

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**ESTUDIO DE LAS PERTURBACIONES DE LA ONDA DE  
TENSIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Reyes R., Raúl E.  
para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2006

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **ESTUDIO DE LAS PERTURBACIONES DE LA ONDA DE TENSIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

PROFESOR GUÍA: Ing. Julio Molina.  
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. José Herrera.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Reyes R., Raúl E.  
para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2006

## CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 10 de noviembre de 2006

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Raúl E., Reyes R., titulado:

### **“ESTUDIO DE LAS PERTURBACIONES DE LA ONDA DE TENSIÓN: FLICKER, SWEEL Y SAGS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

  
Prof. Carlos Cruz  
Jurado

  
Prof. Alexander Cepeda  
Jurado



  
Prof. Julio Molina  
Prof. Guía

## **DEDICATORIA**

En especial a mi hijo RAÚL RAMÓN DE JESÚS REYES LA ROSA (Bebe Oso), ser maravilloso que iluminaste mi vida. Oso melero Jesús te cuida. Te prometo portarme bien para que al morir poder estar contigo, gracias por regalarme los días más felices de mi vida, por dormir conmigo en mí pecho. Tu mamá te escribió lo siguiente, en nombre de los dos:

Reíste aquel día cuando fue nuestra despedida  
A tu papi lo miraste como diciendo, sé que llegaste  
Uniste nuestras almas para siempre con Jesús  
Lo buscamos y tú nos los mostraste.

Realizaste nuestro sueño más anhelado de ser padres  
Amamos cada instante de nuestras vidas contigo  
Mirándonos estas, montado en una nube junto a Jesús  
Orando esperamos el día en que nos volvamos a ver frente a frente  
Nada nos va a separar otra vez.

Despertarme de este sueño quisiera, duele mucho la realidad  
Extrañándote interminablemente me la paso diariamente.

Jesús tu que lo tienes, dame el consuelo y fuerza para  
Esperar en ti, ese día en que me encuentre contigo  
Sostenme en tu amor y enséñame a ser puro como él  
Unge mi corazón con esperanza  
Saca todo rencor y confusión, conviértelos en amor al prójimo.

A mis padres ELDA RAMÍREZ DE REYES y PABLO NOE REYES AGREDA, por regalarme la vida y ser mi refugio en todos los momentos de mi vida.

A mi esposa AURA LA ROSA MORALES, por ser parte fundamental de este logro, TE AMO OSA.

A mis hermanos PETER, EDITH y MIGUEL, por sus consejos.

*Raúl E. Reyes R.*

## **RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS**

A mis amigos de la Universidad, Alejandro, Darihelen, Freddy, Deahnis, Gabriel, Jhonny, Jhon, Carlos, Yaneth, Alonso, Osman, Servando, Román.

A mis amigos de vida Yobell, Ismael, José Leonardo Montero.

A mis Tutores, Prof. José G. Herrera y Prof. Julio Molina, por su ayuda en la elaboración de la tesis.

A los Ingenieros del Ministerio de Energía y Petróleo Enrique Pérez, Richard Ardila, Ricardo Arias, Julio Ruiz, Yubrinny Ponce, Marahaiza Luces, Hugo Ocando, Yelitza Moreno por su valiosa colaboración en la elaboración de este trabajo.

A mis vecinos Rafaela, Wilfredo, Daneris, Manolo, Señor y Señora Ezparragoza, Señora Mirna, Carmen, Nelly y Gustavo; por tenderme la mano en momentos difíciles.

A la secretaria Liliana Yanez y a la Licenciada Magda por sus consejos, sonrisas y hacer mis días de pasantía agradables.

A mis suegros Teresa Morales y Algimiro La Rosa.

Si me faltase alguien por incluir, les pido disculpa.

**Reyes R., Raúl E.**

## **ESTUDIO DE LAS PERTURBACIONES DE LA ONDA DE TENSIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**Profesor Guía: Ing. Julio Molina. Tutor Industrial: Ing. José Herrera Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Potencia. Institución: Ministerio de Energía y Petróleo, 2006, 102 h. + Anexos.**

**Palabras Claves:** Red de Distribución de Energía Eléctrica; Perturbaciones Electromagnéticas; Indicadores de Calidad, Fluctuaciones Rápidas de Tensión (flicker); Huecos de Tensión (sags); Incrementos de Tensión (swell).

**Resumen.** EL estudio de las perturbaciones de la onda de tensión específicamente Fluctuaciones Rápidas de Tensión (Flicker), Huecos de Tensión (Sags) e Incrementos de Tensión (Swell) en la red de distribución de energía eléctrica es un trabajo que surge por la necesidad de identificar y evaluar la pertinencia de la utilización de indicadores para su control, en las redes de distribución venezolanas mediante la incorporación de los mismos en las Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad (NCSDE), según los requerimientos del ente Regulador del Servicio Eléctrico en Venezuela (Ministerio de Energía y Petróleo – MENPET). Para fundamentar los posibles indicadores, inicialmente se realiza un estudio de las definiciones, características, causas y efectos de las perturbaciones electromagnéticas en estudio. Posteriormente se analizan los indicadores de calidad utilizados por empresas de distribución eléctrica e instituciones, a nivel mundial. Entre los resultados obtenidos, se destaca, que el indicador correspondiente a las Fluctuaciones Rápidas de Tensión (Pst), debe seguir siendo considerado en las NCSDE. En el caso de los Hueco de Tensión e Incrementos de Tensión, no se propone un indicador que los evalúe, debido a que no existe un estándar internacional que lo respalde. Sin embargo, existen distintos indicadores de instituciones particulares que permiten evaluar sus comportamientos, requiriéndose la realización de mediciones que permitirían determinar y ajustar el más conveniente al caso venezolano.

## ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS .....	vi
RESUMEN.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	3
OBJETIVOS DE LA TESIS .....	3
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Objetivo General .....	4
1.3 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Delimitación de la investigación.....	4
CAPÍTULO II .....	5
METODOLOGÍA .....	5
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Calidad de Potencia Eléctrica.....	7
2.2 Compatibilidad Electromagnética (CEM).....	9
2.3 Perturbación electromagnética .....	10
2.4 Clasificación de los fenómenos electromagnéticos.....	10
2.5 Antecedentes de las fluctuaciones rápidas de tensión, huecos de tensión e incrementos de tensión.....	11
CAPÍTULO III.....	14
FLUCTUACIONES RÁPIDAS DE TENSIÓN .....	14
3.1 Definición de las fluctuaciones rápidas de tensión .....	14
3.2 Características de las fluctuaciones rápidas de tensión.....	15
3.2.1 Magnitud de las fluctuaciones rápidas de tensión.....	15
3.2.2 Duración de las fluctuaciones rápidas de tensión .....	16
3.2.3 Contenido espectral de las fluctuaciones rápidas de tensión .....	17
3.3 Fuentes de fluctuaciones rápidas de tensión .....	17
3.3.1 Arranque y paradas de motores.....	18
3.3.2 Hornos eléctricos.....	19
3.3.2.1 Horno eléctrico de resistencia .....	19
3.3.2.2 Horno eléctrico de arco .....	19
3.3.2.2.1 Período de fundición .....	20
3.3.2.2.2 Período de refinamiento .....	20
3.3.3 Soldadores eléctricos.....	20
3.3.4 Flicker no producido por fluctuaciones rápidas de tensión.....	21
3.4 Efectos de las fluctuaciones rápidas de tensión. ....	22

3.4.1 Lámparas.....	22
3.4.1.1 Lámpara incandescente .....	22
3.4.1.2 Lámpara de vapor de sodio (baja presión y alta presión) y vapor de mercurio alta presión.....	23
3.4.1.3 Lámparas fluorescentes.....	23
3.4.2 Resto de cargas: .....	23
3.5 Clasificación de equipos eléctricos por cargas Residenciales, Comerciales e Industriales .....	26
3.5.1 Cargas Residenciales.....	27
3.5.2 Cargas Comerciales.....	27
3.5.3 Cargas Industriales.....	28
3.6 Indicadores de calidad de las fluctuaciones rápidas de tensión .....	28
3.6.1 Flicker Instantáneo .....	29
3.6.2 Dosis de Flicker .....	30
3.6.3 Flickérmetro .....	30
3.6.4 Indicadores de calidad alternativos de las fluctuaciones rápidas de tensión .....	34
CAPÍTULO IV.....	37
HUECO DE TENSIÓN.....	37
4.1 Definición del hueco de tensión.....	37
4.2 Características del hueco de tensión .....	38
4.2.1 Magnitud del hueco de tensión .....	39
4.2.1.1 Normativa de la magnitud del hueco de tensión.....	39
4.2.1.2 Tensión eficaz .....	40
4.2.1.3 Componente fundamental .....	42
4.2.2 Duración del hueco de tensión .....	43
4.2.2.1 Normativa de duración típica del hueco de tensión .....	43
4.2.2.2 Medición de la duración del hueco de tensión .....	44
4.2.3 Nuevos enfoques característicos .....	45
4.2.3.1 Punto de inicio del hueco de tensión.....	45
4.2.3.2 Punto de recuperación del hueco de tensión .....	46
4.2.3.3 Curvas de susceptibilidad.....	46
4.2.3.4 Clasificación de los huecos de tensión.....	49
4.3 Fuentes de huecos de tensión .....	50
4.3.1 Fuentes de huecos de tensión debida a la red de distribución y transmisión .....	50
4.3.2 Fuentes de huecos de tensión debida a las cargas de la red .....	53
4.4 Efectos del hueco de tensión .....	54
4.4.1 Motores de inducción.....	55
4.4.2 Motor sincrónico .....	57
4.4.3 Equipos de computación .....	57
4.4.4 Lámparas .....	58
4.4.4.1 Lámparas incandescentes y fluorescentes.....	58
4.4.4.2 Lámparas de alta intensidad de descarga (H.I.D.) .....	59
4.4.5 Variadores de Velocidad - ASD Adjustable Speed Drive .....	60

4.4.6 Relés auxiliares .....	61
4.4.7 Equipos domésticos.....	62
4.4.8 Controlador Lógico Programable (PLC).....	63
4.4.9 Contactores.....	64
4.4.10 Microprocesadores .....	65
4.4.11 Equipos de generación de calor a base de resistencia .....	66
4.4.12 Equipos en general .....	66
4.5 Clasificación de equipos eléctricos por cargas Residenciales, Comerciales e Industriales.....	68
4.5.1 Cargas Residenciales.....	68
4.5.2 Cargas Comerciales.....	69
4.5.3 Cargas Industriales:.....	69
4.6 Indicadores de calidad del hueco de tensión.....	69
4.6.1 Sag Score.....	71
4.6.2 SARFI .....	72
4.6.3 RF .....	74
4.6.4 ESKOM Sudáfrica (NRS 048 – 2).....	74
CAPÍTULO V .....	78
INCREMENTO DE TENSIÓN .....	78
5.1 Definición de los incrementos de tensión .....	78
5.2 Características de los incrementos de tensión.....	79
5.2.1 Magnitud del incremento de tensión.....	80
5.2.1.1 Normativa de magnitud de tensión típica del incremento de tensión .....	80
5.2.1.2 Tensión eficaz .....	81
5.2.1.3 Componente fundamental .....	81
5.2.2 Duración del incremento de tensión.....	82
5.3 Fuentes de los incrementos de tensión .....	83
5.3.1 Desconexión de grandes bloques de carga.....	83
5.3.2 Fallas monofásicas a tierra en el sistema eléctrico.....	83
5.4 Efectos de los incrementos de tensión .....	83
5.4.1 Lámparas incandescentes.....	83
5.4.2 Equipos de computación .....	84
5.4.3 Motor de inducción .....	85
5.4.4 Motor sincrónico.....	86
5.5 Clasificación de equipos eléctricos por cargas Residenciales, Comerciales e Industriales.....	86
5.5.1 Cargas Residenciales.....	86
5.5.2 Cargas Comerciales.....	87
5.5.3 Cargas Industriales .....	88
5.6 Indicadores de calidad de los incrementos de tensión .....	88
5.6.1 SARFI .....	89
5.6.2 $\Delta V / V$ .....	90
CONCLUSIONES .....	91
RECOMENDACIONES.....	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

BIBLIOGRAFÍA .....	98
GLOSARIO .....	101
[Anexo Nro. 1] .....	104
[Anexo Nro.2] .....	105

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla Nro. 2.1.</b> Clasificación de los principales fenómenos causados por perturbaciones electromagnéticas.....	11
<b>Tabla Nro. 3.1.</b> Característica de las magnitudes típicas de las fluctuaciones rápidas de tensión.....	16
<b>Tabla Nro. 3.2.</b> Característica en tiempo de las fluctuaciones rápidas de tensión.....	16
<b>Tabla Nro. 3.3.</b> Característica en frec. de las fluctuaciones rápidas de tensión...	17
<b>Tabla Nro. 3.4.</b> Fuentes de flicker distintas a fluctuaciones rápidas de tensión...	21
<b>Tabla Nro. 3.5.</b> Clasificación de lámparas según: tipo, potencia y comportamiento.....	24
<b>Tabla Nro. 3.6.</b> Equipos eléctricos típicos en cargas residenciales.....	27
<b>Tabla Nro. 3.7.</b> Equipos eléctricos típicos en cargas comerciales.....	27
<b>Tabla Nro. 3.8.</b> Equipos eléctricos típicos en cargas industriales.....	28
<b>Tabla Nro. 4.1.</b> Magnitudes típicas del hueco de tensión.....	40
<b>Tabla Nro. 4.2.</b> Duración típica del hueco de tensión.....	44
<b>Tabla Nro. 4.3.</b> Causas de huecos de tensión en sistemas de distribución.....	51
<b>Tabla Nro. 4.4.</b> Tiempo de operación de interruptores.....	52
<b>Tabla Nro. 4.5.</b> Efecto general del hueco de tensión sobre las características del motor de inducción.....	56
<b>Tabla Nro. 4.6.</b> Tensión y duración de funcionamiento de Equipos eléctricos...	67
<b>Tabla Nro. 4.7.</b> Mínima tensión de funcionamiento de equipos eléctricos.....	67
<b>Tabla Nro. 4.8.</b> Equipos eléctricos típicos en cargas residenciales.....	68
<b>Tabla Nro. 4.9.</b> Equipos eléctricos típicos en cargas comerciales.....	69
<b>Tabla Nro. 4.10.</b> Equipos eléctricos típicos en cargas industriales.....	70
<b>Tabla Nro. 4.11.</b> Niveles de compatibilidad.....	75
<b>Tabla Nro. 4.12.</b> Niveles de compatibilidad para distintos niveles de tensión...	76
<b>Tabla Nro. 4.13.</b> Límites de números de huecos de tensión por año para niveles de tensión y características del sistema.....	76
<b>Tabla Nro. 5.1.</b> Comparación en porcentaje de perturbaciones electromagnéticas.....	79
<b>Tabla Nro. 5.2.</b> Magnitudes típicas del incremento de tensión.....	80
<b>Tabla Nro. 5.3.</b> Duración típica del incremento de tensión.....	82
<b>Tabla Nro. 5.4.</b> Efecto de variaciones de voltaje sobre lámparas incandescente.	85
<b>Tabla Nro. 5.5.</b> Efecto general del incremento de tensión sobre las características del motor de inducción.....	86
<b>Tabla Nro. 5.6.</b> Equipos eléctricos típicos en cargas residenciales.....	87
<b>Tabla Nro. 5.7.</b> Equipos eléctricos típicos en cargas comerciales.....	88
<b>Tabla Nro. 5.8.</b> Equipos eléctricos típicos en cargas industriales.....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura Nro. 2.1.</b> Curva de flicker.....	13
<b>Figura Nro. 3.1.</b> Fluctuaciones rápidas de tensión cíclica.....	15
<b>Figura Nro. 3.2.</b> Representación gráfica de fuente, elementos de la red y carga.....	18
<b>Figura Nro. 3.3.</b> Curva de sensibilidad.....	29
<b>Figura Nro. 3.4.</b> Representación de Flickermetro por bloques.....	31
<b>Figura Nro. 4.1.</b> Voltaje eficaz e instantáneo de un hueco de tensión causado por una falla monofásica.....	37
<b>Figura Nro. 4.2.</b> Ejemplo típico de un hueco de tensión.....	39
<b>Figura Nro. 4.3.</b> Hueco de tensión debido a falla monofásica.....	41
<b>Figura Nro. 4.4.</b> Hueco de tensión en valores eficaces.....	42
<b>Figura Nro. 4.5.</b> Magnitud de la componente fundamental.....	43
<b>Figura Nro. 4.6.</b> Muestreo de tensión eficaz para cada ciclo.....	45
<b>Figura Nro. 4.7.</b> Punto de inicio del hueco de tensión ( $\Phi_i$ ).....	45
<b>Figura Nro. 4.8.</b> Punto de recuperación del hueco de tensión ( $\Phi_r$ ).....	46
<b>Figura Nro. 4.9.</b> Curva CBEMA.....	47
<b>Figura Nro. 4.10.</b> Curva ITIC.....	47
<b>Figura Nro. 4.11.</b> Curva SEMI (Grupo internacional de equipos y materiales de semiconductor) – 1998.....	48
<b>Figura Nro. 4.12.</b> Clasificación del hueco de tensión según el tipo de falla.....	49
<b>Figura Nro. 4.13.</b> Estudio sobre típicas fuentes de huecos de tensión.....	52
<b>Figura Nro. 4.14.</b> Hueco de tensión debido a energización de transformador... ..	53
<b>Figura Nro. 4.15.</b> Armónicos debido a falla.....	53
<b>Figura Nro. 4.16.</b> Hueco de tensión debido al arranque de un motor.....	54
<b>Figura Nro. 4.17.</b> Comportamiento de la velocidad del motor de inducción en presencia de huecos de tensión.....	55
<b>Figura Nro. 4.18.</b> Vida del aislamiento del motor en función de variaciones de temperatura.....	57
<b>Figura Nro. 4.19.</b> Efectos de la variación de tensión sobre lámparas incandescentes y fluorescentes.....	58
<b>Figura Nro. 4.20.</b> Efectos de la variación de tensión sobre lámparas de descarga.....	59
<b>Figura Nro. 4.21.</b> Estructura típica de un variador de velocidad.....	60
<b>Figura Nro. 4.22.</b> Curva de susceptibilidad de los variadores de velocidad.....	61
<b>Figura Nro. 4.23.</b> Relé enchufable de pequeña potencia.....	61
<b>Figura Nro. 4.24.</b> Curva de susceptibilidad de los relés auxiliares.....	62
<b>Figura Nro. 4.25.</b> Curvas de susceptibilidad de equipos domésticos.....	62
<b>Figura Nro. 4.26.</b> Curva de susceptibilidad del PLC.....	64

<b>Figura Nro. 4.27.</b> Descripción de un contactor.....	64
<b>Figura Nro. 4.28.</b> Curva de susceptibilidad del contactor.....	65
<b>Figura Nro. 4.29.</b> Curva de susceptibilidad del microprocesador.....	66
<b>Figura Nro. 4.30.</b> Categorías de los huecos de tensión S, T, X, Y y Z.....	75
<b>Figura Nro. 5.1.</b> Voltaje eficaz e instantáneo de un Sag causado por una falla monofásica.....	78
<b>Figura Nro. 5.2.</b> Comportamiento de la Lámpara incandescente a variaciones de tensión	84

## **SIGLAS**

**ASD:** Adjustable Speed Driver.

**CBEMA:** Computer and Business Equipment Manufacturers Association.

**CREG:** Comisión de Regulación de Energía y Gas (Colombia).

**EDELCA:** Electrificación del Caroní.

**ENELVEN:** Energía Eléctrica de Venezuela.

**ENRE:** Ente Regulador de la Electricidad (Argentina).

**EPRI:** Electric Power Research Institute.

**ESKOM:** South African Electricity Supply Company.

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers.

**IEC:** International Electrotechnical Comisión.

**ITIC:** Information Technology Industry Council.

**LOSE:** Ley Orgánica del Sector Eléctrico.

**MENPET:** Ministerio de Energía y Petróleo.

**NCSDE:** Norma de Calidad de Servicio de Distribución de Electricidad.

**PLC:** Programmable Logic Controller.

**SARFI:** System Average RMS Variation Frequency Index

**SEMI:** Semiconductor Equipment and Materials Institute.

**UCV:** Universidad Central de Venezuela.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la utilización de equipos sensibles a perturbaciones en la onda de tensión ha ido en aumento, principalmente por las ventajas que presentan (costo, rendimiento, etc), y se demuestra con el uso creciente en las industrias (PLC, ASD, etc), comercios y residencias (equipos de iluminación, PC, etc). La utilización de estos equipos que además de ser sensibles a las perturbaciones en la onda de tensión, son fuentes de las mismas, es decir, incorporan a la red gran cantidad de alteraciones que afectan el buen funcionamiento del sistema.

En este estudio se abarcarán tres perturbaciones electromagnéticas definidas por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en la Norma std. 1159, son: Fluctuaciones Rápidas de Tensión (Flicker), Huevo de Tensión (Sags) e Incremento de Tensión (Swell). Actualmente, las Fluctuaciones Rápidas de Tensión son evaluadas en Venezuela por medio del indicador denominado Índice de Severidad de Corta Duración (Pst), para el control de la Calidad del Producto Técnico, establecido en el Artículo 14 de las Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad (NCSDE). El Pst se basa en el efecto del parpadeo de las lámparas incandescentes (flicker) sobre la sensibilidad humana, lo que ha originado la utilización de otros tipos de lámparas (lámparas fluorescentes), por presentar tecnología avanzada en sus componentes, que disminuyen el efecto del Flicker y proporciona mejor servicio a un bajo consumo.

En este orden de ideas, existen perturbaciones de la onda de tensión establecidas en las normas internacionales IEEE e IEC como los Huecos de Tensión (sags) y los Incrementos de Tensión (swell), que afectan la calidad de la onda de tensión que suministran las empresas distribuidoras de energía eléctrica, sin embargo no se definen posibles indicadores y límites permisibles que permitan evaluar estos fenómenos. A pesar de ello, existen empresas a nivel mundial que manejan

indicadores que de una manera específica cuantifican estas perturbaciones de la onda de tensión, estas por su relevancia se asumen como objeto de estudio en el presente trabajo.

Dado el desconocimiento del impacto y la cuantificación del efecto sobre las redes venezolanas, surge la necesidad en el Ministerio de Energía y Petróleo (MENPET) de desarrollar el presente trabajo enfocado en el estudio de las Fluctuaciones Rápidas de Tensión (Flicker), Huecos de Tensión (Sags) e Incrementos de Tensión (Swell), estimando que de los resultados obtenidos, se puedan plantear indicadores que permitan reflejar de manera exacta las características de las perturbaciones y sus efectos sobre los equipos eléctricos conectados a las redes eléctricas.

En el marco del desarrollo, este estudio se encuentra estructurado en cinco capítulos. El Capítulo I, formula y justifica el problema, además presenta los objetivos y los clasifica. El Capítulo II, contiene la base metodológica empleada y aspectos teóricos que mejoran la comprensión del estudio. Los Capítulos III, IV y V, presentan las perturbaciones: Fluctuaciones Rápidas de Tensión (Flicker), Huecos de tensión (Sags) e Incrementos de Tensión (Swell) respectivamente, mediante un desarrollo teórico que engloba definiciones, características, causas, efectos e indicadores de calidad necesarios para evaluar estos fenómenos.

# CAPÍTULO I

## OBJETIVOS DE LA TESIS

### 1.1 Planteamiento del Problema

El Índice de Severidad (Pst), es un indicador de calidad de energía eléctrica, basado en el efecto de las fluctuaciones rápidas de tensión sobre lámparas incandescentes, tecnología que está siendo desplazada por equipos de iluminación modernos; por lo tanto, es necesario realizar un estudio enfocado en la utilización del indicador Pst para la evaluación de las fluctuaciones rápidas de tensión. Las Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad (NCSDE) sólo establece las fluctuaciones rápidas de tensión y distorsión armónica como perturbación de la onda de tensión a objeto de control, existiendo en las normas del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) otras perturbaciones tales como: el hueco de tensión (sag) y el incremento de tensión (swell) que afectan las características físicas de la onda de tensión y corriente, las cuales serán objeto de estudio en este trabajo para evaluar el impacto real sobre las redes de distribución eléctrica, y determinar la pertinencia de su inclusión en las NCSDE.

Por lo planteado anteriormente, surge la necesidad de parte del Ministerio de Energía y Petróleo (MENPET) en desarrollar el presente trabajo, enfocado al estudio de las perturbaciones de la onda de tensión Fluctuaciones Rápidas de Tensión (flicker), Huecos de Tensión (sags) e Incrementos de Tensión (swell) en la red de distribución de energía eléctrica. La finalidad de este estudio es establecer criterios fundamentados en una investigación documental que permita definir y proponer otros indicadores para las NCSDE y de esta manera, garantizar un suministro de electricidad con calidad y al menor costo, según lo establecido en el artículo 2 de la Ley Orgánica del Servicio Eléctrico (LOSE).

## **1.2 Objetivo General**

Estudiar y caracterizar los efectos de las perturbaciones de la onda de tensión: Fluctuaciones Rápidas de Tensión, Huecos de Tensión e Incrementos de Tensión en la red de distribución de energía eléctrica y definir los indicadores para su evaluación.

## **1.3 Objetivos Específicos**

- Definir y caracterizar las Fluctuaciones Rápidas de Tensión, Huecos de Tensión e Incrementos de Tensión.
- Identificar las causas de las Fluctuaciones Rápidas de Tensión, Huecos de Tensión e Incrementos de Tensión en las redes de distribución de energía eléctrica.
- Determinar como afectan las Fluctuaciones Rápidas de Tensión, Huecos de Tensión e Incrementos de Tensión en la compatibilidad electromagnética de los equipos de los usuarios de servicio residencial, comercial e industrial.
- Establecer indicadores de calidad para evaluar las Fluctuaciones Rápidas de Tensión, Huecos de Tensión e Incrementos de Tensión.

## **1.4 Delimitación de la investigación**

**Tipo de Investigación:** Documental.

**Delimitación de Recurso:** Se consultaron normas técnicas de la IEEE, IEC, NRS, ANSI, EN y COVENIN, relacionadas con las fluctuaciones rápidas de tensión (flicker), huecos de tensión (sags) e incrementos de tensión (swell) debido al costo que representan.

**Delimitación de tiempo:** Desde el 08 de Agosto de 2005 al 27 de Enero de 2006.

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA

El desarrollo de esta investigación se divide en cuatro fases para facilitar el logro de los objetivos planteados, las cuales se describen a continuación:

**(a) Fase I: Búsqueda y clasificación de la información.**

La primera fase se basa en la búsqueda y clasificación de trabajos nacionales e internacionales relacionados con temas sobre las perturbaciones electromagnéticas, específicamente fluctuaciones rápidas de tensión, huecos de tensión (sags) e incrementos de tensión (swell); además de consultar diversas normas donde se clasifican y caracterizan dichas perturbaciones electromagnéticas.

