

**Diseño del Prototipo del Módulo para la Monitorización del Fenómeno Flicker
para una Unidad Constructiva de Medición de Parámetros de Calidad de
Potencia Eléctrica, con base en el estándar CEI 61000-4-15.**

Silvia Juliana Oviedo Castillo

Laura Milena Rueda Acosta

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas**

**Diseño del Prototipo del Módulo para la Monitorización del Fenómeno Flicker
para una Unidad Constructiva de Medición de Parámetros de Calidad de
Potencia Eléctrica, con base en el estándar CEI 61000-4-15.**

Silvia Juliana Oviedo Castillo

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Electrónica

Laura Milena Rueda Acosta

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Electricista

Director

Msc. César Antonio Duarte Gualdrón

Codirector

Ing. Jaime Quintero Murillo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2009

DEDICATORIA

A MI DIOS Y A LA VIRGEN MARÍA QUE GUIAN MI VIDA Y ME FORTALECEN
A MIS PADRES JOSÉ MANUEL RUEDA Y MARÍA MERCEDES ACOSTA
Y A MI HERMANO.

LAURA RUEDA.

A Dios:

*Te adoro con amor, oculto Dios,
que bajo estas figuras te has quedado;
a Ti mi corazón se entrega entero,
por que entero al mirarte desfallece.*

S. Tomás de Aquino.

Silvia Oviedo

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a:

Cesar Antonio Duarte Gualdrón, por sus aportes como Director en este trabajo de grado, por su inteligencia, comprensión, apoyo, constancia, compromiso, entrega y motivación para llevar a cabo esta labor. Por orientarnos muy acertadamente durante este tiempo, de nuevo mil y mil gracias.

Gabriel Ordóñez Plata, por sus valiosos aportes en el grupo de trabajo, por su tiempo y disposición para guiarnos, disponiendo su incalculable conocimiento a nuestro alcance.

Gilberto Carrillo Caicedo, por la enseñanza a lo largo de mi carrera universitaria, por brindarme su confianza; por su interés por compartir con los alumnos y de brindar espacios de discusión, esparcimiento e integración.

José Alejandro Amaya Palacio, por ser un gran profesor y amigo de todos.

Y a todos los profesores de mi hermosa carrera de Ingeniería Eléctrica, por brindarme conocimiento y enseñarme a amar esta profesión.

Agradezco también a los laboratoristas que estuvieron siempre dispuestos a enseñarme y a colaborar entre ellos a Gustavito.

A mi grandes amigos Karen, Camilo, Juan Carlos, Jorge y Harry por compartir conmigo alegrías, tristezas, tramos nocturnos estudiando, paseos, y rumbas, pero sobre todo por que siempre estaban dispuestos a colaborar.

A todos mis compañeros de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a los Costeños, Boyacos, Santandereanos, en fin a todos, por compartir a lo largo de mi carrera; a mis amigos Electrónicos con alma de Electricistas, y a mi compañera de trabajo de grado Silvia Oviedo.

Y para finalizar agradezco a la Universidad Industrial de Santander por haberme sumergido en este mundo de conocimiento durante este tiempo, por enseñarme a crecer como persona y como profesional.

LAURA MILENA RUEDA ACOSTA

A César Duarte por dirigir en las dificultades con paciencia y buen humor.

A Gabriel Ordóñez por orientar con sencillez y desinterés.

A mis padres por tantos esfuerzos y cariño. A mi hermano por animarme cuando pensé que no podía.

A mis abuelos por su respaldo y cariño y al resto de mi familia por creer en mí.

A mis amigos Ovidio, Omar, Marlon, Andrés, José David y a mi amiga Judy, por escucharme y aceptar mi carácter.

Silvia Oviedo

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. EL FENÓMENO DENOMINADO <i>FLICKER</i>	3
1.1. DEFINICIÓN DEL FENÓMENO <i>FLICKER</i>	3
1.1.1 Origen de las Fluctuaciones de Tensión asociadas al Flicker.	4
1.1.2 Descripción Matemática de las Fluctuaciones de Tensión.	5
1.1.3 Caracterización del <i>Flicker</i>	10
1.1.4 Consecuencias Fisiológicas del fenómeno del <i>Flicker</i>	13
1.2. REGLAMENTACIÓN COLOMBIANA SOBRE LA MEDICIÓN DE <i>FLICKER</i> ..	14
1.3. MEDICIÓN DE <i>FLICKER</i> CON BASE EN EL ESTÁNDAR CEI 61000-4-15	18
1.3.1 Descripción del sistema de medición de <i>Flicker</i> del Estándar CEI 61000-4-15	19
1.3.2 Técnicas de mejoramiento de la precisión de la evaluación del Flicker	26
1.3.2.1 Interpolación Lineal.....	26
1.3.2.2 Interpolación no Lineal.....	27
2. ADAPTACIÓN DEL ESTÁNDAR CEI 61000-4-15 PARA LA MEDICIÓN DIGITAL DE <i>FLICKER</i>	29
2.1. Requisitos funcionales y especificaciones de diseño para un medidor digital de Flicker.	29
2.2. Estimación del nivel instantáneo de <i>Flicker</i> (<i>IFL</i>) en forma digital.	30
2.2.1. Frecuencia de muestreo.....	31
2.2.2. Filtrado digital.	33
2.2.2.1 Transformación de Filtros en tiempo continuo a Filtros en tiempo discreto.	34
2.2.2.2 La transformación bilineal.....	35

4.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ESTABLECIDAS EN EL ESTÁNDAR CEI 61000-4-30.	66
4.2.1 Verificación de la Conformidad de los Métodos de Medida y Obtención del Margen de Variación de las Magnitudes de Influencia.	67
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	70
5.1 CONCLUSIONES	90
5.2 RECOMENDACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	93
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXO A. RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LOS FILTROS CONTINUOS PROPUESTOS POR LA CEI.	79
ANEXO B. ESQUEMA EN SIMULINK DE MEDIDOR DE NIVEL INSTANTÁNEO DE FLICKER	84
ANEXO C. ALGORITMO DE EXTRACCIÓN DEL NIF A PARTIR DE LA SEÑAL DE TENSIÓN DE ENTRADA Y ALGORITMO DE EXTRACCIÓN DEL PST A PARTIR DEL NIF	86
ANEXO D. VERIFICACIÓN DE LA CONFORMIDAD DE LOS MÉTODOS DE MEDIDA Y OBTENCIÓN DEL MARGEN DE VARIACIÓN DE LAS MAGNITUDES DE INFLUENCIA.	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Señal sinusoidal modulada por una señal sinusoidal.....	8
Figura 2. Señal sinusoidal con envolvente cuadrada.	9
Figura 3. Curva de tolerancia IEEE 141.	12
Figura 4. Curva de tolerancia dependiendo del tipo de carga.	13
Figura 5. Diagrama de bloque Flicker-metro analógico propuesto por el Estándar ICE 6100-1-15.	24
Figura 6. Curva de magnitud vs. frecuencia del filtro pasa bajas con frecuencia de corte 42 Hz.....	36
Figura 7. Curva de magnitud vs. frecuencia del filtro pasa altas con frecuencia de corte de 0,05Hz.	37
Figura 8. Curva de magnitud vs. frecuencia de filtro de ponderación.	38
Figura 9. Curva de magnitud vs. frecuencia del filtro pasa bajas del bloque 4. ...	38
Figura 10. Esquema en Simulink para extraer el valor R.M.S de una trama de datos.	42
Figura 11. Esquema en Simulink de la etapa de adaptación de la entrada propuesta por la CEI.	43
Figura 12. Nivel instantáneo de Flicker con un valor de pico igual a una unidad	54
Figura 13. Esquema de clasificación de una señal muestreada cada T_s segundos.	58
Figura 14. Esquema de clasificación de una señal muestreada cada T_s segundos, con el doble de clases.	59
Figura 15 Característica PST vs. $\Delta V/V$ %.....	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores indicativos para los parámetros en una lámpara a 120V/60Hz. .	22
Tabla 2. Resultados de PST y tiempo de ejecución cuando se varía la frecuencia de muestreo.	32
Tabla 3. Resultados de PST y tiempo de ejecución cuando se varía la frecuencia de muestreo, acotando el resultado a dos cifras decimales.....	32
Tabla 4. Cálculo de las constantes de tiempo de los filtros.....	40
Tabla 5. Valores de PST para varias señales de entrada, variando el límite inferior del clasificador.....	49
Tabla 6. Valores de PST para varios casos a la entrada variando el número de clases.	51
Tabla 7. Valores promedio del nivel instantáneo de Flicker de un algoritmo de medición correctamente calibrado.	55
Tabla 8. Especificaciones de ensayo para el clasificador del medidor de Flicker	60
Tabla 9. Resultados de PST para una frecuencia de señal moduladora especificada con diferente número de cifras decimales.	61
Tabla 10. Resultados de PST para las pruebas sugeridas en CEI 61000-4-15.....	64
Tabla 11. Resultados prueba de linealidad con modulación rectangular.....	65
Tabla 12. Tabla No. 3 de la IEC 61000 – 4 – 30	67

RESUMEN

TÍTULO: Diseño del Prototipo del Módulo para la Monitorización del Fenómeno Flicker para una Unidad Constructiva de Medición de Parámetros de Calidad de Potencia Eléctrica, con base en el estándar CEI 61000-4-15¹

AUTORAS: OVIEDO CASTILLO, Silvia Juliana y RUEDA ACOSTA, Laura Milena²

Palabras clave: algoritmo, CEI 61000-4-15, *Flicker*, Nivel Instantáneo de *Flicker*, PST.

La medición del PST como indicador para la evaluación de la calidad de la potencia eléctrica ante la perturbación conocida como *Flicker* ha sido objeto de análisis por parte de la comunidad científica internacional y de los organismos nacionales responsables de la distribución y monitorización de la energía eléctrica. Los lineamientos de diseño y las especificaciones para la elaboración de un medidor analógico se encuentran descritos en el estándar internacional IEC 6000-4-15, adoptado como referencia por la Comisión de Regulación de Energía y Gas de Colombia. Este trabajo de grado presenta de manera detallada el proceso de desarrollo de un algoritmo de medición digital del *Flicker* basado en dicho estándar.

El contenido de este trabajo comprende las hipótesis planteadas alrededor del proceso de digitalización del medidor de *Flicker* propuesto por el estándar previamente mencionado. Se presentan también las características de procesamiento que garantizan que la señal muestre las mismas características que en un medidor analógico, con el objeto de que las pruebas realizadas al algoritmo de medición digital, a partir de la señal de nivel instantáneo de *Flicker*, sean válidas atendiendo al procedimiento de pruebas del estándar IEC 61000-4-15. Asimismo, se realiza una discusión acerca de las libertades concedidas por dicho estándar para el procesamiento estadístico de la señal de *Flicker*, como la selección del número de clases o el número de cifras decimales en el procesamiento de la señal, y la incidencia de éstas en la diferencia de resultados de PST para una misma señal de entrada, así como de los problemas de interpretación que se sortearon debido a la falta de especificidad e ilustraciones en el estándar.

¹ Proyecto de Grado

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: César A. Duarte G., Mcs. Codirector: Ing. Jaime Quintero M.

ABSTRACT

TITLE: Design of the Prototype of the Module for Monitoring the Flicker phenomenon for a Constructive Unity to Measure Power Quality Parameters, based on Standard CEI 61000-4-15¹.

AUTHORS: OVIEDO CASTILLO, Silvia Juliana y RUEDA ACOSTA, Laura Milena²

Keywords: algorithm, *Flicker*, IEC 61000-4-15, IFL (Instantaneous Flicker Level), PST.

The measurement of PST as an indicator for the evaluation of the power quality in the presence of the disturbance known as Flicker has been object of analysis for the International scientific community and the national organisms responsible for the distribution and monitoring of electric power. The design requirements and the specifications for the construction of an analogical Flickermeter are found in the International standard IEC 61000-4-15, adopted as reference by the Energy and Gas Regulation Commission of Colombia. This document presents in a detailed fashion the development process of an algorithm for the digital measurement of Flicker based on the mentioned standard.

The content in this paperwork consists of the hypothesis surrounding the digitalization process of the Filckermeter proposed by the IEC standard. The signal processing characteristics that assure the integrity of the signal regarding the results for analogical Flickermeter are also presented, with the objective of obtaining, from the IFL signal, valid results for the test proposed by the IEC standard. In the same fashion, a discussion about the liberties awarded by the standard for the statistical processing of the IFL signal is presented. Those liberties including the selection of the number of classes and the number of decimal figures and the incidence of them over the PST calculation is also presented, concluding that they are responsible of the difference in the PST values for two meters in presence of the same disturbance.

¹ Degree Project.

² Faculty of Physics-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: Mcs. César A. Duarte G. Co-director: Msc(c) Jaime Quintero M.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las actividades diarias es hoy en día, totalmente dependiente del suministro eléctrico, por lo cual se requiere que éste sea confiable y de la mejor calidad posible. Es creciente el número de sistemas electrónicos en las cadenas de producción de la industria e inclusive en el hogar y también así la sensibilidad de los mismos ante perturbaciones del suministro. Es por ello que los esfuerzos por la generación de energía eléctrica de mejor calidad son cada vez más grandes. No obstante, el conservar la calidad de la onda de tensión a lo largo de la red es también una tarea importante, por lo que la regulación en cuanto a compatibilidad electromagnética se refiere, junto con la normalización a nivel internacional de las prácticas correspondientes a la medición de los parámetros de calidad de potencia han adquirido gran importancia en los últimos años.

Debido a la situación ambiental por la que atraviesa el planeta, la generación de energía eléctrica desde nuevas fuentes, como el viento, las mareas o el sol, va ganando espacio y recursos para su implementación. Sin embargo, la capacidad de generación de estas nuevas fuentes no es predecible todo el tiempo, conllevando a la producción de tensiones fluctuantes además de otros fenómenos de la calidad de la potencia eléctrica. Medir el impacto de estas nuevas fuentes de generación en la calidad de la energía es posible mediante el uso de indicadores de calidad de potencia que, según su valor, determinan la severidad de las perturbaciones.

No sólo las nuevas formas de generación pueden deteriorar la calidad de la onda. De hecho, la mayoría de los fenómenos se generan en las cargas y se propagan por la red, afectando el sistema de distribución y el resto de las cargas.

Este trabajo comprende la teoría del fenómeno del Flicker, los lineamientos de la implementación de un medidor propuestos por el estándar CEI 61000-4-15 y a partir de dichos lineamientos, la descripción del proceso de digitalización de un algoritmo de medición de *Flicker*. En el proceso se encuentran dificultades por la falta de especificidad de la norma y también se encuentran alternativas de implementación que se discuten a fin de proponer un algoritmo digital para entregar el indicador de PST a partir de la señal de tensión de la red.

1. EL FENÓMENO DENOMINADO *FLICKER*

La calidad de la onda de tensión tiene que ver con las desviaciones de voltaje con referencia en una onda sinusoidal ideal. Una perturbación de la calidad de la potencia está categorizada como una variación o un evento. Dentro de la categoría de eventos se encuentran los fenómenos corta duración, como los transitorios, los hundimientos de tensión (*dips* o *sags*), las elevaciones de tensión (*swells*) y las interrupciones. En la categoría de las variaciones, se encuentran las variaciones en frecuencia, magnitud del voltaje, desbalances, armónicos, distorsión y, finalmente *Flicker*. En Colombia, la medición de dichas desviaciones y eventos se realiza de acuerdo con los parámetros establecidos por estándar internacional CEI 61000-4-30.

1.1. DEFINICIÓN DEL FENÓMENO *FLICKER*.

En el Estándar IEEE 1159-1995, el *Flicker* es descrito como la “impresión de inestabilidad de la sensación visual inducida por un estímulo luminoso cuya luminancia o distribución espectral fluctúa en el tiempo”.¹ Lo anterior expresa que el fenómeno de *Flicker* es la respuesta de la cadena lámpara-ojo-cerebro ante una variación en la intensidad luminosa a determinada frecuencia, producto de una variación proporcional en el voltaje de alimentación de la lámpara. Dicha respuesta es de carácter fisiológico, porque involucra la percepción a través del sentido de la vista

¹ THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality: IEEE Std 1159-1995. New York: IEEE, 1995. p 3.

Es importante aclarar que el *Flicker* es un fenómeno con diversas variables, así que no puede ser visto sólo como una variación repetitiva en la tensión de alimentación de las lámparas, sino también como la consecuente fluctuación de la intensidad luminosa y la sensación generada en el ser humano, ya que estas variables también forman parte de la definición de *Flicker* del estándar IEEE1159 y deben ser tenidas en cuenta para la medición o caracterización de dicho fenómeno.

1.1.1 Origen de las fluctuaciones de tensión asociadas al Flicker.

Según lo establecido por el Estándar IEEE 1159-1995, cualquier carga que tenga variaciones significativas en la corriente, puede llegar a generar fluctuaciones de voltaje. Aquellas cargas que exhiban variaciones rápidas y repetitivas en la magnitud de la corriente de carga generarán dichas fluctuaciones.

En la mayoría de los casos, las variaciones repetitivas de tensión se generan por grandes cargas conectadas al sistema de distribución cuando éstas se conectan y desconectan. Dependiendo de la impedancia de la fuente de tensión, las demás cargas comunes y la red en general experimentarán las consecuencias de los cambios en el voltaje. Una red se conoce como red fuerte si la impedancia de la fuente es relativamente baja, ya que una impedancia baja generará una caída de tensión relativamente baja a través de dicha impedancia. Por otra parte, en una red débil, la impedancia, por ser alta, generará caídas de voltaje proporcionales, por lo que los cambios en la corriente, que pueden originar Flicker, se verán reflejados en mayor medida en la red.

