & Gregor, P. D. (1992). Starting Of Metal Halide Lamps. In *IEEE Conference Record - Abstracts 1992 IEEE International Conference on Plasma* (pp. 87–87). USA: IEEE. doi:10.1109/PLASMA.1992.697759
- Calleja Rodriguez, A. J. (2000). BALASTOS ELECTRÓNICOS DE UNA SOLA ETAPA CON ALTO FACTOR DE POTENCIA: NUEVOS MÉTODOS DE CONTROL Y APORTACIÓN DE NUEVAS TOPOLOGÍAS OPTIMIZADAS.
- Cheng, P.-T. C. P.-T., Huang, C.-C. H. C.-C., Pan, C.-C. P. C.-C., & Bhattacharya, S. B. S. (2002). Design and implementation of a series voltage sag compensator under practical utility conditions. *APEC Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition Cat No02CH37335*, 2(3), 844–853.
- Co, M. A., Resende, C. Z., Simonetti, D. S. L., Vieira, J. L. F., & Almeida, P. C. A. (2002). Microcontrolled electronic gear for low wattage metal halide (MH) and high-pressure sodium (HPS) lamps. In *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344)* (Vol. 3, pp. 1863–1868). IEEE. doi:10.1109/IAS.2002.1043787
- Comisión Internacional de Electrotécnia IEC. IEC61000-4-3, 2000 Order A Journal On The Theory Of Ordered Sets And Its Applications 585 (2006). USA: Iso.
- Committee, D. (2009). *IEEE Std 1159<sup>TM</sup>-2009, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. October* (Vol. 2009, pp. c1 –81). Ieee.
- Committee, T. and distribution. (2011). *IEEE 1250 Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems* (Vol. 2011).
- Dasilva, L., Pereira, R., & Mantovani, J. (2010). Minimization of voltage sag induced financial losses in distribution systems using FACTS devices. *Electric Power Systems Research*, 69(1), 77–84. doi:10.1016/j.epsr.2010.11.003
- De Carvalho Filho, J. M., de Abreu, J. P. G., Noronha, J. C. C., & Arango, H. (2000). Analysis of power system performance under voltage sags. *Electric Power Systems Research*, 55(3), 211–218. doi:10.1016/S0378-7796(00)00085-7
- Departament of commerce USA. (1983). Guideline on electrical power for adp instalations.pdf.

- Diaz, F. J., Azcondo, F. J., Ortiz, F., Ortiz, a, Maana, M., & Renedo, C. (2007). Effects of voltage sags on different types of ballasts for 150-W HPS lamps. *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*.
- Dongyu, L., Honglin, Z., Shuai, X., & Geng, Y. (2010). A new voltage sag generator base on power electronic devices. In *The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems* (pp. 584–588). IEEE. doi:10.1109/PEDG.2010.5545808
- Dorr, D., Mansoor, A., Morinec, A., & Worley, J. (1995). Applying HID high-pressure sodium lamps in a variable-voltage environment. In *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting* (Vol. 3, pp. 2059–2065). IEEE. doi:10.1109/IAS.1995.530564
- Flechas Villamil, J. (2000). Calidad de la potencia eléctrica.
- Gas, P., & Company, E. (2007). Voltage Sag Immunity Standards – SEMI F47 and F42 –, (3), 1–4.
- Kezuncwid, M. (2001). Automated Analysis of valtaje sags, their causes and impacts, *00(C)*, 1113–1117.
- Kwang, T. C., Kumaran, V., Fadzil, M., Siam, M., & Busrah, A. M. (2004). Power Quality Event Characterization. *IEEE Magazine*, 1–4.
- Kyei, J. ( P. systems E. rsearch C. (1996). Analysis and Design of Power Acceptability Curves for Industrial Loads. *IEEE Explorer*, 3–9.
- Lee, Y.-S. L. Y.-S., So, H.-C. S. H.-C., & Chow, M. (2009). Design of AC voltage sag compensators. *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 3, 2587–2590.
- Ma, Y. M. Y., & Karady, G. G. (2008). A single-phase voltage sag generator for testing electrical equipments. *2008 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 1–5.
- Markiewicz, H. (Cooper D. A., & Klajn, A. (COPPER). Voltage Disturbances, 5.4.2 Power quality Application Guide 4–11 (2004).
- Ministerio de Minas y Energía. (2010). *Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público - RETILAP*. Bogotá (Colombia). Retrieved from [http://www.minminas.gov.co/minminas/energia.jsp?cargaHome=3&id\\_categoria=157&id\\_subcategoria=963](http://www.minminas.gov.co/minminas/energia.jsp?cargaHome=3&id_categoria=157&id_subcategoria=963)