**(b) Fase II: Análisis de la información.**

En la segunda fase se procede al procesamiento de la información obtenida. Se realiza una reseña histórica sobre las perturbaciones electromagnéticas en la onda de tensión bajo estudio, específicamente fluctuaciones rápidas de tensión, huecos de tensión e incrementos de tensión sobre las redes eléctricas a nivel del sistema de distribución eléctrica. Luego se realizan análisis de los distintos puntos de vistas con respecto a las definiciones, caracterización y distintas técnicas de medición para las perturbaciones electromagnéticas. Seguidamente, se procede a la documentación de indicadores de las fluctuaciones rápidas de tensión y sobre los distintos indicadores de calidad de los huecos e incrementos de tensión.

**(c) Fase III: Determinación de las causas y efectos en la carga, por las perturbaciones electromagnéticas.**

En la fase III se procede al estudio de las causas y efectos de las perturbaciones electromagnéticas específicamente fluctuaciones rápidas de tensión, huecos de tensión e incremento de tensión en cargas típicas residenciales, comerciales e industriales con respecto a la compatibilidad electromagnética.

**(d) Fase IV: Propuesta de indicadores.**

En la fase IV se realiza el estudio sobre propuestas de empresas de distribución de electricidad a nivel nacional e internacional y propuestas realizadas por instituciones internacionales, sobre indicadores de calidad de perturbaciones electromagnéticas específicamente fluctuaciones rápidas de tensión, huecos de tensión e incrementos de tensión. Como última parte de esta fase se realiza el análisis de los planteamientos anteriores.

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 Calidad de Potencia Eléctrica

El término Calidad de Potencia Eléctrica se define como, “*Las características físicas de las señales de tensión y corriente, para un tiempo dado y un lugar determinado, que tiene el propósito de satisfacer necesidades del usuario*”, tal como lo indica A. Abreu, donde sugiere una estructura de definiciones [Anexo Nro 1] para entender lo anteriormente expuesto. Dado que en los últimos años se ha incrementado el uso de equipos que pueden ser generadores de fenómenos electromagnéticos o ser susceptibles a estos fenómenos, principalmente por los componentes electrónicos que poseen, el interés por la Calidad de Potencia Eléctrica en los últimos años ha ido en aumento.

En Venezuela, se aprecia la falta de leyes que regulen el servicio eléctrico venezolano para principios de la década del 90, contrario a lo observado en diversos países del mundo, como por ejemplo Argentina , donde se comenzaban a regularizar, el servicio eléctrico a nivel de distribución mediante la promulgación de leyes, reglamentos y normas; fenómeno que en el año 1999 comienza a ser asumido por el estado venezolano, donde se promulga la Ley de Servicio Eléctrico (LSE) y dando comienzo a la creación del Marco Legal en Venezuela, a continuación se presenta de manera cronológica las promulgaciones legales posteriores a la LSE:

- (a) Reglamento General de la Ley del Servicio Eléctrico. (GO 5510, 13 de diciembre 2000).
- (b) Ley Orgánica del Servicio Eléctrico (GO 5568, 31 de diciembre 2001).  
Sustituyendo a la Ley de Servicio Eléctrico.
- (c) Reglamento de Servicio. (GO 37825, 25 de noviembre de 2003).
- (d) Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad. (GO 38006, 12 de agosto de 2004).

En el artículo 2 de la LOSE, se hace referencia al “deber del Estado en velar y garantizar la calidad del suministro de electricidad, elaborando los Reglamentos y Normas Técnicas” mencionadas anteriormente. La Norma de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad (NCSDE), establece los niveles de calidad que deben cumplir las empresas distribuidoras de electricidad en el entorno técnico y comercial. Con respecto al entorno comercial o Calidad de Servicio Comercial, la NCSDE se enfoca en el nivel de cumplimiento sobre el tiempo establecido, con respecto a los requerimientos y reclamos de los usuarios. En el área de Calidad de Producto Técnico se enfoca al nivel de cumplimiento de los valores aceptables establecidos con respecto a los niveles de tensión del fluido eléctrico y a la forma de onda de la tensión suministrada por la empresa distribuidora, así como de las interrupciones de servicio; y en el área de Calidad de Servicio Técnico se refiere a la continuidad del servicio o control de interrupciones del servicio eléctrico para con los usuarios.

La definición adoptada por el marco legal Venezolano, específicamente por las NCSDE con respecto a la Calidad de Producto Técnico es: “El grado de cumplimiento de los valores admisibles establecidos en esta Resolución, determinado por mediciones realizadas de los niveles de tensión del fluido eléctrico y la forma de onda de la tensión suministrada por la Distribuidora” [1], siendo esta definición coherente con la definición de la Calidad de Potencia Eléctrica analizada anteriormente.

Dentro de los aspectos considerados en la Calidad del Producto Técnico de las NCSDE están las perturbaciones en la onda de tensión (artículo 7 NCSDE), específicamente las Fluctuaciones Rápidas de Tensión y la Distorsión Armónica de Tensión (artículo 14 NCSDE). En el artículo N° 15 de las NCSDE se establece el Índice de Severidad (Pst) como parámetro a utilizar para cuantificar la Fluctuación Rápida de Tensión, siendo  $Pst=1$  el umbral de irritabilidad con respecto a la variación máxima de luminancia que puede ser soportada por el ser humano. Adicionalmente indica que el valor de Pst no podrá exceder el umbral por más del 5% del período de

medición para puntos de medición en baja, media y alta tensión, para no ser sancionado tal como lo establece la NCSDE.

La Calidad del Producto Técnico de las NCSDE como se describió anteriormente solo abarca dos perturbaciones electromagnéticas de la onda tensión: Fluctuaciones rápidas de tensión y la distorsión armónica; sin embargo, existen otras perturbaciones electromagnéticas que afectan las características físicas de la onda de tensión y corriente que no son consideradas, es por ello que el presente trabajo se enfocará en el estudio de las fluctuaciones rápidas de tensión, huecos de tensión e incrementos de tensión, con la finalidad de establecer criterios fundamentados en una investigación documental que permita definir y proponer otros indicadores que pudieran ser considerados en las NCSDE, tal como se describió en el planteamiento del problema.

## **2.2 Compatibilidad Electromagnética (CEM)**

La compatibilidad electromagnética está definida según la *“Práctica recomendada para el monitoreo de la Calidad de Potencia”* IEEE 1159 – 1995, como: *“La capacidad de un dispositivo, equipo o sistema de funcionar satisfactoriamente en su ambiente electromagnético sin introducir disturbios electromagnéticos intolerables a cualquier otro equipo que se encuentre en su ambiente”*. Los disturbios electromagnéticos indicados en la definición son señales que afectan, por radiación o conducción, a las características físicas de la onda de tensión y corriente, y por ende afectan el buen funcionamiento de los equipos eléctricos. Es por ello, que tanto en Europa como en los Estados Unidos, se han desarrollado niveles de compatibilidad electromagnética para perturbaciones conducidas y radiadas con respecto a los equipos eléctricos, los cuales se han tomado como criterios de diseño. Cuando se habla de niveles de compatibilidad electromagnética nos referimos a su definición: *“máximo grado de perturbación, que no debe afectar al correcto funcionamiento de cualquier aparato o equipo”*[2].

### 2.3 Perturbación electromagnética

Las perturbaciones electromagnéticas son “*Cualquier fenómeno electromagnético que pueda degradar o afectar el desempeño de un dispositivo, equipo o sistema*” [2]. Estos fenómenos electromagnéticos son producidos por distintas causas que serán analizadas en los capítulos posteriores.

### 2.4 Clasificación de los fenómenos electromagnéticos

La Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC), ha establecido en la norma IEC 61000-2-5 una clasificación de los principales fenómenos que causan las perturbaciones electromagnéticas y se encuentran también referenciada en la norma del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) std. 1159-1995 (ver tabla 2.1). Esta clasificación se basa en dos características: la frecuencia y el medio de propagación de los fenómenos electromagnéticos.

En la tabla 2.1 el IEEE Std. 1159-1995 indica ciertas características de los fenómenos electromagnéticos para frecuencias mayores a 9 kHz los identifica como alta frecuencia, y para frecuencias menores a 9 kHz de baja frecuencia. Otra característica se refiere al medio de propagación tal, las cuales se definen a continuación:

- (a) **Conducidas:** son los fenómenos electromagnéticos que se propagan por medio del conductor.
  
- (b) **Radiadas:** son los fenómenos electromagnéticos que se propagan por medio de campos electromagnéticos y electroestáticos.

Un aspecto importante de resaltar sobre la tabla 2.1, es que las perturbaciones electromagnéticas como fluctuaciones rápidas de tensión, huecos

de tensión e incrementos de tensión se encuentran ubicadas en la categoría de fenómenos conducidos de baja frecuencia, y a diferencia (valga la aclaratoria) de los fenómenos transitorios, estos están en la categoría de conducidos de alta frecuencia, diferenciándola de las perturbaciones electromagnéticas a estudiar.

**Tabla 2.1. Clasificación de los principales fenómenos causados por perturbaciones electromagnéticas. [1]**

<b>Fenómenos conducidos de baja frecuencia.</b>	Armónicos, interarmónicos.
	Sistemas de señales (portadora de la línea de energía).
	Fluctuaciones de voltaje
	Interrupciones y huecos de voltaje
	Desbalance de voltaje
	Variaciones de frecuencia de alimentación
	Voltajes inducidos de baja frecuencia
	Corriente directa (DC) en redes de Corriente alterna (AC).
<b>Fenómeno radiado de baja frecuencia.</b>	Campos magnéticos.
	Campos eléctricos.
<b>Fenómeno conducido de alta frecuencia</b>	Ondas de tensiones y corrientes inducidas.
	Transitorio unidireccional.
	Transitorio oscilatorio
<b>Fenómeno radiado de alta frecuencia</b>	Campos magnéticos.
	Campos eléctricos.
	Campos electromagnéticos.
	Continuous wave
	Transitorios
<b>Fenómeno de descarga electrostática</b>	-
<b>Pulso electromagnético nuclear.</b>	-

## 2.5 Antecedentes de las fluctuaciones rápidas de tensión, huecos de tensión e incrementos de tensión

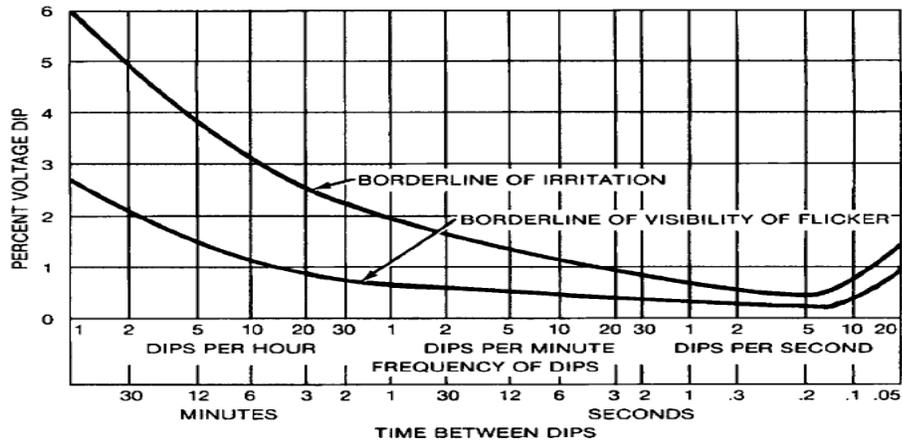
### (a) Fluctuaciones rápidas de tensión

Las fluctuaciones rápidas de tensiones se encuentran íntimamente relacionadas con las fluctuaciones de flujo luminoso de las lámparas, también

conocido como “flicker”, es por ello que se comenzará sobre los inicios de los estudios del flicker hasta abordar las fluctuaciones rápidas de tensión.

En 1891 se selecciona 60 Hz como frecuencia estándar en la industria de la energía eléctrica de Norteamérica, debido principalmente a la oscilación de la intensidad luminosa (flicker) en las lámparas de arco “open – type”. En cambio en Europa se tomó como frecuencia estándar 50 Hz debido a la utilización de otro tipo de lámpara de arco “enclosed – type”, dando así comienzo al estudio del Flicker, pero en este caso debido a la frecuencia del sistema eléctrico.

En 1921, la General Electric inicia el estudio del Flicker debido a las fluctuaciones rápidas de tensión en lámparas de 115 voltios de filamento de tungsteno, publicando en 1925 la Curva del Flicker (también llamada curva de sensibilidad), posteriormente es tomada en cuenta como un estándar para el diseño en Norteamérica. Esta curva fue obtenida mediante la exposición de una muestra poblacional a variaciones de flujo luminoso provocado por fluctuaciones de tensión. En 1937 se valida la curva de Flicker, pero es en 1964 cuando se modifica y se publica la curva mostrada en la figura 2.1, en el estándar “*Práctica recomendada para la distribución de la energía eléctrica para plantas industriales (libro rojo)*” IEEE std. 141-1993, tomando como referencia la publicación de la Consolidated Edison de Nueva York y la compañía Westinghouse. La curva de flicker publicada por la IEEE std. 141-1993, indica que la curva fue realizada en función de variaciones cuadradas, y se comporta de manera distinta para variaciones sinusoidales siendo menos sensible para el ojo humano para las mismas condiciones de tensión [3].



**Figura 2.1. Curva de flicker. [4]**

En 1994, el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (siglas en inglés EPRI) y la Asociación Eléctrica Canadiense determinan la existencia en el mercado de lámparas fluorescentes electrónicas, que son más propensas a oscilar al igual que la lámpara incandescente; es por ello, que empresas del área de iluminación comenzaron a realizar mejoras a sus productos con el fin de atenuar este problema, a tal punto, que en los actuales momentos existen lámparas fluorescentes (no la mayoría) que son inmunes a las fluctuaciones rápidas de tensión, debido a la consideración de la curva de Flicker al momento de diseñar sus productos.

### **(b) Huecos de tensión e incrementos de tensión**

Es a partir de la década del noventa cuando se comienza a estudiar estas perturbaciones, debido a la existencia de equipos de medición capaces de registrar los huecos de tensión e incrementos de tensión. Las normas de estandarización internacional han sido publicadas en años recientes, donde sólo especifican las principales características de estas perturbaciones electromagnéticas su definición, niveles de magnitud y muy someramente las causas y efectos. En la actualidad están bajo estudio en distintas instituciones a nivel mundial los indicadores de calidad del hueco de tensión que serán analizadas en este trabajo.

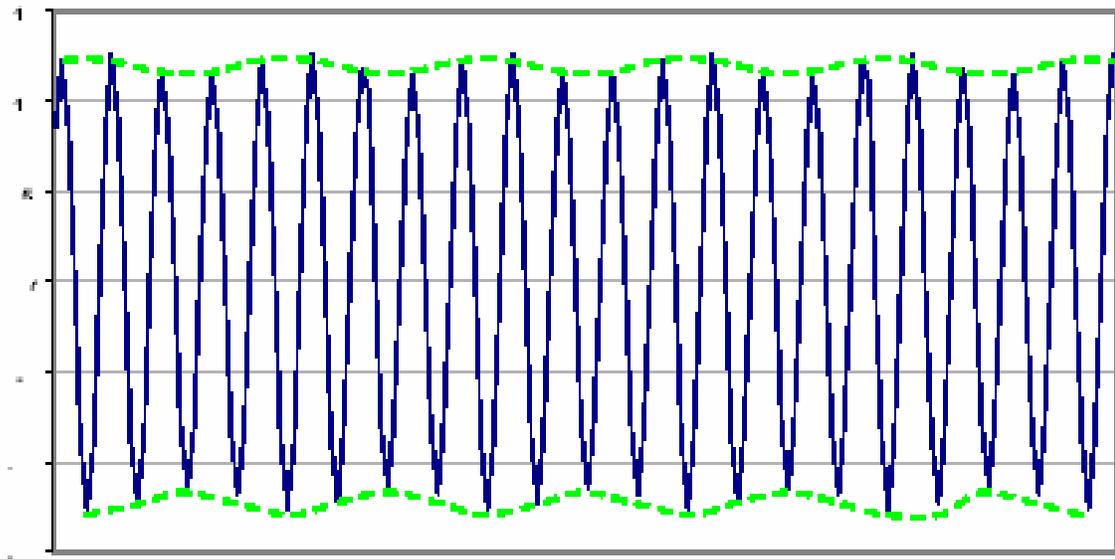
## CAPÍTULO III

### FLUCTUACIONES RÁPIDAS DE TENSIÓN

#### 3.1 Definición de las fluctuaciones rápidas de tensión

Las fluctuaciones rápidas de tensión son variaciones de la envolvente de la onda de tensión (fenómeno de modulación AM), dentro de un rango de variación del 10% con respecto a la tensión nominal. Esta perturbación genera lo que comúnmente se conoce como flicker. Para comprender a cabalidad este concepto, se comenzará por el significado de la palabra flicker que en español significa “parpadeo”, y se asocia con la variación o fluctuación de la luminancia.

En tal sentido, se difiere con la definición asumida por algunos autores que definen fluctuación rápida de tensión y flicker como el mismo fenómeno, asociando dos términos que son causa y efecto para un tipo de perturbación en la onda de tensión. Aunque en la norma IEEE std. 1159 – R2001 especifica que se debe tener cuidado en no confundir estos términos, en las Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad (NCSDE) puede tender a confundir estos términos, debido a que en el artículo 3 específicamente en la sección de definiciones, se especifica las fluctuaciones rápidas de tensión y entre paréntesis aparece la palabra flicker. Una vez aclarado el punto anterior, y según distintas referencias encontradas, el flicker se podría definir como *“La percepción o impresión subjetiva de la variación de la intensidad luminosa de una lámpara”* [2], debido a fluctuaciones rápidas de tensión que son ocasionadas por cargas cuya demanda de potencia no es constante en el tiempo. Las fluctuaciones rápidas de tensión se pueden presentar de manera cíclica o aleatoria, como el ejemplo mostrado en la figura 3.1, donde se representa una fluctuación rápida de tensión cíclica.



**Figura 3.1. Fluctuaciones rápidas de tensión cíclica. [2]**

### **3.2 Características de las fluctuaciones rápidas de tensión**

Este tipo de perturbación electromagnética es la más estudiada a nivel mundial en comparación con los huecos de tensión e incrementos de tensión, en base a la relación de normas existentes a nivel internacional (IEEE e IEC). Entre los contenidos de las normas de la IEEE e IEC destacan el contenido espectral característico, duración típica (características en el tiempo) y la magnitud de voltaje representativo, siendo sólo las fluctuaciones rápidas de tensión, el fenómeno que prevé normas estandarizadas IEEE e IEC para la aplicación de técnicas de prueba y medición con ayuda de un instrumento de medidas llamado flickémetro.

#### **3.2.1 Magnitud de las fluctuaciones rápidas de tensión**

Las norma IEEE std. 141, establece las características de las magnitudes típicas de la fluctuación rápida de tensión, como se muestra en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1. Característica de las magnitudes típicas de las fluctuaciones rápidas de tensión. [5]**

Categorías	Magnitud de voltaje típico
<b>6.0 Fluctuaciones de voltaje</b>	IEEE 1159
	0,1 - 7 %

Las magnitudes descritas en la tabla 3.1, está referida a la envolvente de la onda tensión, es decir a valores pico de tensión. El cálculo de la magnitud de la fluctuación rápida de tensión, se analizará más a fondo en la explicación del flickérmeter (sección 3.6.1). Es importante indicar que la norma europea EN 50160 señala varias clases de fluctuaciones de tensión, siendo la clase D la correspondiente a la estudiada en este trabajo, además indica que las variaciones de tensión son entre  $\pm 10\%$  de la tensión nominal (valor eficaz).

### **3.2.2 Duración de las fluctuaciones rápidas de tensión**

En la tabla 3.2 se muestra la caracterización en el tiempo de la norma IEEE std. 1159, en concordancia con la definición establecida, debido a que la palabra intermitente se relaciona con las características típicas de las fuentes que generan esta perturbación electromagnética, esto quiere decir, que las fuentes de fluctuaciones rápidas de tensión pueden ser de carácter cíclico o aleatorio. La norma europea EN 50160 señala el comportamiento de la onda de tensión referente a fluctuación de tensión como cíclica o aleatoria, coincidiendo con la norma IEEE std. 1159.

**Tabla 3.2. Característica en tiempo de las fluctuaciones rápidas de tensión. [5]**

Categorías	Características en el tiempo
<b>6.0 Fluctuaciones de voltaje</b>	IEEE std. 1159
	Intermitente

### 3.2.3 Contenido espectral de las fluctuaciones rápidas de tensión

La norma IEEE std. 1159 e IEC 61000 – 4 – 15, añade como características de las fluctuaciones rápidas de tensión un contenido espectral típico menor a 25 Hz (ver tabla 3.3), debido a los estudios realizados por el IEEE e instituciones internacionales sobre la Curva de Flicker o de sensibilidad (ver figura 2.1), establecieron que el ojo humano es sensible a variaciones de intensidad lumínica debido a variaciones de la envolvente de tensión caracterizadas por frecuencias menores a 25 Hz.

**Tabla 3.3. Característica en frecuencia de las fluctuaciones rápidas de tensión.**

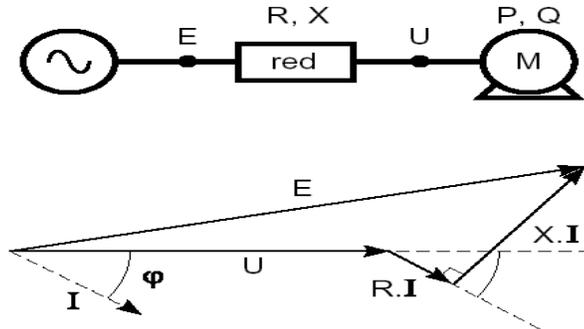
[5]

Categorías	Contenido espectral típico
<b>6.0 Fluctuaciones de voltaje</b>	IEC 61000-4-15
	IEEE std. 141
	< 25 Hz

### 3.3 Fuentes de fluctuaciones rápidas de tensión

Las fluctuaciones rápidas de tensión son generadas por cargas fluctuantes de potencia, estas cargas se pueden clasificar dado su comportamiento cíclico o aleatorio, en: equipos de soldadura, hornos de arco, laminadoras, arranque de motores, entre otras. Una manera representativa de entender este fenómeno es mediante la figura 3.2, donde se representa de manera concentrada la fuente de generación de energía eléctrica (E), los elementos de la red (R,X) y una fuente de fluctuaciones rápidas de tensión. Las características fundamentales de las fuentes de fluctuaciones rápidas de tensión es hacer variar la intensidad de corriente (I) debido a su funcionamiento, implicando variaciones de tensión en los parámetros de la red como se puede observar en el diagrama fasorial. Este fenómeno producirá variaciones

de tensión en los bornes del motor ( $U$ ), asumiendo la tensión del generador constante (con su respectivo margen de tolerancia).



**Figura 3.2. Representación gráfica de fuente, elementos de la red y carga [6]**

Donde:

E: Tensión en los terminales de la fuente de alimentación ó tensión en vacío de la red.

R, X: Impedancia de la red aguas arriba.

U: Tensión de funcionamiento de la red.

P: Potencia activa de la carga bajo la tensión de funcionamiento.

Q: Potencia reactiva de la carga bajo la tensión de funcionamiento.

I: Corriente nominal.

$\cos \varphi$ : Factor de potencia de la carga.

Dada la explicación del comportamiento de las fuentes de fluctuaciones rápidas de tensión y consecuencias sobre la red de energía eléctrica, a continuación se describen de manera más detallada las fuentes típicas de este fenómeno electromagnético.

### 3.3.1 Arranque y paradas de motores

La fuente de perturbación que provoca la mayoría de las fluctuaciones rápidas de tensión son los arranques y paradas de motores. Los motores tienen como característica principal, el consumo de gran cantidad de corriente al momento de su arranque, ya que varía aproximadamente de seis a ocho veces el valor nominal de la

corriente, debido a que el Par debe ser lo suficientemente grande para que gire el rotor. Con respecto a la parada de motores, el hecho de disminuir carga abruptamente, ocasiona incremento de tensión debido a las características inductivas del sistema. Por esta razón, la combinación aleatoria de los arranques y paradas de motores pueden generar fluctuaciones rápidas de tensión.

### **3.3.2 Hornos eléctricos**

Los hornos eléctricos para fundición son una de las cargas industriales que genera mayores fluctuaciones rápidas de tensión y tiene mayor presencia en las industrias. Dentro de los tipos de hornos eléctricos se encuentran: de resistencia y de arco. A continuación se describe su funcionamiento:

#### **3.3.2.1 Horno eléctrico de resistencia**

Este horno esta conformado por un conductor unido a unos electrodos, el cual, debido a la circulación de gran cantidad de corriente produce altas temperaturas de aproximadamente 1000 °C, produciendo la fundición del metal. Actualmente este tipo de horno es utilizado para tratamientos térmicos y muy pocos en el proceso de fundición de los metales.

#### **3.3.2.2 Horno eléctrico de arco**

Este tipo de horno se caracteriza por ser la carga industrial de mayor demanda para la empresa distribuidora, encontrándose de manera monofásica o trifásica. El horno eléctrico de arco se basa en el contacto de electrodos con el metal produciéndose un arco eléctrico (cortocircuito), originándose altas temperaturas provocando la fundición del metal. El funcionamiento de este tipo de horno eléctrico se divide en dos períodos, descritos a continuación:

#### **3.3.2.2.1 Período de fundición**

En este período se generan las fluctuaciones rápidas de tensión, debido al comportamiento aleatorio del arco eléctrico entre el electrodo y las masas de acero que se desean fundir. Este comportamiento ocasiona variaciones aleatorias de altos niveles de corriente con bajo factor de potencia.

#### **3.3.2.2.2 Período de refinamiento**

Luego del período de fundición viene el período de refinamiento, el cual se caracteriza por tener factor de potencia alto, ya que el arco eléctrico formado por el electrodo y la masa fundida es uniforme por medio de los reguladores automáticos de los electrodos.

### **3.3.3 Soldadores eléctricos**

Los soldadores eléctricos manejan potencias relativamente pequeñas con respecto al sistema (generalmente en cargas industriales), es por ello que individualmente en la mayoría de los casos no representa fuente de fluctuaciones rápidas de tensión, a menos que represente la mayor carga. Ahora bien, la operación en conjunto de diversos soldadores eléctricos, representan una fuente importante de fluctuaciones rápidas de tensión, encontrándose principalmente en industrias y construcciones de gran magnitud, como por ejemplo: La Línea 4 del Metro de Caracas, el Plan Ferroviario Nacional (Sistema Ferroviario “Ezequiel Zamora”), Metro de Los Teques, Metro de Valencia y el segundo puente sobre el Río Orinoco. Los tipos de soldadores más comunes según un estudio realizado por la empresa CVG – EDELCA, “Estudio del fenómeno de las fluctuaciones de tensión causantes del flicker en los sistemas de potencia” son:

- (a) Soldadores eléctricos de arco. (genera fluctuaciones rápidas de tensión)
- (b) Soldadores eléctricos de presión. (genera poca fluctuaciones rápidas de tensión)
- (c) Soldadores eléctricos de proyección. (genera poca fluctuaciones rápidas de tensión)
- (d) Soldadores eléctricos de resistencia. (genera fluctuaciones rápidas de tensión)

### 3.3.4 Flicker no producido por fluctuaciones rápidas de tensión

Otra fuente de Flicker que no es generada por cargas fluctuantes es debida principalmente al mal funcionamiento de la luminaria, por ejemplo:

- (a) El caso de las lámparas fluorescentes, donde su funcionamiento al final de su vida útil, presenta un flujo luminoso no constante por el deterioro de sus componentes.
- (b) En el mercado se encuentran balastos que utilizan reguladores con mando de ángulo de fase los cuales generan Flicker en presencia de armónicos.