La conmutación de grandes cargas, es responsable de la fluctuación luminosa de las bombillas conectadas al punto de acople común. Algunos ejemplos de cargas

de operación conmutada son los grandes hornos de arco y calderas de la industria siderúrgica, máquinas de soldadura, bombas de calefacción y grandes motores. Existen otras fuentes de fluctuaciones, en donde la onda de tensión es generada de manera irregular, ya que no se controla la velocidad de generación, como en las turbinas eólicas o las turbinas que aprovechan la fuerza mareomotriz.

Anteriormente se pensaba que era sólo en las lámparas incandescentes donde las variaciones se hacían evidentes. A medida que las lámparas de gas ionizado aparecieron y se estudiaron, se determinó que también eran susceptibles a las variaciones de tensión, ya que en este tipo de lámparas, las descargas entre los dos electrodos no ocurren de manera uniforme dentro del tubo, lo que genera una variación en la intensidad de la luz en los extremos del mismo; este problema se puede corregir mediante la instalación de una luminaria con una superficie reflectora alrededor de la lámpara, ya que ésta refleja la luz y debilita la señal con fluctuación en los extremos.

1.1.2 Descripción matemática de las fluctuaciones de tensión.

Matemáticamente las fluctuaciones asociadas al *Flicker* se modelan de la misma forma que una modulación AM convencional, donde la señal portadora es la señal de tensión de la red, a 60 Hz. La señal moduladora, que es la envolvente de la señal de 60 Hz, es una señal cuya frecuencia se sitúa por lo general entre 0,5 Hz y 25 Hz y que provoca un cambio en la amplitud de la portadora de no más del 10% de la amplitud de la misma.

Una señal sinusoidal modulada en amplitud obedece a la siguiente expresión en el tiempo:

$$s(t) = A_c [1 + m * g(t)] * \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

Donde $g(t)$ corresponde a la señal moduladora normalizada en amplitud y m corresponde al coeficiente de modulación. Este coeficiente representa el cambio de amplitud presente en una forma de una onda de amplitud modulada. El porcentaje de modulación es el coeficiente de modulación expresado como porcentaje.

Como ejemplo, se establece que la señal moduladora es una señal sinusoidal de la forma:

$$x(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \quad (2)$$

Donde f_m es la frecuencia de la señal moduladora que se encuentra entre 0,5 Hz y 25 Hz.

La señal $x(t)$ de la Ecuación (2) difiere de la señal $g(t)$ de la Ecuación (1) en que $g(t)$ está normalizada en amplitud. Lo anterior es necesario ya que matemáticamente m incluye la amplitud de la señal moduladora que provoca la variación de la amplitud en la señal portadora. La Ecuación (3) describe $g(t)$.

$$g(t) = \cos(2\pi f_m t) \quad (3)$$

Combinando la ecuación (3) con la ecuación (1) y expandiendo, se tendrá:

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) + A_c m [\cos(2\pi(f_c - f_m)t) + \cos(2\pi(f_c + f_m)t)] \quad (4)$$

La Ecuación (4) es el modelo matemático de una señal sinusoidal con una fluctuación de amplitud constante y una forma de onda envolvente sinusoidal.

En el espectro, una señal de este tipo se observa como una componente portadora centrada en 60Hz con dos bandas laterales simétricas, correspondientes al espectro de la señal moduladora, de tal forma que en el

espectro de frecuencias positivas, una señal con fluctuación periódica de tensión se sitúa entre $f_c - f_m$ y $f_c + f_m$, con centro en f_c .

El porcentaje de modulación m es descrito matemáticamente² por la Ecuación (5). Esta ecuación es muy útil cuando se cuenta con una imagen de la señal modulada o muestras de la misma.

$$m = \frac{A_m}{A_c} \quad (5)$$

A_c es la amplitud pico de la señal portadora sin modular y A_m es el cambio pico en la amplitud de voltaje de la señal modulada.

La Figura 1 muestra una señal sinusoidal modulada en amplitud. En ella se muestran A_m y A_c . Se observa que A_m es equivalente a $\frac{\Delta V}{2}$ (Delta V medios), que representa la desviación de amplitud de la señal portadora.

A partir del análisis de la Figura 1, es posible llegar las siguientes dos expresiones:

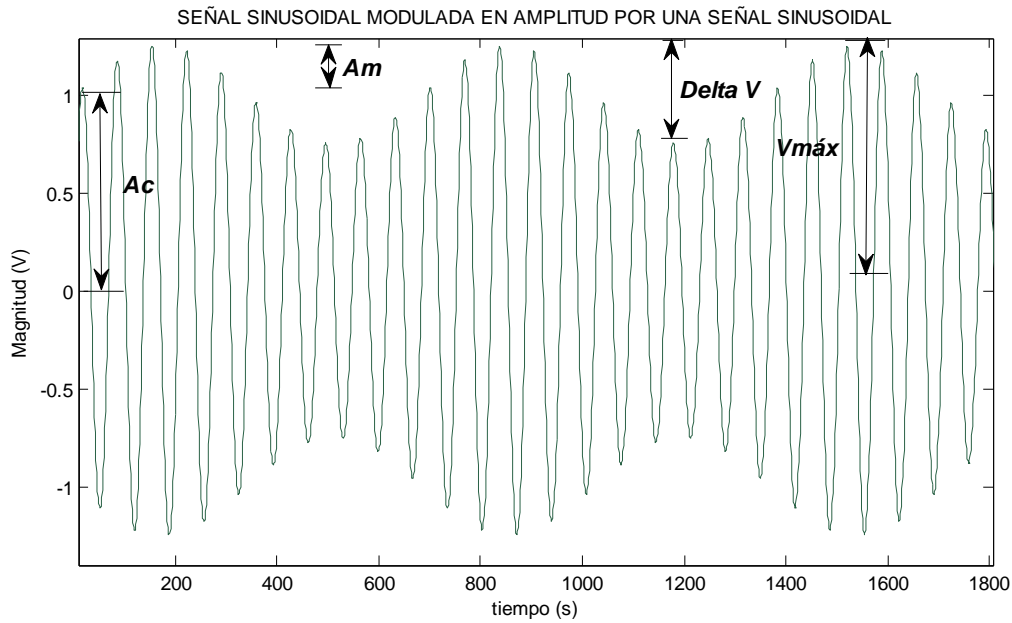
$$A_m = \frac{\Delta V}{2} \quad (6)$$

Notando que

$$\frac{\Delta V}{V} = (V_{\text{máx}} - A_c) \quad (7)$$

² TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Cuarta Edición. Pearson Education, 2003. p 107.

Figura 1. Señal sinusoidal modulada por una señal sinusoidal



Fuente: Las autoras

Finalmente se tiene que la Ecuación (5) se ha transformado en la expresión de la Ecuación (8):

$$m = \frac{Vmáx - A_c}{A_c} \quad (8)$$

Expresando m como un porcentaje:

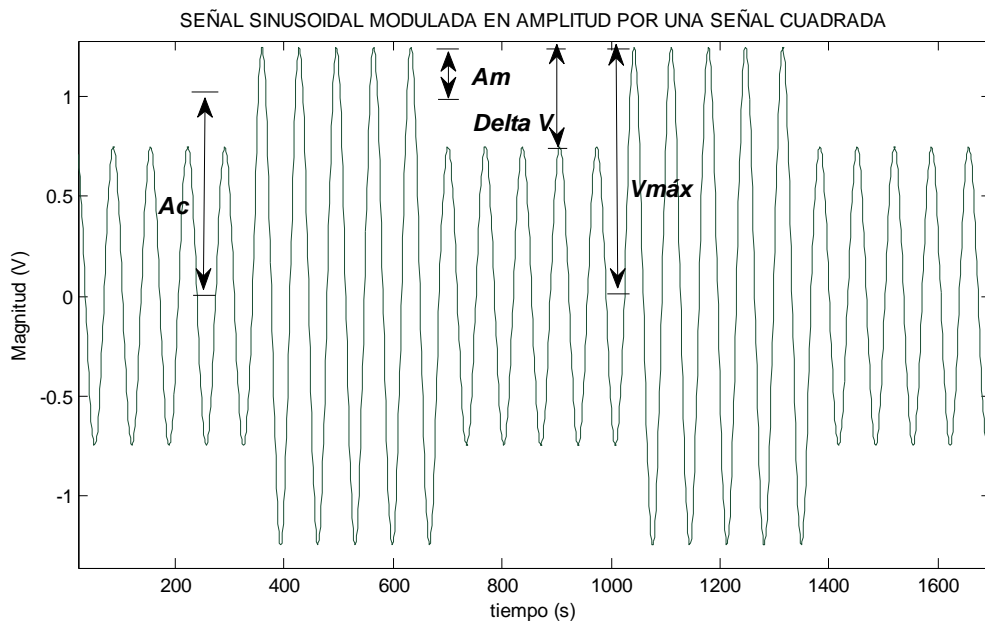
$$m = \frac{Vmáx - A_c}{A_c} * 100\% \quad (9)$$

Si en cambio se establece que la señal moduladora tiene forma cuadrada (ver Figura 2), la forma de onda modulada en amplitud, según la modificación del Estándar CEI 61000-4-15 del 2003, obedece a la Ecuación (10):

$$s(t) = A_c * \text{sen}(2 * \pi * f_c * t) * \left\{ 1 + \frac{\Delta V}{V} * \frac{1}{100} * \frac{1}{2} * \text{signo}[\text{sen}(2 * \pi * f_m * t)] \right\} \quad (10)$$

El término $\frac{\Delta V}{V}$ (Delta V sobre V) corresponde al coeficiente de modulación expresado como porcentaje, f_m corresponde a la frecuencia de la señal moduladora, A_c es la amplitud de la señal portadora sin modular y f_c es la frecuencia de esta última.

Figura 2. Señal sinusoidal con envolvente cuadrada.



Fuente: Las autoras

Es importante mencionar que las anteriores son expresiones para una señal sinusoidal ideal, sin considerar otras perturbaciones como armónicos o huecos (sags).

1.1.3 Caracterización del *Flicker*.

Modelar el fenómeno del *Flicker* es un proceso complejo, porque como se dijo anteriormente, no sólo tiene como variables la frecuencia y la tensión, sino también involucra la percepción humana, las condiciones ambientales del lugar donde se dé y el tipo de carga, entre otras. Debido a que la respuesta fisiológica del ser humano ante los estímulos luminosos es un proceso subjetivo, el tratamiento estadístico de los datos provenientes de los resultados de los experimentos referentes al estudio del *Flicker* es imprescindible.

Las frecuencias a las cuales las se perciben las fluctuaciones son relativamente bajas (0,5 - 25 Hz aproximadamente). Estudios realizados acerca del fenómeno³ señalan que las frecuencias inferiores a 0,5 Hz no alcanzan a producir molestia porque la cadena ojo-cerebro es capaz de separar los destellos producto de las fluctuaciones; pero a partir de una cierta frecuencia, que se conoce como frecuencia de fusión, aparece el fenómeno de *Flicker* causando una sensación desagradable en quien lo percibe. Superada una determinada frecuencia de parpadeo, que no tiene un valor fijo sino que depende de las condiciones ambientales de iluminación, y que está alrededor de los 25 a 30 Hz, la sensación de *Flicker* desaparece y el sistema ojo-cerebro percibe una iluminación promedio constante.

Algunos experimentos realizados^{4 5} han entregado como resultados las curvas de tolerancia, que son gráficos que enseñan los valores de modulación y frecuencia

³ Díez, G.; Eguíluz, L.I.; Mañana, M.; Lavandero, J.C.; Ortiz, A. Revisión crítica del umbral de perceptibilidad del *Flicker*. En: XII Reunión de Grupos de Investigación en Ingeniería Eléctrica. Córdoba 2002. p 1.

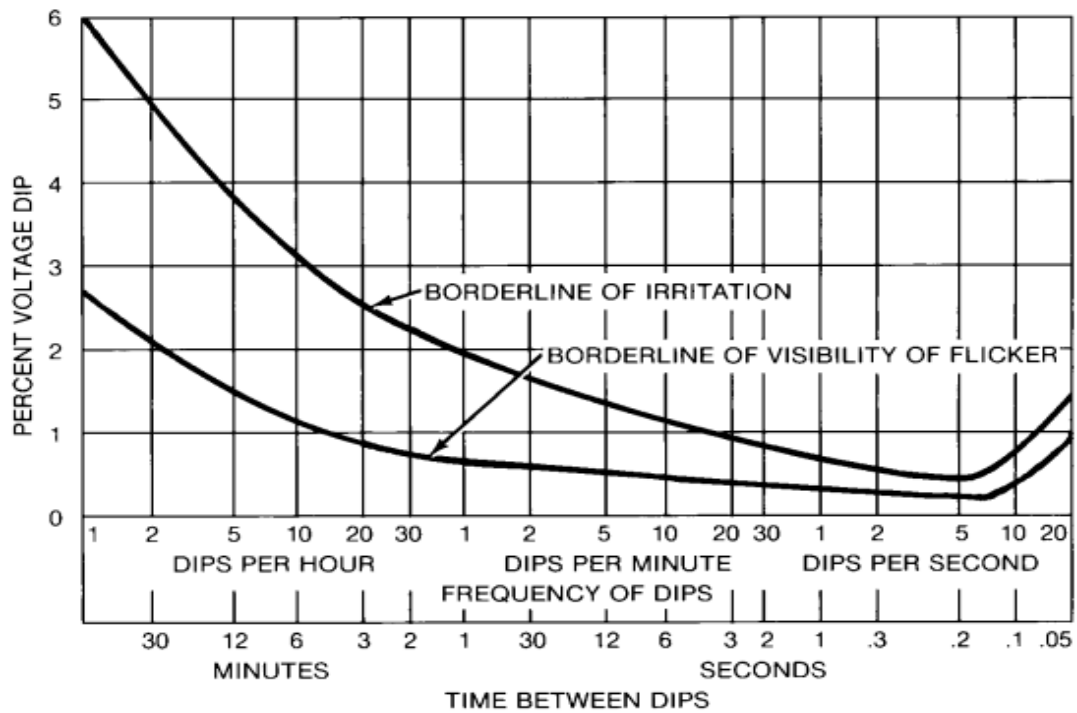
⁴ THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants: Std 141-1993 New York: IEEE, 1993. p 94.

de fluctuación para los cuales hay un nivel de percepción común, según las condiciones específicas de los experimentos, como el tipo de carga responsable de la fluctuación, el tipo de lámpara empleada, o el tipo de espacio en el que se encuentre la misma y los participantes del ensayo. Debido a que no todos los individuos responden de igual forma ante las fluctuaciones en la intensidad lumínica, las curvas de tolerancia se han trazado tomando en cuenta la impresión de la mayoría de los individuos presentes, cuando éstos se encuentran en el límite de perceptibilidad del *Flicker*, que significa que se está a punto de comenzar a experimentar molestia.

En la figura 3 se presentan las curvas de límites de visibilidad e irritabilidad del estándar IEEE 141-1993. Para la curva inferior, los individuos detectan la fluctuación, mientras que para los valores de la curva superior, el fenómeno comienza a ser percibido como una molestia evidente.

Figura 3. Curva de tolerancia IEEE 141.

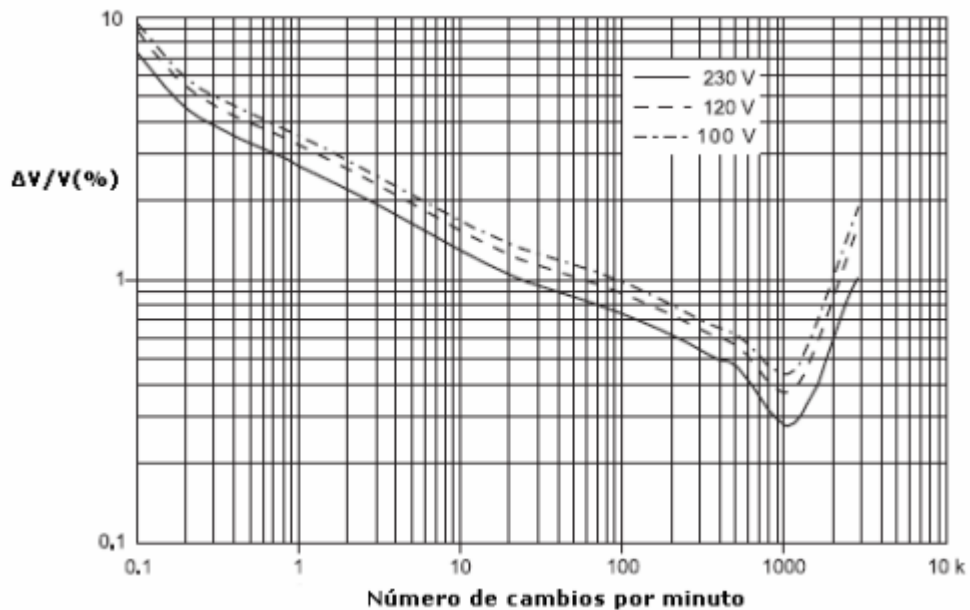
⁵ HANZELKA, Zbigniew y BIEN, Andrzej. Power Application Guide: Voltage Disturbances, Flicker Measurement. Poland: LPQI, 2005. Leonardo Power Quality Initiative (LPQI), AGH University of Science and Technology. p 2.



Fuente: Estándar IEEE 141-1993.