- Ministerio de Minas y Energía, C. Resolución Creg 070-2001 (2001).
- Ministerio de Minas y Energía, C. Creg 024-2005.pdf (2005).
- MOTOROLA. (2005). Data Sheet MC68HC08JL3. Retrieved from [http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data\\_sheet/MC68HC08JL3.pdf](http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC68HC08JL3.pdf)
- OBRA-LUX. (2008). Luminotecnia.
- Olguin, G., Vuinovich, F., & Bollen, M. H. J. (2006). An Optimal Monitoring Program for Obtaining Voltage Sag System Indexes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(1), 378–384. doi:10.1109/TPWRS.2005.857837
- Pérez Fernández, E. (2006). *Nuevo Método de Detección y Análisis en Tiempo Real de Eventos en la Tensión de Suministro de Energía Eléctrica Empleando un Modelo Combinado Wavelets-Filtro de Kalman Extendido*. (Universidad de Cantabria, Ed.). Tesis Doctorales en Red. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10803/10634>
- Perez Fernandez, E. (Universidad de C. (2006). *Universidad de Cantabria Departamento de Electrónica y Computadores*. Universidad de Cantabria.
- Raigoza Gil, J. (2008). *ANALISIS DE SAGS EN UN CIRCUITO INDUSTRIAL EN BASE A CURVAS ISO-SAG*. Universidad de los Andes.
- Reinstein, D. CREG, Concepto 20452 (2002).
- Reyes, D. F., Torres, M. T. R. De, & Torres, Á. (2005). Impacto de los Sags en la seguridad de los sistemas industriales. *Open Journal Systems*, 1–7.
- Ribas, J., Alonso, J. M., Calleja, a J., Lopez, E., Cardesin, J., Garcia, J., & Rico, M. (2003). Arc Dynamic Stabilization in Low-Frequency Square-Wave Electronic Ballast for Metal Halide Lamps. *Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 2003 APEC 03*, 2(5), 1592–1599.
- Ribas, J., Garcia, J., Cardesin, J., Dalla-Costa, M. A., Calleja, J. A., & Corominas, E. L. (2005). High Frequency Electronic Ballast for Metal Halide Lamps Based on a PLL Controlled Class E Resonant Inverter. In *IEEE 36th Conference on Power Electronics Specialists, 2005*. (pp. 1118–1123). IEEE. doi:10.1109/PESC.2005.1581769
- Sanchez, J., Caicedo, G., & Castro-aranda, F. (2008). Evaluation of meter of power quality. *Revista Energía Y Computación*, 16(1), 33–41.