A continuación se presenta en la siguiente tabla 3.4, las fuentes de flicker distintas de las fluctuaciones rápidas de tensión:

**Tabla 3.4. Fuentes de flicker distintas a fluctuaciones rápidas de tensión. [7]**

(LM: Luz mixta, HG: Mercurio, MH: Metal halide, NA: Sodio alta presión)

Síntoma	Fuente de luz				Causa probable
	LM	HG	MH	NA	
<b>El Bombillo Parpadea</b>	X	X	X	X	Voltaje de alimentación muy bajo.
	X	X	X	X	Alguna conexión floja en el circuito.
	X	X	X	X	Mala conexión.
			X	X	Fin de la vida útil.
	X		X	X	Posición de encendido incorrecta.

### **3.4 Efectos de las fluctuaciones rápidas de tensión.**

El efecto de las fluctuaciones rápidas de tensión sobre los equipos eléctricos conectados a la red de distribución de energía eléctrica es muy puntual, según las distintas referencias consultadas, en la cual indican que los equipos más afectados son las distintas lámparas presentes en el mercado. Además, otros equipos rara vez pueden verse afectados por las fluctuaciones rápidas de tensión como los son: monitores, televisores, sistemas de imágenes usados en la medicina, PLC, entre otros. A continuación se analizarán el efecto de las fluctuaciones rápidas de tensión sobre cada equipo eléctrico según las referencias consultadas.

#### **3.4.1 Lámparas**

Las lámparas en general al ser sometidas a fluctuaciones rápidas de tensión tienen como efecto fluctuaciones en la luminancia (flicker), siendo este fenómeno un problema de percepción para los seres humanos provocando fatiga física y psíquica, a continuación se describen los efectos particulares de las fluctuaciones rápidas de tensión sobre cada tipo de lámparas.

##### **3.4.1.1 Lámpara incandescente**

El principal efecto relacionado con las variaciones rápidas de tensión es la variación de la intensidad lumínica en las lámparas incandescentes, siendo este efecto, la base para determinar el parámetro con el cual se cuantifica las fluctuaciones rápidas de tensión [5]. Estas lámparas tienen mayor presencia en las cargas residenciales, siendo lo contrario para cargas comerciales e industriales, según las aplicaciones que indican los fabricantes de lámparas y el costo que representan.

### **3.4.1.2 Lámpara de vapor de sodio (baja presión y alta presión) y vapor de mercurio alta presión**

Estas lámparas son sensibles a las fluctuaciones rápidas de tensión, debido a la inercia del plasma de la descarga luminosa. A pesar de verse afectada por las fluctuaciones rápidas de tensión su molestia ocasionada por el Flicker no es tan perceptible, debido a que se utiliza en la iluminación de exteriores como autopistas, plazas, parques (espacios abiertos), etc. (ver tabla 3.5) [6]. Sin embargo, en las industrias se utilizan lámparas de vapor de mercurio y podría estar en contradicho lo afirmado por la referencia [6], de igual manera las lámparas de vapor de sodio utilizadas en la mayoría de las autopistas, podrían afectar a un conductor con varias horas de viaje sometido a parpadeo de dichas lámparas (flicker).

### **3.4.1.3 Lámparas fluorescentes**

Este tipo de lámparas son las menos afectadas por las fluctuaciones rápidas de tensión. Una lámpara fluorescente se verá afectada con la misma severidad de una lámpara incandescente, si la magnitud de la fluctuación de tensión es entre 2 ó 3 veces mayor (tabla 3.5) [6]

### **3.4.2 Resto de cargas:**

A continuación se cita textualmente las referencias bibliográficas, en las que se señalan los equipos eléctricos afectados o no por las fluctuaciones rápidas de tensión:

**Tabla 3.5. Clasificación de lámparas según: tipo, potencia y comportamiento.**

**Cuaderno Técnico Schneider 176 [6].**

<b>Fuentes luminosas</b>	<b>Fluorescencia</b>	<b>Incandescencia</b>	<b>Vapor de sodio a baja presión</b>	<b>Vapor de sodio a alta presión</b>	<b>Vapor de mercurio a alta presión</b>
<b>Tipo de lámpara</b>	Rectilínea, circular, de un solo casquillo, compacta, miniatura o de sustitución	Estándar, fantasía, halógena BT o MTB		Con distintos casquillos	Ampolla fluorescente, luz mixtas con yoduros metálicos, con distintos casquillos.
<b>Potencia eléctrica (W)</b>	De 45 a 65	De 5 a 2000	De 18 a 180	De 35 a 1000	De 35 a 3500
<b>Comportamiento frente a fluctuaciones de la tensión de alimentación</b>	Sólo se perturba con fluctuaciones 2 ó 3 veces más fuertes que las que afectan a las lámparas de incandescencia. Esto debido a la remanencia del depósito fluorescente.	Especialmente sensibles a las pequeñas variaciones de tensión repetidas. Esto se debe a la pequeña constante térmica de los filamentos.	Muy sensible puesto que su inercia térmica es la del plasma de la descarga luminosa.	Idem que la lámpara de vapor de sodio a baja presión.	Idem que la lámpara de vapor de sodio a baja presión.

- (a) *“Como las fluctuaciones tienen una amplitud que no excede de  $\pm 10\%$ , la mayor parte de los aparatos no resultan afectados. El principal efecto de la fluctuaciones de tensión es la fluctuación de la luminosidad de las lámparas (parpadeo o flicker)”* [8]. A pesar de afirmar que la mayoría de los equipos no son afectados por las fluctuaciones rápidas de tensión, no especifica a que equipos eléctricos se refiere.
- (b) *“Estas fluctuaciones pueden afectar el funcionamiento de equipos sensibles, como los son: sistemas digitales de control, electromedicina, PLC, instrumentación, etc...”* [2]. La afirmación descrita anteriormente, señala los equipos eléctricos que pueden verse afectados por el fenómeno electromagnético, por lo tanto, se tomará como referencia para justificar la influencia de las fluctuaciones rápidas de tensión.
- (c) *“Las fluctuaciones de tensión menores que el 7% en magnitud pueden tener igual efecto (mal funcionamiento) en otros tipos de cargas, por ejemplo el parpadeo de la pantalla del monitor de las computadoras”* [9], señalando

posteriormente los equipos eléctricos a los cuales afectan, indicando: “*Los sistemas de imágenes usados en la medicina, los cuales consisten de tomografía computarizada, imágenes de resonancia magnética y ultrasonido, los cuales pudiesen activar los circuitos de detección de baja tensión e inhibir las operaciones de exploración (scanning)*”, En general, informa que los equipos que contienen despliegue visual de información (pantalla) pueden ocasionar efectos similares a los producidos por las fluctuaciones de tensión en las lámparas (flicker), debido a las fluctuaciones rápidas de tensión. Se debe aclarar que, dentro de los equipos de despliegue visual se encuentran los televisores y monitores, actualmente existen en el mercado equipos de Pantalla de Cristal Líquido (LCD) que no presentan el fenómeno del parpadeo debido a su funcionamiento, por ejemplo: el Televisor – Monitor SM 711MP son libre de flicker (flicker free), tal como lo indica la empresa fabricante en la dirección “[http://www.leonera.com/product\\_info+4766.html](http://www.leonera.com/product_info+4766.html)”.

- (d) “*Voltage fluctuations less than 7% in magnitude have little effect on other types of customer loads*” [5], confirma lo indicado en el punto (c), más no es suficiente por la ambigüedad de la información, ya que no se especifican los equipos eléctricos que son afectados.
- (e) “*No se han producido denuncias de daños a equipos debido a las fluctuaciones de tensión*” [10], haciendo alusión a que no existen otros equipos eléctricos que sean afectados por las fluctuaciones de tensión, opinión que no es compartida debido a que se basa en denuncias de los usuarios.
- (f) “*There are, however, rare cases where voltaje flicker can affect equipment operation such as electric drives and Ups systems*” [11], en el cual se señalan que hay raros casos donde las fluctuaciones rápidas de tensión afectan la operación de los equipos eléctricos, basándose en las afirmaciones realizadas por el trabajo “Power Disturbance and Power Quality – Light Flicker Voltaje Requeriments” de Owen, Edgard.

- (g) *“La mayoría de los aparatos utilizados no son sensibles a disturbios de variaciones de pequeña amplitud aun si son bruscas y repetidas. Las mayores consecuencias negativas se presentan en las fuentes luminosas, que están sujetas a variaciones bruscas y repetidas del flujo luminoso, las cuales producen cansancio visual”* [12]. Esta referencia solo afirma la afectación de las lámparas debido a las fluctuaciones rápidas de tensión, y no especifica que equipos no son sensibles a esta perturbación electromagnética.

Como se puede observar en las citas textuales de las referencias consultadas, no enfatizan sobre los estudios que justifican la afectación de los equipos eléctricos (excepto las lámparas) debido a las fluctuaciones rápidas de tensión, ya que los estudios realizados se han orientado en los efectos causados al ser humano por el parpadeo (flicker) de las lámparas incandescentes, provocado por las fluctuaciones rápidas de tensión. En consecuencia, los estudios sobre la afectación de otros equipos eléctricos debido a dicha perturbación son muy pocos. Sin embargo, se tomarán los equipos eléctricos señalados por las referencias como los afectados por las fluctuaciones rápidas de tensión.

### **3.5 Clasificación de equipos eléctricos por cargas Residenciales, Comerciales e Industriales**

En esta clasificación se indica por medio de tablas, los equipos eléctricos presentes en las cargas Residenciales, Comerciales e Industriales que son afectados por las fluctuaciones rápidas de tensión, tomando como base la referencia consultada y analizada en la sección 3.4 de este capítulo.

### 3.5.1 Cargas Residenciales

En la tabla 3.6, se indican los equipos eléctricos presentes en las cargas residenciales afectados por las fluctuaciones rápidas de tensión, según lo analizado en la sección 3.4:

**Tabla 3.6. Equipos eléctricos en cargas residenciales**

Sector	Aplicación	Equipo	Nivel de tensión [V]	Consumo de Potencia [kW]	Afectado por fluctuaciones rápidas de tensión
Residencial	Iluminación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lámpara Incandescente.</li> <li>Lámpara Fluorescente.</li> </ul>	110	< 5	✓
	Electrónica de Potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Televisor.</li> <li>Monitor de Computadora.</li> </ul>			✓

### 3.5.2 Cargas Comerciales

Al igual que en las cargas Residenciales, en la tabla 3.7 se indican los equipos eléctricos presentes en este tipo de carga que son afectados por las fluctuaciones rápidas de tensión, en base a la sección 3.4, destacándose los equipos médicos que utilizan pantalla con despliegue visual.

**Tabla 3.7. Equipos eléctricos en cargas comerciales**

Sector	Aplicación	Equipo	Nivel de tensión [V]	Consumo de Potencia [kW]	Afectado por fluctuaciones rápidas de tensión
Comercial	Iluminación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lámpara Incandescente.</li> <li>Lámpara Fluorescente.</li> </ul>	110	< 5	✓
	Electrónica de Potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Televisor.</li> <li>Monitor de Computadora.</li> <li>Equipos de tomografía computarizada, imágenes de resonancia magnética y ultrasonido</li> </ul>			✓

### 3.5.3 Cargas Industriales

En la tabla 3.8, se indican los equipos eléctricos presentes en las cargas industriales que son afectados por las fluctuaciones rápidas de tensión, según las referencias consultadas en la sección 3.4.

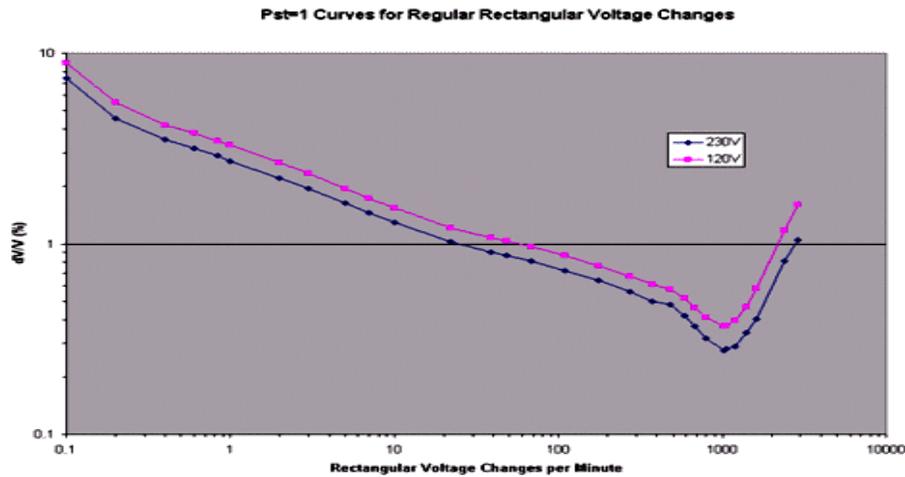
### 3.6 Indicadores de calidad de las fluctuaciones rápidas de tensión

El flicker que presentan las lámparas conectadas en baja tensión, debido a cargas perturbadoras (fluctuaciones rápidas de tensión) conectadas a cualquier nivel de tensión, han sido objeto de estudio desde hace varias décadas. Este fenómeno que se presenta en las lámparas genera molestia en los seres humanos, es por ello, que se han realizado estudios en la búsqueda de indicadores de calidad o parámetros para la medición (cuantificación) del fenómeno del flicker. Sin embargo, los factores técnicos, fisiológicos y psicológicos que involucran este fenómeno han hecho de estos estudios un problema complejo [6].

**Tabla 3.8. Equipos eléctricos en cargas industriales**

Sector	Aplicación	Equipo	Nivel de tensión [V]	Consumo de Potencia [kW]	Afectado por fluctuaciones rápidas de tensión
Industrial	Iluminación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lámpara Incandescente.</li> <li>• Lámpara Fluorescente.</li> <li>• Lámpara de H.I.D.</li> <li>• Lámpara de Vapor de Mercurio.</li> </ul>	110	< 5	✓
	Electrónica de Potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Televisor.</li> <li>• Monitor de Computadora.</li> <li>• Sistemas Digitales de control.</li> <li>• PLC.</li> <li>• Equipos de Instrumentación.</li> </ul>			✓

La Curva de Sensibilidad (ver figura 3.3), fue el primer estudio en determinar los niveles de sensibilidad de un observador medio, bajo la presencia de parpadeos (flicker) de una lámpara incandescente de 60 W/120V/240V provocado por fluctuaciones rectangulares de tensión, en función de cambios por minuto del voltaje rectangular [4]. A partir de la curva de sensibilidad, se definieron unidades de medida como el flicker instantáneo, Dosis de flicker, Pst y Plt. Indicadores que serán analizados a continuación.



**Figura 3.3. Curva de Sensibilidad. [13]**

### 3.6.1 Flicker Instantáneo

El flicker Instantáneo, se definen como: “*toda fluctuación de tensión de amplitud ( $a_{8,8i}$ ) y de frecuencia  $f$  distinta a 8,8 Hz ( $f \neq 8,8$  Hz) que genere molestia, se podrá representar como una fluctuación de tensión de 8,8 Hz con una amplitud de  $a_{8,8}(t) = a(t) * g_f$ , siendo  $g_f$  un coeficiente menor que uno dependiente de la frecuencia ( $f$ ) y  $a(t)$  la amplitud de la fluctuación de tensión a frecuencia  $f$ . Pero si en un tiempo determinado de medición se encuentran presentes fluctuaciones de tensión de distintas frecuencias, se podrán representar mediante la ecuación 3.1” [6]. Es decir, toda fluctuación de tensión de frecuencia distinta a 8,8 Hz, se podrá representar en una fluctuación de tensión de frecuencia, con frecuencia 8,8 Hz mediante la ecuación 3.1, resultando la amplitud de tensión ( $a_{8,8}(t)$ ) denominado flicker instantáneo.*

$$a_{8,8}(t) = \sqrt{\sum_i a_{8,8i}(t)^2} = \sqrt{\sum_i a_i(t)^2 * g_{fi}^2}, \text{ (Flicker Instantáneo)...(3.1)}$$

Donde:

$a_{8,8}(t)$ : Amplitud de tensión representativa a fluctuaciones de tensión con frecuencia distinta a 8,8 Hz.

$a_{8,8i}(t)$ : Amplitudes de tensión de las fluctuaciones de tensión a la frecuencia distinta a 8,8 Hz.

$g_{fi}$ : Coeficiente menor que uno, dependiente del valor de frecuencia.

### 3.6.2 Dosis de Flicker

La Dosis de flicker fue una unidad de cuantificación utilizada en Francia, basado en la observación de una fluctuación rápida de tensión con una cierta amplitud y tiempo de duración determinada, en la cual se puede observar la misma percepción visual en otra fluctuación rápida de tensión de amplitud doble y de un cuarto de duración. La Dosis de flicker se calcula mediante la ecuación 3.2.

$$G = \int_{t_0}^{t_0+T} a_{8,8}(t)^2 .dt, \text{ donde G es la Dosis de flicker....(3.2)}$$

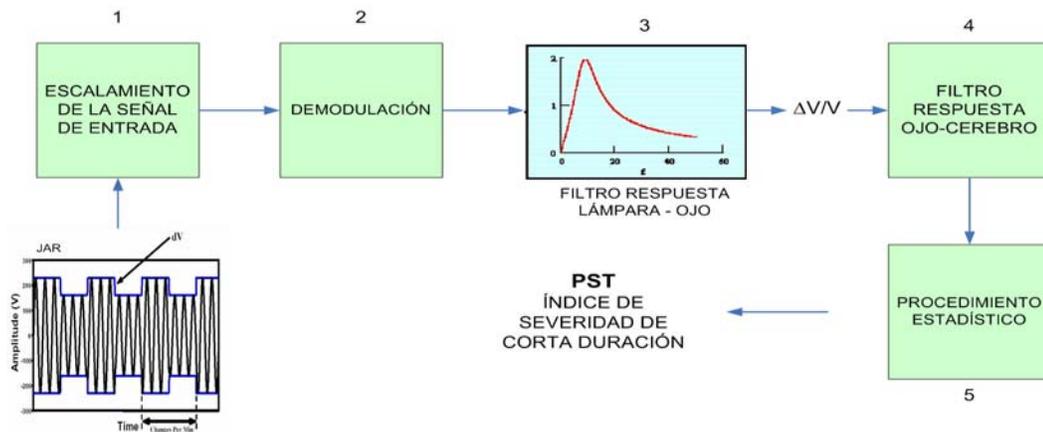
### 3.6.3 Flickérmetro

Actualmente, en varios países del mundo incluyendo Venezuela, se han acogido al estándar internacional IEC 61000-4-15, la cual recomienda un parámetro para determinar la severidad del flicker (Pst y Plt) por medio de un equipo de medición llamado flickérmetro. Estos parámetros se calculan basándose en evaluaciones estadísticas, debido a que:

- (a) Se puede evaluar el flicker en un período de tiempo representativo.
- (b) Por la naturaleza impredecible y extensa de la variable (flicker instantáneo).

- (c) Además, por tener las herramientas para calcular no solo los niveles máximos del flicker sino los niveles de flicker excedidos para porcentajes de período de medición.

El medidor de flicker o flickérmetro se estructura en cinco bloques (ver figura 3.4), donde el grupo de bloques del 2 al 4 simulan la percepción visual (Lámpara-ojo-cerebro) y el bloque 5 realiza el análisis estadístico. A continuación se describe brevemente la composición y funcionabilidad de cada bloque para la obtención del Pst.



**Figura 3.4. Representación de Flickermetro por bloques [14]**

**Bloque 1: Adaptador de la tensión de entrada y circuito para comprobación de calibración.**

Este bloque consta de dos circuitos, el primero es un generador de señal que tiene la función de calibrar el equipo de medición y el segundo es un adaptador de la tensión que tiene la función de escalar la tensión eficaz de la red a un nivel de referencia interno porcentual. [3]

El bloque 1, calcula la tensión eficaz de entrada mediante la elevación al cuadrado, e integrando entre cruces por cero por cada medio ciclo y por último se calcula la raíz cuadrada, este valor es una salida del bloque 1 opcional. [3]

### **Bloque 2: Demodulador cuadrático.**

Este bloque se encarga de simular el comportamiento de lámpara, mediante la elevación al cuadrado del valor de salida del bloque 1 (tensión eficaz de la red escalada al nivel de referencia interno). [3]

### **Bloque 3: Filtro de ponderación.**

Este bloque está compuesto por dos filtros y un selector de margen para las medidas colocadas en cascada. El primer filtro tiene como función eliminar las componentes DC y de rizado a frecuencia doble de la red. El segundo filtro tiene como función simular la respuesta en frecuencia de las fluctuaciones sinusoidales de tensión de una lámpara incandescente de 60W – 120V, en combinación con la percepción del ojo humano. Se debe acotar que el segundo filtro se basa en la percepción del 50 % de la muestra poblacional sometida a estudio para distintas frecuencias, esto quiere decir, que el segundo filtro se basa en la curva de sensibilidad para las fluctuaciones de tensión sinusoidales descrito en la sección 3.6 de este capítulo. En el caso de cuando las fluctuaciones que no son sinusoidales o aleatorias, la función de transferencia compleja del bloque 3 y 4 se adaptan para la correcta ponderación. [3]

### **Bloque 4: Multiplicador cuadrático y filtro pasa bajo (alisado).**

La función del bloque 4 es representar la sensación instantánea del flicker, mediante un multiplicador cuadrático y un filtro de primer orden pasabajo (alisado) colocados en cascada.

Los bloques 2,3 y 4 simulan la respuesta lámpara, ojo y cerebro debido a las fluctuaciones de la intensidad luminosa de las lámparas incandescentes debido a las fluctuaciones rápidas de tensión.

### **Bloque 5: Análisis estadístico en tiempo real.**

Este bloque está compuesto por un microprocesador el cual realiza el procesamiento estadístico en tiempo real indicado en la sección 3.6 referente al índice de severidad Pst.

En la norma IEC 61000-3-3, la cual tiene como título “Limitación de las fluctuaciones de tensión y del flicker en redes de baja tensión para los equipos con corriente de entrada  $\leq 16A$ ”, contiene curvas de factor F para señales escalones equidistantes, rampas, rectángulos, triángulos y arranque de motores, que son utilizadas para ser adaptadas a fluctuaciones rápidas de tensión cuadradas. De acuerdo con lo planteado, la norma propone un cálculo analítico del índice de severidad del flicker (Pst), mediante la siguiente ecuación 3.3:

$$P_{ST} = 3,2 \sqrt{\frac{\sum t_f}{T_P}} \dots\dots\dots(3.3)$$

Donde:

Pst = Índice de severidad de corta duración.

$\Sigma t_f$  = Suma de los tiempos correspondiente a las variaciones ocurridas durante el tiempo de observación.

$T_P$  = Tiempo de observación. (10 minutos)

Por otra parte, la norma 61000-4-15, establece la consideración de un nuevo parámetro “Plt”, ya que el Pst se basa en un tiempo de observación de 10 minutos para evaluar perturbaciones causadas por cargas individuales de ciclo corto, en

cambio el Plt determinará la operación aleatoria o combinada de varias cargas perturbadoras de ciclo largo y variable, y se determinará a partir de valores de Pst tomando en cuenta un período de tiempo representativo tal que un observador reaccione ante el flicker, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N}} \dots(3.10)$$

Donde los valores de Psti (i = 1,2,3,...), son valores consecutivos.

#### **3.6.4 Indicadores de calidad alternativos de las fluctuaciones rápidas de tensión**

Además de los parámetros Pst y Plt, se han realizado estudios sobre parámetros alternativos para determinar de cierta manera la severidad de las fluctuaciones rápidas de tensión enfocadas al efecto sobre las lámparas incandescentes. Tal es el caso de Argentina, el cual utiliza el  $\Delta V/V$  para determinar las posibles “localizaciones” de este tipo de variaciones de tensión, aunque en la norma IEC 61000-4-15 no especifica que el indicador  $\Delta V/V$  se pueda utilizar como parámetro para indicar la severidad de las fluctuaciones rápidas de tensión sobre las lámparas incandescentes, establece que representa las variaciones de tensión. Las principales justificaciones del uso de este parámetro como localizador de fluctuaciones rápidas de tensión, son las siguientes:

- (a) Principalmente se basa en la normativa y estudio publicado en la resolución ENRE del 2001 para la Calidad del Producto Técnico, y documentos técnicos donde prueban después de 5 años de aplicación de metodología con premedición de  $\Delta V/V$ , que el control de la perturbación de flicker es eficaz, según la empresa ECAMEC. Para justificar aún más este parámetro, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos publicó la referencia [15], el cual se centró en la eficacia de un condensador variable de potencia reactiva

en la atenuación de las fluctuaciones rápidas de tensión producto de los soldadores de resistencia en un sistema eléctrico trifásico, por medio de una modelación por computadora. En la modelación por computadora se incluyó la simulación del flickermetro (UIE/IEC) para la obtención de mediciones, luego de realizar la simulación se compararon las mediciones obtenidas por la simulación con las mediciones reales o de campo, dando como resultado la concordancia entre las mediciones y logrando determinar de manera objetiva, que el  $\Delta V/V$  y el índice de severidad están íntimamente relacionadas para este estudio.

- (b) Reducir los costos de medición y evitar las altas inversiones en equipos de medición a las distribuidoras, debido a la aplicación del marco legal durante jornadas de medición para una perturbación que se presume presente en la red de energía eléctrica.

La promoción de este tipo de medición para este parámetro, surgió como iniciativa de la empresa Argentina ECAMEC, la cual indica que fabricando equipos de medición para tensión, energía,  $\Delta V/V$ , distorsión armónica (hasta la décimo quinta armónica); su precio en comparación con un flickermetro cumpliendo con la norma, estaría en relación de costo de 4 a 1, debido a que no utilizarían microprocesadores para las evaluaciones estadísticas.

Ahora bien, otro aspecto importante que fue tomado en cuenta al momento de establecer el  $\Delta V/V$  como parámetro de medición del flicker por el ENRE – Argentina, fue que las normas Argentinas establecían jornadas de medición del Pst que implicaban la utilización de un gran número de equipos de medición al mismo tiempo, condición que implicaba elevados costos de inversión en estos equipos. Venezuela presenta en las NCSDE la misma condición de Argentina, es por ello el planteamiento de este trabajo en realizar jornadas de medición a nivel nacional del  $\Delta V/V$  y Pst para corroborar la relación existente entre éstos parámetros, y a la vez

determinar el nivel de fluctuaciones rápidas de tensión presentes en la red de distribución venezolano.