La figura 4 representa un experimento en el cual la tensión de alimentación de la bombilla empleada para reflejar la fluctuación es otra de las variables.

Figura 4. Curva de tolerancia dependiendo de la tensión de alimentación de la bombilla.



Fuente: Power Quality Application Guide: Voltaje Disturbances, Flicker Measurement.

1.1.4 Consecuencias Fisiológicas del fenómeno del *Flicker*

La luz pulsátil puede ser una de las causas de los cuadros de molestias relacionados con cefaleas. Según estudios realizados en el campo médico, reportados en la literatura de la misma área⁶, cuando un observador mira hacia una luz fluctuante, la actividad eléctrica cerebral (*EEG*, por sus siglas en inglés) registrada en el lóbulo occipital responde con la misma frecuencia de pulsación de la luz. En algunas ocasiones esta respuesta es tan prolongada que se detecta sobre el telón de fondo de los otros ritmos cerebrales en el trazado del *EEG*, disparando el potencial eléctrico. Este potencial es el resultado del campo eléctrico generado cuando grandes poblaciones de neuronas descargan de forma sincrónica.

⁶ MUNOA, José Luis. Estrés y Visión: La luz eléctrica, fuente de estrés visual. En: Anales de la Sociedad Ergoofalmológica Española. [en línea]. Vol.27. No. 1-2 (1998). Consultado el 25 de abril de 2009. Disponible en < <http://www.oftalmo.com/ergo/ergo1998/06cap06.htm> >

En general, los efectos más comunes del fenómeno del *Flicker* sobre las personas son⁷: el cansancio visual, posibles migrañas, cefaleas, estrés y en casos extremos puede desencadenar crisis convulsivas.

1.2. REGLAMENTACIÓN COLOMBIANA SOBRE LA MEDICIÓN DE *FLICKER*.

La Ley 143 de 1994 estableció que le corresponde a la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) definir los criterios técnicos de calidad con que debe suministrarse el servicio de energía a los usuarios finales. Teniendo en cuenta que se ha masificado el uso de los equipos electrónicos con alta susceptibilidad a las fluctuaciones de tensión, se hace necesario reflejar estos fenómenos con indicadores de calidad. Por esta razón, la CREG propone cuantificar las fluctuaciones de tensión basadas en un indicador de continuidad de la forma de onda, entendiendo como discontinuidad la desviación de la onda real en relación con la forma estándar sinusoidal pura de tensión, denominado Perceptibilidad de Corto Plazo, PST.

La CREG recomienda medir únicamente indicadores de Calidad de tensión ya que en ésta se refleja el impacto de la Calidad de la Corriente en el Punto de Acople Común, lo que significa que al medir la Calidad de la tensión se está midiendo la Calidad de la Potencia Eléctrica. Al medir la Calidad de la Potencia Eléctrica como Calidad de la tensión se mide el impacto sobre una mayor cantidad de usuarios. Ello también simplifica la labor de vigilancia y control, por parte de la entidad.

⁷ DÍEZ, G., et al, Op. Cit.,p.2.

Conforme a lo anterior, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) en las resoluciones 024 de 2005 y 016 de 2007, recomienda al Operador de Red (OR) medir el indicador PST para calificar la calidad de tensión de suministro⁸. Para ello, la CREG recomienda seguir la guía del estándar IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) 61000-4-15, actualización del 2003, donde se normaliza un medidor analógico de *Flicker* para aplicar en lámparas de 60 W, 120 V, 60 Hz.

A continuación se presentan algunos apartes de la resolución CREG 024 de 2005, concernientes a la medida del indicador PST. Lo allí expuesto, representa los lineamientos a seguir para la construcción de un módulo de medición del fenómeno del *Flicker*.

Del Artículo 1°.Definiciones.

“Parpadeo (*Flicker*). Impresión de inestabilidad de la sensación visual causada por un estímulo luminoso, cuya luminosidad o distribución espectral fluctúa en el tiempo...PST (*Percibility Short Time*).Es un indicador de la perceptibilidad de un equipo o sistema, ante fluctuaciones de tensión durante un período de tiempo corto (10 minutos), obtenido de forma estadística a partir del tratamiento de la señal de tensión. La forma de calcularlo se define en el Estándar IEC-61000-4-15 (2003-02).”⁹

⁸ COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución 024 de 2005. Bogotá: CREG, 2005. p.6

⁹ Ibid.,p.4

Del Artículo 3ª. Equipos de Medición.

“Los equipos de medición a usar deben al menos, respecto a la calidad de la potencia:

Medir el indicador PST, de acuerdo con el Estándar IEC-61000-4-15 (2003-02), o al menos permitir descargar, en medio magnético, información digital de la forma de onda del voltaje, para ser procesada en otra parte del sistema, como se describe en el artículo 5º, con una velocidad de muestreo mínima de 1024 muestras por segundo.”¹⁰

Del Artículo 5º. Plan de Recolección de Datos.

“Para cada punto de medida se usará la siguiente metodología para procesar la información cada 10 minutos:

a) Descarga de información: Se descargan 10 minutos de la señal Tensión contra Tiempo del registrador. Posteriormente a esto, la memoria del registrador destinada a almacenar esta información, puede ser borrada.

d) Cálculo del PST: Usando el algoritmo descrito en el Estándar IEC-61000-4-15 (2003-02) se calcula el PST a partir de la información descargada. El ejecutable para calcular el PST a partir de la información, en medio magnético, de la señal de tensión, podrá ser tomado de la página web de la CREG.

f) Almacenamiento de PST: La información es almacenada en un archivo del tipo "csv" llamado CEL_Semana_j_PM.csv; donde j corresponde al número

¹⁰ Ibid.,p.6

de la semana, y PM corresponde al nombre del punto de medida.

Para cada intervalo de tiempo se registra la Fecha y Hora en la cual comienza el período de evaluación del PST, el número de interrupciones que comenzaron en el intervalo y la duración total de las interrupciones durante este (en segundos), el número de Desviaciones Estacionarias de Tensión (DET) que comenzaron en el intervalo, y la duración total de las DET durante este (en segundos), el valor del PST para cada fase medida, con dos cifras decimales, y el valor de la relación $V(2)/V(1)$, con cuatro cifras decimales, utilizando el siguiente formato: "dd/mm/aaaa, hh:mm, NI, DI, NDET, DDET, PST_R, PST_S, PST_T, V2V1". (dd= día, mm= mes, aaaa= año, hh= hora, mm= minuto, NI = Número de interrupciones, DI = Duración de interrupciones, NDET = Número de DET, DDET = Duración de las DET, PST_RS ó T = PST por fases, V2V1 = relación $V(2) / V(1)$)."¹¹

Del Artículo 7°. Límites del PST.

“Los límites máximos exigidos para PST serán definidos por la CREG a partir de los resultados obtenidos de un estudio de diagnóstico del sistema colombiano. Se iniciará con una regulación basada en el autocontrol para el cumplimiento de límites. El sistema de Autocontrol podrá ser revaluado por la CREG si lo considera necesario.”¹²

Por otra parte, la resolución 016 de 2007, que modifica parcialmente la 024 de

¹¹ Ibid., p.7

¹² Ibid., p.9

2005, expresa en el artículo 4¹³ que en los registros de PST debe dejarse constancia de la existencia de las desviaciones de la tensión R.M.S de duración superior a un minuto e iguales o superiores al 10% de la tensión nominal. Así mismo, las discontinuidades superiores a un minuto de duración y con tensión menor al 10% de la tensión nominal deben reportarse en los registros de PST.

Con respecto al procesamiento de la señal, esta resolución establece que se permite el uso de equipos capaces de entregar el valor de PST, sin necesidad de descargar la información de la señal digitalizada de la red.

La comisión de regulación de energía y gas, se adhiere a las recomendaciones del Estándar internacional CEI 61000-4-15 para la construcción o diseño de medidores y algoritmos de medición de Flicker, limitando las frecuencias de muestreo únicamente a tasas iguales o superiores a 1024 muestras por segundo. Para el reporte de los valores de PST, según la normativa colombiana¹⁴, se deben reportar los eventos de tensión paralelos al reporte del valor del PST correspondientes a una duración superior a un minuto, ya sea que éstas superen el límite del 10% de la tensión nominal o no.

1.3. MEDICIÓN DE *FLICKER* CON BASE EN EL ESTÁNDAR CEI 61000-4-15

La Comisión Electrotécnica Internacional es una organización para la normalización en los campos eléctrico y electrónico, creada con el fin de promover

¹³ COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución 024 de 2005. Bogotá: CREG, 2005. p.5

¹⁴ Ibid., p.5

la unificación en dichos campos. La norma internacional CEI 61000-4-15 ha sido elaborada por el subcomité encargado de Fenómenos de baja frecuencia, del comité técnico 77 de la CEI, encargado de Compatibilidad Electromagnética.

Los estudios de la CEI en este tema, se enfocan en la susceptibilidad de la cadena lámpara-ojo-cerebro ante el fenómeno del *Flicker*. Con base en la respuesta de la cadena ante los cambios en la luminosidad de una bombilla, establece requerimientos de compatibilidad electromagnética para un equipo de medida de dichos cambios. Estos requerimientos se condensan en un algoritmo que a partir de la señal de tensión, calcula un indicador físico – estadístico llamado PST, que asigna un nivel de severidad a un conjunto de fenómenos que se presentan en un período de tiempo específico.

1.3.1 Descripción del sistema de medición de *Flicker* del Estándar CEI 61000-4-15

El sistema de medida se basa en la arquitectura analógica que se presenta en la figura 4¹⁵. Dicha arquitectura de medidor de flicker propuesta por la CEI, se divide en dos partes:

- 1 Simulación de la respuesta de la cadena lámpara – ojo – cerebro, realizada por los bloques dos, tres y cuatro.

¹⁵ COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL. Estándar Internacional CEI/IEC 61000-4-15, Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4, Técnicas de ensayo y medida. Ginebra: Secretaria Central de la Comisión Electrotécnica Internacional, 2003. p. 19

2 Análisis Estadístico en tiempo real de la señal de flicker, realizada por el bloque cinco.

La simulación de la respuesta de la cadena lámpara-ojo-cerebro se hace empleando un modelo de flujo luminoso, la característica de tensión del bulbo de tungsteno de una bombilla y un modelo de la reacción humana ante fluctuaciones del flujo luminoso. Lo anterior arroja la medida instantánea de Flicker (IFL). Sin embargo, cada individuo reacciona de forma diferente a las variaciones del flujo luminoso, así que el valor del índice PST se obtiene de un modelo estadístico basado en un trabajo experimental con un grupo grande de individuos.

A continuación se hace una descripción de cada uno de los bloques que conforman la arquitectura analógica para obtener el nivel instantáneo de *Flicker* (IFL por *instantaneous Flicker Level*), según son descritos por la CEI.

Bloque Uno: “Contiene un generador de señal para comprobar la calibración del medidor de Flicker en servicio y un circuito adaptador de tensión que escala el valor eficaz medio de la tensión de entrada a un nivel de referencia interno...”¹⁶, de manera que la salida de este primer bloque sea una relación porcentual. El circuito de adaptación de la tensión de entrada especificado para un medidor analógico deberá tener un tiempo de respuesta a una variación en escalón del valor eficaz de entrada igual a 1 minuto.

Bloque Dos: El demodulador cuadrático que corresponde a este bloque tiene el propósito de reestablecer la fluctuación de tensión. Esto significa que la salida de este bloque es una tensión proporcional a la amplitud de la fluctuación de modulación de la entrada. En este bloque se eleva la señal de entrada al

¹⁶ Ibid., p.7

cuadrado para recuperar el valor de la fluctuación de tensión de entrada escalada al nivel de referencia y, luego se hace pasar la señal por un filtro pasa bajas. Este filtro se emplea para eliminar componentes de distorsión de frecuencia que se originan al elevar la señal al cuadrado¹⁷.

Bloque Tres: Comprende una cascada de 3 filtros (Ver Figura cinco). El filtro pasa altas de primer orden, con una frecuencia de corte de -3 dB alrededor de 0,05 Hz tiene como finalidad eliminar las componentes de corriente continua de la señal de entrada. La salida de este filtro ingresa a un filtro paso bajo *Butterworth* de sexto orden, con una frecuencia de corte de -3 dB de 42 Hz, que se emplea para eliminar el rizado de alta frecuencia de la salida del demodulador que se produce al multiplicar la señal de entrada al demodulador por ella misma.

Finalmente, el tercer filtro del bloque tres modela la reacción humana ante las variaciones del flujo luminoso. La reacción del ojo y el cerebro es modelada con el uso de un filtro pasa bandas, con frecuencia central de 8,8 Hz, descrito por el Estándar IEC 61000-4-15 con la siguiente función de transferencia:

$$F(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \times \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \quad (11)$$

Los valores indicativos para los parámetros se enseñan en la Tabla 1. Este filtro se ha diseñado con base en una investigación psico-fisiológica sobre la influencia de los cambios del flujo luminoso en las personas e incluyó el análisis del efecto del cambio en la frecuencia y la amplitud del flujo luminoso.

¹⁷ TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Cuarta Edición. Pearson Education, 2003. p 148.

Selector de Márgenes: Puede estar a la entrada o salida de la cadena de filtros. Escala la salida (o la entrada) de dichos filtros para ajustar la sensibilidad del equipo al valor de la fluctuación relativa de tensión en la entrada.

Tabla 1. Valores indicativos para los parámetros en una lámpara a 120V/60Hz.

Variable	Lámpara 120 V / 60 Hz
k	1,6357
λ	$2 \cdot \pi \cdot 4,167375$
ω_1	$2 \cdot \pi \cdot 9,077169$
ω_2	$2 \cdot \pi \cdot 2,939902$
ω_3	$2 \cdot \pi \cdot 1,394468$
ω_4	$2 \cdot \pi \cdot 17,31512$

Fuente: Estándar Internacional CEI 61000-4-15. 2003.

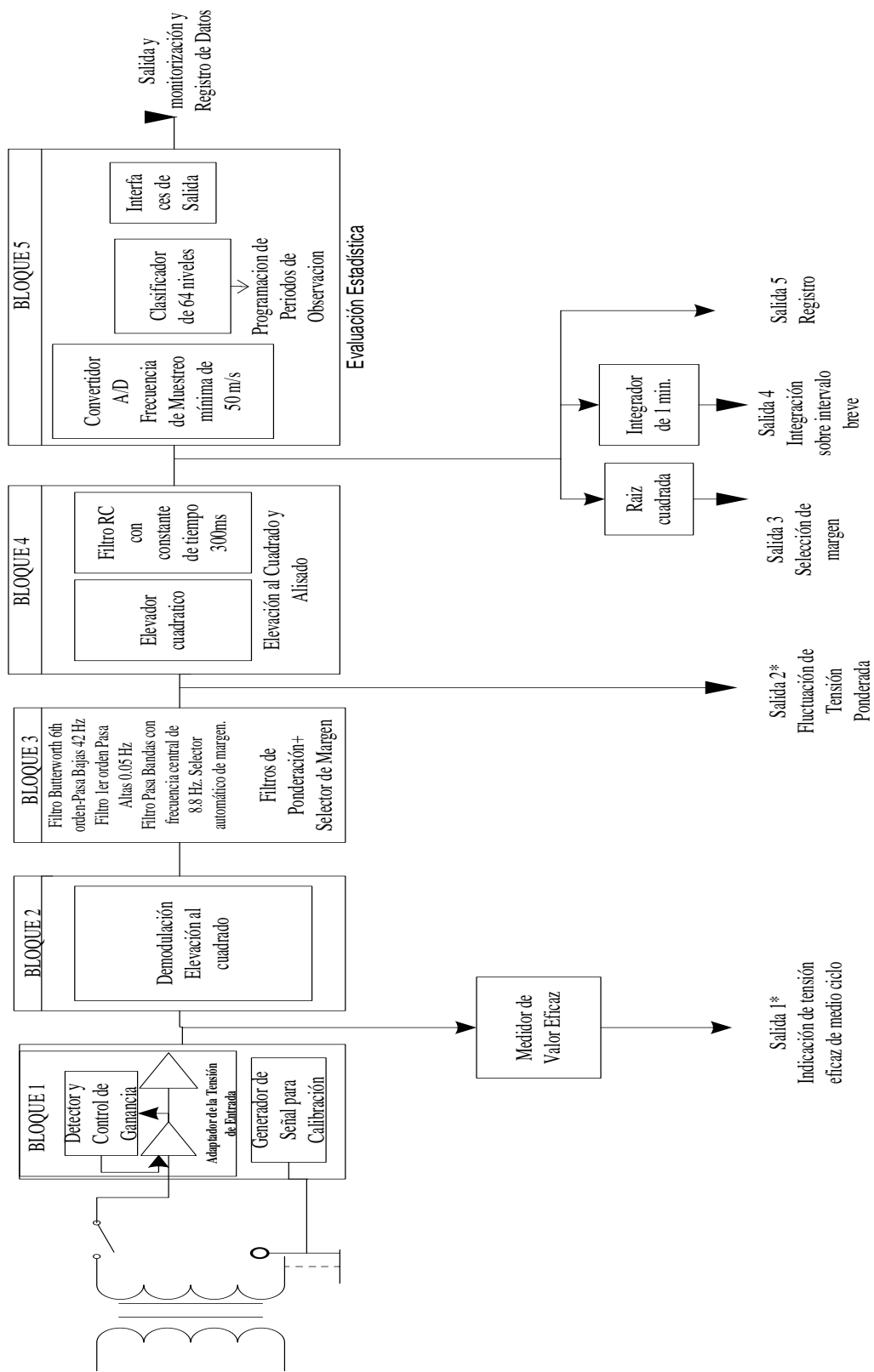
Bloque cuatro: Simula la sensación de parpadeo procesada por el cerebro. Para ello se dispone un modulador cuadrático que eleva al cuadrado la señal de flicker ponderada para simular el comportamiento no lineal de la percepción del ojo – cerebro. Seguidamente se tiene un filtro de primer orden que simula el efecto de almacenamiento o memoria de las sensaciones visuales. Los requisitos de este filtro son que debe tener una respuesta equivalente a un filtro paso bajo resistivo/capacitivo de primer orden con una constante de tiempo de 300 milisegundos.