- Sedighnejad, H., & Jalilian, A. (2010). Effect of protection device coordination on voltage sag characteristics of distribution networks. *ISA Transactions*, 49(4), 407–14. doi:10.1016/j.isatra.2010.05.004
- Senturk, O. S., & Hava, A. M. (2010). A simple sag generator using SSRs. *Energy Conversion Congress and Exposition ECCE 2010 IEEE*, 48(1), 4049–4056.
- Std, I., Committee, S. C., Quality, P., & Board, I. S. (1998). *Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment*, IEEE1346.
- Superintendencia delegada para energía y Gas. (2011). *Informe ejecutivo de gestión Empresas Públicas de Medellín ESP* (pp. 1–20). Colombia. Retrieved from [http://www.superservicios.gov.co/content/download/2036/21483/version/1/file/\(2011\)+INFORME+EJECUTIVOS+DE+GESTION+EMPRESAS+PUBLICAS+DE+MEDELLIN.pdf](http://www.superservicios.gov.co/content/download/2036/21483/version/1/file/(2011)+INFORME+EJECUTIVOS+DE+GESTION+EMPRESAS+PUBLICAS+DE+MEDELLIN.pdf)
- Tecnología, E. (2010). Análisis de eventos de Tensión Curvas ITIC , CBEMA y SEMI F47.
- Thallam, R. S., & Heydt, G. T. (2000). Power acceptability and voltage sag indices in the three phase sense. In *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)* (Vol. 2, pp. 905–910). IEEE. doi:10.1109/PESS.2000.867482
- Thomas, C. (2006). Overview of SEMI F47-0706. *SEMICON*.
- Vargas López, A. I. (2005). *SUBTENSIONES (SAGs & DIPs) Y SU IMPACTO ECONÓMICO EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA E INDUSTRIA GUATEMALTECA*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Retrieved from [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:SUBTENSIONES+\(SAGs+&+DIPs\)+Y+SU+IMPACTO+EN+LA+CALIDAD+DE+LA+ENERGÍA+E+INDUSTRIA+GUATEMALTECA#0](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:SUBTENSIONES+(SAGs+&+DIPs)+Y+SU+IMPACTO+EN+LA+CALIDAD+DE+LA+ENERGÍA+E+INDUSTRIA+GUATEMALTECA#0)
- Wagner, V., Grebe, T., Kretschmann, R., Morgan, L., & Price, a. (1994). Power system compatibility with industrial process equipment. *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2(1).
- Wang, J. W. J., Xu, D. X. D., & Yang, H. Y. H. (2003). Design considerations of electronic ballast for MH lamps with frequency modulation. *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems 2003 PEDS 2003*, 2.
- WIPO-OMPI. (2008). Solicitud Internacional publicada en virtud del tratado de cooperación en materia de patentes. USA.

- Won, D., Ahn, S., Member, S., & Moon, S. (2005). A Modified Sag Characterization Using Voltage Tolerance Curve for Power Quality Diagnosis. *IEEEExplore*, 20(4), 2638–2643.
- Won, D.-J. W. D.-J., Ahn, S.-J. A. S.-J., Chung, I.-Y. C. I.-Y., Kim, J.-M. K. J.-M., & Moon, S.-I. M. S.-I. (2003). A new definition of voltage sag duration considering the voltage tolerance curve. In *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, (Vol. 3, pp. 456–460). IEEE. doi:10.1109/PTC.2003.1304432
- Yun, S.-Y., & Kim, J.-C. (2003). An evaluation method of voltage sag using a risk assessment model in power distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 25(10), 829–839. doi:10.1016/S0142-0615(03)00063-2

## ANEXOS

### ANEXO A: VARIAC UTILIZADO EN LOS ENSAYOS



---

#### CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

---

Modelo	Potencia	Tensión de alimentación
Epa	2200VA	230V-400V

---

<http://www.cieffegi.com/prodotti/monofase-da-retroquadro-a-giorno/2200-3300-4100-5100-7000-8000-va>



## ANEXO B: LUMINARIA DE ALTA DESCARGA TIPO METAL HALIDE 400W



CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS		
Modelo	Potencia	Tensión De Alimentación
PHILIPS CH9 MH/U	400W	208V/220V; 60Hz

## ANEXO C: BALASTO ELECTRÓNICO UTILIZADO EN EL CIRCUITO DE PRUEBAS



CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS		
Modelo	Potencia	Tensión De Alimentación
B60101E	400W	208V/220V; 60Hz

**ANEXO D: TRANSFORMADOR ELÉCTRICO ELEVADOR UTILIZADO EN LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LA LUMINARIA**