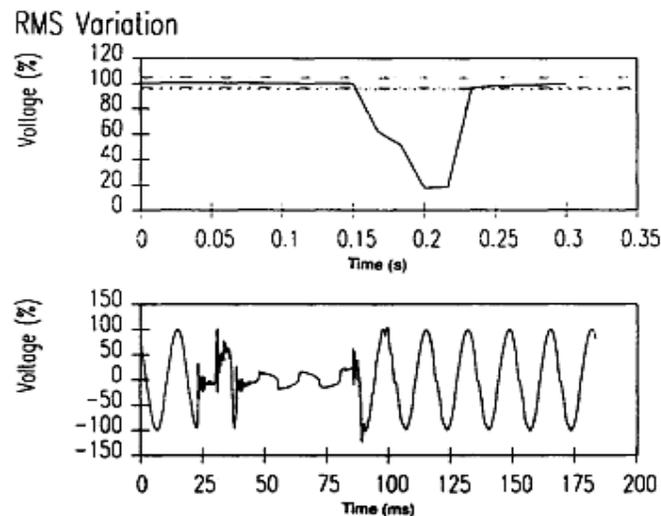
En Venezuela se han hecho estudios regionales en los cuales también se ha presentado este tipo de comportamiento, tal es el caso del Ing. Augusto Abreu de la empresa ENELVEN, con el trabajo “Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución” y la tesis de la Ing. Yubrinny Punce titulada “Desarrollo de aplicaciones para el cálculo, registro e interpretación de indicadores del Reglamento del Servicio y la Norma de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad” [16], que manifiesta la idea de elaborar un estudio sobre la posibilidad de realizar la comprobación del uso del  $\Delta V/V$  como posible parámetro de medición de las fluctuaciones rápidas de tensión. Esta última propuesta puede realizarse mediante jornadas de medición nacional en un tiempo representativo, y apoyada en la experiencia suministrada por expertos nacionales e internacionales, por ejemplo, la experiencia de la empresa ENELVEN de Venezuela y de la empresa ECAMEC de Argentina, las cuales indican que las fuentes de fluctuaciones rápidas de tensión en su mayoría son determinadas por los reclamos de los usuarios de la red de distribución; es decir, que es un problema puntual con respecto a los puntos de acoplamiento común, siendo esta afirmación clave para la implementación del  $\Delta V/V$ . Además de esta consideración, se debe realizar una evaluación económica con respecto a otros equipos y parámetros futuros a medir.

## CAPÍTULO IV

### HUECO DE TENSION

#### 4.1 Definición del hueco de tensión

La definición adoptada por la norma IEEE std. 1159 indica lo siguiente: “*Es la disminución brusca de la magnitud de tensión referencial en valor eficaz a frecuencia industrial, por debajo de un umbral preestablecido en una o más fases de la red de energía eléctrica, para luego recuperar la tensión eficaz perdida en un lapso de tiempo determinado*”. (Ver figura 4.1).



**Figura 4.1. Voltaje eficaz e instantáneo de un hueco de tensión causado por una falla monofásica [5].**

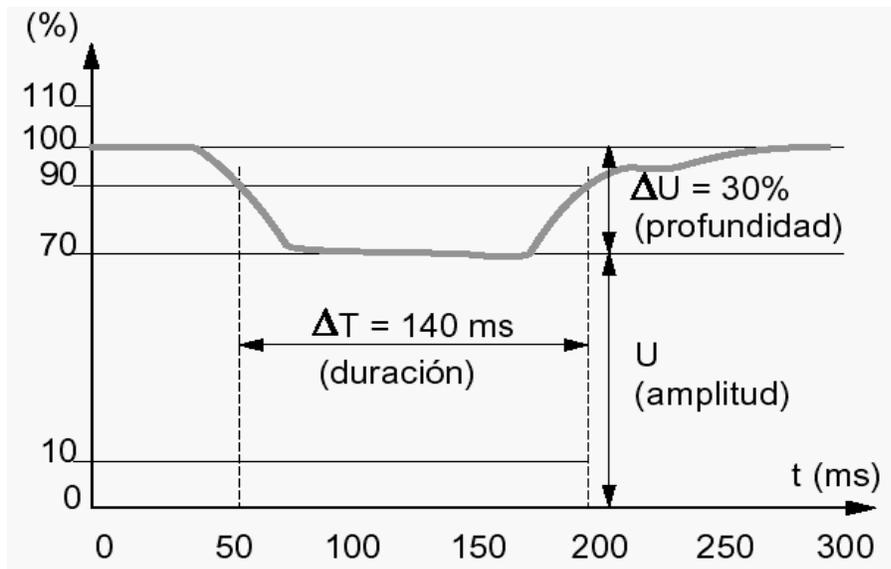
La figura 4.1, tomada de la norma IEEE std. 1159 – 1995, ejemplifica un hueco de tensión debido a la ocurrencia de una falla monofásica a tierra. Se muestran dos figuras, la primera muestra el valor eficaz de la tensión (en línea continua) y las líneas punteadas indican el rango aceptable que debería seguir la tensión, la otra figura muestra un ejemplo de la onda de tensión en sus valores instantáneos.

En referencias americanas el hueco de tensión se encuentra asociado al término “Sag” (IEEE), mientras que, en Europa se maneja en las referencias bibliográficas el término “Dip” (IEC), el cual también se encuentra asociado al hueco de tensión. Sin embargo, los indicadores empleados para este fenómeno en América y Europa son complementarios entre una norma y otra, ya que, cuando se refiere a un decrecimiento del nivel de tensión eficaz del 30 % (ver figura 4.2), se indica que existe un Sag del 70% de la tensión eficaz de referencia, en cambio utilizando el término Dip, se indica que existe un Dip del 30 % de la tensión eficaz de referencia. En el desarrollo de este trabajo se emplea el término en español (hueco de tensión) asociados al Sag ó Dip.

Se debe tener presente que al hablar de la tensión de referencia, nos referimos a dos casos posibles: la tensión nominal del sistema ó la tensión antes de ocurrir el hueco de tensión [7]. Sin embargo, según referencias bibliográficas, generalmente se toma como tensión de referencia la tensión nominal.

#### **4.2 Características del hueco de tensión**

En la actualidad el estudio del hueco de tensión, ha sido caracterizado principalmente por la magnitud y duración (normas IEEE e IEC). Como se puede observar en el ejemplo de la figura 4.2, existe un Sag del 70% con una duración de 140 ms, tomando en cuenta que esta duración comienza cuando el nivel de tensión está por debajo del 90% de la tensión nominal y termina cuando la tensión medida supera el 90 % de la tensión nominal (umbral). A continuación se describen las magnitudes típicas (eficaces) asociadas al hueco de tensión, de igual manera se analizan las duraciones típicas establecidas por norma y los enfoques actuales hacia otras características que se deben tomar en cuenta a parte de la magnitud y duración del hueco de tensión [8].



**Figura 4.2. Ejemplo típico de un hueco de tensión.[8]**

## **4.2.1 Magnitud del hueco de tensión**

### **4.2.1.1 Normativa de la magnitud del hueco de tensión**

Las normas IEEE std. 1159 – 1995 y la IEC 61000 – 2 – 1, establecen las características típicas de magnitud para identificar un hueco de tensión, tal como lo muestra la tabla 4.1.

Para calcular las magnitudes del hueco de tensión se pueden aplicar distintos métodos, por ejemplo: tensión eficaz, componente fundamental de tensión y tensión pico. Como veremos posteriormente los tres métodos son válidos siempre y cuando la tensión sea sinusoidal, pero como veremos en secciones posteriores la ocurrencia de un hueco de tensión no necesariamente serán sinusoidales. A continuación se describen los métodos de cálculo de la magnitud para el hueco de tensión.

**Tabla 4.1. Magnitudes típicas del hueco de tensión**

<b>Norma</b>	<b>Categorías</b>	<b>Magnitud de voltaje típico</b>
<b>IEEE 1159</b>	<b>Variaciones de corta duración</b>	
	Instantáneo Hueco de tensión (Sag)	0,1 - 0,9 pu
	Momentáneo Hueco de tensión (Sag)	0,1 - 0,9 pu
	Temporal Hueco de tensión (Sag)	0,1 - 0,9 pu
<b>CEI 6100-2-1</b>	Huecos de tensión (Dip)	0,01 – 0,9pu

#### 4.2.1.2 Tensión eficaz

La IEEE std. 1159 – 1995 establece que la magnitud del hueco de tensión debe ser en valores eficaces. Generalmente, el valor eficaz se determina para medio ciclo de la señal en un período de la fundamental esta condición puede variar según el equipo [17]. La ecuación 4.1, muestra como se determina la tensión eficaz, partiendo del muestreo de puntos de tensión instantánea en el dominio del tiempo.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i^2}, \dots\dots(4.1)$$

Donde:

N: es el número de muestras por ciclo.

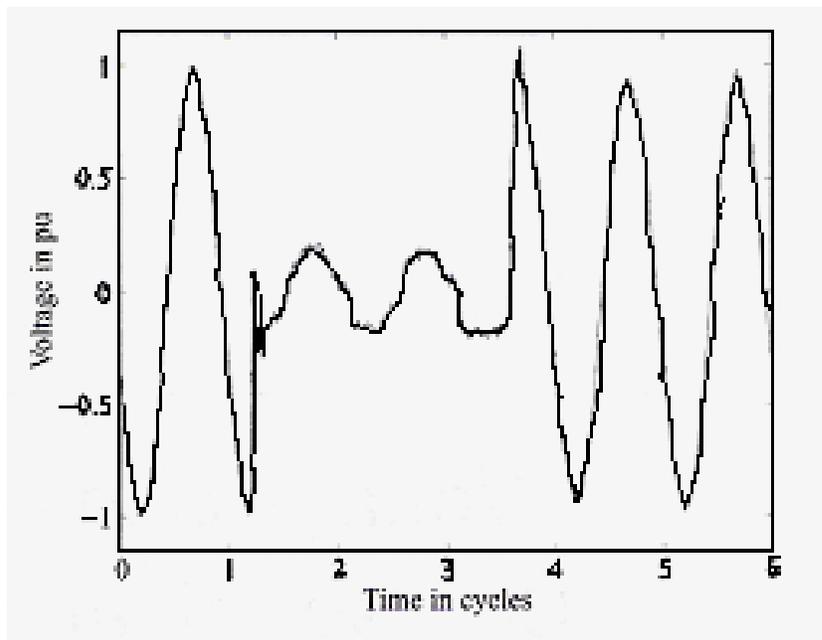
V<sub>i</sub>: el voltaje instantáneo en el dominio del tiempo.

Además de esta ecuación, existen otras que son utilizadas para el cálculo del valor eficaz de cada muestra (ecuación 4.2) y de cada ciclo (ecuación 4.3).

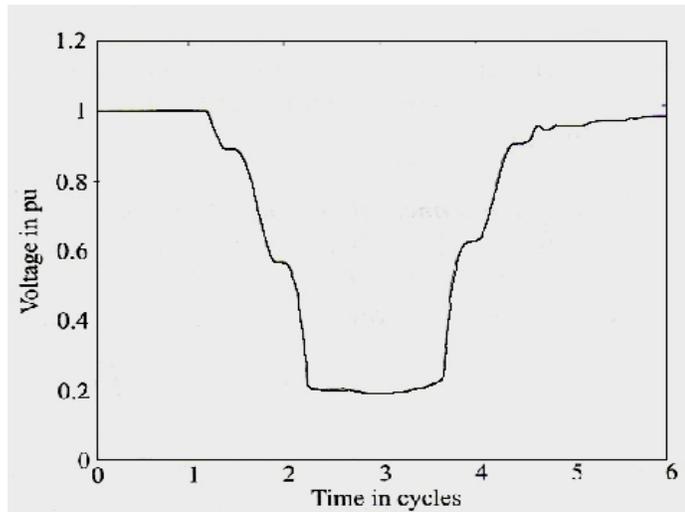
$$V_{rms}(N) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=K-N+1}^{i=K} v_i^2}, \dots\dots(4.2)$$

$$V_{rms}(KN) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=(K-1).N+1}^{i=K.N} v_i^2}, \dots\dots(4.3)$$

En la figura 4.3, se muestra un ejemplo donde se representa la tensión en una fase al momento de ocurrir una falla monofásica, y en la figura 4.4 se observa la misma falla monofásica pero representada en valores eficaces para cada ciclo.



**Figura 4.3. Hueco de tensión debido a falla monofásica. [18]**



**Figura 4.4. Hueco de tensión en valores eficaces. [18]**

#### 4.2.1.3 Componente fundamental

La obtención de la magnitud del hueco de tensión por medio de la componente fundamental se logra calculando el valor absoluto de la siguiente ecuación 4.4:

$$V_{fund}(t) = \frac{2}{T} \cdot \int_{t-T}^T v(t) e^{j \cdot \omega_0 \cdot t} \cdot dt \quad , \dots (4.4)$$

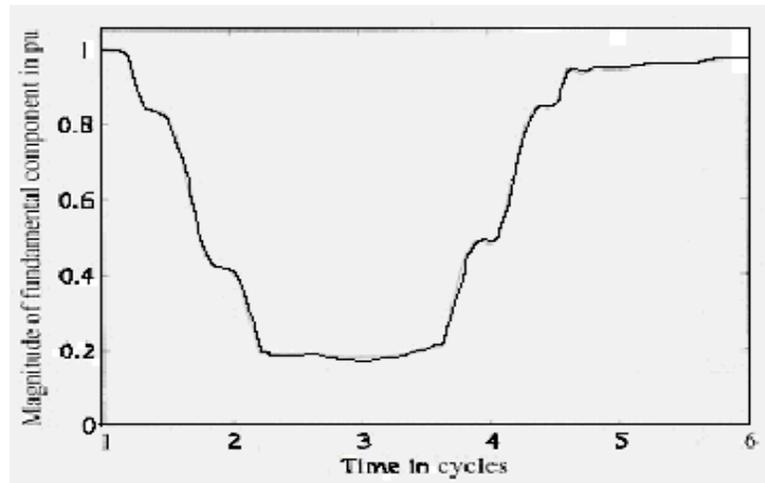
Donde:

T: período de la onda de tensión

$$\omega_0 = (2 \cdot \Pi) / T$$

Como se observa en la ecuación 4.4, el valor de tensión que se obtiene es un número complejo, resultando una nueva característica que se puede utilizar para esta perturbación electromagnética, ya que por medio de este resultado se obtiene el ángulo de fase o salto del ángulo de fase al ocurrir un hueco de tensión.

En la figura 4.5, se representa un hueco de tensión a través de la magnitud de la componente fundamental, la cual fue obtenida a través de un algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier. Este procedimiento presenta cierta desventaja debido a que es más fácil el cálculo para ventanas de medio ciclo a través de la tensión eficaz, aunque la componente fundamental sea la más laboriosa. A pesar de esta desventaja, se observa que la figura 4.5 (método componente fundamental) es muy parecida a la figura 4.4 (método tensión eficaz), tomando en ambos casos 256 muestras por ciclo. [18]



**Figura 4.5. Magnitud de la componente fundamental. [18]**

## **4.2.2 Duración del hueco de tensión**

### **4.2.2.1 Normativa de duración típica del hueco de tensión**

De igual manera que en las magnitudes típicas de tensión, las normas IEEE std. 1159 – 1995 y la IEC 61000 – 2 – 1, establecen la duración típica para identificar un hueco de tensión, tal como lo muestra la tabla 4.2. La norma IEEE 1159 – 1995, establece tres categorías instantáneo, momentáneo y temporal, según la duración típica asociado a cada categoría (entre 1/2 ciclo a 1 minuto). En cambio la norma IEC

61000 – 2 –1, no divide el hueco de tensión en categorías y estableciendo una duración típica entre 10 ms y 1 minuto.

**Tabla 4.2. Duración típica del hueco de tensión.**

<b>Norma</b>	<b>Categorías</b>	<b>Duración típica</b>
<b>IEEE 1159</b>	<b>Variaciones de corta duración</b>	
	Instantáneo Hueco de tensión (Sag)	0,5 - 30 ciclos
	Momentáneo Hueco de tensión (Sag)	30 ciclos - 3 s
	Temporal Hueco de tensión (Sag)	3s - 1min
<b>IEC 6100-2-1</b>	Huecos de tensión (Dip)	10ms – 1 min

#### 4.2.2.2 Medición de la duración del hueco de tensión

Los equipos de medición actuales, normalmente calculan los valores eficaces para cada ciclo, esto ocasionará que la duración del hueco de tensión por debajo del umbral de tensión (0,9 p.u.) estará dada por números de ciclos, aunque esto puede variar según la clase del equipo [17]. Esta forma de calcular la duración del hueco de tensión generará un intervalo de error, ya que el inicio de esta perturbación electromagnética, no necesariamente coincidirá con el punto de medición del equipo (ver figura 4.6).

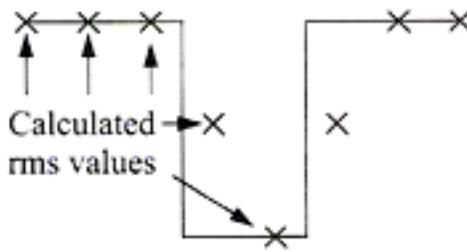


Figura 4.6. Muestreo de tensión eficaz para cada ciclo.

### 4.2.3 Nuevos enfoques característicos

#### 4.2.3.1 Punto de inicio del hueco de tensión

Es el ángulo de fase ( $\theta_i$ ) de la onda de tensión fundamental medido desde el cruce de la tensión por cero (ángulo de referencia) hasta el comienzo del hueco de tensión [18]. La figura 4.7, muestra un ejemplo de un hueco de tensión debida a una falla de cortocircuito, donde se representa con el ángulo  $\theta_i$  el punto de inicio del hueco de tensión.

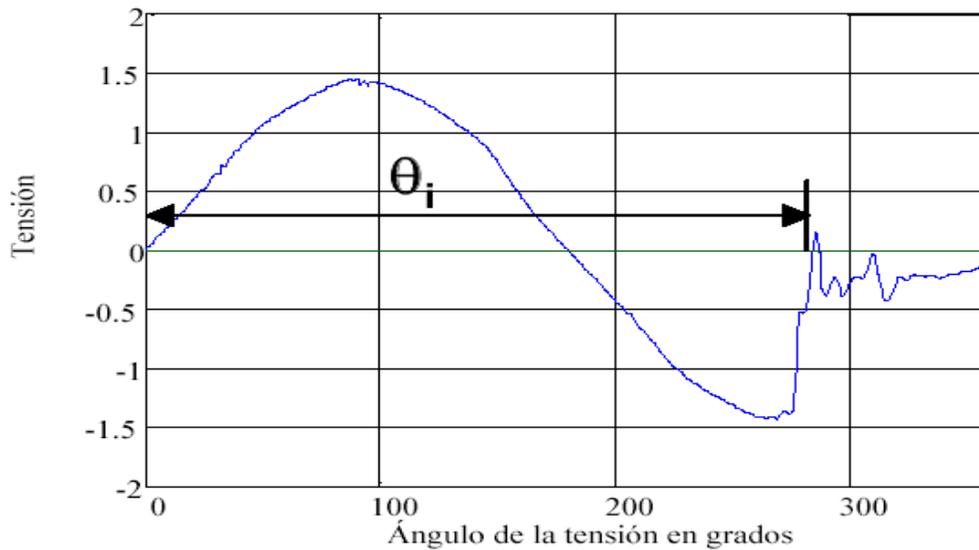
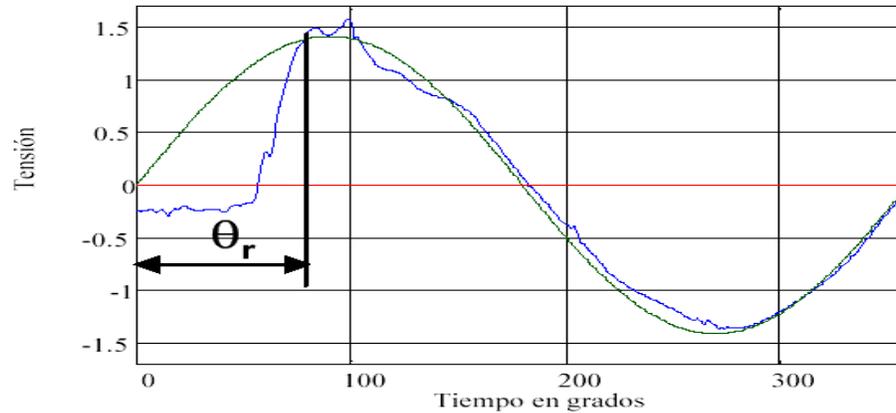


Figura 4.7. Punto de inicio del hueco de tensión ( $\theta_i$ ) [19]

#### 4.2.3.2 Punto de recuperación del hueco de tensión

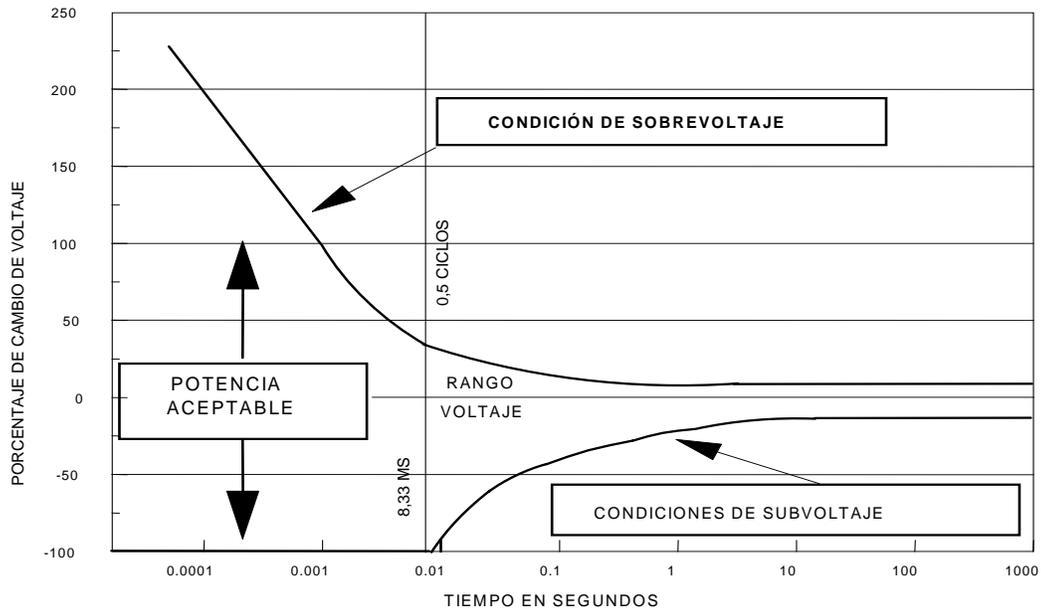
Es el ángulo de fase ( $\theta_r$ ) de la onda de tensión fundamental medido desde el cruce de la tensión por cero (ángulo de referencia) hasta finalizar el hueco de tensión [18]. La figura 4.8, muestra un ejemplo de un hueco de tensión indicando el punto de recuperación.



**Figura 4.8. Punto de recuperación del hueco de tensión ( $\theta_r$ ) [19]**

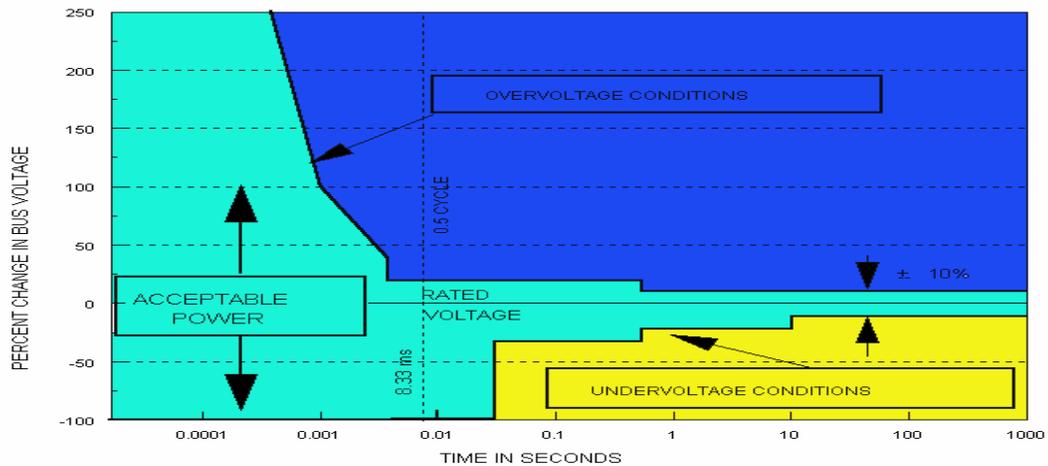
#### 4.2.3.3 Curvas de susceptibilidad

Las curvas de susceptibilidad son lugares geométricos, donde se representa en las abscisas la duración de la perturbación electromagnética, la cual puede representarse en segundos o ciclos, y en la ordenada se representa los cambios de tensión en porcentaje. Tal como se muestra en la figura 4.9, la curva CBEMA, es la curva de susceptibilidad propuesta por la Asociación de Fabricantes y Comerciantes de Equipos de Computación, la misma presenta dos lugares geométricos, dividiéndose en tres zonas: zona aceptable, zona de sobrevoltaje y zona de bajo voltaje. Esta curva ha sido utilizada para la identificación del adecuado diseño del sistema de distribución y los límites de vulnerabilidad de la carga, sin embargo, ha sido mal utilizada, para otros equipos como por ejemplo: variadores de velocidad, luminarias, etc., posteriormente se observarán las curvas de susceptibilidad de estos equipos y se comprobarán las grandes diferencias.



**Figura 4.9. Curva CBEMA. [20]**

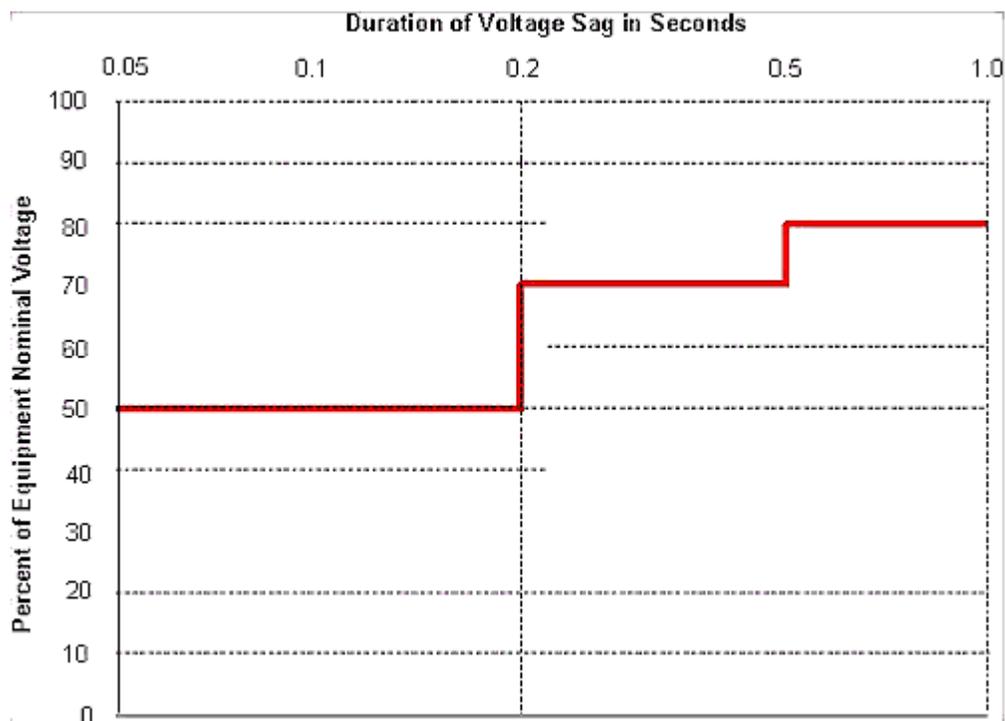
En 1996, la curva CBEMA fue sustituida por la curva ITIC, esta curva tal como lo muestra la figura 4.10, posee tres zonas de operación al igual que la curva CBEMA, la diferencia se encuentra en lo alisado de los cambios de la curva ITIC. La zona verde representa funcionamiento aceptable, la zona azul representa daño debido a sobrevoltaje y la zona amarilla representa la falla debido a bajo voltajes.