Las ecuaciones de los filtros continuos que hacen parte de la arquitectura descrita, así como las figuras de la respuesta en frecuencia de cada uno de ellos, pueden ser consultadas en el anexo A.

Bloque Cinco: Corresponde al procesamiento estadístico digital en tiempo real. La salida de este bloque será el nivel de severidad de flicker obtenido a partir de las medidas (Ver Figura cinco). Los índices de severidad son valores que representan el grado de molestia que causan las fluctuaciones de tensión en las lámparas. Los índices de severidad se pueden dar en severidad de período corto o PST (perceptibility short time) y de período largo Plt (perceptibility long time).

El análisis estadístico, realizado en tiempo real se deberá hacer subdividiendo la amplitud de la señal de nivel de *Flicker* en un número adecuado de clases.

Figura 5. Diagrama de bloque Flicker-metro analógico propuesto por el Estándar ICE 6100-1-15.



Fuente: Std. IEC 61000-4-15.

“Cada vez que aparece el valor apropiado, el contador de la clase correspondiente se incrementa en una unidad. De esta forma, se obtiene la función de distribución de frecuencias. Añadiendo el contenido de los contadores de todas las clases y expresando el valor del contador de cada clase relativo a la suma de los valores de los de todas las clases se obtiene la función de densidad de probabilidad de los niveles de *Flicker*. De esta función se obtiene la función de probabilidad acumulada usada en el método estadístico permanente a un nivel dado.”¹⁸

Acerca de la duración de los periodos de observación para la extracción del indicador PST, la CEI declara que el período de observación¹⁹ se define por dos intervalos de tiempo ajustables T_{corto} y T_{largo} . El intervalo de observación largo define el tiempo de observación total y siempre es un múltiplo del intervalo corto. T_{corto} puede seleccionarse entre 1, 5, 10 y 15 minutos.

Partiendo de la función de probabilidad acumulada calculada y empleando un mínimo de 6 bits de resolución, 64 clases, frecuencia de muestreo de 50 muestras por segundo como mínimo y un tiempo de observación de 10 minutos; se obtiene el PST por medio de la siguiente ecuación²⁰:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{3s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s}} \quad (12)$$

Donde los percentiles $P_{0.1}$, P_1 , P_3 , P_{10} y P_{50} , son los niveles de flicker excedidos a lo largo del 0,1%, 1%, 3%, 10% y 50%, respectivamente del tiempo durante el

¹⁸ COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL, Op. Cit., p. 8

¹⁹ Ibid., p. 13

²⁰ Ibid., p. 13

período corto de observación. El sufijo *s* en la fórmula indica que debería usarse el valor ponderado de cada percentil, el cual se obtiene usando las ecuaciones siguientes:

$$P_{50s} = \frac{(P_{30} + P_{50} + P_{80})}{3} \quad (13)$$

$$P_{10s} = \frac{(P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})}{5} \quad (14)$$

$$P_{3s} = \frac{(P_{2.2} + P_3 + P_4)}{3} \quad (15)$$

$$P_{1s} = \frac{(P_{0.7} + P_1 + P_{1.5})}{3} \quad (16)$$

Cabe destacar que el motivo por el cual se hace una estimación promediada de los percentiles de la Ecuación (11) es que se evite que pequeñas variaciones en el ciclo de trabajo de las cargas origen de las fluctuaciones afecten de forma significativa el valor del PST.

1.3.2 Técnicas de mejoramiento de la precisión de la evaluación del Flicker

En la mayoría de los casos, los valores de percentil requeridos para el cálculo del PST no tienen una correspondencia directa con el valor de la clase a la que cada uno corresponde. La deducción de los valores de clase deberá hacerse a través de interpolación o extrapolación. Los siguientes son los métodos de interpolación sugeridos por la CEI para aumentar la precisión en la estimación del PST. Para información adicional, referirse al anexo A del estándar CEI 61000-4-15.

1.3.2.1 Interpolación lineal.

“La clasificación lineal se hace de forma que la escala completa, F_s , del clasificador tenga N pasos discretos iguales dando una amplitud de clase de F_s/N . Sea n el número de la clase a la que pertenece el percentil P_k . La

clase n comprende los niveles de salida del medidor de Flicker entre $(n-1) F_s/N$, que es superado por el y_{n-1} por ciento de las muestras y $n F_s/N$, que es superado por el y_n por ciento de las muestras. Por interpolación lineal, el percentil P_k correspondiente al y_k por ciento de las muestras es:

$$P_k = \frac{F_s}{N} \left(n - \frac{y_k - y_n}{y_{n-1} - y_n} \right) \quad (17)^{21}$$

Es posible intentar aumentar la exactitud en la estimación mediante la interpolación no lineal, descrita a continuación.

1.3.2.2 Interpolación no lineal

“Cuando la interpolación lineal no da suficiente precisión, se debe utilizar interpolación no lineal. El procedimiento recomendado es adaptar una fórmula cuadrática a los niveles correspondientes a tres clases consecutivas de la función de probabilidad acumulada (CPF).

$$P_k = \frac{F_s}{N} \left(n - 1 + \frac{1}{2H_2} (H_1 - \sqrt{H_3}) \right) \quad (18)$$

Donde

$$H_1 = 3/2y_{n-1} - 2y_n + 1/2y_{n+1} \quad (19)$$

$$H_2 = 1/2y_{n-1} - y_n + 1/2y_{n+1} \quad (20)$$

$$H_3 = H_1^2 - 4H_2(y_{n-1} - y_k) \quad (21)^{22}$$

²¹ Ibid., p. 21

El estándar IEC 61000-4-15 sugiere el empleo de los indicadores PST y Plt de la señal de tensión para la evaluación de los niveles de *Flicker*. Propone que para el cálculo de los mismos, primero se realice la extracción de la respuesta de la cadena lámpara-ojo-cerebro ante las fluctuaciones, conocida como nivel instantáneo de *Flicker* (IFL) o sensación instantánea de *Flicker*, para lo cual describe una arquitectura de forma analógica que consta de cuatro bloques. El último bloque, es obligatoriamente digital e implica la digitalización de la señal, si es analógica, con una frecuencia de muestreo mínima de 50 muestras por segundo. Para el tratamiento estadístico se impone un mínimo de 6 bits de resolución y usando al menos 64 clases. Si se desea aumentar la precisión de la estimación de los valores de los percentiles, la CEI propone algunos métodos de interpolación, descritos previamente. La consulta del Estándar IEC 61000-4-15 es recomendada para incrementar la comprensión de los aspectos expuestos en este capítulo.

²² Ibid., p. 21

2. ADAPTACIÓN DEL ESTÁNDAR CEI 61000-4-15 PARA LA MEDICIÓN DIGITAL DE *FLICKER*.

Como se estableció en el capítulo uno, la arquitectura del medidor de Flicker propuesto por la CEI corresponde a una implementación analógica. La justificación de una versión digital para un medidor de calidad de potencia eléctrica reside en los siguientes aspectos:

- a) La digitalización simplifica de manera significativa la implementación física.
- b) Provee mayor flexibilidad ante los cambios y mejoras que puedan surgir en alguna parte de la arquitectura original.
- c) La exactitud del sistema dependerá de variables como la frecuencia de muestreo o el número de bits del convertor y se puede determinar.
- d) Para mediciones trifásicas, el medidor multicanal podría implementarse con un solo ADC, siempre y cuando no se produzca un error considerable por retardo de tiempo en la multiplexación.
- e) Si el medidor de Flicker pertenece a una unidad constructiva de medición de parámetros de la calidad de la potencia eléctrica, las operaciones comunes con otros algoritmos pueden ser aprovechadas.

Lo anterior supone que una versión digital del medidor de la CEI debe conservar intactas las características de la respuesta global del sistema analógico y de hecho, minimizando algunos de los problemas asociados al tratamiento de la señal analógica, como las no linealidades, atenuaciones indeseables o ruido.

2.1. Requisitos funcionales y especificaciones de diseño para un medidor digital de Flicker.

El estándar CEI 61000-4-15 establece los requisitos funcionales para un medidor de Flicker, analógico y digital, lo que significa que un medidor digital debe validarse de la misma forma que uno analógico y contener las mismas etapas de tratamiento de la señal de entrada para la obtención del nivel de Flicker.

Durante varios años, a partir de la publicación del Estándar, se han publicado algunos trabajos en los cuales se procura una implementación de un medidor digital de Flicker o una simulación del mismo^{23 24 25}. Gran parte de esos trabajos realiza el tratamiento de la señal transformándola desde el dominio temporal al dominio de la frecuencia, mediante diversas transformadas.

Las consideraciones que se realizan en el presente trabajo se hacen a partir de la premisa de que se tiene una señal proveniente de la red eléctrica, que ha sido muestreada y cuantificada en forma adecuada, a una tasa de muestreo determinada, de forma tal que la entrada al algoritmo que se pretende especificar corresponde a la forma de onda de las figuras 1 y 2, en forma digitalizada.

2.2. Estimación del nivel instantáneo de *Flicker* (IFL) en forma digital.

La obtención del nivel instantáneo de Flicker a partir de la señal de entrada, correspondiente a la señal de tensión de 60 Hz de la red, comprende la primera

²³ GRACZYK, Adam. Working Out a Model and an Analysis of Metrological Properties of a Digital Flickermeter. En: Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. No. 979, 2006; ELEKTRYKA, p.26-34.

²⁴ NERI, G.; CAIN, G.D.; SALMON, T.; YARDIM, A. A microprocessor-based digital flickermeter. En: Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on. Vol 40, Issue 6, Dec. 1991; p. 1008-1014.

²⁵ BERTOLA, A.; LAZAROIU, G.C.; ROSCIA, M.; ZANINELLI, D. A Matlab-Simulink flickermeter model for power quality studies. En: Harmonics and Quality of Power, 2004. 11th International Conference on. 12-15 Sept. 2004; p. 734 - 738

fase de la medición descrita en el estándar CEI 61000-4-15, expresada en forma analógica, y corresponde también a la primera etapa del algoritmo digital.

Para la verificación de la integridad de la señal, y la conformidad del desarrollo digital con el estándar, un medidor analógico se implementó de forma paralela en Simulink de Matlab. Una vez se probó este último, se empleó para, bloque a bloque, observar la respuesta del sistema y validar la respuesta de la versión digital.

2.2.1. Frecuencia de muestreo.

La CREG establece que, como frecuencia de muestreo mínima se debe emplear una tasa de 1024 muestras por segundo. Un estudio previo al desarrollo del presente algoritmo²⁶ concluye a través de la experimentación con diferentes frecuencias de muestreo que dicha frecuencia no afecta de manera significativa la respuesta del medidor ante cualquier perturbación. Las pruebas fueron realizadas variando la frecuencia en un rango de 50 Hz (mínimo propuesto por la CEI) a 4096 Hz.

La siguiente tabla resume los experimentos concernientes a la frecuencia de muestreo de la señal de entrada para dos señales de entrada de prueba distintas, correspondientes a las pruebas uno y siete de la tabla cinco del estándar CEI 61000-4-15, empleando 256 clases en ambos los casos. Los resultados de las otras cinco pruebas son similares a los presentados en la tabla dos, razón por la cual se omiten. El valor de PST esperado debe estar entre 0,95 y 1,05 unidades

²⁶ RODRÍGUEZ, Tania y MUÑOZ, Dagoberto. Análisis de los Algoritmos de Medición de Flicker Considerando los Estándares Internacionales. Bucaramanga, 2007, p.80 Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, electrónica y de Telecomunicaciones.

de perceptibilidad. La respuesta de la Tabla 2 corresponde a los valores de PST entregados por el algoritmo digital desarrollado en el presente proyecto:

Tabla 2. Resultados de PST y tiempo de ejecución cuando se varía la frecuencia de muestreo.

Frecuencia de modulación (Hz)	Porcentaje de modulación (%)	Frecuencia de muestreo (muestras/s)	PST	Tiempo aproximado de ejecución en MATLAB
0,008	3,166	1024	0,947001565928003	3,411 [s]
		2048	0,946936222908508	6,601 [s]
		4096	0,947012679879915	13,304 [s]
40	4,834	1024	1,03451683993273	3,504 [s]
		2048	0,979579528134255	6,961 [s]
		4096	0,943385109916145	13,858 [s]

Fuente: Las autoras.

Sin embargo, según lo especificado por la CREG, los reportes de PST deben hacerse con dos cifras decimales, por lo cual la Tabla 2 queda modificada como se observa en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3. Resultados de PST y tiempo de ejecución cuando se varía la frecuencia de muestreo, acotando el resultado a dos cifras decimales

Frecuencia de modulación (Hz)	Porcentaje de modulación (%)	Frecuencia de muestreo (Hz)	PST	Tiempo aproximado de ejecución en MATLAB
--------------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	------------	---

0,008	3,166	1024	0,95	3,411 [s]
		2048	0,95	6,601 [s]
		4096	0,95	13,304 [s]
40	4,834	1024	1,03	3,504 [s]
		2048	0,98	6,961 [s]
		4096	0,94	13,858 [s]

Fuente: Las autoras.

Se observa que el número de muestras por segundo que se tomen en la entrada incide sobre algunas cifras decimales del indicador PST a la salida del algoritmo; la variación de dichas cifras está relacionada con otras variables, como la severidad de la perturbación y la frecuencia de la misma. Los resultados a las diferentes frecuencias de prueba se encuentran dentro de los límites permitidos por la norma, así que para efectos del presente trabajo se concluye que la frecuencia de muestreo más adecuada es 1024 muestras por segundo, ya que implica el menor tiempo de ejecución. Cabe destacar que la frecuencia de muestreo no es del todo irrelevante, ya que aunque la diferencia de los resultados no supera el 5%, dicha variación de frecuencia puede hacer variar la primera cifra decimal del resultado del PST, según las condiciones particulares de la entrada.

2.2.2. Filtrado digital.

Para la implementación de las etapas de filtrado en un algoritmo de medición digital de Flicker, se partirá de las etapas sugeridas en la norma, dado que se pretende reproducir fielmente el medidor analógico de la CEI. Por lo tanto, se transformarán los filtros analógicos empleando las técnicas de diseño de filtros IIR en tiempo discreto a partir de filtros en tiempo continuo²⁷.

²⁷ OPPENHEIM, Alan. Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto. Segunda Edición. Madrid: Prentice Hall. 2000. p 452.

2.2.2.1 Transformación de filtros en tiempo continuo a filtros en tiempo discreto.

El método tradicional de diseño de filtros IIR en tiempo discreto se basa en la transformación de un filtro en tiempo continuo en un filtro en tiempo discreto que cumpla con las especificaciones preestablecidas. Si el desempeño de los filtros sugeridos por la CEI es suficientemente bueno, es ventajoso emplear la transformación de los filtros para aprovechar dicho desempeño.

Para todas las técnicas de transformación de filtros en tiempo continuo a filtros en tiempo discreto, se deben tener en cuenta las siguientes dos restricciones ²⁸:

- Al realizar la transformación se desea que la respuesta en frecuencia del filtro en tiempo discreto resultante preserve las propiedades esenciales de la respuesta en frecuencia del filtro en tiempo continuo, lo que implica que el eje imaginario del plano s se transforme en la circunferencia unidad del plano z .
- Un filtro estable en tiempo continuo se debe transformar en un filtro estable en tiempo discreto, es decir que si el sistema continuo sólo tiene polos en el semiplano izquierdo del plano s , el sistema en tiempo discreto sólo tiene polos en el interior de la circunferencia unidad del plano z .

Algunas pruebas realizadas a algoritmos digitales para la medición del Flicker²⁹, que evalúan el desempeño de los métodos de transformación de los filtros analógicos en digitales a partir de las funciones de transferencia dadas por la CEI,

²⁸ Ibid.,p 451

²⁹ RODRÍGUEZ, Tania y MUÑOZ, Dagoberto, Op. Cit., p. 51

concluyen que los métodos que aproximan adecuadamente dichas funciones de transferencia y que cumplen con los ensayos de funcionamiento establecidos por el Estándar son: La transformación bilineal y la transformación bilineal con frecuencia de *prewarping*.

2.2.2.2 La transformación bilineal

La transformación bilineal es una transformación algebraica entre las variables s y z que convierte el eje imaginario del plano s en una revolución de la circunferencia unitaria característica del plano z .

Concretamente, la transformación bilineal se realiza sustituyendo s de acuerdo con la siguiente expresión:

$$s = \frac{2}{T_d} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) \quad (22)$$

Así que si se tiene una función de transferencia $H(s)$, la transformación bilineal implica que la función de transferencia, ahora en el dominio de z , sea:

$$H(z) = H \left[\frac{2}{T_d} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) \right] \quad (23)$$

Según la literatura de tratamiento de señales²⁹, el parámetro T_d , representa un paso de integración, que no afecta el proceso de diseño y que se selecciona para evitar valores numéricos muy grandes o muy pequeños durante el proceso de diseño. Para expresar los filtros continuos como su equivalente discreto, se escogió un paso equivalente a la frecuencia de muestreo a la que trabaja todo el algoritmo, que es 1024 muestras por segundo.