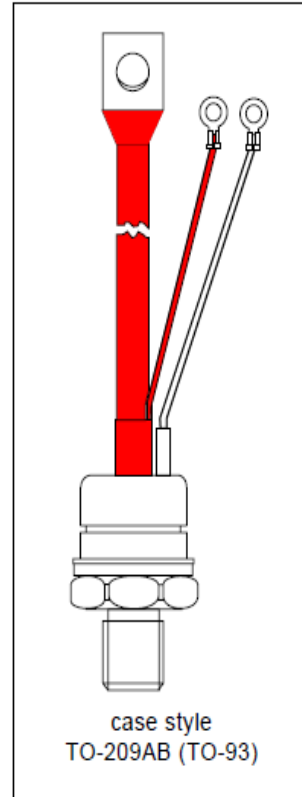
## ANEXO E: TRIAC UTILIZADO EN EL GENERADOR DE SAG

### Typical Applications

- DC motor controls
- Controlled DC power supplies
- AC controllers

### Major Ratings and Characteristics

Parameters	ST180S	Units
$I_{T(AV)}$	200	A
@ $T_C$	85	°C
$I_{T(RMS)}$	314	A
$I_{TSM}$ @ 50Hz	5000	A
@ 60Hz	5230	A
$I^2t$ @ 50Hz	125	KA <sup>2</sup> s
@ 60Hz	114	KA <sup>2</sup> s
$V_{DRM}/V_{RRM}$	400 to 2000	V
$t_q$ typical	100	μs
$T_J$	- 40 to 125	°C



[www.irf.com](http://www.irf.com)

## ANEXO F: ESPECIFICACIONES DEL MEDIDOR DE CARGAS AMPROBE LCR55A



[www.amprobe.eu/en\\_GB/downloadfile/145/anleitung\\_1/](http://www.amprobe.eu/en_GB/downloadfile/145/anleitung_1/)

Accuracies at 23°C ± 5°C, <75% RH.

### **Resistance**

Ranges: 20, 200Ω, 2, 20, 200kΩ, 2, 20MΩ

Resolution, 20Ω range: 10mΩ

Accuracy: 20Ω range: ±1.2% rdg (zero adjust)

200Ω range: ±0.5% rdg +3dgt

2k to 2MΩrgs: ±(0.5% rdg +1dgt)

20MΩrg: ±(2.0% rdg +2dgt)

OL Protection, all ranges: 350VDC or AC RMS

Open Circuit Voltage; 20Ω range: 6.5VDC; 200Ω range: 3.0VDC; other ranges:  
1.2VDC

### **Continuity**

Audible Indication, 2kΩrg: at R ≤30Ω

Response time: 800ms approx

OL Protection: 350VDC or AC RMS

### **Diode Test**

Test Current: 1mA (approx.)

Test Voltage: 3.0VDC typical

Accuracy:  $\pm(1.5\% \text{rdg} + 1 \text{dgt})$

Display: Forward Junction Voltage

OL Protection: 350VDC or AC RMS

### **Micro Wave Diode Test**

Test Current: 1.3mA (approx.)

Test Voltage: 8.0VDC typical

Accuracy:  $\pm(3.0\% \text{rdg} + 1 \text{dgt})$

Display: Forward Junction Voltage

OL Protection: 350VDC or AC RMS

### **Capacitance**

Ranges: 200pF, 2, 20, 200nF, 2, 20, 200, 2000 $\mu$ F

Accuracy\*: 200pF to 200nF:  $\pm(1.0\% \text{rdg} + 3 \text{dgt})$

2 $\mu$ F to 200 $\mu$ F rgs:  $\pm(2.0\% \text{rdg} + 3 \text{dgt})$

2000 $\mu$ F range:  $\leq 1000\mu\text{F} \pm(3.0\% \text{rdg} + 3 \text{dgt})$

$> 1000\mu\text{F} \pm(5.0\% \text{rdg} + 5 \text{dgt})$

Note: In lower ranges, subtract 6 points residual offset reading from result

Test Frequency: 200p to 2 $\mu$ F: 1000Hz; 20, 200 $\mu$ F ranges: 100Hz; 2000 $\mu$ F range:

10Hz

Temperature Coefficient:  $\leq 0.5\mu\text{F}$ : 0.1%/°C;  $>0.5\mu\text{F}$ : 0.2%/°C

OL Protection: 0.1A/250V fast blow fuse.