**Figura 4.10. Curva ITIC. [20]**

Si comparamos las características de los huecos de tensión con la curva ITIC, se puede observar que estos equipos en la mayoría de los eventos se encuentran en la zona de falla.

Otra curva de susceptibilidad es la propuesta por la SEMI (siglas en inglés - Grupo del Semiconductor e Instituto de los Materiales) – 1998 (ver figura 4.11) llamada Especificación provisional para la inmunidad del hueco de tensión del equipo de proceso del semiconductor (SEMI F47). La principal diferencia con respecto a las curvas de susceptibilidad anteriores, es que sólo considera los efectos de los huecos de tensión e interrupciones para los componentes electrónicos. Al comparar las características de los huecos de tensión descrito por las normas con la curva SEMI, estos componentes electrónicos se ven afectados por esta perturbación electromagnética.



**Figura 4.11. Curva SEMI (Grupo internacional de equipos y materiales de semiconductor) – 1998. [21]**

#### 4.2.3.4 Clasificación de los huecos de tensión.

Investigaciones sobre nuevas clasificaciones de los huecos de tensión se basan en el planteamiento de desarrollar indicadores de calidad del hueco de tensión según los distintos orígenes de esta perturbación electromagnética. Los huecos de tensión generalmente se originan en el arranque de grandes motores, energización de transformadores y fallas en la red eléctrica; por las distintas maneras de afectar la onda de tensión, este punto es en el que se fundamenta el investigador para realizar la clasificación. [18]

La propuesta de clasificación de los huecos de tensión se basa en los distintos tipos de fallas (trifásicas, bifásicas y monofásicas) presentes en la red de energía eléctrica. En la figura 4.12, se plantean los siete tipos, ellos son:

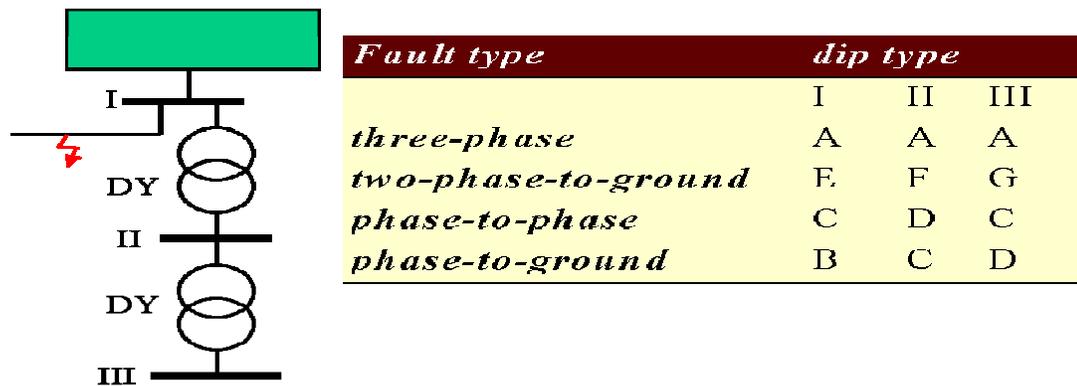


Figura 4.12. Clasificación del hueco de tensión según el tipo de falla. [22]

- (a) Tipo A: debido a falla trifásica.
- (b) Tipo B: debido a falla monofásica.
- (c) Tipo C: debido a falla bifásica.
- (d) Tipo D: debido a falla bifásica a través de un transformador delta-estrella.
- (e) Tipo E: debido a falla monofásica a tierra.
- (f) Tipo F: debido a falla monofásica a tierra a través de un transformador delta-estrella.

- (g) Tipo G: debido a falla monofásica a tierra tipo F a través de un transformador delta estrella.

Esta propuesta surge por la necesidad de plantear una clasificación que involucre las tres fases, debido a que en la norma 6100-4-30 no se contempla tomar las mediciones en las tres fases. Otra clasificación que plantea M. Bollen es cuando se presenta un hueco de tensión debido a arranque de grandes motores, el cual indica que sólo es necesario la determinación de las características de la tensión residual y el tiempo de duración. Por último, plantea medir el desbalance de tensión y los armónicos para caracterizar la energización de los transformadores. [22]

### **4.3 Fuentes de huecos de tensión**

El entendimiento de la ocurrencia del hueco de tensión, comienza por la comprensión de la teoría de las redes eléctricas, de acuerdo con las variaciones bruscas de la corriente y las variaciones de tensión que ocurren en las impedancias de la red aguas arriba, tal como se indica en el Capítulo III según la figura 3.2. Para el caso del hueco de tensión, el aumento de la corriente causa una caída de potencial representativa en la impedancia de la red, provocando la disminución en la tensión vista desde la carga. En el caso particular de la red eléctrica, las fuentes de huecos de tensión se dividen en: fuentes debidas a la red de distribución/transmisión y fuentes debidas a las cargas de la red.

#### **4.3.1 Fuentes de huecos de tensión debida a la red de distribución y transmisión**

En el ámbito de la red de distribución, existen múltiples fuentes generadoras de huecos de tensión como: accidentes de construcción, accidentes de vehículos automotores, árboles en contacto con los conductores, contaminación de aisladores y tormentas, que ocasionan fallas monofásicas, bifásicas y/o trifásicas [23]. A pesar de

que las fallas trifásicas son las más severas, se caracterizan por ser las menos frecuentes.

Estudios realizados por el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI), indican que la causa de mayor porcentaje de generación de huecos de tensión en la red de distribución produciendo fallas, es el efecto de los relámpagos, tomando en consideración que este estudio esta condicionado a la zona de evaluación, ya que el mismo, fue realizado en Virginia del Norte (1976) y su nivel isocerámico es de 40 relámpagos por año [Anexo Nro 2]. Como se muestra en la tabla 4.3, el relámpago representa el 46 % (para este estudio) causante del hueco de tensión en la red de distribución. Es necesario destacar que no se hace referencia a estudios realizados en Venezuela debido a no tener acceso a dichas investigaciones.

**Tabla 4.3. Causas de huecos de tensión en sistemas de distribución. [23]**

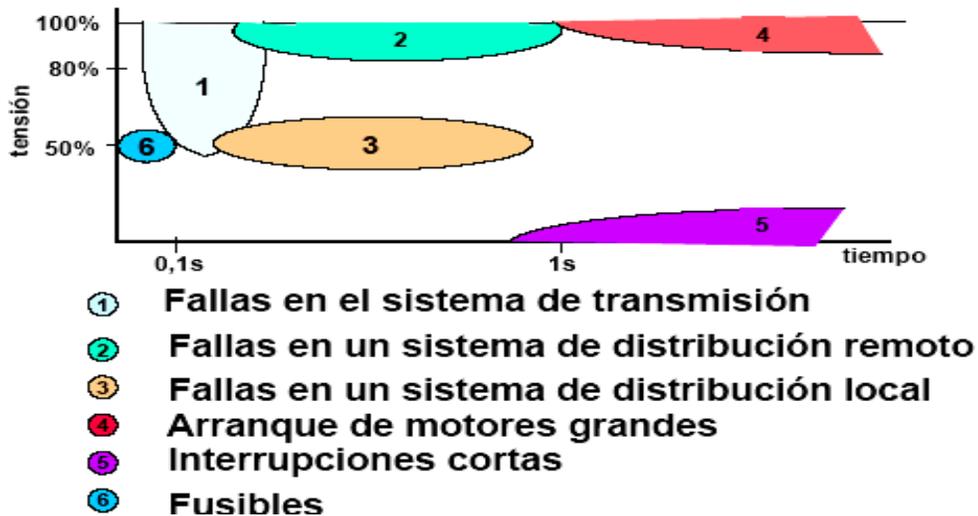
<b>CAUSAS</b>	<b># DE OCURRENCIAS</b>	<b>%</b>
<b>Vientos y Relámpagos</b>	37	46
<b>Falla de equipo</b>	8	10
<b>Accidente de construcción o tráfico</b>	8	10
<b>Animales</b>	5	6
<b>Árboles</b>	1	1
<b>Desconocido</b>	21	26
<b>TOTAL</b>	80	100

La duración del hueco de tensión es un aspecto importante en la red de distribución, ya que está directamente relacionada con la severidad y va a depender principalmente del tiempo de actuación del sistema de protección. Los equipos típicos de protección en las redes de distribución son los fusibles y los interruptores, en la tabla 4.4 se muestran los tiempos de operación más utilizados para un interruptor:

**Tabla 4.4. Tiempo de operación de interruptores. [23]**

	<b>Tiempo de Operación (ciclos)</b>
<b>Apertura polos en presencia de falla</b>	6 a 20
<b>1<sup>er</sup> Recierre de polos</b>	30 a 60
<b>2<sup>do</sup> Recierre de polos</b>	120 a 600

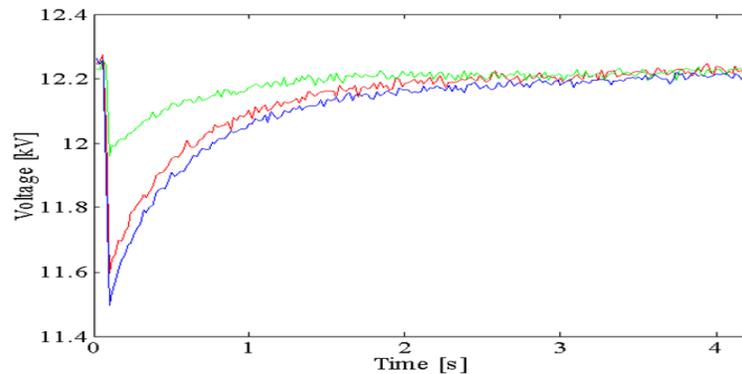
Como se puede observar en la tabla 4.4, el interruptor opera entre 6 y 20 ciclos para despejar la falla, realiza un recierre entre 30 y 60 ciclos, y si la falla persiste abre sus polos para luego hacer un último recierre entre 120 y 600 ciclos, si la falla sigue persistiendo, el interruptor no opera. Estos recierres generan huecos de tensión de distintos tiempos de duración en los alimentadores en paralelo. Como se indica en la figura 4.13, los arranques de grandes motores representan una fuente importante de fuentes de huecos de tensión. [18]



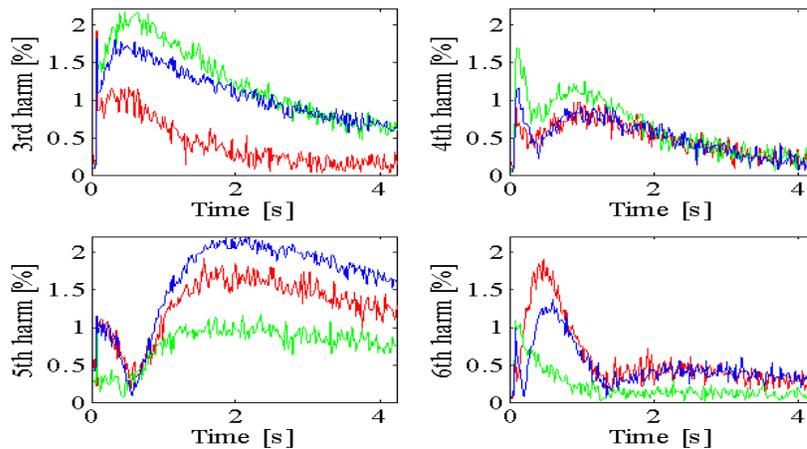
**Figura 4.13. Estudio sobre típicas fuentes de huecos de tensión.**

Otra fuente del hueco de tensión en la red de distribución es el transformador, debida a la saturación que presentan al momento de energizarse (ver figura 4.14). El ejemplo mostrado fue medido en el lado de alta del transformador y es generado por un recierre de un interruptor en el lado de alta del transformador. Otro factor que está asociado al hueco de tensión debido a los transformadores son

los armónicos debido a las fallas, principalmente por el alto armónico 2, 4 y 6. (Ver figura 4.15) [22].



**Figura 4.14. Hueco de tensión debido a energización de transformador.[22]**



**Figura 4.15. Armónicos debido a falla.[22]**

En los sistemas de transmisión también se presentan fenómenos que causan huecos de tensión, y son de alguna manera semejantes a los que se presentan en el sistema de distribución. Se diferencian principalmente en el tiempo de duración, debido a que los dispositivos de protección en transmisión actúan más rápidos que los dispositivos de protección en los sistemas de distribución [23]. En la figura 4.13 se muestra un estudio donde se representa la duración del hueco de tensión en función de su magnitud, con respecto a las causas comunes de los huecos de tensión, en donde se encuentra incluido el sistema de transmisión [18].

#### **4.3.2 Fuentes de huecos de tensión debida a las cargas de la red**

Generalmente las fuentes generadoras de huecos de tensión debido a las cargas conectadas a la red, se deben al accionamiento o conmutación de grandes bloques de carga que sobrecargan la red eléctrica, y su duración estará condicionada principalmente por la actuación de los dispositivos de protección que aislarán la parte afectada ó la desaparición rápida de la sobrecarga sin dejar que actúen las protecciones.

La fuente de mayor generación de huecos de tensión en las redes eléctricas son los motores eléctricos de gran potencia o la operación conjunta de varios motores de menor capacidad. En la figura 4.16, se representa un hueco de tensión debido al arranque de un motor. Como se puede observar el comportamiento de la tensión eficaz no es de forma rectangular, sino más bien que la tensión eficaz se incrementa al transcurrir el tiempo de forma cuasi exponencial, este punto es muy importante ya que estamos en presencia de un tipo de hueco que se ejemplifica en la norma IEEE std. 1159 – 1995 (R2001), pero no la caracteriza. En secciones posteriores se tratará este punto y las propuestas de medición.

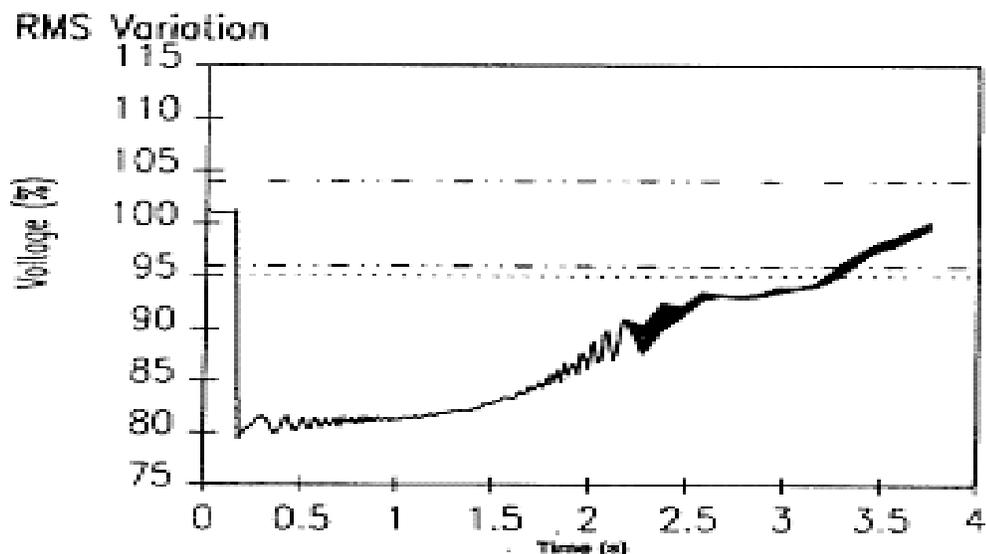


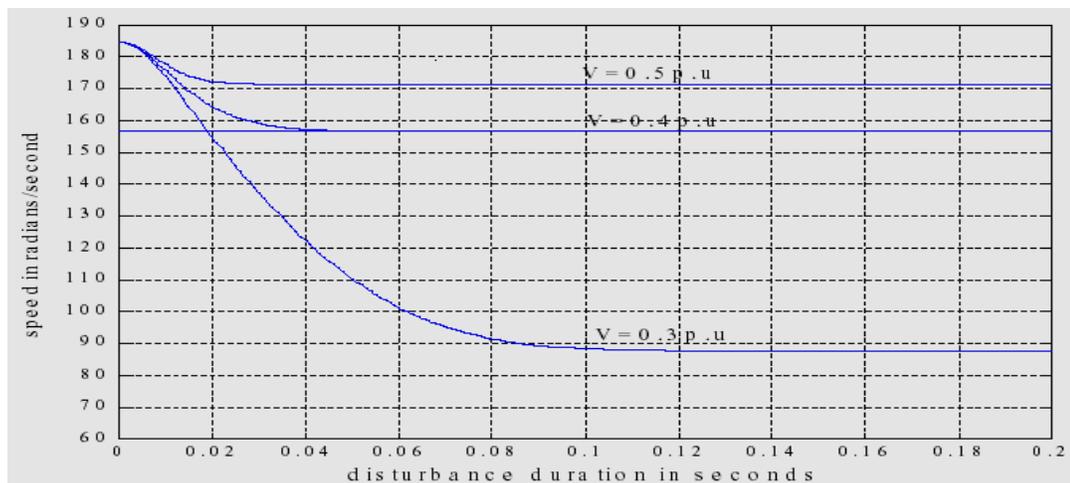
Figura 4.16. Huecos de tensión debido al arranque de un motor. [5]

#### 4.4 Efectos del hueco de tensión

#### 4.4.1 Motores de inducción

El efecto de la disminución de tensión en los motores de inducción, es la disminución del par, debido a la relación existente con el cuadrado de la tensión (ver figura 4.17), la cual implica la disminución de la velocidad y dependiendo del tiempo de recuperación de la tensión y la profundidad de la misma, el motor tenderá a detenerse (tomando en cuenta la constante de inercia del motor) o seguir su funcionamiento, pero generalmente no llega a detenerse debido al equilibrio par motor-par resistente a una velocidad inferior. [24]

En el caso de una carga industrial, todos los motores sufrirán el mismo fenómeno, si esta disminución de tensión tiene una duración tal que el rotor disminuya significativamente su velocidad, entonces en el momento que se reestablezca la tensión a sus valores nominales, la corriente en ese instante será aproximadamente la corriente de arranque (varias veces la corriente nominal) para cada motor lo que posiblemente causará caídas de tensión en la red y finalmente la parada del motor.



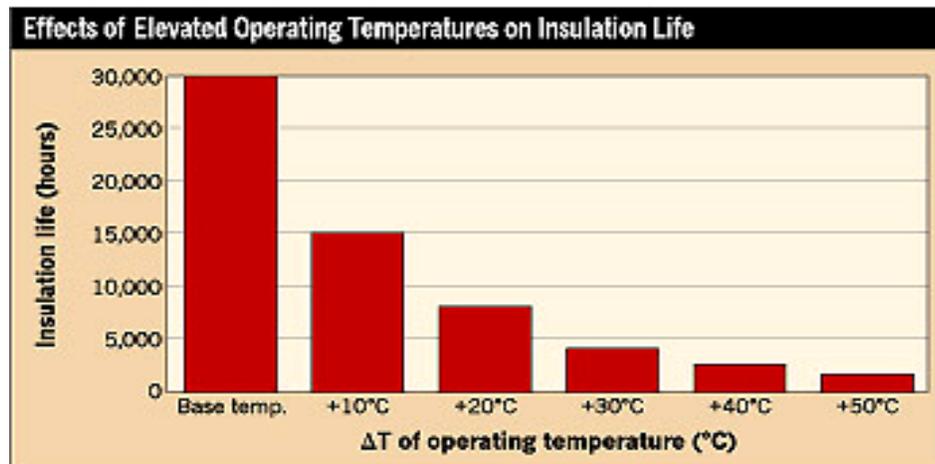
**Figura 4.17. Comportamiento de la velocidad del motor de inducción en presencia de huecos de tensión.[24]**

De la norma IEEE std. 141, se establece el efecto del hueco de tensión sobre las características eléctricas del motor de inducción, tal como se muestra en la tabla 4.5:

**Tabla 4.5. Efecto general del hueco de tensión sobre las características del motor de inducción. [4]**

<b>Características</b>	<b>Proporcional a</b>	<b>Variación de Voltaje 90 % de tensión de placa</b>
<b>Máximo funcionamiento del par y arranque</b>	$V^2$	-19 %
<b>Porcentaje de deslizamiento</b>	$(1/V)^2$	+ 23 %
<b>Velocidad a plena carga</b>	Velocidad sincrónica menos deslizamiento	- 0,2 a - 1 %
<b>Corriente de arranque</b>	$V$	-10 %
<b>Corriente a plena carga</b>	Varía con el diseño	+ 5 a + 10 %
<b>Corriente sin carga</b>	Varía con el diseño	- 10 a - 30 %
<b>Aumento de Temperatura</b>	Varía con el diseño	+ 10 a + 15 %
<b>Eficiencia a plena carga</b>	Varía con el diseño	- 1 a - 3 %
<b>Factor de potencia a plena carga</b>	Varía con el diseño	+3 a + 7 %
<b>Ruido magnético</b>	Varía con el diseño	-

La tabla 4.5 confirma lo expuesto anteriormente, pero también muestra el incremento de la corriente cuando se encuentra a plena carga, aunque se indica que el aumento de la corriente varía con el diseño, ocasionando un aumento de la temperatura (temperature rise), y como se muestra en la figura 4.18, el nivel de vida del aislamiento de los devanados del motor (expresado en horas), disminuirá a medida que las variaciones de temperatura sean mayores.



**Figura 4.18. Vida del aislamiento del motor en función de variaciones de temperatura.[25]**

#### **4.4.2 Motor sincrónico**

La influencia de los huecos de tensión sobre el motor sincrónico, se va a asemejar a los efectos producidos sobre el motor de inducción (ver tabla 4.5), diferenciándose en que la velocidad se mantiene constante (sincrónico), soportando huecos de tensión de hasta 50 % de la tensión nominal, debido a la inercia que normalmente es mayor a la proporcionalidad del par con la tensión [18].

#### **4.4.3 Equipos de computación**

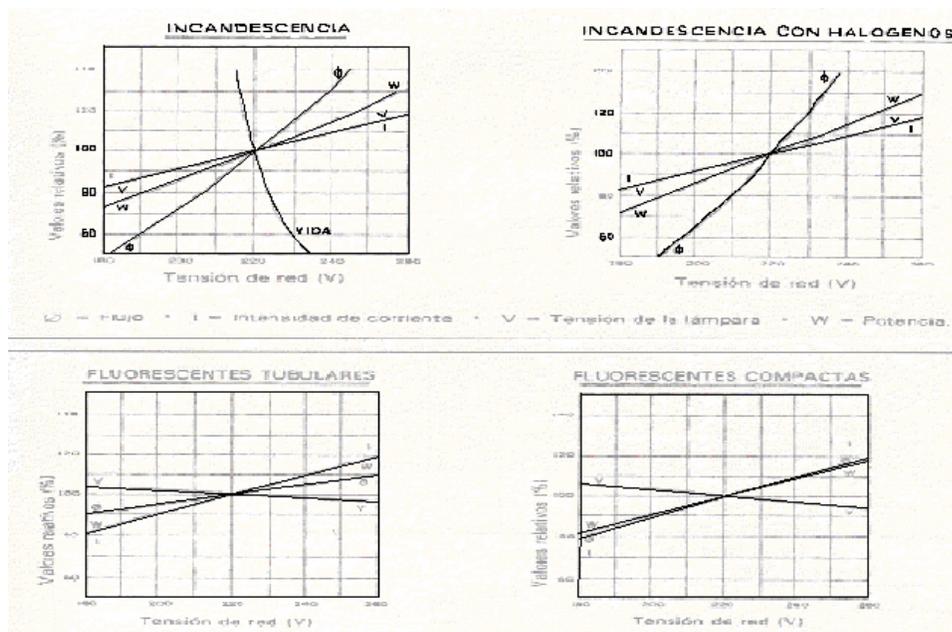
Los equipos informáticos en general se encuentran inmunes hasta niveles de tensión de  $\pm 10\%$  de la tensión nominal, debido a la estandarización de la curva ITIC – 1997, la cual establece los límites de tensión en función del tiempo, para el buen funcionamiento de los equipos informáticos. Es necesario acotar que la condición anterior se refiere a equipos que fueron diseñados bajo la consideración de la curva ITIC, por otra parte, existen equipos informáticos que no fueron diseñados bajo este estándar y que no se consideran en este estudio. En la actualidad, los equipos informáticos están presentes en los procesos industriales a nivel de control de

procesos y seguridad, entre otros. Debido a esto, al ocurrir perturbaciones en la onda de tensión como los huecos de tensión, se generan señales de mando erróneas ocasionando pérdidas económicas en las industrias por las pausas en la producción. Además, los huecos de tensión ocasionan daños sobre los equipos informáticos implicando la pérdida de datos.

#### 4.4.4 Lámparas

##### 4.4.4.1 Lámparas incandescentes y fluorescentes

El principal efecto del hueco de tensión sobre las lámparas incandescentes y fluorescentes es la disminución del flujo luminoso, en la figura 4.19 se representa la influencia de las variaciones de tensión en función de las características eléctricas de las lámparas, incluyendo el flujo luminoso.



**Figura 4.19. Efectos de la variación de tensión sobre lámparas incandescentes y fluorescentes. [7]**

#### 4.4.4.2 Lámparas de alta intensidad de descarga (H.I.D.)

Dentro del grupo que integran este tipo de lámparas están: Sodio a baja presión y alta presión, Metal Halide y Mercurio. Estas lámparas pueden soportar aproximadamente hasta un 75 % del nivel de tensión antes de apagarse [4], aunque este valor puede cambiar debido al fabricante o muestra de producción, el hecho de extinguirse implica que se ha de volver a encender y dependiendo del tipo de lámpara se deberá tomar un tiempo determinado para poder volver a encender la lámpara. Una de las variables importantes en la vida útil de la lámpara es el número de veces que se enciende la lámpara, ya que son inversamente proporcionales y dependerá del fabricante. La figura 4.20, muestra el comportamiento de los parámetros eléctricos de las lámparas de descarga en función de la variación de tensión de alimentación.