²⁹ OPPENHEIM, Alan, Op. Cit., p. 452

El comando *bilinear* de MATLAB³⁰ realiza el procedimiento de transformación requerido. Este comando recibe la especificación de f_p en Hertz, que es un parámetro adicional que representa la frecuencia de *prewarping*. Dicha frecuencia indica una frecuencia para la cual la respuesta en frecuencia antes y después de realizar la transformada bilineal coinciden. Si se elige hacer la transformada bilineal empleando una frecuencia de *prewarping*, la expresión a la cual dicha transformada obedece es:

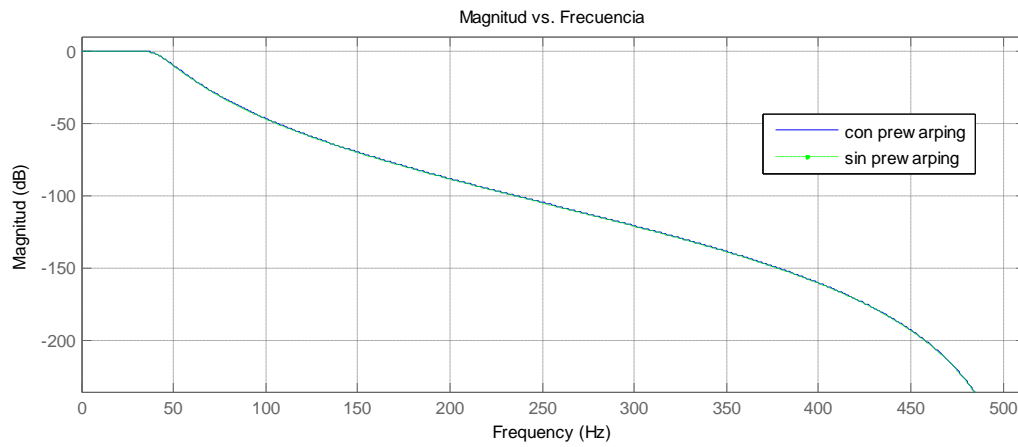
$$H(z) = H \left[\frac{2\pi f_p}{\tan\left(\frac{\pi f_p}{f_d}\right)} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) \right] \quad (24)$$

Donde f_p es la frecuencia de *prewarping*, y f_d es la frecuencia de muestreo en Hz, equivalente a $1/T_d$.

Al realizar la transformada Bilineal a los filtros involucrados en la medición, empleando frecuencia de *prewarping* y omitiéndola, se obtuvo el conjunto de figuras siguientes, donde se enseña la respuesta en frecuencia en ambos casos:

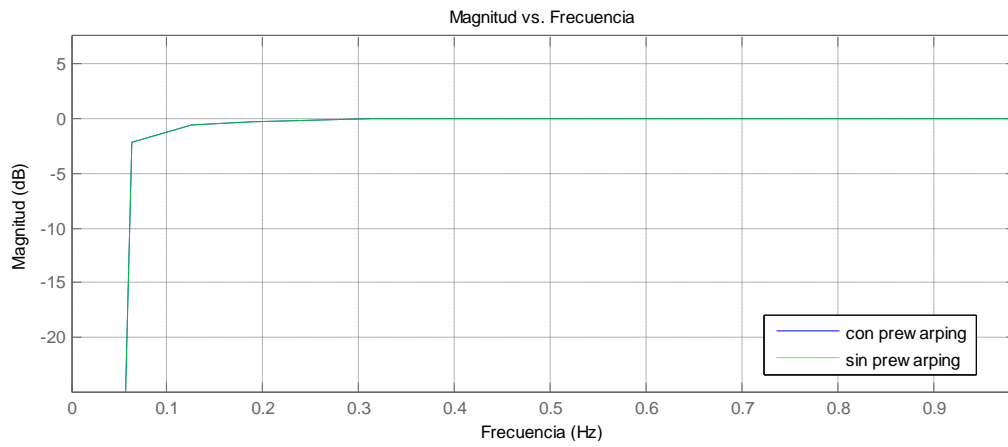
Figura 6. Curva de magnitud vs. frecuencia del filtro pasa bajas con frecuencia de corte 42 Hz y $F_p=42$ Hz..

³⁰ MATH WORKS, MATLAB [programa de computador]. Versión 7.2 R2007b.



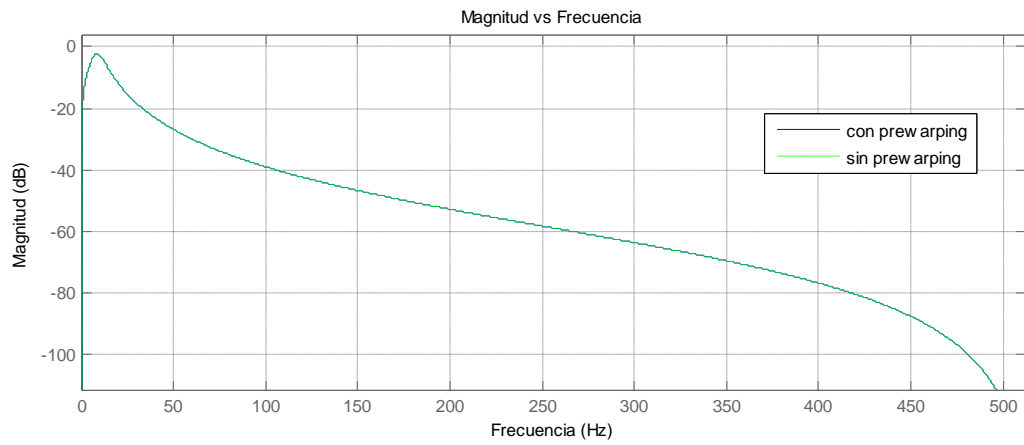
Fuente: Las autoras

Figura 7. Curva de magnitud vs. frecuencia del filtro pasa altas con frecuencia de corte de 0,05Hz y $F_p=0.05\text{Hz}$.



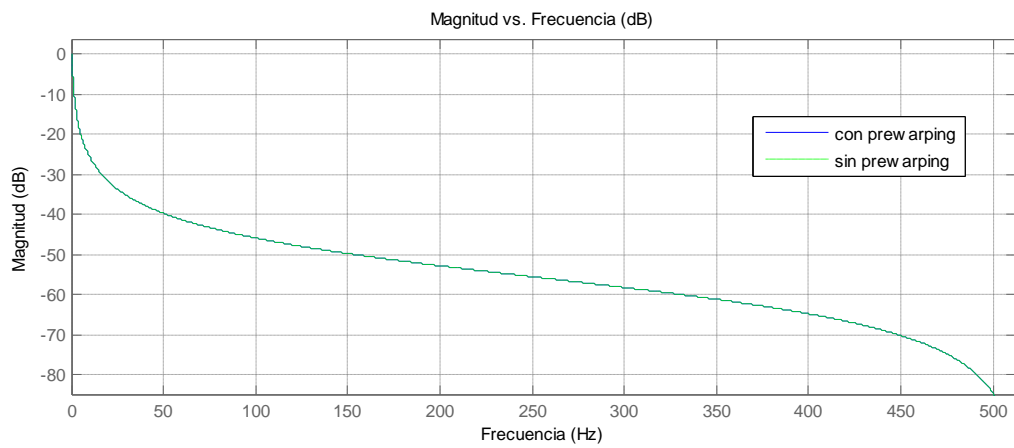
Fuente: Las autoras

Figura 8. Curva de magnitud vs. frecuencia de filtro de ponderación con $F_p=8.8\text{ Hz}$



Fuente: Las autoras

Figura 9. Curva de magnitud vs. frecuencia del filtro pasa bajas del bloque 4.
 $F_p = 0.53 \text{ Hz}$.



Fuente: Las autoras

Lo anterior permite concluir que, para las condiciones particulares del algoritmo de medición de Flicker, la transformada bilineal puede realizarse sin necesidad de especificar una frecuencia de *prewarping*. Pese a ello, para el algoritmo de medición de Flicker desarrollado en este trabajo, se especificó una frecuencia de *prewarping* para cada filtro, correspondiente a la frecuencia de corte de -3 dB o a la frecuencia central, según el tipo de filtro.

2.2.2.3. Cálculo de las constantes de tiempo de los filtros.

Con el fin de realizar una medida correcta del PST y debido a los transitorios de la respuesta de los filtros, se hace necesario el cálculo del tiempo que demora su respuesta natural, para descontar esta parte de la respuesta de la señal de nivel instantáneo de *Flicker* a analizar estadísticamente.

Los cálculos de las constantes de tiempo se realizaron tomando la distancia radial del polo más alejado del origen. Bajo el anterior criterio, la constante de tiempo del transitorio se calcula con la expresión:

$$N = \frac{-1}{\ln|polo|} \text{ (Muestras)} \quad (25)$$

Expresando esta constante de tiempo en segundos se tiene:

$$tiempo = \frac{N}{f_{muestreo}} \text{ (Segundos)} \quad (26)$$

La tabla siguiente contiene los cálculos para cada uno de los filtros del proceso.

Filtro	Distancia del polo más alejado	Muestras aproximadas	Constante de tiempo [s]
--------	--------------------------------	----------------------	-------------------------

Pasabanda	0,991478	117	0,114
Pasa Altas	0,999693	3258	3,182
Butterworth 6º orden	0,936075	15	0,014
Pasa Bajas	0,996750	307	0,299
Mayor constante de tiempo	-	3258	3,182
Duración Transitorio (10 constantes de tiempo)	-	32580	31,82

Tabla 4. Cálculo de las constantes de tiempo de los filtros

Fuente: Las Autoras

La tabla anterior significa que las muestras en el transitorio son aproximadamente 32580, que corresponden a un tiempo de 31,82 segundos, por lo que el tiempo de simulación del algoritmo, para obtener una medida de PST debe ser de por lo menos el tiempo que se haya determinado como tiempo corto más 31,82 segundos. Por ejemplo, si el tiempo corto es de 10 minutos, el tiempo de simulación debe ser de por lo menos 631,82 segundos.

2.2.3. Normalización de la señal de entrada con el valor eficaz.

La CEI propone que el proceso de adecuación de la señal de entrada consista en escalarla a un valor de referencia interno basado en el valor R.M.S de la señal de entrada y que dicho adaptador tenga un tiempo de respuesta de 1 minuto ante una variación tipo escalón en el valor eficaz de entrada. Si el objetivo de este bloque es mantener el valor eficaz de la tensión modulada a la entrada del bloque 2 a un valor de referencia constante, es necesario que en caso de que el valor R.M.S de la tensión de entrada cambie, también lo haga el valor de escalamiento, y en la misma proporción, para que de esta manera el valor de entrada al bloque 2 sea constante.

Habiendo determinado que el valor por el cual se va a escalar la tensión de entrada es el valor R.M.S. de la misma, es necesario establecer cada cuánto es necesario recalcular este valor desde la tensión de entrada. La frecuencia mínima de las pruebas sugeridas por el estándar CEI 61000-4-15, corresponde a 0,008 Hz o, 1 cambio por minuto. Si la variación mínima corresponde a un cambio por minuto y el sistema de adaptación de la entrada debe detectarlo, el valor de escalamiento debería refrescarse al menos cada minuto. Lo anterior significa que, si el tiempo corto T_{corto} es 10 minutos, deben calcularse al menos 10 valores de escalamiento y dividir las muestras correspondientes a cada minuto entre el valor R.M.S calculado sobre los valores de dichas muestras.

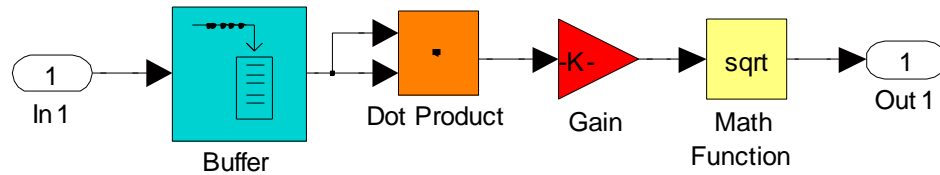
Para obtener el valor R.M.S de un período de tiempo determinado, se debe contar con todas las muestras correspondientes a ese período. Por ejemplo, si la tasa de muestreo es de 1024 muestras por segundo, y el período sobre el cual se calcula el valor R.M.S es de 1 minuto, deben almacenarse 61440 muestras ($1024 \cdot 60$) antes de estimar un valor R.M.S. Si dos grupos de muestras tuviesen el mismo valor R.M.S, el valor de entrada al bloque dos sería siempre el mismo, si este valor cambia de un minuto al siguiente, este cambio será detectado por el instrumento y se sabrá entonces que la variación relativa de tensión $\frac{\Delta V}{V}$ ha cambiado.

La estimación del valor R.M.S se hizo empleando la expresión matemática de media cuadrática para una serie de datos discretos:

$$X_{r.m.s} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2} \quad (27)$$

Para ilustrar el procedimiento recién expuesto, se presenta un diagrama en Simulink de MATLAB, en el cual se distinguen las siguientes etapas en relación con la ecuación (27):

Figura 10. Esquema en Simulink para extraer el valor R.M.S de una trama de datos.



Fuente: Las autoras

Etapa Uno. Recolección de las muestras necesarias para un cálculo de valor R.M.S. El *buffer* de la figura convierte los datos en serie, en tramas de datos en paralelo. Cada trama contiene el número de muestras necesario para un cálculo de valor R.M.S.

Etapa Dos. Elevación al cuadrado de las muestras y sumatoria. Corresponde al producto punto de una trama de datos A por ella misma, como lo indica la Ecuación (28):

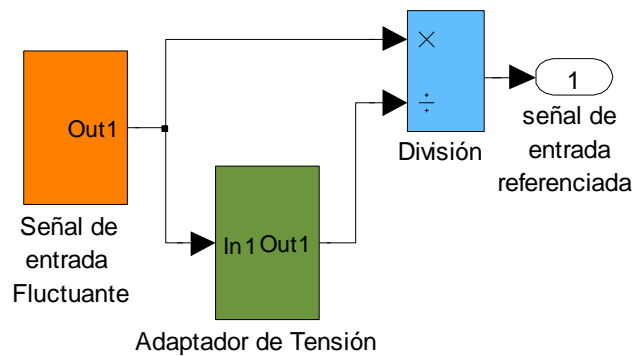
$$A \bullet A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_N) * (a_1, a_2, a_3, \dots, a_N) = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2, \dots + a_N^2. \quad (28)$$

De esa forma, se obtiene la sumatoria de las muestras de una trama, elevadas al cuadrado.

Etapa tres. División entre en número de datos y raíz cuadrada. A la salida de esta etapa se obtiene el valor R.M.S del conjunto de N datos, correspondientes a la primera trama o al primer minuto.

En la Figura 11 se presenta el esquema de adaptación de la señal de entrada, según lo sugerido por la CEI.

Figura 11. Esquema en Simulink de la etapa de adaptación de la entrada propuesta por la CEI.



Fuente: Las autoras

La adaptación digital de la arquitectura de un medidor de Flicker presentada por el Estándar CEI 61000-4-15, conservando todos los procedimientos sugeridos requiere la especificación de una frecuencia de muestreo de la señal de tensión de entrada, el empleo de un método confiable de transformación de filtros, y la digitalización del proceso de adaptación de la señal de entrada, la selección de los tiempos de observación y el cálculo del transitorio del sistema debido a los filtros. Para el algoritmo de medición de Flicker desarrollado en este trabajo se seleccionó una frecuencia de muestreo de 1024 muestras por segundo, se empleó la transformada Bilineal con frecuencia de *prewarping* para la digitalización de los filtros; se normalizó la señal de entrada con el uso del valor R.M.S de la misma refrescado cada minuto; se adoptó un tiempo corto de diez minutos y un tiempo largo de dos horas, siguiendo los lineamientos de la Comisión de Regulación de Energía y Gas y los resultados de experimentos previos a este trabajo, junto con

los criterios expuestos, con el fin de obtener la señal del nivel instantáneo de *Flicker* en la misma forma que un medidor analógico.

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DIGITAL PARA LA MEDICIÓN DE *FLICKER*.

Este capítulo presenta los aspectos determinantes de la implementación de un medidor digital de Flicker. Se centra principalmente en el proceso de estimación del indicador PST a partir de la señal de nivel instantáneo de Flicker y las posibles variantes del mismo, en relación a las decisiones de diseño que se tomen. No obstante, como complemento al capítulo anterior se presenta la validación de la respuesta global, desde el bloque uno hasta el bloque cuatro del medidor digital de Flicker, como garantía de la objetividad de la estimación del PST.

3.1. PROCESAMIENTO DIGITAL PARA EL CÁLCULO DEL NIVEL INSTANTÁNEO DE FLICKER (IFL)

Como se mencionó en el capítulo precedente, para el desarrollo del algoritmo digital que se enseña en el presente, se partió de las características funcionales de la arquitectura en tiempo continuo propuesta por la CEI, es decir la relación entrada-salida de cada uno de los bloques de procesamiento de señal incluidos en dicha propuesta. El desarrollo de dos algoritmos paralelos, uno analógico y otro digital, permitió la comprobación del buen desempeño del segundo, después de haberse validado el primero. Cabe mencionar, que el algoritmo digital se sometió a las mismas pruebas que el analógico, quedando ambos validados de forma completa. El esquema del medidor digital, implementado en Simulink de Matlab puede detallarse en el anexo B. El bloque 5 no se incluye allí, pues es común a ambos medidores (analógico y digital) y se expone en el anexo C.