### **Inductance**

Ranges: 200 $\mu\text{H}$ , 2, 20, 200mH, 2, 20, 200H

Accuracy: 200 $\mu\text{H}$  rg:  $\pm(5.0\%\text{rdg} + 30\text{dgt})^*$

2 to 200mH:  $\pm(3.0\% + 20\text{dgt})^*$

2 to 200H:  $\pm(5.0\% + 20\text{dgt})^*$

\*For values of  $Q \leq 7$

Test Frequency: 200 $\mu\text{H}$  to 2H rgs: 1000Hz; 20 and 200H ranges: 100Hz

Temperature Coefficient,  $\leq 0.5\text{H}$ : 0.2%/°C;  $>0.5\text{H}$ : 0.5%/°C

OL Protection: 0.1A/250V fast blow fuse

### **Transistor Test**

hFE Range: 0-1000

hFE Base Current: 5 $\mu\text{A}$  approx.

hFE Voltage C-E: 3.0VDC approx.

I<sub>ceo</sub> Range, Leakage Current: 10nA to 20 $\mu\text{A}$

## ANEXO G: FICHA TÉCNICA MEDIDOR FLUKE 435



DATOS TÉCNICOS	
Entradas	<p>Número: 4 de tensión y corriente (3 fases + neutro)</p> <p>Tensión máxima: 1000 Vrms (pico de 6 kV)</p> <p>Velocidad de muestreo máxima: 200 kS/s en cada canal simultáneamente</p>
Voltios/amperios/hercios	<p>Vrms (CA + CC)</p> <p>Rango de medida: 1 ... 1000 V</p> <p>Precisión: 0,1% de la tensión nominal</p> <p>Pico de tensión</p> <p>Rango de medida: 1 ... 1400 V</p> <p>Precisión: 5% de la tensión nominal</p> <p>Factor de cresta, tensión</p> <p>Rango de medida: 1 ... &gt; 2,8</p> <p>Precisión: ± 5%</p> <p>Arms (CA + CC)</p> <p>Rango de medida: 0 ... 20 kA</p>



	<p>Precisión: <math>\pm 0,5\% \pm 5</math> cuentas</p> <p>Amperios de pico</p> <p>Rango de medida: 0 ... 5,5 kA</p> <p>Precisión: 5%</p> <p>Factor de cresta, A</p> <p>Rango de medida: 1 ... 10</p> <p>Precisión: <math>\pm 5\%</math></p> <p>50Hz nominal</p> <p>Rango de medida: 42,50 ... 57,50 Hz</p> <p>Precisión: <math>\pm 0,01\text{Hz}</math></p>
Fluctuaciones	<p>Vrms (CA+CC) <sup>2</sup></p> <p>Rango de medida: 0,0% ... 100% de Vnom</p> <p>Precisión: <math>\pm 0,2\%</math> de la tensión nominal</p> <p>Arms (CA+CC) <sup>2</sup></p> <p>Rango de medida: 0 ... 20 kA□</p> <p>Precisión: <math>\pm 1\% \pm 5</math> cuentas</p>
Armónicos	<p>Armónico (interarmónico) (n)</p> <p>Rango de medida: DC, 1..50; (desactivado, 1..49) medido respecto a CEI 61000-4-7</p> <p>Vrms</p>