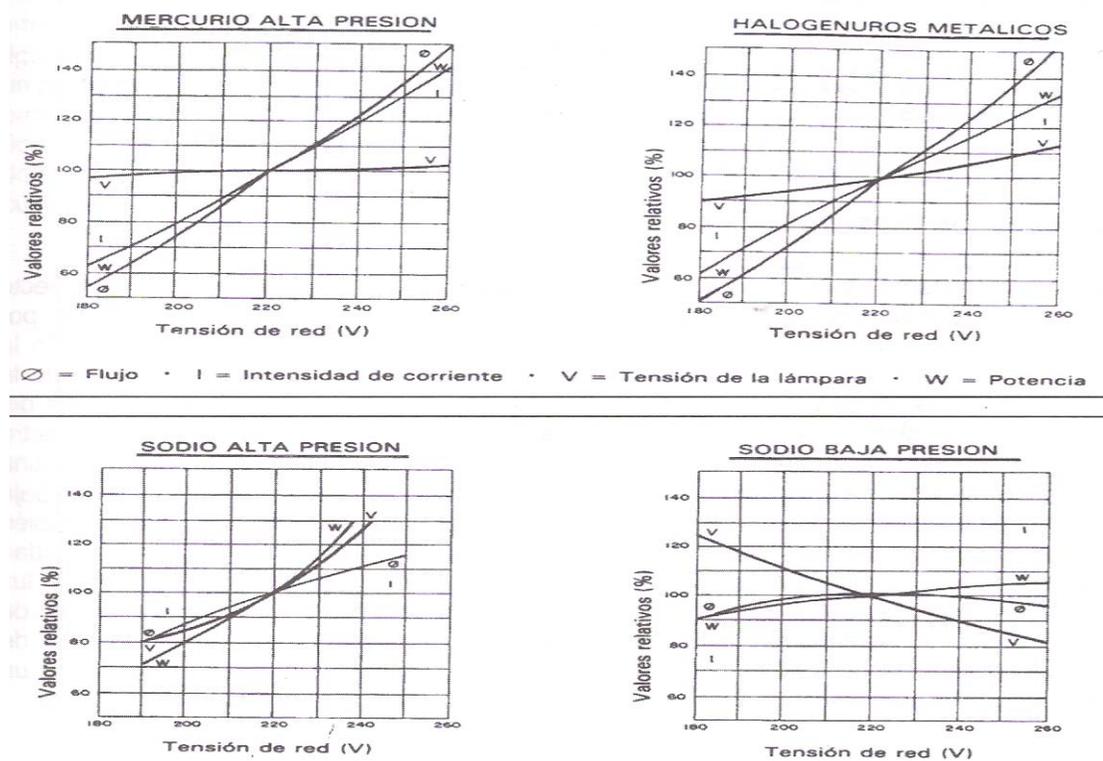


Figura 4.20. Efectos de la variación de tensión sobre lámparas de descarga. [7]

#### 4.4.5 Variadores de Velocidad - ASD Adjustable Speed Drive

Los variadores de velocidad, se basan en la variación de la frecuencia para lograr su aplicabilidad sobre los motores. Actualmente, son muy utilizados en procesos industriales, gracias a sus múltiples aplicaciones en cargas industriales, es por ello, la importancia de conocer el comportamiento de estos dispositivos eléctricos ante los huecos de tensión. En la figura 4.21, se muestra la estructura típica de los variadores de velocidad.

Para conocer el comportamiento de los variadores de velocidad en presencia de huecos de tensión, se muestra la curva de susceptibilidad asociada a este dispositivo eléctrico (figura 4.22), en la cual se puede observar una franja de sensibilidad punteada, una zona de interrupción y una zona de operabilidad, además de tener superpuesta la curva CBEMA. Evidentemente si comparamos las características de los huecos de tensión descritas en la sección 4.2, los variadores de velocidad se verán afectados llegando a la interrupción, y si se compara con la curva CBEMA se puede observar que son menos sensibles que los equipos de computación, esta comparación es debida a la mala utilización de la curva CBEMA para otros equipos eléctricos, siendo este comentario aplicable a las demás curvas de susceptibilidad.

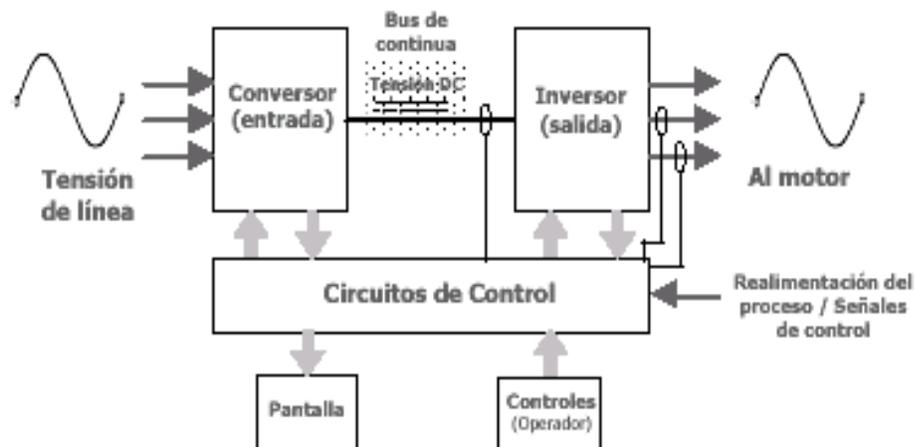


Figura 4.21. Estructura típica de un variador de velocidad.[26]

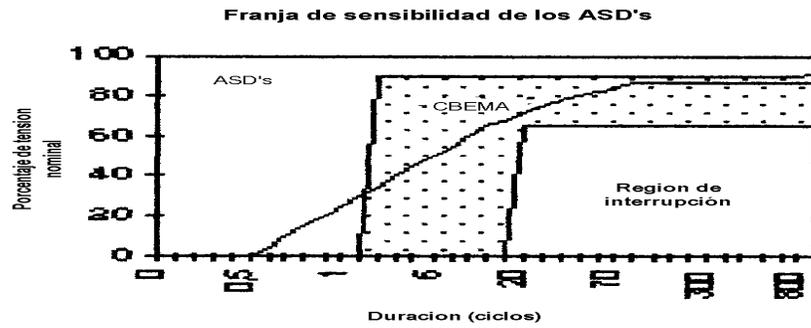


Figura 4.22. Curva de susceptibilidad de los variadores de velocidad. [27]

#### 4.4.6 Relés auxiliares

El relé, es un dispositivo electromagnético que permite abrir o cerrar uno o varios interruptores de circuitos eléctricos, mediante la circulación de una pequeña corriente por un electroimán (ver figura 4.23). La principal ventaja los relés es la de controlar dispositivos eléctricos a distancia, mediante señales eléctricas de poca corriente, en tal sentido, son muy utilizados en las industrias por su versatilidad en los controles de procesos. En la figura 4.24, se muestra el comportamiento del relé en presencia de disminuciones de tensión en función del tiempo (ciclos), en la cual se puede observar una franja de sensibilidad, una región de interrupción y una zona de buen funcionamiento. Sobre esta curva se encuentra superpuesta la curva CBEMA correspondientes a equipos de computación, siendo el relé auxiliar menos sensible en presencia de huecos de tensión que los equipos de computación.

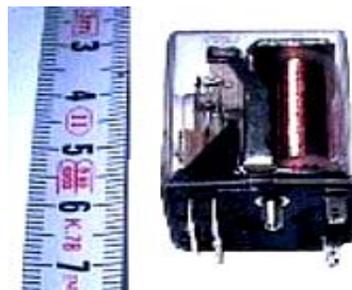


Figura 4.23. Relé enchufable de pequeña potencia. [28]

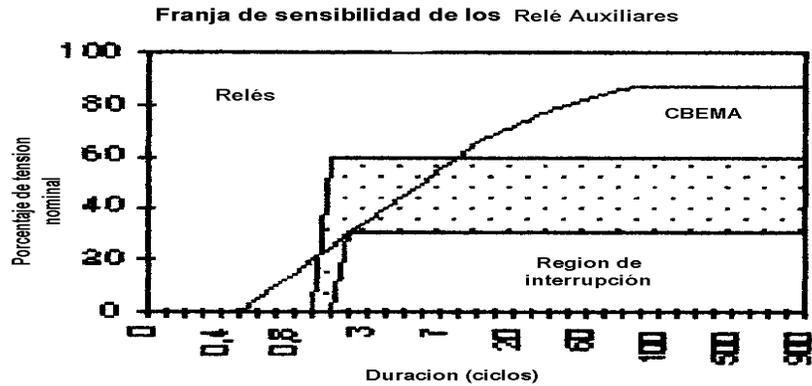


Figura 4.24. Curva de susceptibilidad de los relés auxiliares. [27]

#### 4.4.7 Equipos domésticos

Los equipos domésticos en la actualidad están presentes en las cargas industriales, comerciales y residenciales, tal es el caso del horno microondas, relojes digitales, video grabadoras (VCR). A pesar que existen variedad de equipos domésticos, se citan solamente los equipos eléctricos anteriormente mencionados, ya que éstos fueron objeto de estudio en relación a su funcionamiento en presencia de huecos de tensión [28], tal como se muestra en la figura 4.25.

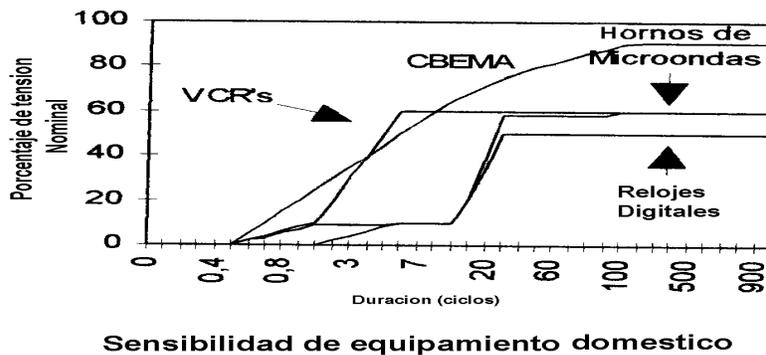


Figura 4.25. Curvas de susceptibilidad de equipos domésticos. [27]

Como se observa en la figura 4.25, los relojes digitales son los menos sensibles en presencia de los huecos de tensión en comparación con las demás curvas de sensibilidad. A pesar de ello, si se compara la curva de sensibilidad de los VCR y hornos microondas con la curva CBEMA, se puede observar que también son menos sensibles a los huecos de tensión. Las comparaciones con la curva CBEMA se hacen aprovechando la fuente de estudio de las curvas de susceptibilidad de cada uno de los equipos.

#### **4.4.8 Controlador Lógico Programable (PLC)**

El controlador lógico programable es un dispositivo electrónico destinado para controlar en tiempo real procesos secuenciales, mediante la previa programación del dispositivo. El funcionamiento se basa en la captación de señales, donde el PLC las procesa mediante un programa lógico, para luego actuar sobre los accionadores del sistema.

El PLC tiene un gran campo de aplicación dada las ventajas que presenta y su constante evolución en hardware y software, que permiten generar mayores beneficios. Generalmente, se utiliza en procesos de señalización y control en industrias, comercios y residencias. Otras de las ventajas importantes del PLC son: pequeño espacio de ocupación, posibilidad de introducir cambios en su programación, minimización del tiempo en los procesos, reducción de costos de mano de obra en mantenimiento, entre otros.

Debido a la presencia de los PLC en las industrias, comercios y residencias, en la figura 4.26, se muestra la curva de susceptibilidad del PLC, en la cual se puede observar una franja de sensibilidad, una zona de interrupción y una zona de correcto funcionamiento, además la curva CBEMA está superpuesta para observar que el PLC es más sensible en presencia de huecos de tensión que los equipos de computación representados por la curva CBEMA.

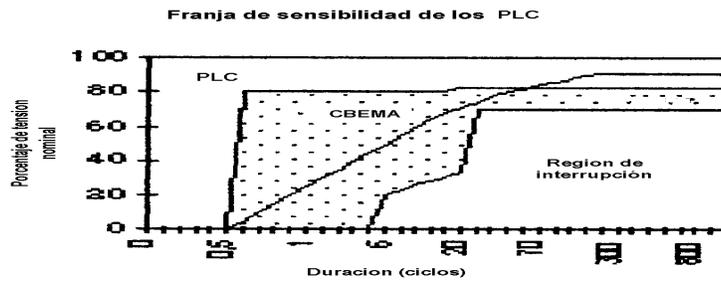


Figura 4.26. Curva de susceptibilidad del PLC. [27]

#### 4.4.9 Contactores

El contactor es un dispositivo mecánico que tiene como finalidad realizar la conexión o desconexión eléctrica, mediante la acción de un electroimán accionado a distancia. En la figura 4.27, se describen las partes que componen el contactor: su tamaño y números de contactos la cual varían según la potencia que se desea manejar. Otro aspecto importante en la caracterización del contactor (IEC), es el factor de potencia de la carga a manejar, ya que si el factor de potencia es menor que uno, el tiempo de vida útil de los contactos disminuye debido a la formación de arco eléctrico.

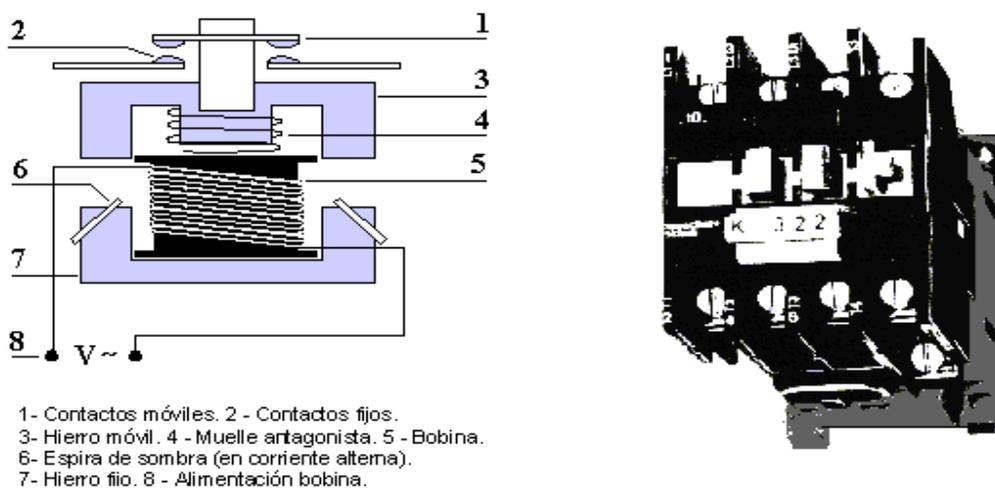
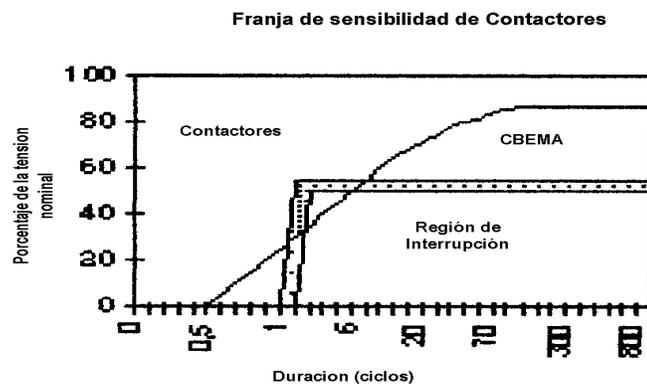


Figura 4.27. Descripción de un contactor.

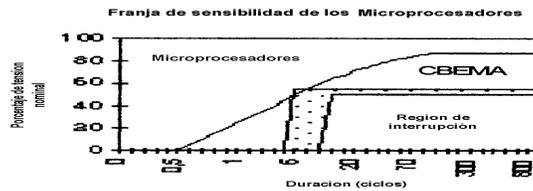
Los contactores son muy utilizados en las industrias, para el accionamiento de motores en sus distintas aplicaciones, por ejemplo: trenes de laminación, máquinas – herramientas, etc; esto quiere decir, que se actúa sobre un contactor para poner en marcha un motor. Si la tensión se encuentra por debajo del nivel de tensión del motor, el contactor abre y para encender nuevamente el motor se debe accionar el contactor manualmente. En este sentido, en la figura 4.28 se muestra la curva de susceptibilidad de los contactores y se observa su comportamiento ante la presencia de huecos de tensión, representando en la gráfica una zona de interrupción y una franja de sensibilidad. Si se compara con las características del hueco de tensión descrita por las normas, el contactor se ve afectado por la presencia de este fenómeno electromagnético.



**Figura 4.28. Curva de susceptibilidad del contactor. [27]**

#### **4.4.10 Microprocesadores**

En la actualidad, los microprocesadores están presentes en gran cantidad de equipos eléctricos, debido a su velocidad en el procesamiento de información.



**Figura 4.29. Curva de susceptibilidad del microprocesador. [27]**

En la figura 4.29 se observa el comportamiento del microprocesador, ante la presencia de huecos de tensión, en la cual se puede apreciar una zona de buen funcionamiento, una zona susceptible y una zona de interrupción.

#### **4.4.11 Equipos de generación de calor a base de resistencia**

Estos equipos se basan en la elevación de la temperatura por medio de la circulación de corriente por una resistencia, en los cuales la tensión y la corriente se comportan de manera proporcional, en función de la Ley de Ohm. Por lo tanto, la potencia de salida de estos equipos es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación, ocasionando una disminución en la potencia de salida y por ende en la temperatura, en presencia de huecos de tensión. Normalmente estos equipos están dispuestos de termostatos que tienen como función abrir o cerrar los circuitos de éstos equipos, los cuales se ven afectados en presencia de huecos de tensión.

#### **4.4.12 Equipos en general**

En la tabla 4.6, se señalan equipos que han sido analizados anteriormente, como otros que no, donde se indica el nivel mínimo de funcionamiento (hueco de tensión) y el tiempo máximo asociado al nivel mínimo de la magnitud de tensión. La tabla 4.7, presenta una serie de equipos eléctricos en función de la magnitud mínima de tensión de funcionamiento. Se debe resaltar que los valores de voltaje mínimo permisible indicados en la tabla 4.7 se debe a la opinión de una empresa de

generación, es por ello que se debe establecer comparaciones con las características de los fabricantes de motores.

**Tabla 4.6. Tensión y duración de funcionamiento de Equipos eléctricos. [19]**

<b>Equipos Eléctricos</b>	<b>Vmin (%)</b>	<b>Tmáx (ms)</b>
Arrancadores de motores	50	40
PLC	50 – 90	8 – 20
Inversores variador de velocidad	82	1,5
Controladores de proceso	70	< 8
Computadoras	70	< 8
Controladores de CC	88	< 8
Contactores	50 – 60	20 – 30
Interruptores Electromagnéticos	50	10
Relés y Arrancadores Electromagnéticos	50 – 60	15 – 40
Carga sensible alimentada con transformador	50	500
Equipo médico	60	130
Rectificadores para variadores de velocidad	50 – 80	2 – 3

**Tabla 4.7. Mínima tensión de funcionamiento de equipos eléctricos. [29]**

<b>Problema de localización del sag</b>	<b>Mínimo Voltaje Permissible (% de clasificación de equipo)</b>
Terminales al encender un motor.	80% (a)
Todos los terminales de otros motores que deben reaccelerar.	71% (a)
Accionamiento Contactor AC (por estándar)	85%
Accionamiento Contactor DC (por estándar)	80%
Contactador sostenido (promedio en uso)	60 – 70% (b)
Dispositivos de control de estado sólido	90% (c)
Equipo electrónico típico	80%
Balasto de lámpara Metal Halide y vapor de Sodio	90%
Parpadeo notable	3% cambios

- (a) NEMA solo diseño motor tipo B. El valor puede ser más alto (o bajo) dependiendo de las características reales del motor y de la carga.

- (b) El valor puede ser alto como 80% para ciertas condiciones durante intervalos que comienzan prolongados.
- (c) Puede variar típicamente  $\pm 5\%$  dependiendo de ajustes disponibles del transformador de la fuente de alimentación.

## 4.5 Clasificación de equipos eléctricos por cargas Residenciales, Comerciales e Industriales.

### 4.5.1 Cargas Residenciales

En la tabla 4.8, se puede observar que absolutamente todos los equipos eléctricos presentes en las cargas residenciales se ven afectados por los huecos de tensión, unos más afectados que otros, según las curvas de susceptibilidad correspondiente a cada equipo.

**Tabla 4.8. Equipos eléctricos típicos en cargas residenciales**

Sector	Aplicación	Equipo	Nivel de tensión [V]	Consumo de Potencia [kW]	Afectado por los huecos de tensión
Residencial	Iluminación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lámpara incandescente.</li> <li>• Lámpara fluorescente.</li> </ul>	110 220*	< 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si</li> <li>• Si</li> </ul>
	Generación de Calor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Horno y tostador.</li> <li>• Calentador de agua.</li> <li>• Plancha.</li> <li>• Secador de cabello.</li> <li>• Cafetera.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si</li> <li>• Si</li> <li>• Si</li> <li>• Si</li> <li>• Si</li> </ul>
	Con motores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lavadora.</li> <li>• Nevera.(compresor)</li> <li>• Trituradora.</li> <li>• Máquina de coser.</li> <li>• Licuadora.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si</li> <li>• Si</li> <li>• Si</li> <li>• Si</li> <li>• Si</li> </ul>
	Electrónica de Potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Televisor.</li> <li>• Equipo de sonido.</li> <li>• Computador.</li> <li>• Video-grabadora.</li> <li>• Radio/reloj.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si</li> <li>• Si</li> <li>• Si</li> <li>• Si</li> <li>• Si</li> </ul>

220\*: exclusivamente para el calentador de agua.

#### 4.5.2 Cargas Comerciales

En la tabla 4.9, se muestran los equipos eléctricos que generalmente están presentes en las cargas comerciales, destacando la particularidad en la poca utilización de equipos eléctricos. Se puede observar que todas las cargas se ven afectadas por los huecos de tensión, y como se analizó anteriormente unos se ven más afectados que otros dependiendo de sus curvas de sensibilidad.

**Tabla 4.9. Equipos eléctricos típicos en cargas comerciales**

Sector	Aplicación	Equipo	Nivel de tensión [V]	Consumo de Potencia [kW]	Afectado por los huecos de tensión
Comercial	Iluminación	• Lámpara incandescente.	110 220*	< 5 KW	• Sí
		• Lámpara fluorescente.			• Sí
	Generación de calor	• Cafetera.			• Sí
		• Secador de cabello			• Sí
Con motores	• Nevera.	• Sí			
Electrónica de potencia	• Televisor. • Radio/reloj • Computador.	• Sí			
		• Sí			
		• Sí			

#### 4.5.3 Cargas Industriales:

En la tabla 4.10 se muestran los equipos eléctricos presentes en las cargas industriales, en los cuales se destacan las aplicaciones de motores y de electrónica de potencia. Se puede apreciar que todos los equipos eléctricos se ven afectados por los huecos de tensión, y al igual que las cargas residenciales y comerciales el nivel de afectación depende de las curvas de susceptibilidad.

#### 4.6 Indicadores de calidad del hueco de tensión

A nivel internacional existen indicadores para cuantificar los huecos de tensión, antes de analizar los distintos parámetros de medición se especifican los

pasos a seguir para determinar los índices de los huecos de tensión, según la propuesta de la norma IEEE 1564 [30]:

- (a) Medir el nivel de tensión bajo prueba con cierta tasa y resolución de muestreo.
- (b) Calcular las características del evento en función del tiempo de los voltajes muestreados.
- (c) Calcular el índice de un solo evento.

**Tabla 4.10. Equipos eléctricos típicos en cargas industriales**

Sector	Aplicación	Equipo	Nivel de tensión [V]	Consumo de Potencia [kW]	Afectado por los huecos de tensión
<b>Industrial</b>	Iluminación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lámpara incandescente.</li> <li>• Lámpara fluorescente.</li> <li>• Lámpara fluorescente de alta intensidad de descarga</li> </ul>	110 220	> 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> </ul>
	Generación de calor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calentadores de agua.</li> </ul>	220		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí</li> </ul>
	Con motores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventiladores.</li> <li>• Bombas, molinos.</li> <li>• Agitadores.</li> <li>• Compresores de aire.</li> <li>• Motores para accionamientos.</li> <li>• Máquinas y herramientas</li> </ul>	220 440		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> </ul>
	Electrónica de potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reguladores de velocidad.</li> <li>• Reguladores de tensión.</li> <li>• Arrancadores suaves.</li> <li>• Equipos de control (PLC's).</li> <li>• Fuentes de potencia ininterrumpidas (UPS's).</li> <li>• Sistema de cómputos.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí</li> </ul>

- (d) Calcular el índice de sitio de los índices de un solo evento de todos los eventos medidos durante un cierto período de tiempo.
- (e) Calcular el índice del sistema de los índices de sitio para todas las localidades dentro de un sistema de potencia.

En el paso (a), la tasa típica utilizada para el muestreo de la tensión es 128 y 256 muestras por ciclo para cada caso y la resolución se relaciona con los números de bits usados para el almacenamiento de una muestra de voltaje.

En el ámbito de conocer los indicadores de calidad del hueco de tensión, seguidamente se presentan cada uno de los índices propuestos por las distintas instituciones internacionales, al igual que empresas distribuidoras del servicio eléctrico.

#### 4.6.1 Sag Score

El Sag Score es utilizado por la empresa de distribución eléctrica Detroit Edison, para sus clientes fabricantes de automóviles, y se calcula por medio de las magnitudes de voltaje en las tres fases ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ) en por unidad correspondientes al peor hueco de tensión en un período determinado de tiempo, y para determinar el Sag Score se utiliza la siguiente ecuación 4.5:

$$S = 1 - \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \dots\dots\dots(4.5)$$

Como puede observarse el Sag Score es el promedio de las caídas de tensión en las tres fases, por lo que a mayor magnitud de Sag Score mayor será la profundidad del hueco de tensión. La ventaja principal de este método es la

simplicidad del cálculo, pero no toma en consideración la duración de los huecos de tensión. Además asume tres criterios para el cálculo de este indicador anual:

- (a) Para la muestra del peor hueco de tensión se registra a razón de 15 minutos por cada localización, siendo este intervalo de tiempo, un punto en contra de este indicador debido a la no correspondencia con el tiempo de medición del indicador de la fluctuaciones rápidas de tensión (Pst), ya que el Pst establece un período de medición de 10 min, y ocasionaría la programación del equipo en dos intervalos de tiempos distintos, implicando el manejo de mayor volumen de datos, disminuyendo la eficiencia del equipo de medición en relación a la capacidad de almacenamiento de información.
- (b) Cuando una o dos fases sobrepasan el 1 por unidad (1 p.u.), estos valores se reajustan a 1 (1 p.u.), por lo que no se consideran las sobretensiones presentes en las fases sanas.
- (c) Para considerar los huecos de tensión, por lo menos una de las fases debe tener un valor de tensión menor o igual al 0,75 por unidad. Si se compara este criterio como característica del hueco de tensión, con la norma IEEE 1159 – 1995, se puede observar que las magnitudes características no coinciden, la cual originaría complicaciones a la hora de utilizar equipos de medición basados en las normas establecidas.

#### **4.6.2 SARFI**

Las investigaciones ejecutadas sobre este indicador se desarrollaron bajo el patrocinio del Instituto de Investigación de la Potencia eléctrica (siglas en inglés EPRI), El SARFI significa System Average RMS Frequency Indices ó Índice promedio de la frecuencia de la tensión eficaz del sistema, se ubica dentro del grupo de indicadores de sistema y es calculado para cada una de las fases, mediante la siguiente ecuación:

$$SARFI = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} N_i}{N_T} \dots\dots\dots(4.6)$$

Donde:

$n_s$  = número de acontecimientos.