3.1.1. Selección de la ganancia del medidor.

Según el Comité Electrotécnico Internacional, el selector de margen realiza un selector de ganancia, según sea la profundidad de la modulación a la entrada, para garantizar que el rango de entrada sea cubierto en su totalidad por el instrumento.

Debido a que la CEI no expone en una forma detallada la idea del selector de margen, para la realización de la etapa de ganancia, se recurrió a la consulta de diferentes artículos con trabajos referentes a la medición de Flicker. En dichos trabajos se hace la respectiva validación del medidor con base en el estándar, pero no se especifica la forma en la que está implementado el selector de margen. Se piensa que lo anterior es consecuencia de la poca claridad que se tiene sobre el tema.

Para encontrar un valor adecuado de ganancia, se realizaron las pruebas propuestas en las tablas uno y dos del Estándar, para fluctuaciones de tensión sinusoidales y rectangulares. Como el objetivo de las pruebas es la obtención de una unidad de perceptibilidad a la salida del medidor, se comenzó con una ganancia de uno y se observó la forma de onda de la salida. Tras varios ensayos se obtuvo una ganancia adecuada que, bajo los parámetros de entrada característicos de las pruebas, arroja un nivel de uno a la salida del bloque cuatro del algoritmo, para fluctuaciones de tensión menores que 3%. Dicha ganancia tiene un valor de $1/18,1e-004$ (552,4862). Desde luego, para cubrir todo el rango de la entrada de las pruebas y garantizar un rango de linealidad aceptable, fue necesario el uso de otras ganancias para cumplir con el intervalo apropiado de exactitud solicitado por el Estándar.

3.1.2 Detección de la profundidad de modulación o el porcentaje de la fluctuación de tensión.

Con el objeto de variar la ganancia del selector de márgenes según la profundidad de modulación, se hace necesario implementar una etapa de selección de ganancia, en función de la profundidad. Dicha profundidad es fácilmente determinada si se cuenta con una señal discreta, como es el caso y empleando la Ecuación (29), presentada también en el Capítulo uno.

$$m = \frac{V_{\text{máx}} - A_c}{A_c} \quad (29)$$

Si se cuenta con el valor de la muestra máxima y el valor nominal de la tensión de la red, de acuerdo con la ecuación precedente, se podrá evaluar la profundidad de modulación. De acuerdo con la profundidad obtenida y según se haga necesario, se asignará una ganancia adecuada para que la respuesta del sistema ante las entradas propuestas en las tablas uno y dos sea un nivel de Flicker de una unidad de perceptibilidad.

3.2. EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DEL NIVEL INSTANTÁNEO DE FLICKER.

Esta sección explica el procedimiento de obtención del indicador PST a partir de la señal de nivel instantáneo de Flicker. Las operaciones que se describen corresponden a las sugeridas por la CEI para el bloque 5. Los lineamientos para la realización de las mismas corresponden al uso de 64 clases como mínimo, 6 bits de resolución y una frecuencia de muestreo de al menos de 50 Hz.

3.2.1. Procesamiento digital para el cálculo del PST a partir de la señal IFL.

Para la realización de la evaluación estadística desde la señal discreta del nivel instantáneo de Flicker según el Estándar CEI 61000-4-15, se identificaron dos etapas principales que determinan, según su desempeño, el éxito del algoritmo en

la medición de *Flicker* y la estimación del indicador PST. Dichas etapas, se encuentran descritas a continuación:

a. Clasificación - Obtención de la distribución de frecuencias.

Cada muestra es clasificada, según su valor, en un rango determinado por la cantidad de clases que se emplee. Cuando se realiza una distribución de frecuencias, el valor de cada muestra pasa a ser indeterminado, debido a que el dato que se obtiene en cada clase corresponde al número de muestras que pertenecen a ésta.

La cantidad de clases mínima es de 64. Para establecer los valores de los límites de las clases se debe determinar primero la longitud de las mismas, con ayuda de la Ecuación (30).

$$L = \frac{Imáx - Imín}{Nc} \quad (30)$$

Imáx e Imín representan el valor de la muestra máxima y mínima del nivel instantáneo de Flicker, respectivamente. Nc representa el número de clases.

Estadísticamente, lo más ventajoso para realizar una clasificación es establecer intervalos de longitud L entre el valor mínimo y el valor máximo, como lo expresa la Ecuación (23). No obstante, la Figura 2a del estándar CEI 61000-4-15 sugiere que la clasificación se haga entre cero y un valor de plena escala (F_s), que no es el máximo de la señal de nivel instantáneo de Flicker, sino que está determinado por los valores de la Tabla 4 del Estándar (no de este documento), en relación con los valores del selector de margen. La longitud de clase está dada por la Ecuación (31):

$$L = \frac{F_s}{Nc} \quad (31)$$

La Tabla 5 presenta los resultados de PST, para diferentes señales de entrada que según la CEI, deben producir un valor de PST a la salida del algoritmo desde 0,95 hasta 1,05. La columna de la derecha es el resultado de tomar un límite inferior del clasificador igual a cero, mientras que la columna de la izquierda son los valores de PST, clasificando la señal de nivel instantáneo de *Flicker* entre su valor máximo y su valor mínimo. El número de clases empleado fue 256.

Tabla 5. Valores de PST para varias señales de entrada, variando el límite inferior del clasificador.

Frecuencia de Modulación (Hz)	Porcentaje de Modulación (%)	PST Límite inferior del clasificador= Imín	PST Límite inferior del clasificador= 0
0,008	3,166	1,03	1,07
0,017	2,568	1,00	1,03
0,058	1,695	0,99	1,00
0,325	1,044	0,99	0,99
0,917	0,841	0,99	0,99
13,5	0,547	0,99	0,99
40	4,834	1,03	1,03

. Fuente: Las autoras.

Elaborar una clasificación fuera de los límites de la señal de nivel instantáneo de *Flicker*, aumenta la posibilidad de clases vacías, lo que implica valores repetidos contiguos en la función de probabilidad acumulada. Esto justifica la diferencia que

hay entre algunos de los valores de PST de ambas columnas, para un mismo caso de entrada.

b. Obtención de la función de Probabilidad Acumulada.

La función de probabilidad acumulada se obtiene a partir de la suma progresiva de los valores de los contadores de cada una de las clases. Con la función de probabilidad acumulada de la permanencia de la señal en las clases se podrán encontrar los valores de los percentiles sugeridos para la estimación del PST, además de otros valores estadísticos relevantes como el valor medio y la desviación típica. Para el cálculo de los percentiles será necesario interpolar los puntos de la función de probabilidad acumulada, ya que en muchos casos, el valor solicitado de percentil no podrá extraerse directamente de los valores en dicha función.

3.2.2.1 Número de Clases.

Dentro de los parámetros más importantes de un algoritmo de medición de Flicker se encuentra el número de clases que se empleen para dividir la señal del nivel instantáneo de *Flicker* en partes iguales y de esta forma medir la permanencia de la señal en cada una de las clases. La Tabla 6 presenta los resultados de PST para diferentes casos de entrada, variando el número de clases. Los valores esperados de PST están entre 0,95 y 1,05 unidades de perceptibilidad.

Los resultados del experimento para diferentes clases sugieren que al aumentar el número de clases, el valor de PST disminuye de forma suave. No obstante, el incremento del número de clases implica un aumento evidente en el tiempo de estimación del PST por parte del programa.

Tabla 6. Valores de PST para varios casos a la entrada variando el número de clases.

Frecuencia de Modulación (Hz)	Porcentaje de Modulación (%)	64 clases	128 clases	256 clases	512 clases
0,008	3,166	1,07	1,04	1,03	1,02
0,017	2,568	1,03	1,01	1,00	1,00
0,058	1,695	1,00	0,99	0,99	0,99
0,325	1,044	0,99	0,99	0,99	0,99
0,917	0,841	0,99	0,99	0,99	0,99
13,5	0,547	0,99	0,99	0,99	0,99
40	4,834	1,03	1,03	1,03	1,03

Fuente: Las autoras.

Como se observa en la tabla, todos los valores de PST se encuentran dentro del rango esperado, por lo que, teniendo en cuenta el tiempo de ejecución del programa para diferente número de clases, el rango de clases en las cuales el presente algoritmo operará de forma satisfactoria estará entre 64 y 256 clases.

3.2.2.2 Mecanismo de interpolación

En procura del incremento de la exactitud en la estimación de los percentiles, se empleó la técnica de interpolación lineal sugerida por el estándar. De forma alterna, se probó el algoritmo empleando la interpolación no lineal, descrita en el mismo estándar. Para el conjunto de entradas sugeridas para la validación del clasificador del algoritmo de medición de *Flicker*, se obtuvo una respuesta muy similar con el uso de los dos tipos de interpolación, por lo que se optó por emplear

un mecanismo de interpolación de clases lineal, aprovechando su sencillez en comparación con la interpolación no lineal. Cabe destacar que la interpolación lineal es el método de interpolación empleado en las pruebas de número de clases, frecuencia de muestreo, límites del clasificador y, en general, todas las pruebas concernientes al algoritmo digital de medición de *Flicker*.

La estimación del PST es un proceso que, según lo sugerido por la CEI, depende de las elecciones que se hagan en el proceso de clasificación. Los aspectos que han de tenerse en cuenta en un algoritmo digital de medición de *Flicker* son el número de clases, la frecuencia de muestreo, los límites del clasificador, la ganancia del algoritmo de extracción del nivel instantáneo de *Flicker* y el método de interpolación de las clases realmente disponibles.

3.3 INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DEL ESTÁNDAR CEI 61000-4-15

En el capítulo uno se elaboró una descripción de los lineamientos de la CEI para la elaboración de un medidor analógico de *Flicker*. No obstante, durante el proceso de interpretación del estándar IEC 61000-4-15, para la adaptación del mismo a una versión digital surgieron algunas cuestiones que, a pesar de ser determinantes para el desempeño del algoritmo, no se presentan de forma detallada en el estándar. Lo anterior hizo que recurrir a trabajos acerca de la medición de *Flicker* fuera necesario para lograr una mayor comprensión de los requerimientos funcionales del medidor. Sin embargo, dichos trabajos parecen adherirse al estándar como herramienta de validación y no como herramienta de desarrollo, por lo que en ellos se nota una clara independencia de algunos de los lineamientos del estándar que corresponden precisamente a aquellos sobre los cuales no se profundiza en el estándar. Los lineamientos a los cuales se hará referencia en el presente capítulo pueden ser consultados en los capítulos cuatro y seis del estándar CEI 61000-4-15.

El objetivo de este capítulo es exponer la forma en la que se asumen las sugerencias del estándar CEI 61000-4-15 concernientes a la elaboración de un medidor digital de *Flicker*. También se discute acerca de las consecuencias de las libertades concedidas por el estándar y su influencia en la diferencia de medidas provenientes de medidores de *Flicker* que han sido validados por medio de dicho estándar.

3.3.1 Ensayo y Calibración del algoritmo de medición de Flicker.

“La comprobación individual de todos los elementos no es necesaria generalmente, únicamente se debe verificar la respuesta global de entrada-salida hasta el bloque 4 para fluctuaciones de tensión rectangulares y sinusoidales, con referencia a las tablas 1 y 2. Adicionalmente, se debe ensayar el análisis estadístico (bloque 5) de acuerdo con el capítulo 5 y la tabla 5”³¹

Las tablas uno y dos presentan una serie de entradas con una frecuencia de modulación y profundidad de modulación específicas, ante las cuales la respuesta desde el bloque uno hasta el bloque cuatro (es decir, el nivel instantáneo de *Flicker*) debe tener las características descritas a continuación:

“Los ensayos se deben hacer variando la amplitud de la modulación de entrada de forma que el valor de pico de la lectura de salida sea de una unidad”.³²

De lo anterior puede comprenderse que ante las especificaciones de entrada propuestas por las tablas uno y dos del estándar, el nivel instantáneo de *Flicker* (a la salida del bloque cuatro) debe tener un valor de pico de una unidad. Se asume

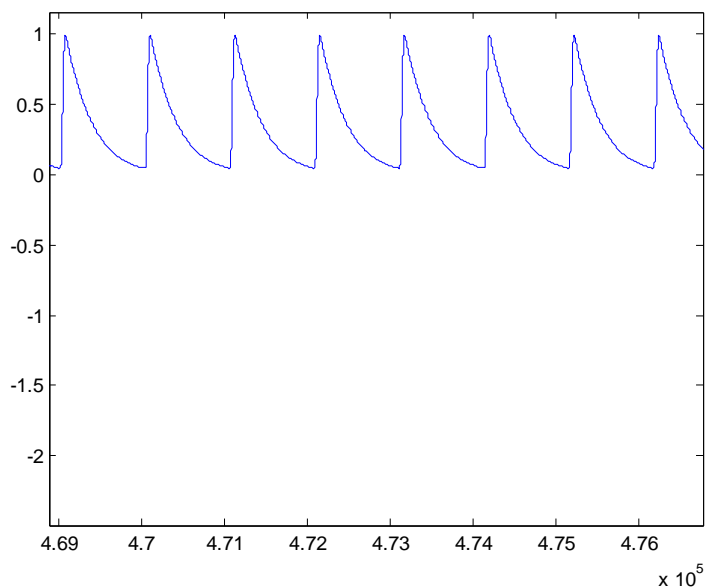
³¹ COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL, Op. cit., p.15

³² Ibid.,p. 15

el término “valor de pico” como el valor máximo que alcanza la señal de nivel instantáneo de Flicker en una oscilación con referencia en cero y no con referencia en el promedio de dicha señal. La figura 11 presenta una señal de nivel instantáneo de Flicker con un valor de pico de una unidad.

Comprender que la referencia para medir el valor pico debe ser cero es importante, ya que como se observa en la Tabla 7 el valor promedio de la señal de nivel instantáneo de Flicker (IFL) no es siempre el mismo, a pesar de que todas las señales tienen un valor de pico de una unidad.

Figura 12. Nivel instantáneo de Flicker con un valor de pico igual a una unidad.



Fuente: Las autoras

Tabla 7. Valores promedio del nivel instantáneo de Flicker de un algoritmo de medición correctamente calibrado.

Modulación (%)	Frecuencia (Hz)	Promedio del IFL (u.p)	Modulación (%)	Frecuencia (Hz)	Promedio (u.p)
0,6	0,5	0,52	0,280	10,5	0,96
0,547	1	0,61	0,297	11	0,99
0,504	1,5	0,70	0,309	11,5	0,97
0,471	2	0,77	0,323	12	0,96
0,439	2,5	0,80	0,369	13	0,97
0,421	3	0,84	0,411	14	0,96
0,407	3,5	0,85	0,459	15	0,98
0,394	4	0,88	0,513	16	0,97
0,371	4,5	0,92	0,580	17	0,99
0,349	5	0,92	0,632	18	0,98
0,323	5,5	0,93	0,752	19	0,97
0,302	6	0,93	0,818	20	0,99
0,282	6,5	0,94	0,853	21	0,96
0,269	7	0,95	0,946	22	0,99
0,258	7,5	0,97	1,946	23	0,96
0,255	8	0,97	1,072	24	0,99
0,253	8,8	0,95	3,46	40	1,05
0,257	9,5	0,95	-	-	-

Fuente: Las autoras.

La Tabla 7 indica que el valor de continua del nivel de la señal de Flicker se incrementa a medida que se recorre la curva de tolerancia, descrita por las entradas sugeridas por las tablas uno y dos del estándar. Ello implica que el proceso de clasificación de las muestras para encontrar el indicador PST debe hacerse teniendo en cuenta el nivel real de la señal de nivel instantáneo de *Flicker*. En este proyecto se consideró el IFL entre sus valores máximo y mínimo y

no entre cero y su valor máximo para realizar la curva de distribución de frecuencias.

“Si las amplitudes de la modulación de entrada obtenidas para el instrumento sometido a ensayo coinciden con los valores especificados (con una tolerancia máxima del +/-5%), se demuestra la conformidad con esta especificación”.³³

Lo anterior implicaría que las entradas sugeridas por las tablas uno y dos del estándar podrían variar un cinco por ciento y que las pruebas se consideran exitosas si para estas entradas se obtiene un nivel a la salida de una unidad. Para el algoritmo de medición de *Flicker* desarrollado en este proyecto, se empleó esta interpretación para validar la respuesta del medidor desde el bloque uno hasta el bloque cuatro y seleccionar la ganancia del selector de margen de acuerdo con el valor de porcentaje de modulación.

3.3.2 Selector de Márgenes

Como fue descrito en el capítulo uno, el selector de márgenes determina la sensibilidad del instrumento, variando la ganancia de acuerdo con la amplitud de la fluctuación de tensión a medir.