	Rango de medida:	0 ... 1000 V
	Precisión:	± 0,05% de la tensión nominal
	Arms	
	Rango de medida:	0 ... 4000 mV x escala de la pinza de corriente
	Precisión:	±5% ± 5 cuentas
	Vatios	
	Rango de medida:	Según escala de la pinza de corriente
	Precisión:	±5% ± n x 2% o lectura, ± 10 cuentas
	Tensión de CC	
	Rango de medida:	0 ... 1000 V
	Precisión:	± 0,2% de la tensión nominal
	THD	
	Rango de medida:	0,0 ... 100,0%
	Precisión:	± 2,5% V y A (± 5% Vatios)
	Hz	
	Rango de medida:	0 ... 3500 Hz
	Precisión:	± 1 Hz
	Ángulo de fase	
	Rango de medida:	-360° ... +360°
	Precisión:	± n × 1,5°

Potencia y energía	<p>Vatios, VA, VAR</p> <p>Rango de medida: 1,0 ... 20,00 MVA<sup>1</sup></p> <p>Precisión: ± 1% ± cuentas</p> <p>kWh, kVAh, kVARh</p> <p>Rango de medida: 00,00 ... 200,0 GVAh<sup>1</sup></p> <p>Precisión: ± 1.5% ± 10 cuentas</p> <p>Factor de potencia/ Cos Φ / DPF</p> <p>Rango de medida: 0 ... 1</p> <p>Precisión: ± 0,03</p>
Flicker (Parpadeo de tensión)	<p>Pst (1 min), Pst, Plt, PF5</p> <p>Rango de medida: 0 ... 20</p> <p>Precisión: ± 5%</p>
Desequilibrio	<p>Voltios</p> <p>Rango de medida: 0 ... 5%</p> <p>Precisión: ±0,5%</p> <p>Corriente</p> <p>Rango de medida: 0% ... 20%</p> <p>Precisión: ± 1%</p>
Captura de transitorios	<p>Voltios</p> <p>Rango de medida: ±6000 V</p> <p>Precisión: ±2,5% de Vrms</p> <p>Duración de detección mínima 5 μs (muestreo a 200kS/seg.)</p>

Modo de corriente de arranque	<p>Arms (CA + CC)</p> <p>Rango de medida: 0,000 ... 20,00 kA<sup>1</sup></p> <p>Precisión: ±1% de medida ± 5 cuentas</p> <p>Duración del arranque (seleccionable)</p> <p>Rango de medida: 7,5 s ... 30 minutos</p> <p>Precisión: ± 20 ms (frecuencia nominal = 50 Hz)</p>
Registro de automático de tendencias	<p>Muestreo: Muestreo continuo de 5 lecturas/segundo en cada canal</p> <p>Memoria: 1.800 puntos. Cada punto contiene los valores máx., mín., y promedio de todas las lecturas realizadas.</p> <p>Tiempo de registro: Hasta 450 días</p> <p>Zoom: Hasta 12 aumentos de zoom horizontal</p>
Memoria	<p>Pantallas y datos 50. La memoria se comparte entre los registros, las pantallas y los datos.</p>
Notas	<p><sup>1</sup> Según la escala de la pinza</p> <p><sup>2</sup> El valor se mide en un ciclo, comenzando en un paso por cero fundamental y actualizado cada medio ciclo</p>
<b>ESPECIFICACIONES AMBIENTALES</b>	
Temperatura de trabajo	0 °C a +50 °C
<b>ESPECIFICACIONES DE SEGURIDAD</b>	
Seguridad	Grado 2 de contaminación según la norma EN61010-1 (2ª edición); 1000 V CAT III / 600 V CAT IV ANSI/ISA S82.01

ESPECIFICACIONES MECÁNICAS Y GENERALES	
Tamaño	256 x 169 x 64 mm
Peso	1,1 kg
Duración de la batería	Batería NiMH recargable (instalada): >7 horas Tiempo de carga de la batería: 4 horas típicas
Golpes y vibraciones	Prueba de impactos: 30 g Prueba de vibraciones: 3 g conforme a la Clase 2 de la norma MIL-PRF-28800F
Maletín	Resistente y a prueba de impactos con funda protectora integrada IP51 (contra el polvo y las salpicaduras)
Garantía	3 años