$N_i$  = número de clientes que experimentan un acontecimiento.

$N_T$  = número de los clientes servidos de la sección que se determinará.

Quando se habla de acontecimiento se refiere a huecos de tensión ó incrementos de tensión ó interrupciones; teniendo en cuenta que todas estas perturbaciones electromagnéticas están dentro de la categoría de variaciones de tensión de corta duración especificada en la norma IEEE std. 1159 – 1995. Los dos tipos de SARFI existentes son los siguientes:

- (a) **SARFI<sub>X</sub>**: la diferencia existente entre éste indicador y el SARFI, es el subíndice “X”, que representa el umbral de tensión eficaz. El SARFI<sub>X</sub> indica el número de acontecimientos por debajo del umbral “X” cuando X sea menor que la tensión nominal, y por encima del umbral “X” cuando X sea mayor que la tensión nominal. Los umbrales establecidos para este tipo de SARFI<sub>X</sub>, son: 140%, 120%, 110%, 90%, 80%, 70%, 50% y 10 % de la tensión nominal. Por ejemplo: Un SARFI<sub>140%</sub>, indica el índice promedio de la frecuencia de la tensión eficaz, que está por encima del 140 % de la tensión nominal. En cambio un SARFI<sub>90%</sub>, indica los que están por debajo del 90 % de la tensión nominal.
- (b) **SARFI – CURVA**: se basa en las curvas de susceptibilidad asociada a equipos y componentes eléctricos. Estas curvas, por lo general, presentan zonas de funcionamiento aceptable y zonas donde el desempeño es afectado. En consecuencia, el SARFI – CURVA, indica el índice promedio de la

frecuencia de la tensión eficaz, que se encuentra fuera de la zona de funcionamiento adecuado que se representa en la curva de susceptibilidad, por ejemplo: CBEMA, ITIC, SEMI, etc.

#### **4.6.3 RF**

La diferencia entre el indicador RF y el SARFI, se establece en que el SARFI por ser un indicador de sistema, se utiliza para planificación y mantenimiento, en cambio el RF es un indicador de sitio, siendo utilizado para problemas legales o relacionado a la imposición de multas y sanciones entre la empresa distribuidora de energía eléctrica y el usuario. Este indicador al igual que el SARFI, fue patrocinado por el Instituto de Investigación de la Potencia Eléctrica (EPRI).

El Indicador RF define cinco rangos de magnitud (90, 80, 70 50 y 10%) también conocidos como umbrales y tres intervalos de magnitud definidos por la IEEE std. 1159 – 1995. Los indicadores RF definidos son:

RF<sub>X</sub>: Frecuencia de variación del valor eficaz, para un umbral “X”, con duración entre 0,5 ciclos a 1 minuto.

IRF<sub>X</sub>: Duración entre 0,5 ciclos a 30 ciclos.

MRF<sub>X</sub>: Duración entre 30 ciclos a 3 segundos.

TRF<sub>X</sub>: Duración entre 3 segundos a 1 minuto.

Se puede observar que este indicador esta enfocado hacia las características de duración de las perturbaciones electromagnéticas de corta duración.

#### **4.6.4 ESKOM Sudáfrica (NRS 048 – 2)**

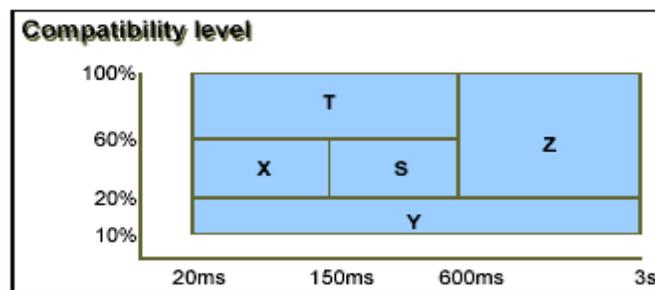
La ESKOM Sudáfrica es una empresa de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. ESKOM ha desarrollado un indicador del hueco de

tensión, debido a la no existencia de normas internacionales que lo contemple y dado los efectos que ha ocasionado en las cargas de sus redes eléctricas, que a pesar de no ser tan severos como los ocasionados por las interrupciones, son tan frecuentes que los igualan en severidad total. Esta empresa ha formulado límites del número de huecos de tensión, dependientes de las características de funcionamiento de los sistemas eléctricos, y enfocados en las particularidades de los huecos de tensión al momento de evaluar el impacto en las cargas..

La empresa ESKOM realizó mediciones de calidad de potencia eléctrica en su sistema eléctrico durante varios años, obteniendo información estadística sobre el número de huecos de tensión y sus características asociadas. Basándose en estos resultados se formularon los niveles de compatibilidad (ver tabla 4.11), en función de la magnitud y duración del hueco de tensión, tal como se muestra en la figura 4.30:

**Tabla 4.11. Niveles de compatibilidad [31]**

CLASE	MAGNITUD (%)	DURACIÓN (ms)
Y	10 – 20	20 – 3000
X	20 – 60	20 – 150
S	20 – 60	150 – 600
T	60 – 100	20 – 600
Z	20 – 100	600 - 3000



**Figura 4.30. Categorías de los huecos de tensión S, T, X, Y y Z. [31]**

En la figura 4.30, se puede observar que los huecos de tensión están divididos por ventanas rectangulares caracterizados en magnitud y duración, la razón de esta división se basa en las características de los equipos de protección y la sensibilidad de las cargas. Las ventanas rectangulares se clasifican con las letras S, T, X, Y y Z, en la tabla 4.12 se especifica el número de acontecimientos por año según el nivel de tensión del sistema (compatibilidad electromagnética). Sin embargo, ESKOM, para asegurar los límites mínimos en sistemas donde las características en la red eléctrica cambian y, considera que la cantidad de huecos de tensión que deberían de soportar los equipos eléctricos de los clientes de las empresas sean el adecuado, ESKOM desarrolló unos nuevos niveles de funcionamiento (ver tabla 4.13) para los distintos niveles de tensión y según el tipo de sistema. Esta tabla es utilizada por los clientes de la empresa, para evaluaciones económicas preliminares al cumplimiento por parte de la empresa en el condicionamiento de la energía.

**Tabla 4.12. Niveles de compatibilidad para distintos niveles de tensión. [32]**

	S	T	X	Y	Z
6,6 kV a 44 kV	30	30	100	150	20
> 44 kV a 132 kV (rural)	69	54	215	314	49
> 44 kV a 132 kV	25	25	80	120	16
> 132 kV a 765 kV	11	6	45	88	5

**Tabla 4.13. Límites de números de huecos de tensión por año para niveles de tensión y características del sistema. [32]**

	S	T	X	Y	Z
6,6 kV a 44 kV	10	8	50	75	10
> 44 kV a 132 kV (rural)	25	15	100	150	20
> 44 kV a 132 kV	10	10	50	80	5
> 132 kV a 765 kV	3	3	33	40	2

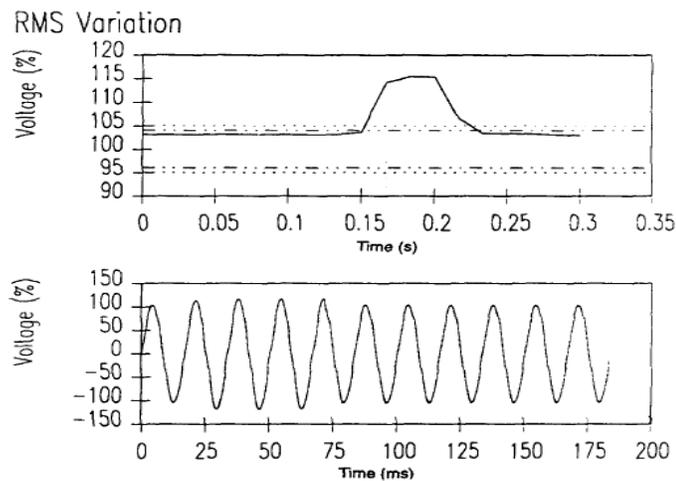
Para la obtención del hueco de tensión, se toma el de mayor profundidad en valores eficaces y la duración esta condicionada a la máxima duración de la fase más afectada. Las empresas distribuidoras miden los huecos de tensión según la Norma Surafricana de la Nacional Electricity Regulator (NRS 048-2:1996). Las mediciones se realizan en las tres fases, en el caso de que el sistema presente conexión neutro sólidamente a tierra del transformador, son medidos los voltajes fase a neutro. En caso de sistemas con conexión delta se mide la tensión fase a fase.

## CAPÍTULO V

### INCREMENTO DE TENSIÓN

#### 5.1 Definición de los incrementos de tensión

Los incrementos de tensión, se definen como el aumento de tensión por encima de un umbral establecido para la tensión de referencia en valores eficaces a frecuencia industrial, en una o más fases de la red de energía eléctrica, para luego disminuir la tensión eficaz en un tiempo establecido [5]. En la figura 5.1, se puede observar la representación de un incremento de tensión en valores instantáneos y eficaces, obtenida de la norma IEEE std. 1159 – 1995 (R2001), donde se ejemplifica una falla monofásica, que origina un incremento de tensión en las fases sanas.



**Figura 5.1. Voltaje eficaz e instantáneo de un Sag causado por una falla monofásica. [5]**

Completando la definición anterior, la norma europea EN 50160 - 1999 denomina el incremento de tensión como sobrevoltaje temporal a la frecuencia del sistema, definiéndolo como: “*El sobrevoltaje temporal está dado por la locación de relativa larga duración*” [33]. Por otra parte, la norma IEEE std. 1250 – 1995 define el incremento de tensión como un sobrevoltaje momentáneo a frecuencia fundamental

con duración de medio ciclo a unos pocos segundos. Estas últimas definiciones presentan similitud, pero se considera la definición adoptada por la norma IEEE std. 1159 – 1995 (R2001) como la más adecuada debido a ser la más actualizada.

## 5.2 Características de los incrementos de tensión

Actualmente, los incrementos de tensión se caracterizan por su magnitud y duración. Los estudios relacionados a este tipo de perturbaciones ha sido escasos y principalmente se debe a la escasa presencia de este fenómeno electromagnético en las redes eléctricas, tal como se puede observar en el estudio mostrado en la tabla 5.1:

**Tabla 5.1. Comparación en porcentaje de perturbaciones electromagnéticas. [34]**

	<b>% del total de perturbaciones</b>
<b>Huecos de tensión (Sags)</b>	62%
<b>Ondas Sobretensión (Surges)</b>	21%
<b>Interrupciones</b>	14%
<b>Incrementos de tensión</b>	2%

Es importante señalar que este estudio no corresponde al sistema de distribución eléctrico venezolano, no obstante sería necesario realizar un estudio similar para evaluar el comportamiento del sistema. De llegarse a realizar dicho estudio y confirmar que los incrementos de tensión son poco frecuentes en las redes de distribución eléctrica venezolana, sería conveniente considerar la pertinencia de continuar con los estudios de los incrementos de tensión, ya que el objetivo primordial de los mismos, es plantear un indicador que permita evaluar el comportamiento y las características de dicho fenómeno. Por otra parte, de ratificar la presencia significativa de incrementos de tensión, entonces sería inminente la continuación del estudio de esta perturbación electromagnética. Los incrementos de tensión poseen características normadas con respecto a su magnitud y duración, entre ellas:

### 5.2.1 Magnitud del incremento de tensión

Para el cálculo de la magnitud del incremento de tensión se plantea los mismos métodos aplicados en el capítulo IV – Huecos de Tensión, ya que la norma IEEE std. 1159 – 1995 (R2001) establece que la representación del incremento de tensión se debe realizar en valores eficaces de tensión, Por otra parte, es importante resaltar, que la normativa internacional plantea características para los incrementos de tensión que se deben considerar.

#### 5.2.1.1 Normativa de magnitud de tensión típica del incremento de tensión

La norma IEEE std. 1159 – 1995 (R2001), establece las características de la magnitud del incremento de tensión. En la tabla 5.2, se describen tres categorías de incrementos de tensión: instantáneo, momentáneo y temporal, donde sus rangos de tensión son 1,1 a 1,8 p.u., 1,1 a 1,4 p.u. y 1,1 a 1,2 p.u., respectivamente. La norma europea EN 50160, indica que la magnitud asociada a la sobretensión temporal (incremento de tensión) depende de la localidad, y no define magnitudes específicas. Es por ello, que la norma IEEE 1159 se toma como referencia para citar comparaciones en el transcurso de este capítulo.

**Tabla 5.2. Magnitudes típicas del incremento de tensión**

Norma	Categorías	Magnitud de voltaje típico
IEEE 1159-1995 (R 2001)	Variaciones de corta duración	
	Instantáneo Incremento de tensión (Swell)	1,1 - 1,8 pu
	Momentáneo Incremento de tensión (Swell)	1,1 - 1,4 pu
	Temporal Incremento de tensión (Swell)	1,1 - 1,2pu

### 5.2.1.2 Tensión eficaz

El método aplicado para determinar la tensión eficaz que representa el incremento de tensión, se realiza de la misma manera que los huecos de tensión, utilizando la ecuación 5.1, la ecuación 5.2 y 5.3 aplican para cada muestra y para cada ciclo.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i^2} ,.....(5.1)$$

$$V_{rms}(N) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=K-N+1}^{i=K} v_i^2} ,.....(5.2) \text{ Para cada muestra}$$

$$V_{rms}(KN) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=(K-1).N+1}^{i=K.N} v_i^2} ,.....(5.3). \text{ Para cada ciclo}$$

Donde:

N: Número de muestras por ciclo.

$V_i$ : Voltaje del tiempo en el dominio del tiempo.

### 5.2.1.3 Componente fundamental

El método de la componente fundamental es planteado en el capítulo IV – Huecos de Tensión, calculando su magnitud mediante la ecuación 5.4.

$$V_{fund}(t) = \frac{2}{T} \cdot \int_{t-T}^T v(t) e^{j \cdot \omega_0 \cdot t} \cdot dt ,.....(5.4)$$

Donde:

T: Período de la onda de tensión

$\omega_0 = (2 \times \Pi) / T$

Este método también es planteado para la representación del incremento de tensión, debido a que no es exclusivo de los huecos de tensión. La obtención de la

magnitud representativa de esta perturbación electromagnética se debe realizar con ayuda de un algoritmo de la transformada rápida de Fourier, tal como lo plantea el Ing. Math Bollen, en su libro “*Entendiendo la Calidad de Potencia Eléctrica*”.

### 5.2.2 Duración del incremento de tensión

La norma IEEE std. 1159 – 1995, establece la duración típica de este tipo de perturbación electromagnética, la cual se puede apreciar en la tabla 5.3:

**Tabla 5.3. Duración típica del incremento de tensión.**

Norma	Categorías	Duración típica
IEEE 1159	<b>Variaciones de corta duración</b>	
	Instantáneo Incremento de tensión (Swell)	0,5 - 30 ciclos
	Momentáneo Incremento de tensión (Swell)	30 ciclos - 3 s
	Temporal Incremento de tensión (Swell)	3s - 1min

El incremento de tensión se divide en tres categorías: instantáneo, momentáneo y temporal, con un rango de duración de 0,5 a 30 ciclos, 30 ciclos a 3 s y 3 s a 1 minuto respectivamente. Es necesario mencionar que la norma EN 50160, no divide los incrementos de tensión y no fija un tiempo establecido para su caracterización indicando una relativa larga duración.

### **5.3 Fuentes de los incrementos de tensión**

#### **5.3.1 Desconexión de grandes bloques de carga**

La ocurrencia de este fenómeno esta dada por el comportamiento del sistema, ya que al predominar el comportamiento inductivo y ante la presencia de variaciones bruscas de corriente en la red eléctrica, se dan a lugar a variaciones de tensión, debido a que la naturaleza de la inductancia es la de oponerse a las variaciones bruscas de corriente. Para justificar este comportamiento se presenta la siguiente ecuación 5.5:

$$V = L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} , \dots\dots (5.5)$$

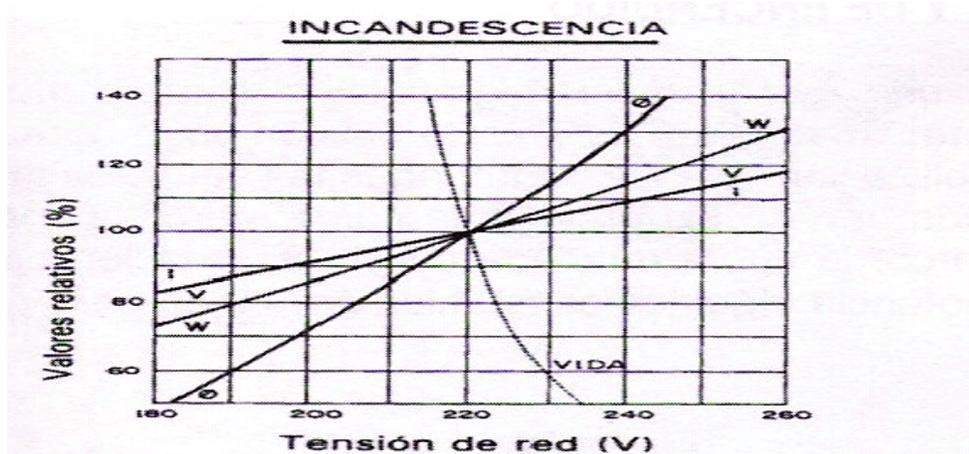
#### **5.3.2 Fallas monofásicas a tierra en el sistema eléctrico**

Generalmente, esta es la mayor causa de generación de incrementos de tensión, y pueden llegar a ser 1,73 veces la tensión nominal en las fases sanas cuando la impedancia de la secuencia cero tiende a infinito (ver figura 5.1). Asociada a esta perturbación electromagnética se encuentra la severidad del incremento de tensión, la cual se encuentra sujeta a la localización de la falla, la puesta a tierra y la impedancia del sistema.

### **5.4 Efectos de los incrementos de tensión**

#### **5.4.1 Lámparas incandescentes**

Los incrementos de tensión son una de las causas más severas que disminuyen la vida útil de las lámparas incandescentes, esto se puede apreciar en la figura 5.2, donde se muestra la vida útil de una lámpara incandescente de 220 V, en función de la tensión de alimentación.



**Figura 5.2. Comportamiento de la Lámpara incandescente a variaciones de tensión.  $\Phi$  = flujo, I = Intensidad de corriente, V = Tensión de la lámpara, W = Potencia. [27]**

La norma “IEEE Recommended Practice for electric Power Distribution for Industrial Plants”. std 141 – 1993, establece el efecto de las variaciones de tensión en función de la vida útil de las lámparas incandescentes de 120 V, 125 V y 130 V. En la figura 5.2, se puede visualizar el comportamiento, y en los valores reportados en la tabla 5.4, se confirma el comportamiento de las variables eléctricas debido a los incrementos de tensión.

#### 5.4.2 Equipos de computación

Tomando como referencia la curva ITIC – 1997 (ver figura 4.10 – Capítulo IV) y realizando el contraste con las características descritas anteriormente en las normas, se puede afirmar que los equipos informáticos se ven seriamente afectados por los incrementos de tensión, ciertamente porque la zona superior coloreada en azul representa zona de daño para los equipo eléctrico.

La aplicación de los equipos informáticos han abarcado las cargas residenciales, comerciales e industriales; los efectos de los incrementos de tensión se ven reflejados económicamente principalmente a nivel industrial, ya que señales

erróneas emitidas por el mal funcionamiento de los equipos informáticos podrían ocasionar la interrupción de procesos de manufactura donde es indispensable la continuidad de la producción, por ejemplo: industrias petroleras, industrias metalúrgicas, etc. Es necesario acotar, que cuando se hace referencia a la condición anterior en el marco de desarrollo de este trabajo, se habla de equipos que fueron diseñados bajo la consideración de la curva ITIC, puesto que, existen equipos informáticos que no fueron diseñados bajo este estándar y en consecuencia no fueron considerados en esta propuesta.

**Tabla 5.4. Efecto de variaciones de voltaje sobre lámparas incandescentes. [4]**

Voltaje Aplicado (V)	Rango de voltaje					
	120 V		125 V		130 V	
	% Vida	% Flujo luminoso	% Vida	% Flujo luminoso	% Vida	% Flujo luminoso
<b>105</b>	575	64	880	55	-	-
<b>110</b>	310	74	525	65	880	57
<b>115</b>	175	87	295	76	500	66
<b>120</b>	100	100	170	88	280	76
<b>125</b>	58	118	100	100	165	88
<b>130</b>	34	132	59	113	100	100

### 5.4.3 Motor de inducción

En la tabla 5.5 se presentan los cambios de las características eléctricas del motor de inducción en presencia de incrementos de tensión del 110% con respecto a la tensión nominal, suministrada por la norma IEEE std. 141, donde se puede observar que el par de arranque varían en proporción al cuadrado de la tensión, ocasionando el aumento de la intensidad de corriente de arranque. Otro fenómeno similar se presenta cuando el motor se encuentra sin carga, generando aumento de la corriente. Los dos fenómenos anteriores ocasionan el aumento de la temperatura en los devanados del motor, y como vimos en la sección 4.4.1 del capítulo IV, el aumento de temperatura reduce la vida útil del motor.

#### 5.4.4 Motor sincrónico

El incremento de tensión afectará las características eléctricas del motor sincrónico de igual manera que los motores inducción (ver tabla 5.5), pero con la diferencia que el motor sincrónico mantendrá su velocidad constante. Se observa en la tabla 5.5, que el motor sincrónico se verá seriamente afectado cuando ocurra un incremento de tensión, por ejemplo cuando el motor esté sin carga, requerirá de un aumento de la corriente nominal entre el 10 % y 30 %, provocando aumento en la temperatura en los arrollados del estator. [4]

**Tabla 5.5. Efecto general del incremento de tensión sobre las características del motor de inducción. [4]**

Características	Proporcional a	Variación de Voltaje del 110 % de tensión de placa
Máximo funcionamiento del torque y arranque	$V^2$	+21 %
Porcentaje de deslizamiento	$(1/V)^2$	- 17 %
Velocidad a plena carga	Velocidad sincrónica menos deslizamiento	+ 0,2 a + 1 %
Corriente de arranque	tensión	+10 %
Corriente a plena carga	Varía con el diseño	- 5 a - 10 %
Corriente sin carga	Varía con el diseño	+ 10 a + 30 %
Temperatura rise	Varía con el diseño	- 10 % a - 15 %
Eficiencia a plena carga	Varía con el diseño	+ 1 a + 3 %
Factor de potencia a plena carga	Varía con el diseño	- 2 a - 7 %
Ruido magnético	Varía con el diseño	Se incrementa levemente

### 5.5 Clasificación de equipos eléctricos por cargas Residenciales, Comerciales e Industriales

#### 5.5.1 Cargas Residenciales

En la sección 5.4, se argumentó sobre los efectos ocasionados por los incrementos de tensión en los equipos eléctricos conectados a la red de distribución eléctrica; en la tabla 5.6, se presentan los equipos eléctricos típicos afectados por los

incrementos de tensión en las cargas residenciales. Observándose que absolutamente todos los equipos eléctricos son afectados por los incrementos de tensión, variando el nivel de severidad con la que se ven perturbados.

**Tabla 5.6. Equipos eléctricos típicos en cargas residenciales**

Sector	Aplicación	Equipo	Nivel de tensión [V]	Consumo de Potencia [kW]	Afectado por los incrementos de tensión
Residencial	Iluminación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lámpara incandescente.</li> <li>Lámpara fluorescente.</li> </ul>	110 220*	< 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sí</li> <li>Sí</li> </ul>
	Generación de Calor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tostador.</li> <li>Calentador de agua.</li> <li>Plancha.</li> <li>Secador de cabello.</li> <li>Cafetera.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Sí</li> <li>Sí</li> <li>Sí</li> <li>Sí</li> <li>Sí</li> </ul>
	Producción de motor (motor)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lavadora.</li> <li>Nevera.(compresor)</li> <li>Máquina de coser.</li> <li>Licuadaora.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Sí</li> <li>Sí</li> <li>Sí</li> <li>Sí</li> </ul>
	Electrónica de Potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Televisor.</li> <li>Equipo de sonido.</li> <li>Computador.</li> <li>Video-grabadora.</li> <li>Radio/reloj.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Sí</li> <li>Sí</li> <li>Sí</li> <li>Sí</li> <li>Sí</li> </ul>

220\*: exclusivamente para el calentador de agua

### 5.5.2 Cargas Comerciales

Las cargas comerciales típicas se presentan en la tabla 5.7, estos equipos eléctricos en su totalidad son afectados por los incrementos de tensión, en base a las curvas de susceptibilidad analizadas en la sección 5.4 de este capítulo.

**Tabla 5.7. Equipos eléctricos típicos en cargas comerciales**

Sector	Aplicación	Equipo	Nivel de tensión [V]	Consumo de Potencia [kW]	Afectado por los incrementos de tensión
Comercial	Iluminación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lámpara incandescente.</li> <li>• Lámpara fluorescente.</li> </ul>	110	< 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> </ul>
	Generación de calor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cafetera.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí</li> </ul>
	Producción de motor (motor)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nevera.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí</li> </ul>
	Electrónica de potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Televisor.</li> <li>• Radio/reloj</li> <li>• Computador.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> </ul>

### 5.5.3 Cargas Industriales

La mayor cantidad de equipos eléctricos se presentan en las cargas industriales debido a las distintas aplicaciones, tal como se muestra en la tabla 5.8, además, en dicha tabla, se puede observar que estos equipos eléctricos se ven afectados en su funcionamiento, debido a los incrementos de tensión. El sector industria es el que se ve mayor afectado económicamente por los incrementos de tensión, ya que las perturbaciones electromagnéticas pueden ocasionar discontinuidades en los procesos de producción de las industrias.

### 5.6 Indicadores de calidad de los incrementos de tensión

Actualmente, son pocos los estudios realizados sobre indicadores de calidad relacionados con los incrementos de tensión, debido a que esta perturbación es poco frecuente en las redes eléctricas, en comparación con los huecos de tensión y otras perturbaciones electromagnéticas. Sin embargo, existen propuestas para los huecos de tensión que se pueden adaptar al caso de los incremento de tensión, lo cual implica realizar un estudio para conocer la viabilidad de estos indicadores.

**Tabla 5.8. Equipos eléctricos típicos en cargas industriales**

Sector	Aplicación	Equipo	Nivel de tensión [V]	Consumo de Potencia [kW]	Afectado por los incrementos de tensión
<b>Industrial</b>	Iluminación	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lámpara incandescente.</li> <li>▪ Lámpara fluorescente.</li> <li>▪ Lámpara fluorescente, de alta intensidad, de descarga</li> </ul>	110 220	> 5 KW	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sí</li> <li>▪ Sí</li> <li>▪ Sí</li> </ul>
	Generación de calor	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Secadores.</li> <li>• Calentadores de agua.</li> </ul>	220 440		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sí</li> <li>▪ Sí</li> </ul>
	Producción de motor (motor)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventiladores.</li> <li>• Bombas, molinos.</li> <li>• Agitadores.</li> <li>• Compresores de aire.</li> <li>• Motores para accionamientos.</li> <li>• Máquinas y herramientas</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> </ul>
	Electrónica de potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reguladores de velocidad.</li> <li>• Equipos de control (PLC's).</li> <li>• Fuentes de potencia ininterrumpidas (UPS's).</li> <li>• Sistema de cómputos.</li> </ul>	220 440 2200**		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> <li>• Sí</li> </ul>

2200\*\*: tensión para equipos de alta demanda de potencia.