Para el algoritmo de medición de *Flicker* descrito en el presente trabajo, la ganancia del medidor fue determinada a partir de las pruebas sugeridas por las tablas uno y dos del estándar CEI, para lo cual se precisaron cinco ganancias diferentes a fin de abarcar el rango de entrada de forma completa. Para obtener las ganancias adecuadas se variaron las condiciones de la entrada de acuerdo con el estándar y se procuró una salida de nivel instantáneo de *Flicker* de una

³³ Ibid., p. 15

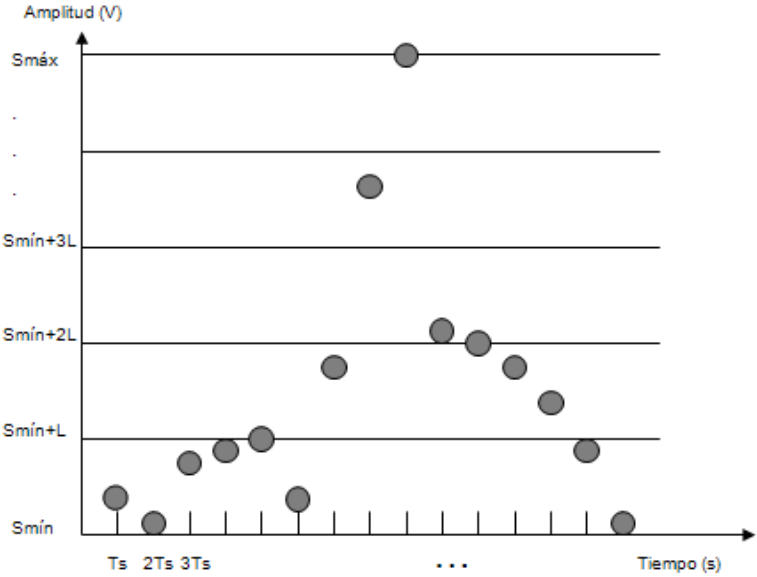
unidad de perceptibilidad, variando la ganancia del medidor. Cuando el porcentaje de modulación incrementa, la ganancia del medidor debe reducirse ligeramente para que el valor de nivel de Flicker esté dentro del rango esperado. Así, las ganancias seleccionadas fueron:

- $\frac{\Delta V}{V} < 3\%$ corresponde a una ganancia de $1/(18,1e-004)$.
- $3\% < \frac{\Delta V}{V} \leq 4\%$ corresponde a una ganancia de $1/(19,2e-004)$.
- $4\% < \frac{\Delta V}{V} \leq 15\%$ corresponde a una ganancia de $1/(17,9e-004)$.
- $15\% < \frac{\Delta V}{V} \leq 18,1\%$ corresponde a una ganancia de $1/(17,85.1e-004)$.
- $\frac{\Delta V}{V} > 18,1\%$ corresponde a una ganancia de $1/(17,8e-004)$.

3.3.3 Defecto en el mecanismo de interpolación.

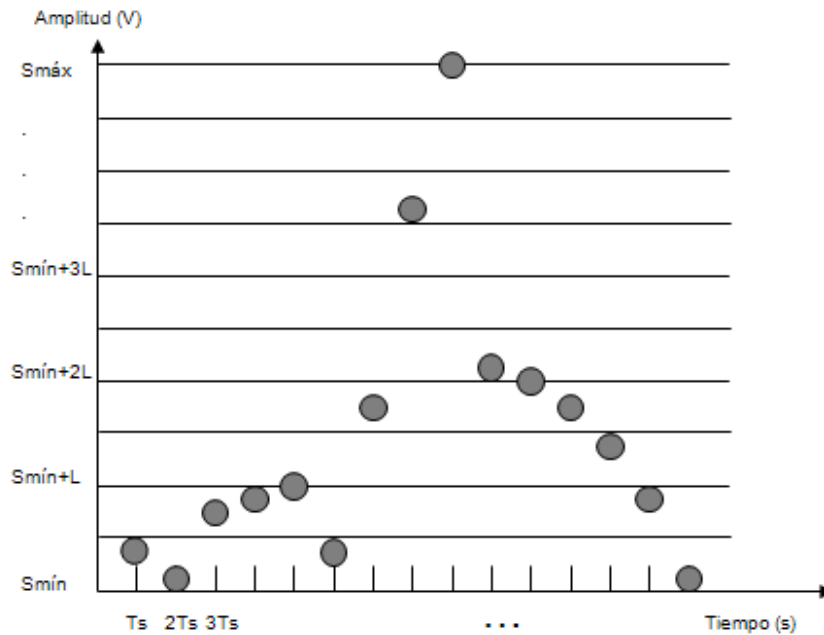
La Figura 13 presenta una señal muestreada a una tasa de muestreo de F_s [Hz], dividida en amplitud por un clasificador de N número de clases. Es sencillo notar que si se aumenta el número de clases (ver figura 14), la posibilidad de que existan clases vacías se incrementa si la frecuencia de muestro permanece constante.

Figura 13. Esquema de clasificación de una señal muestreada cada T_s segundos.



Fuente: Las autoras.

Figura 14. Esquema de clasificación de una señal muestreada cada T_s segundos, con el doble de clases.



Fuente: Las autoras.

3.3.4 Incidencia de los grados de libertad que permite el estándar IEC 61000-4-15 para la estimación del PST.

Como se ha demostrado previamente, la selección de diferentes valores para las variables que deben ser definidas por parte del diseñador del algoritmo de medición de *Flicker* es una labor con diferentes alternativas, cada una de ellas con resultados distintos en cada caso. Si bien es importante que la normalización confiera libertades de diseño con el fin de que el equipo de medición se adapte a las condiciones del punto de medida, es preciso que esas libertades no involucren variables cuyo valor pueda significar una notable diferencia entre las medidas de nivel instantáneo de *Flicker* o de PST para varios algoritmos con la mismas condiciones de entrada.

Dentro de las variables que el diseñador es libre de escoger y que afectan la medición de forma notable se encuentran:

3.3.4.1 Cifras significativas

Un aspecto de gran relevancia, con relación al número de cifras decimales, tiene que ver con la validación del algoritmo empleando los valores de entrada propuestos por el estándar CEI 61000-4-15. En la tabla 5 del estándar se presentan las condiciones de ensayo para el clasificador del medidor de *Flicker*. Dichas condiciones corresponden a los valores de cambios por minuto y variación de la tensión de entrada al medidor. La Tabla 8 presenta los valores sugeridos por la CEI.

Tabla 8. Especificaciones de ensayo para el clasificador del medidor de Flicker.

Variaciones por Minuto	Variaciones de Tensión $\frac{\Delta V}{V}$ (%)
1	3,166
2	2,568
7	1,695
39	1,044
110	0,841
1620	0,547
4800	4,834

Fuente: Estándar CEI 61000-4-15.

La columna de la izquierda corresponde a la tasa de repetición de la fluctuación de tensión, por lo que se puede traducir en un valor de frecuencia para la señal moduladora. En caso de que un algoritmo requiera como entrada un valor de frecuencia de prueba para la señal moduladora, ¿cuántas cifras decimales debería incluir en el valor de dicha frecuencia? Si un algoritmo que genera las señales de prueba para el medidor de Flicker introduce un valor en variaciones por minuto, eso implica que el algoritmo tomará todas las cifras decimales que, según el formato especificado, desplegará la operación de conversión desde variaciones por minuto a Hertz.

El número de cifras significativas al especificar la frecuencia de la onda moduladora es decisivo en los resultados de las pruebas que permiten validar el algoritmo de medición de Flicker. La Tabla 9 presenta los resultados de PST para la primera de las pruebas sugeridas por la Tabla 8, para una entrada modulada por una señal cuadrada de 1 cambio por minuto y con una fluctuación de tensión relativa de 3,166%. El valor de PST esperado está entre 0,95 y 1,05 unidades de perceptibilidad.

Tabla 9. Resultados de PST para una frecuencia de señal moduladora especificada con diferente número de cifras decimales.

Frecuencia (Hz)	Variación de Tensión (%)	PST
0,0083333	3,166	0,027
0,008333	3,166	0,575
0,00833	3,166	1,21
0,0083	3,166	1,17
0,008	3,166	1,03

Fuente: Las autoras.

Los resultados del experimento anterior sugieren que para la correcta calibración del algoritmo de medición de *Flicker* debería tomarse el mismo número de cifras decimales que contienen los valores de variación de tensión, es decir, tres cifras decimales.

Los resultados anteriores sugieren que el número de cifras decimales es relevante en el cálculo del indicador PST y que una especificación de la cantidad de cifras que deben tomarse para el procesamiento de datos en algoritmos digitales deberían ser especificados por el estándar CEI 61000-4-15.

3.3.4 Número de Clases

Como es evidente en los resultados de las pruebas con diferente número de clases ante una misma entrada, la falta de especificidad del estándar acerca número de clases a emplear puede generar resultados distintos de PST. En general, los valores de PST disminuyen progresivamente al aumentar en número de clases. Además, la diferencia de resultados entre dos medidores de Flicker con diferente número de clases puede hacerse superior si el selector de ganancia está implementado de forma diferente. Lo anterior es importante, ya que en el mercado existen medidores que parecen abarcar todo el rango de los valores de entrada con una única ganancia o que simplemente no especifican la forma en la cual está implementado el mecanismo de extracción del nivel instantáneo de Flicker a partir de la señal fluctuante a la entrada. Sin embargo estos equipos aseguran cumplir con las disposiciones internacionales de la CEI para su implementación.

4. VERIFICACIÓN DE LA CONFORMIDAD CON LOS ESTÁNDARES CEI 61000-4-15 Y CEI 61000-4-30

Los lineamientos de diseño e implementación de un medidor de *Flicker* se encuentran expuestos en el estándar CEI 61000-4-15. Dichos lineamientos se siguieron a lo largo del proceso de elaboración y prueba de un algoritmo digital de medición de *Flicker*. Sin embargo, para garantizar que el algoritmo cumpla con los requerimientos de compatibilidad electromagnética, éste debe someterse a pruebas con entradas que incluyan otros fenómenos que afectan la calidad de la onda de tensión, como armónicos, interarmónicos y desequilibrios. El estándar CEI 61000-4-30 propone condiciones de ensayo que simulan una señal real de tensión, a fin de analizar la respuesta de los medidores de calidad y la incidencia de los fenómenos en el error de la medida.

4.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ESTABLECIDAS EN EL ESTÁNDAR CEI 61000-4-15.

En esta sección se presentan los resultados del algoritmo de medición de *Flicker*, según las condiciones de ensayo de la Tabla 5 del estándar CEI 61000-4-15 y el procedimiento propuesto por el mismo para encontrar el rango de linealidad del algoritmo.

4.1.1 Ensayos para el clasificador del medidor de *Flicker*

El objetivo de la prueba cuyos resultados se enseñan en la Tabla 10 es verificar el valor medido de PST de acuerdo a lo indicado en la Tabla 5 de la norma de

referencia IEC 61000-4-15 (ver Tabla 8). Dicha prueba consiste en aplicar una señal sinusoidal, $V_{din} = 120 \text{ Vac}$, 60 Hz, con modulación rectangular, a fin de obtener a la salida del algoritmo de medición de *Flicker* un valor de PST de $1 \pm 5\%$.

Tabla 10. Resultados de PST para las pruebas sugeridas en CEI 61000-4-15

Cambios Rectangulares por Minuto	Frecuencia de Fluctuación (Hz)	$\Delta V/V$ (%)	Valor de PST Medido	Error (%)	Cumple CEI
1	0,008	3,166	1,03	1,53	SI
2	0,017	2,568	1,00	0,10	SI
7	0,058	1,695	0,99	0,48	SI
39	0,325	1,044	0,99	0,76	SI
110	0,917	0,841	0,99	0,99	SI
1620	13,5	0,547	0,99	0,72	SI
4800	40	4,834	1,03	3,21	SI

Fuente: Las autoras

Como se observa en las Tabla 10, el algoritmo de medición de *Flicker* cumple con el ensayo de funcionamiento referente al clasificador, por lo que se concluye que en condiciones ideales el medidor tiene un desempeño satisfactorio.

4.1.2 Obtención del Margen de Linealidad del Algoritmo de Medición de *Flicker*.

El objetivo de esta prueba es verificar si sometiendo al algoritmo a una señal de entrada con una tasa de cambios rectangulares por minuto fija e incrementando

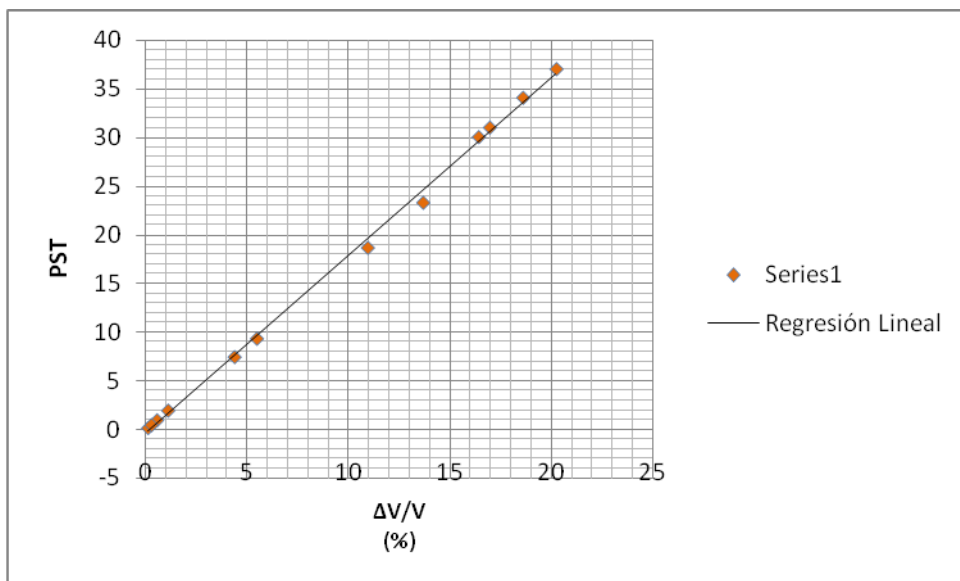
las variaciones de la tensión de entrada por un factor F, la respuesta del medidor es proporcional a ese factor F. De esa forma el PST deberá tener un valor igual a F*PST con un error de hasta $\pm 5\%$ de F*PST, de acuerdo a lo indicado en la norma de referencia IEC 61000-4-15. Para obtener los valores de PST, se incrementa y disminuye el valor de $\Delta V/V$ y se mide el valor del PST resultante.

Tabla 11. Resultados prueba de linealidad con modulación rectangular.

Frecuencia (Hz)	Factor de multiplicación	$\Delta V/V$ (%)	Rango de PST esperado	PST medido
13,5	1	0,547	0,95-1,05	0,99
13,5	0,2	0,109	0,15-0,25	0,2
13,5	0,5	0,273	0,45-0,55	0,5
13,5	2	1,094	1,95-2,05	1,98
13,5	8	4,37	7,95-8,05	7,47
13,5	10	5,47	9,95-10,05	9,35
13,5	20	10,94	19,95-20,05	18,66
13,5	25	13,67	24,95-25,05	23,28
13,5	30	16,41	29,95-30,05	30,00
13,5	31	16,957	30,95-31,05	30,98
13,5	34	18,598	33,95-34,05	34,03
13,5	37	20,239	36,95-37,05	36,97

Fuente: Las autoras

Figura 15. Característica PST vs. $\Delta V/V$ %



Fuente: Las autoras

A partir de la prueba anterior se concluye que a determinada frecuencia el margen de la magnitud de las variaciones de tensión para las cuales los correspondientes valores de PST se dan con una precisión del 5% o mejor es desde 0,2% hasta del 20% de variación, aproximadamente. La Figura 15 presenta en forma gráfica los resultados, con la regresión lineal correspondiente para evidenciar la respuesta lineal del sistema.

4.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ESTABLECIDAS EN EL ESTÁNDAR CEI 61000-4-30.

La presencia de una perturbación en la onda de tensión de la red puede incidir en la medida entregada por cualquier algoritmo de medición de parámetros para la evaluación de la calidad de la potencia eléctrica. En esta sección se presentan algunos de los resultados de las pruebas sugeridas por el estándar CEI 61000-4-30, ante diferentes condiciones de ensayo (Tabla 3 del estándar CEI 61000-4-30). Debido a lo extenso de las pruebas sugeridas por este estándar, en esta sección sólo se presentan la metodología de los experimentos y las conclusiones a partir

de los resultados, mientras que en el anexo D pueden consultarse todos los resultados.

4.2.1 Verificación de la conformidad de los métodos de medida y obtención del margen de variación de las magnitudes de influencia.

El objetivo de esta prueba es verificar el margen de variación de las magnitudes de influencia y la conformidad de los métodos de medida, aplicando el margen de variaciones del *Flicker*, según lo indicado en Tabla 1, línea 3 de la CEI 61000-4-30. Las magnitudes de influencia de las pruebas o perturbaciones son simuladas según la Tabla 3, IEC 61000-4-30, sección 6.2. Se verifica la exactitud del PST, con una señal sinusoidal, con una modulación rectangular de 39, 110 y 1620 cambios por minuto.

La Tabla 12 presenta las condiciones de ensayo propuestas por el estándar CEI 61000-4-30.

Tabla 12. Tabla No. 3 de la IEC 61000 – 4 – 30.

Magnitudes de Influencia	Condiciones de Ensayo No 1	Condiciones de Ensayo No 2	Condiciones de ensayo No 3
Frecuencia	$f_{nom} \pm 0.5 \text{ Hz}$	$f_{nom} -1\text{Hz} \pm 0.5 \text{ Hz}$	$f_{nom} +1\text{Hz} \pm 0.5 \text{ Hz}$
Tensión	$V_{nom} \pm 1.0\%$	Determinado por el nivel de Flicker, Armónicos,	Determinado por el nivel de Flicker, Armónicos, Interarmónicos y

		Interarmónicos y Desequilibrio	Desequilibrio
Flicker	PST < 1.0	PST = 1 ± 0.1 modulación rectangular de 39 cambios por minuto	PST = 4 ± 0.1 modulación rectangular de 110 cambios por minuto Nota: Sólo se aplica a t=10min. Para otros valores, usar PST = 0 a 0.1
Desequilibrio	0% a 0.5% de Vn	0.73% ± 0.5% de Vn Fase A 0.80% ± 0.5% de Vn Fase B 0.87% ± 0.5% de Vn Fase C Todas las fases separadas 120°	1.52% ± 0.5% de Vn Fase A 1.40% ± 0.5% de Vn Fase B 1.28% ± 0.5% de Vn Fase C Todas las fases separadas 120°
Armónicos	0% a 3% de Vn	10 % ± 3% de Vn, 3o a 0° 5 % ± 3% de Vn, 5o	10 % ± 3% de Vn, 7o a 180° 5 % ± 3% de Vn, 13o a

		a 0° 5 % ± 3% de Vn, 29o a 0°	0° 5 % ± 3% de Vn, 25o a 0°
Interarmónicos	0% a 0.5% de Vn	1% a 0.5% de Vn, 7.5 fnom	1% a 0.5% de Vn , 3.5 fnom

Fuente: Estándar Internacional CEI 61000-4-30.