### 5.6.1 SARFI

El SARFI de la ESKOM Sudáfrica, puede ser incluido como indicador de los incrementos de tensión, debido a que entre una de sus aplicaciones utiliza como referencia la curva de susceptibilidad planteada por la ITIC, donde se establece una zona de incremento de tensión, considerada en este capítulo.

### 5.6.2 $\Delta V / V$

El base a la experiencia de Argentina, este indicador, puede ser aprovechado para ser empleado como localizador de fallas (para fluctuaciones rápidas de tensión) y no como un indicador de severidad de las perturbaciones electromagnéticas , tal como se fundamenta en el capítulo III – sección 3.6.2, debido al ahorro monetario que se genera. A pesar que este indicador no esta siendo aplicado en Argentina para los incrementos de tensión, sería interesante manejar una base de datos del comportamiento de los niveles de tensión del sistema de distribución venezolano que permita afirmar la viabilidad en la utilización del mismo como localizador de perturbaciones electromagnéticas.

## CONCLUSIONES

Las fluctuaciones rápidas de tensión han sido enfocados principalmente en analizar sus efectos sobre las lámparas incandescentes, observándose principalmente la severidad de las variaciones de intensidad luminosa sobre el ser humano con ayuda de indicadores de calidad como el Pst. Debido a esto, los estudios sobre la afectación de las fluctuaciones rápidas de tensión en otros equipos eléctricos han sido escasos, y los existentes se limitan a suponer de forma cualitativa su posible afectación ante dicha perturbación electromagnética.

En caso de realizarse un estudio sobre los efectos producidos en los equipos eléctricos debido a las fluctuaciones rápidas de tensión y confirmar su afectación, es importante señalar que no se debe utilizar el indicador Pst, dado que, éste solo se orienta al efecto que producen las variaciones de intensidad lumínica de las “lámparas incandescentes” sobre el ser humano. Así mismo, por ser el Pst un indicador de calidad estandarizado a nivel mundial, y dado que se presume un elevado número de lámparas incandescentes en zonas con predominio de cargas residenciales, se considera pertinente seguir con la utilización de este indicador en la NCSDE, pero limitando las campañas de medición a zonas donde predominen dichas cargas.

Los huecos de tensión (Sags) están siendo objeto de un gran número de estudios a nivel mundial y, a pesar de existir instituciones y empresas que han desarrollado indicadores de calidad para este tipo de perturbaciones en función de sus necesidades, no se ha logrado converger en un indicador único que se estandarice a nivel internacional. Es por ello, que en este trabajo no se propone un indicador de calidad que evalúe los huecos de tensión, sin embargo, se debe considerar que esta perturbación, además de ser importante, es abundante en comparación con otras perturbaciones electromagnéticas (incrementos de tensión, interrupciones, sobretensiones) presentes en las redes de distribución eléctrica. Es necesario resaltar,

la importancia que poseen los efectos negativos del hueco de tensión sobre los equipos y sistemas eléctricos en general, según lo expuesto en este trabajo de investigación por medio de las curvas de susceptibilidad de los equipos eléctricos en general.

Los estudios relacionados con indicadores de calidad que evalúen los incrementos de tensión (Swell) han sido pocos, primordialmente, porque trabajos de investigación anteriores han concluido que éste tipo de perturbación electromagnética no es tan notoria en las redes de distribución de energía eléctrica en comparación con otras. Al igual que los huecos de tensión (Sags), en este trabajo, no se propone un indicador de calidad que permita evaluar los incrementos de tensión, dado que, a nivel internacional, no existe un indicador de calidad estandarizado para este tipo de perturbación, a pesar de ser considerado el de mayor severidad sobre los equipos eléctricos.

## RECOMENDACIONES

Con el objeto de aprovechar al máximo los resultados obtenidos en el estudio ejecutado, se recomienda:

- Incluir la definición de flicker en la Norma de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad (NCSDE), para evitar confusiones con la definición de las fluctuaciones rápidas de tensión.
- Utilizar el indicador Pst en las cargas residenciales, ya que se presume que contienen un alto consumo en iluminación incandescente; y con base en la pertinencia de utilizarlo como indicador global de la calidad de energía en las Normas de Calidad del Servicio de Distribución Eléctrica. Dado que existe un proyecto a nivel nacional de sustitución de bombillos incandescentes por bombillos fluorescentes de alta eficiencia energética, se recomienda realizar un estudio sobre el impacto de la introducción de este tipo de cargas en zonas residenciales, así como de las consecuencias en la medición del flicker, y en general, la calidad de servicio eléctrico en las redes de distribución residenciales.
- Utilizar el indicador Pst en las cargas residenciales, ya que se caracterizan por poseer elevado contenido de lámparas incandescentes; y con base en la pertinencia de utilizarlo como indicador global de la calidad de energía en las Normas de Calidad del Servicio de Distribución Eléctrica.
- Promover jornadas de mediciones de calidad de servicio en las empresas de suministro de energía eléctrica, para sincerar los indicadores y ajustarlos a la realidad nacional.
- Realizar investigaciones enfocadas a la verificación de la relación entre el índice de severidad de corta duración (Pst) con respecto a la magnitud de la fluctuación de tensión ( $\Delta V/V$ ), considerando la exactitud del equipo. De esta manera se pudiera determinar la utilización o no del  $\Delta V/V$ , como localizador

de posibles perturbaciones electromagnéticas de manera puntual, aprovechando la experiencia Argentina y de especialistas en el área de Calidad de Energía Eléctrica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Normas de Calidad y Servicio de Distribución de Electricidad. Gaceta Oficial Nro. 38029, 23-09-2004.

[2] Ing. Abreu Augusto, *Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución*, (Curso).—Zulia: Venezuela: ENELVEN, Junio 2005.

[3] International Electrotechnical Commission (IEC), *Compatibilidad Electromagnética (Parte 4): Técnicas de ensayo y de medida (sección 15): Medidor de Flicker, especificaciones funcionales y de diseño*. IEC 61000 – 4 – 15.

[4] Institute of Electrical and Electronics Engineers. Red Book: Practice Recommended for system distribution electric from plants Industrial, std. 141. (Norma)—New York: USA, 1993.

[5] Institute of Electrical and Electronics Engineers. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, Std. 1159-1995.(Norma)--New York: USA,1995

[6] René Wierda. *Flicker o parpadeo en las fuentes luminosas*. Cuaderno Técnico Schneider N° 176 – Francia.

[7] Ing Miguel Ereú. *Alumbrado Público criterios, diseño y recomendaciones*. (Libro). Electricidad de Caracas (EDC).-Caracas:Venezuela.

[8] P. Ferracci, *La calidad de la energía eléctrica*. Cuaderno Técnico Schneider N° 199.

[9] CVG – EDELCA. “*Estudio del fenómeno de las fluctuaciones de tensión causantes del flicker en los sistemas de potencias*”. 2001

[10] Universitat de Girona. “*Fluctuaciones de Tensión y Flicker*” (Calidad del Servicio Eléctrico – Power Quality).

[11] IEEE SCC 21 P1547. “*Voltaje Flicker Primer*”. Junio de 1999.

[12] <http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot/libros/ie-temas/ie-16/ie-16per.html>

[13]Power Standards Labs. < <http://powerstandards.com/tutorials/Flicker.htm>>

[14] National Physical Laboratory (NPL).  
<<http://www.npl.co.uk/electromagnetic/dclf/flicker/flickermeter.html>>

- [15] IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 3, October 1998 del IEEE. “A Method of Evaluating Flicker and Flicker-Reduction Strategies in Power Systems”,
- [16] Ponce Yubrin, *Desarrollo de aplicaciones para el cálculo, registro e interpretación de los indicadores del Reglamento de Servicio y la Norma de Calidad del Servicio de Distribución Eléctrica*, (Tesis). -- Universidad Central de Venezuela, 2005.
- [17] International Electrotechnical Commission (IEC). *Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods* (Norma), 61000 – 4 – 30.
- [18] Math Bollen, *Understanding power quality problems: Voltage sags and interruptions*, (Libro).
- [19] Gabriel Ordóñez Plata, *Perturbaciones en la onda de tensión: huecos y sobretensiones. Curso: Calidad del Suministro de energía eléctrica* (Calidad de Potencia).. Universidad Industrial de Santander – Colombia.
- [20] [http://grouper.ieee.org/groups/sag/IEEEP1564\\_00\\_10.ppt](http://grouper.ieee.org/groups/sag/IEEEP1564_00_10.ppt)
- [21] [www.f47testing.com/f47abstract.html](http://www.f47testing.com/f47abstract.html)
- [22] CIRED 2005. *Round Table on Voltaje Dips Indices & Benchmarking*. A. Robert y E. De Jaeger. Torino, Tuesday 7 June 2005. [www.cired-s2.org](http://www.cired-s2.org)
- [23] SAGs and SWELLs, Richard P. Bingham. *Manager of Technology and Products Dranetz-BMI*, Revised February 16, 1998.
- [24] G.T. Heydt, *PSerc Seminar on Power Acceptability*. Departamento de ingeniería eléctrica. Universidad del estado de Arizona. Diciembre 2003.
- [25] EC&M. <[http://ecmweb.com/powerquality/electric\\_save\\_motors\\_during/](http://ecmweb.com/powerquality/electric_save_motors_during/)>
- [26] Fluke. <[http://www.fluke.de/comx/applications/gen\\_04\\_es.pdf](http://www.fluke.de/comx/applications/gen_04_es.pdf)>
- [27] Jose A. Silva, *Metodología de estudio de huecos de tensión en SEP*, Proyecto Facultad de Ingeniería-Uruguay, UDELAR - Montevideo, Diciembre 2004
- [28] <<http://es.wikipedia.org/wiki/Rel%C3%A9>>
- [29] *IC.5.1—Voltage Fluctuation and Flicker*. ENGINEERING Standards and Technical Support Department. Pacific Power Utah Power (PACIFICORP), empresa de generación.

[30] *Voltaje Sags indices - Draft 2*. Working document for IEEE P1564. Noviembre 2001.

[31] Norma Surafricana de la National Electricity Regulator. NRS 048 – 2:1996

[32] Mark McGranaghan; Roobert Koch (ESKOM, South Africa) *South Africa Sets the Standard*. South Africa 10/31/97.

[33] Norma Española. *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. EN 50160 – Enero 2001.

[34] José Silva, *Metodología de Estudio de Hueco de tensión en SEP*. Proyecto Facultad de Ingeniería – Uruguay. UDELAR Montevideo. Diciembre 2004

## BIBLIOGRAFÍA

### Tesis

Mañana Canteli, Mario. *Aportaciones a la representación, detección y clasificación de perturbaciones conducidas en sistemas eléctricos de potencia (Tesis doctoral)* – Universidad de Cantabria. Santander, España. Mayo 2000.

### Normas

American National Standard Institute (ANSI). *Electrical Power System and Equipment – Voltage Ratings (60 Hz) ANSI C84.1*. USA, 1995

COVENIN 159:1997. *Tensiones Normalizadas (2da. Revisión)*. Comité de Electricidad de Venezuela – CODELECTRA. Venezuela 1997.

International Electrotechnical Commision (IEC). *Standard Voltage, IEC 60038*, 1996.

Reglamento General de la Ley del Servicio Eléctrico, Gaceta Oficial Nro. 5510, Venezuela, 14-12-2000.

### Libros

Grainger John y William Stevenson Jr. *Análisis de Sistemas de Potencia*, USA: Ed. McGraw-Hill, Inc., 1994.

E. Gaucheron, *Los motores eléctricos... mejorando su control y protección*. Cuaderno Técnico Schneider N° 207 - Francia.

### Artículos

Melhorn Christopher J. and Mark F. McGranaghan. *Interpretation and Analisis of Power Quality Measurements*.—EN: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, Nro.6, November/December 1995.

Divan, Robert y Bielinski, Daniel. *Industrial – Strength sag correction*. Revista Power Quality – www.powerquality.com. SoftSwitching Technologies, Middleton, Wis. March 2002.

Power Quality Center. *Power Quality Monitoring – Plant Investigations*. Technical Note No 5. Sydney – Australia. January 2002.

Martínez, Juan y Arnedo Jacinto. *Calculation of voltage Sag Indices for Distribution Networks*. IEEE paper.

## **Diapositivas**

Thallan, R. y Heydt, G. *Power acceptability and voltage sag indices in the three phase sense*. Salt River Project Phoenix, AZ and Arizona State University temp, AZ.

Alves Roberto. *Calidad del Servicio Eléctrico – Power Quality Normativa y Recomendaciones Nacionales e Internacionales*. Universidad Simón Bolívar.

Khodr Hussein M. *Taller de Calidad de Servicio Eléctrico*. Universidad Simón Bolívar, Noviembre 2004.

Llanos Rodríguez, David. *Calidad en el servicio eléctrico*. Universitat de Girona. Girona – Italia. Febrero 2003.

Mora, Juan. *Perturbaciones en la onda de tensión: Huecos [sag] y Sobretebsiones[swell]*. Universitat de Girona. Girona – Italia. Marzo 2003.

Mora, Juan. *Fluctuaciones de tensión y flicker*. Universitat de Girona. Girona – Italia. Marzo 2002.

Ordoñez, Gabriel. *Calidad del suministro de energía eléctrica (Calidad de potencia) – Perturbaciones en la onda de tensión: huecos y sobretensiones*. Universidad Industrial de Santander, Programa Alure – Proyecto CREG. Cartagena de Indias, Colombia. Febrero 2002.

## **Documentos**

Bingham, Richard. *Sags and Swells*. Dranetz – BMI. Febrero 1998.

Stephens, Mark; Johnson, Dennis; Soward, Jhon y Ammenheuser, Jim. *Guide for the design of semiconductor equipment to mee voltage sag immunity standards*. International SEMATECH. Texas. Diciembre 1999.

EPRI PEAC Corporation. *Understanding SEMI F47 Voltage Sag Standard, interpretantion of voltage sag test results of Schneider Electric Relays and Contactors*. 1999.

Cigré WG 36.07 / CIRED. *Power Quality Indices and Objectives*. January 2004.

EDELCA, C.A. *Medición y Evaluación de la Distorsión Armónica y Flicker en el Sistema de Potencia de EDELCA*. Noviembre 2000.

## **Internet**

Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico (CADAFE).  
<<http://www.cadafe.gov.ve/>>

C.A. Energía Eléctrica de Venezuela <<http://www.enelven.com.ve/>>

C.V.G. Electrificación del Carona (EDELCA). <<http://www.edelca.com.ve/>>

[La Electricidad de Caracas](http://www.laedc.com.ve/). <<http://www.laedc.com.ve/>>

Revista EC & M. <<http://www.powerquality.com/>>

Schneider Electric (España) <<http://www.schneiderelectric.es/>>

Servicio Autónomo Nacional de Normalización, Calidad, Metrología y Reglamentos Técnicos (SENCAMER). <http://www.sencamer.gob.ve/>

Ente Nacional Regulador de Electricidad, Argentina. <<http://www.enre.gov.ar/>>

<[http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara\\_fluorescente](http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_fluorescente)>

Obralux. <[www.obralux.com/pdf/luminotecnica.pdf](http://www.obralux.com/pdf/luminotecnica.pdf)>

IEEE: group. [http://grouper.ieee.org/groups/sag/IEEEP1564\\_00\\_10.ppt](http://grouper.ieee.org/groups/sag/IEEEP1564_00_10.ppt)

Automatización, productividad y calidad S.A. (México)  
<<http://www.waterymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Calidad%20de%20la%20Energia.pdf>>

Suramericana de Seguros S.A. (Colombia)  
<[http://www.suramericana.com/Publicacion/pdfProductos/Sistema\\_Electrico.pdf](http://www.suramericana.com/Publicacion/pdfProductos/Sistema_Electrico.pdf)>

## GLOSARIO

**Ambiente Electromagnético:** Representa la totalidad de fenómenos electromagnéticos que existen en una localización dada.

**Baja tensión:** Nivel de tensión menor a 1 kV. [33]

**Bajo voltaje:** Una medida de voltaje teniendo un valor menor que el valor del voltaje nominal por un período de tiempo mayor que 1 minuto cuando es usado para describir un tipo específico de variación de larga duración, donde sus valores típicos son 0,8 a 0,9pu.

**Calidad:** Es el grado en que un conjunto de características inherentes a bienes y servicios cumple con unas necesidades o expectativas establecidas.

**Calidad del Producto Técnico:** Grado de cumplimiento de los valores admisibles establecidos en la NCSDE, determinado por mediciones realizadas de los niveles de tensión del fluido eléctrico y la forma de onda de la tensión suministrada por la Distribuidora. [33]

**Carga no lineal:** Carga eléctrica de estado constante que drena corriente discontinua o que la impedancia de entrada varía a través del ciclo de la forma de onda del voltaje ac.

**Compatibilidad Electromagnética:** Es la capacidad de un dispositivo, equipo o sistema de funcionar satisfactoriamente en su ambiente electromagnético sin introducir disturbios electromagnéticos intolerables a cualquier otro equipo que se encuentre en su ambiente.

**Demanda eléctrica:** Requerimiento de electricidad de una usuario, área o sistema.

**Energía eléctrica:** Es la potencia eléctrica producida, transmitida o consumida en un período de tiempo. Se mide y se expresa en Kilovatio hora (Kwh), Megavatio hora (Mwh), Gigavatio hora (Gwh) o Teravatio hora (Twh).

**Falla:** Interrupción no prevista del funcionamiento de un componente del sistema eléctrico.

**Fluctuación Rápida de Tensión:** Cambios de pequeña amplitud en los niveles de tensión ocurridos a una frecuencia menor de los 25 Hertz, originados por variaciones rápidas de carga que causan fluctuación de la luminancia. [33]

**Fundamental (componente):** La componente de orden 1 (50 o 60 Hz) de la serie de Fourier de una cantidad periódica.

**Indicador:** Es un parámetro medible del medio eléctrico que nos informa el estado de dicho medio o de aspectos relacionados con él.

**Inmunidad (a la perturbación):** La capacidad de un dispositivo, equipo o sistema de funcionar sin degradarse en presencia de una perturbación electromagnética.

**Instantáneo:** Un rango de tiempo de 0,5 – 30 ciclos de la frecuencia de la energía cuando esta se utiliza para cuantificar la duración de una variación de duración corta.

**Interrupción Momentánea:** Variación de duración corta. la pérdida completa de voltaje (menor a 0.1 p.u) en uno o más conductores de la fase por un período entre 0,5 ciclos y 3 s.

**Límite de Perturbación:** Nivel máximo admisible de PE en condiciones especificadas.

**Momentáneo (Supervisión de la calidad de potencia):** Un rango de tiempo a la frecuencia de energía de 30 ciclos a 3 s cuando se utiliza para cuantificar la duración de una variación de corta duración.

**Nivel de Compatibilidad Electromagnética:** Nivel máximo especificado de PE a que se puede someter un equipo o sistema en condiciones particulares.

**Nivel de Perturbación:** Valor de una PE en forma dada, donde es medida en condiciones especificadas.

**Normas de Calidad de Servicio de Distribución de Electricidad:** Conjunto de condiciones, características y parámetros establecidos por el Ministerio de Energía y Petróleo para la prestación del servicio eléctrico.

**Perturbación Electromagnética (PE):** Cualquier fenómeno electromagnético que pueda degradar el funcionamiento de un dispositivo, equipo, sistema, o afectar la vida o materia inerte.

**Potencia eléctrica:** Es la capacidad de producir, transmitir o consumir electricidad en forma instantánea que se mide generalmente en Kilovatios (Kw) o Megavatios (Mw).  
**Red eléctrica:** Conjunto de conductores, equipos y accesorios empleados por la Distribuidora para suministrar el servicio eléctrico a los usuarios, hasta el punto de suministro.

**Regulación de voltaje:** El grado de control o estabilidad del voltaje rms en la carga. Especificado a menudo en lo referente a otros parámetros, tales como cambio voltaje de entrada, cambios de carga o cambios de temperatura.

**Sag:** Es un decremento entre 0,1 y 0,9 pu en tensión o corriente rms a frecuencia del sistema para duraciones de 0,5 ciclos a 1 min.

**Sobretensión:** Cuando es utilizado para describir un tipo específico de variación de corta duración, se refiere a un voltaje medido que tiene un valor mayor que el voltaje nominal por un período de tiempo mayor de 1 minuto y sus valores típicos son 1,1 a 1,2 pu.

**Susceptibilidad Electromagnética:** Incapacidad de un dispositivo, de un equipo, o de un sistema de funcionar sin degradarse en presencia de una perturbación electromagnética.

**Swell:** Es un incremento en voltaje rms de frecuencia del sistema para duraciones de 0,5 ciclos a 1 min. Donde sus valores típicos son de 1,1 a 1,8 pu.

**Tierra:** Es una conexión conductora intencional o accidental, por la cual un circuito eléctrico o pieza de equipo es conectado a tierra, o a un cierto cuerpo que conduce del grado relativamente grande que sirve en lugar de la tierra.

**Usuario:** Persona natural o jurídica que se beneficia con la prestación del servicio eléctrico bien como titular de un contrato de servicio o como receptor directo del mismo, sujeto a los derechos y, obligaciones que establece la Ley y sus reglamentos. [33]

**Variación de voltaje de corta duración:** Es una variación de valores de voltaje rms del voltaje nominal, para un tiempo mayor a 0,5 ciclos a la frecuencia del sistema pero menor a 1 min. Usualmente se describirá según su magnitud de voltaje (ej: Sag, Swell o interrupción) y posiblemente se describirá según la duración de la variación (instantáneo, momentáneo o temporal).

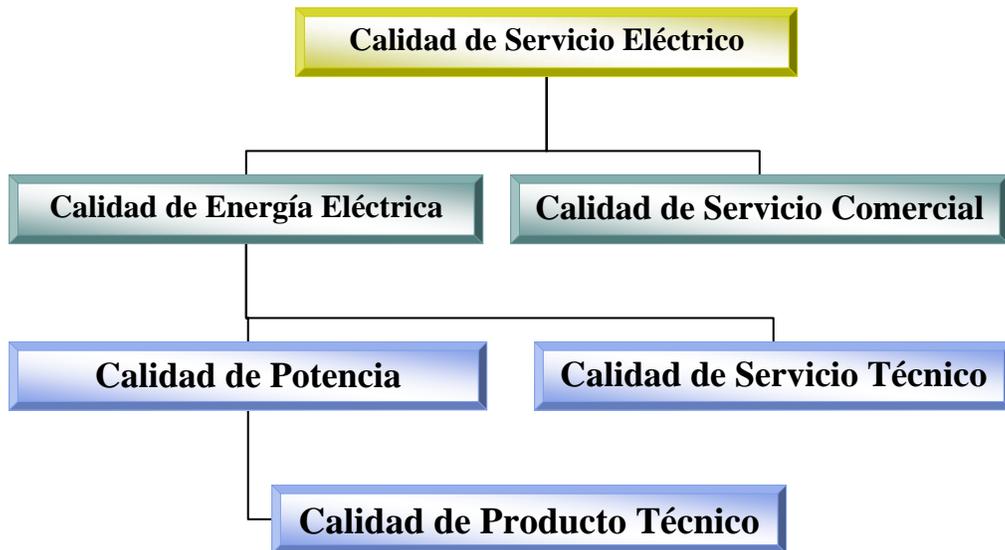
**Variación de voltaje de larga duración:** Es una variación de valores de voltaje rms del voltaje nominal por un tiempo mayor que 1 min. Usualmente se describirá usando una modificación según la variación de voltaje (ej: subtensión, sobretensión, interrupción de voltaje).

**Voltaje Nominal:** Un valor nominal asignado a un circuito o sistema por la propuesta de diseño convenientemente señalado por la clase del voltaje (como 120/208, 208/120, 480/277).



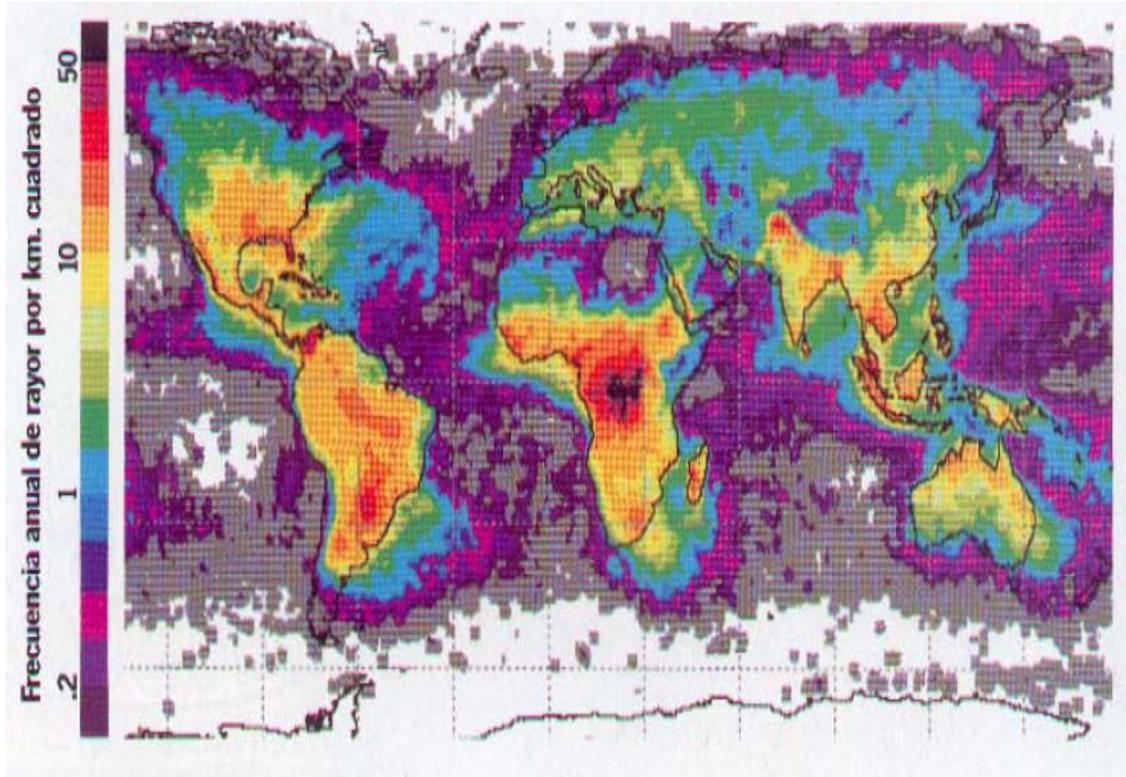


[Anexo Nro. 1]



Esquema de la Calidad del Servicio Eléctrico. [9]

[Anexo Nro.2]



Nivel Isoceráunico a nivel mundial.