Estas pruebas fueron realizadas empleando un generador de señales sintéticas con perturbaciones (magnitudes de influencia) según la Tabla 11. Los resultados fueron todos satisfactorios, es decir, ante la presencia de las magnitudes de influencia, el valor de Flicker se vio afectado, pero se conservó entre los valores esperados de PST para las pruebas en cuestión. Tal intervalo va desde 0,95 hasta 1,05. Lo anterior indica que el algoritmo de medición del medidor de *Flicker* queda validado de forma completa según lo sugerido por el CEI en los estándares CEI 61000-4-15 y CEI 61000-4-30.

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

El desarrollo del presente trabajo permite el establecimiento de conclusiones y recomendaciones referentes al diseño de un algoritmo digital para la medición del fenómeno del Flicker y la obtención del indicador PST desde la onda de tensión, con el objeto de establecer la severidad de la perturbación.

5.1 CONCLUSIONES

A continuación se listan las conclusiones relacionadas con los objetivos que se plantearon para el presente proyecto:

- Se diseñó e implementó un algoritmo de medición de *Flicker* a partir de muestras de la señal de tensión adquiridas a una tasa de 1024 muestras por segundo.
 - Se evaluó el algoritmo desarrollado empleando las condiciones de prueba sugeridas por los estándares CEI 61000-4-15 y CEI 61000-4-30 para un medidor de *Flicker*. Este algoritmo exhibe una respuesta satisfactoria ante dichas condiciones de ensayo y cumple con los requerimientos propuestos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).
 - Se identificaron las variables que, según su valor, inciden en el valor del indicador PST y en el desempeño del algoritmo en general. Los aspectos relativos a dichas variables se mencionan a continuación:
- La forma en la que la ganancia del algoritmo de medición de Flicker está implementada (ya sea una única ganancia o mediante el uso de un selector de ganancia, de acuerdo con el valor de fluctuación de la entrada) es determinante en la calibración del mismo, de forma tal que de acuerdo con el valor de ganancia que emplee cierto medidor ante cierta entrada se obtendría una medida de PST diferente a la de otro medidor cuyo selector de ganancia

haya sido implementado en forma diferente. Es preciso que la CEI sea más precisa en cuanto a las especificaciones del selector de márgenes.

- ☑ El número de clases en las que se divida la señal de nivel instantáneo de *Flicker* puede generar diferencia en la medida del PST entre dos medidores, por lo que, con el objeto de normalizar la medición del fenómeno de *Flicker* la CEI debería establecer un número fijo de clases a emplearse en todos los medidores.

- ☑ La frecuencia de muestreo de la señal de tensión proveniente de la red es un parámetro de diseño cuyo criterio de selección debe ser la conservación de la calidad de la onda de tensión y el tiempo de ejecución. Si bien la frecuencia de muestreo induce una variación en el valor del PST, se considera que la escogencia de la misma debe estar en manos del diseñador del algoritmo, teniendo en cuenta las posibilidades de procesamiento de la señal particulares.

- ☑ El número de cifras significativas es determinante en el resultado del PST, ya que determina la precisión de la medida. Dos algoritmos con entradas idénticas difieren en el valor de PST si el procesamiento de la señal digital se realiza con diferente número de cifras decimales. Asimismo, el número de cifras significativas que se empleen para especificar la frecuencia de la señal moduladora de entrada, para las pruebas que sugiere en CEI es motivo de variación en las medidas entre dos algoritmos de medición.

- Se logró diseñar un algoritmo de medición de *Flicker* con un margen de 0.2-20% de variación de la tensión a la entrada, empleando un selector de ganancia que garantiza una respuesta lineal del algoritmo ante perturbaciones dentro de dicho margen.

- Se evaluaron los métodos de interpolación propuestos por el estándar CEI 61000-4-15 y se encontraron los siguientes aspectos:
- ☑ Si existe una clase vacía, ello implicará que dos valores contiguos de la función de probabilidad acumulada sean iguales, lo que dará como resultado un valor de percentil infinito.
- ☑ El incremento del número de clases aumenta la posibilidad de clases vacías, y una consecuente estimación errada de percentil, por lo que el número de clases debe seleccionarse teniendo en cuenta la frecuencia de muestreo y el valor de PST que se desee alcanzar.
- Se logró establecer que, de acuerdo con el estándar CEI 61000-4-15 y las disposiciones CREG referentes a la medición de *Flicker* se pueden diseñar algoritmos de medición y probar su conformidad con los lineamientos de la CEI, sin que dichos algoritmos estén calibrados en la misma forma, por lo que arrojarán resultados de PST distintos ante una misma perturbación.

5.2 RECOMENDACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Se espera que en trabajos futuros acerca de medición del fenómeno del *Flicker* se cuente con especificaciones por parte de la CEI acerca de los parámetros descritos, o que se puedan proponer valores para ellos, como resultados de experimentos más exhaustivos. De la misma manera, se espera que se desarrolle un algoritmo con un margen de entrada superior, lo que supone un selector de ganancia más completo, a fin de garantizar la respuesta lineal del PST ante las perturbaciones de entrada.

Con base en los lineamientos actuales de la CEI para la medición de *Flicker* se recomienda:

- ☑ Seleccionar un número de clases de acuerdo con la frecuencia de muestreo, para reducir la posibilidad de clases vacías. Este valor debe ser aquel número de clases mínimo con el que las pruebas de la tabla cinco del estándar se satisfagan.
- ☑ Realizar una clasificación entre los niveles reales de la señal de nivel instantáneo de Flicker, teniendo en cuenta que ésta no siempre tiene una media de cero.
- ☑ Incrementar el margen de linealidad del medidor con un selector de ganancia que dependa de la variación relativa de tensión en la entrada. Las ganancias deben ser seleccionadas cumpliendo con lo sugerido por las tablas uno y dos del estándar.
- ☑ Especificar la frecuencia de modulación de la tensión de entrada con tres cifras decimales en todos los casos de prueba de la tabla cinco del estándar CEI 61000-4-15.

Para el desarrollo de algoritmos o equipos de medida de Flicker y estimación del PST se recomienda:

- ☑ Estudiar la posibilidad de realizar una clasificación logarítmica, para hacer más precisa la clasificación y de esa forma, la medida del PST.
- ☑ Estudiar mecanismos de interpolación alternos, que eviten la división entre cero, en caso de clases vacías.
- ☑ Consultar a la CEI acerca de cuántas cifras significativas deben especificarse en la frecuencia de modulación para probar el algoritmo según la tabla cinco del estándar CEI 61000-4-15, debido a la importante variación de los valores de PST especificando la frecuencia de modulación con diferente número de cifras decimales.
- ☑ Los equipos de medida deben permitir no sólo verificar conformidad de acuerdo a la tabla cinco del estándar, sino también de acuerdo a las tablas uno

y dos del mismo, porque es allí donde se evidencia cómo se ha realizado la calibración del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

AXELBERG, Peter. On tracing flicker sources and classification of voltage disturbances. Göteborg, 2007. Tesis Doctoral (Ingeniería Eléctrica). Chalmers University of Technology. School of Electrical Engineering. Department of Electric Power Engineering.

BERTOLA, A.; LAZAROIU, G.C.; ROSCIA, M.; ZANINELLI, D. A Matlab-Simulink flickermeter model for power quality studies. En: Harmonics and Quality of Power, 2004. 11th International Conference on. 12-15 Sept. 2004; p. 734 - 738

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución 024 de 2005. Bogotá: CREG, 2005. 13 p.

-----, Resolución 016 de 2007. Colombia: CREG, 2007. 6 p.

COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL. Estándar Internacional CEI/IEC 61000-4-15, Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4, Técnicas de ensayo y medida. Ginebra: Secretaria Central de la Comisión Electrotécnica Internacional, 2003.

-----, Estándar Internacional CEI/IEC 61000-4-30, Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30, Técnicas de ensayo y medida. Métodos de medida de la calidad del suministro. Ginebra: Secretaria Central de la Comisión Electrotécnica Internacional, 2003.

DÍEZ, G., et al. Revisión crítica del umbral de perceptibilidad del Flicker. En: XII Reunión de Grupos de Investigación en Ingeniería Eléctrica. Córdoba, 2002. 4 p.

-----, Influence on Power Quality Measurement of the Simultaneous Presence of Different Disturbances. En: International Conference on Renewable Energy and Power Quality. ICREPQ'03. Vigo. Abril 2003. 5 p.

GALLO, D.; LANDI, C.; PASQUINO, N. Design and Calibration of an Objective Flickermeter. En: Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on. Vol 55, Issue 6, Dec. 2006; p. 2118 – 2125.

GRACZYK, Adam. Working Out a Model and an Analysis of Metrological Properties of a Digital Flickermeter. En: Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. No. 979, 2006; ELEKTRYKA, z. 109.

GUTIERREZ, J.J.; RUIZ, J.; RUIZ DE GAUNA, S. Linearity of the IEC Flickermeter Regarding Amplitude Variations of Rectangular Fluctuations. En: Power Delivery, IEEE Transactions on. Vol 22, Issue 1, Jan. 2007; p. 729 – 731.

GUTIERREZ, J.J, et al. A New Alternative for the Input-Voltaje Adaptor of the IEC Flickermeter. En: IEEE transaction on instrumentation and measurement. Vol. 57, No. 5, May 2008; p 923-930.

HANZELKA, Zbigniew y BIEN, Andrzej. Power Application Guide: Voltage Disturbances, Flicker Measurement. Poland: LPQI, 2005. Leonardo Power Quality Initiative (LPQI), AGH University of Science and Technology. p 2.

KLEPACKI J. Z, TENNAKOON S. B, AL-TAI M. An experimental Evaluation of Short-Time Flicker Index. En: 9th International Conference: Electrical Power Quality and utilization. Barcelona 9-11 October, 2007.

MAZADI, M.; HOSSEINIAN, S.H. Flickermeter simulation to use in power system analysis software. En: Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International. Vol 2, 6-8 Sept. 2004 p. 917 - 923 vol. 1

MUNOA, José Luis. Estrés y Visión: La luz eléctrica, fuente de estrés visual. En: Anales de la Sociedad Ergoofthalmológica Española. [en línea]. Vol.27. No. 1-2 (1998). [consultado el 25 de abril de 2009]. Disponible en <<http://www.oftalmo.com/ergo/ergo1998/06cap06.htm> >

NERI, G.; CAIN, G.D.; SALMON, T.; YARDIM, A. A microprocessor-based digital flickermeter. En: Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on. Vol 40, Issue 6, Dec. 1991; p. 1008 – 1014.

OPPENHEIM, Alan. Señales y Sistemas. Segunda Edición. México: Pearson Educación. 1998. p. 587-590.

-----, Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto. Segunda Edición. Madrid: Prentice Hall. 2000. p 452-459.

RODRÍGUEZ, Tania y MUÑOZ, Dagoberto. Análisis de los Algoritmos de Medición de Flicker Considerando los Estándares Internacionales. Bucaramanga, 2007, 105 p. Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica). Universidad Industrial de

Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, electrónica y de Telecomunicaciones.

RUIZ, J.; LAZKANO, A.; ARAMENDI, E.; LETURIONDO, L.A. Analysis of sensitivity to the main parameters involved in the digital implementation of the UIE flickermeter. En: Electrotechnical Conference, 2000. MELECON 2000. 10th Mediterranean. 12-15 Sept. 2004; p. 734 – 738

SZLOSEK , Marcin., et al. Comparative Tests of Flickermeters. En: CIRED: 17th International Conference on Electricity Distribution. Barcelona, 12-15 May, 2003.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants: Std 141-1993 New York: IEEE, 1993. 765 p.

----- . IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality: IEEE Std 1159-1995. New York: IEEE, 1995. 76 p.

TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Cuarta Edición: México D.F. Pearson Education, 2003. p

WICZYNSKY, Grzegorz. Simple Model of Flickermeter Signal Chain for Deformend Modulating Signals. En: IEEE transactions on power delivery. Vol. 23, No. 4, october 2008; p 1743-1748.

ANEXO A. RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LOS FILTROS CONTINUOS PROPUESTOS POR LA CEI.

En este anexo se presentan las respuestas de magnitud con respecto a la frecuencia de los cuatro filtros continuos propuestos por la CEI para un medidor de Flicker. Asimismo, se enseñan las funciones de transferencia continuas que los describen en el dominio de la frecuencia.

Filtro Pasa Bajas para demodulación.

Se empleó la herramienta *fdatool* de Matlab para la obtención de los coeficientes de este filtro. Los requerimientos del filtro según la CEI son:

Pasa Bajas, Butterwoth sexto orden, frecuencia de corte de -3 dB: 42 Hz.

Filtro Pasa Altas para eliminar la componente de continua.

Requerimientos del filtro según la CEI: Pasa Altas, primer orden, frecuencia de corte de -3 dB: 0,05 Hz.

Figura A1. Diagrama de Bode Filtro Pasa Bajas para demodulación.

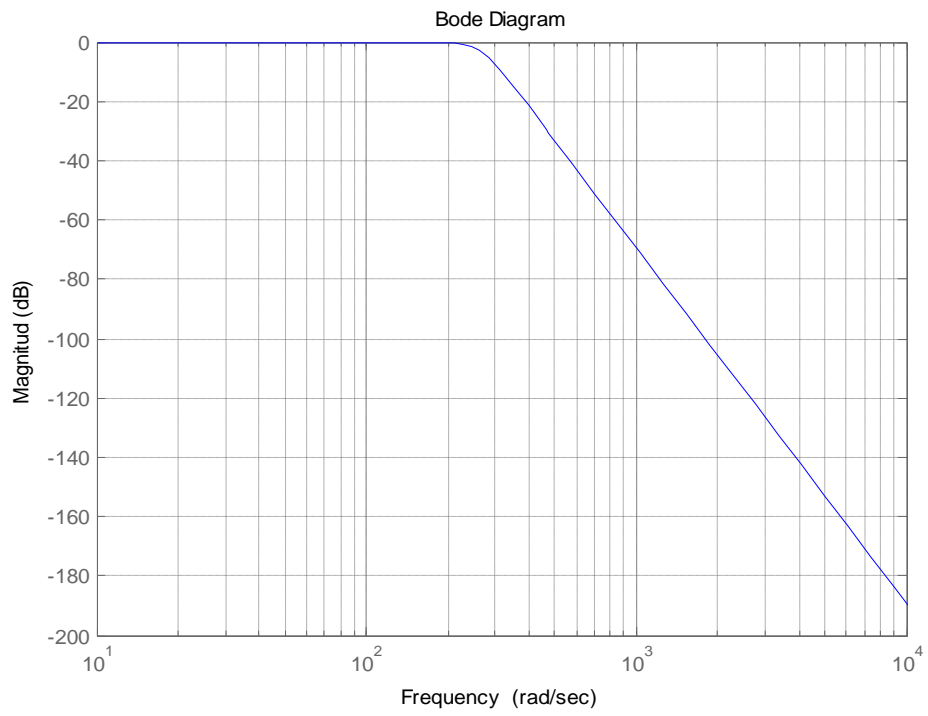
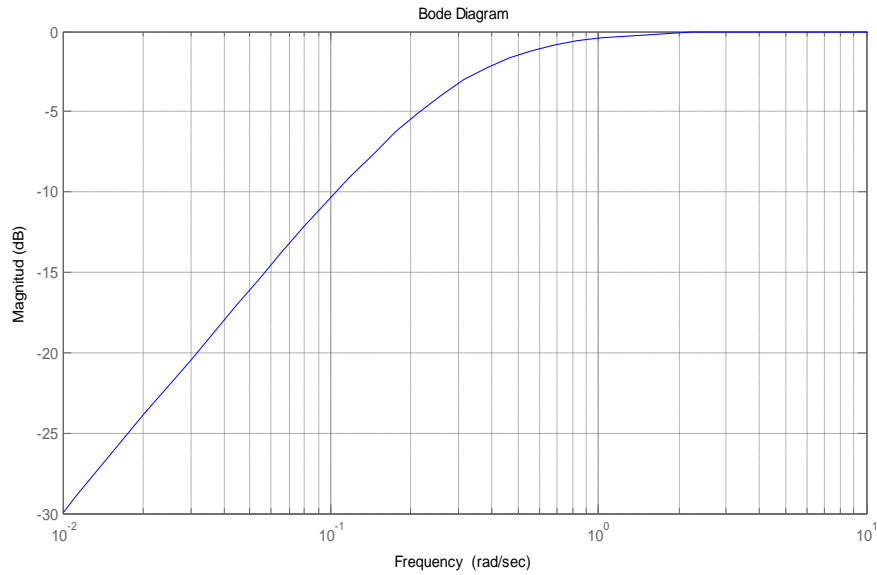


Figura A2. Diagrama de Bode Filtro Pasa Altas para eliminar componentes indeseadas.

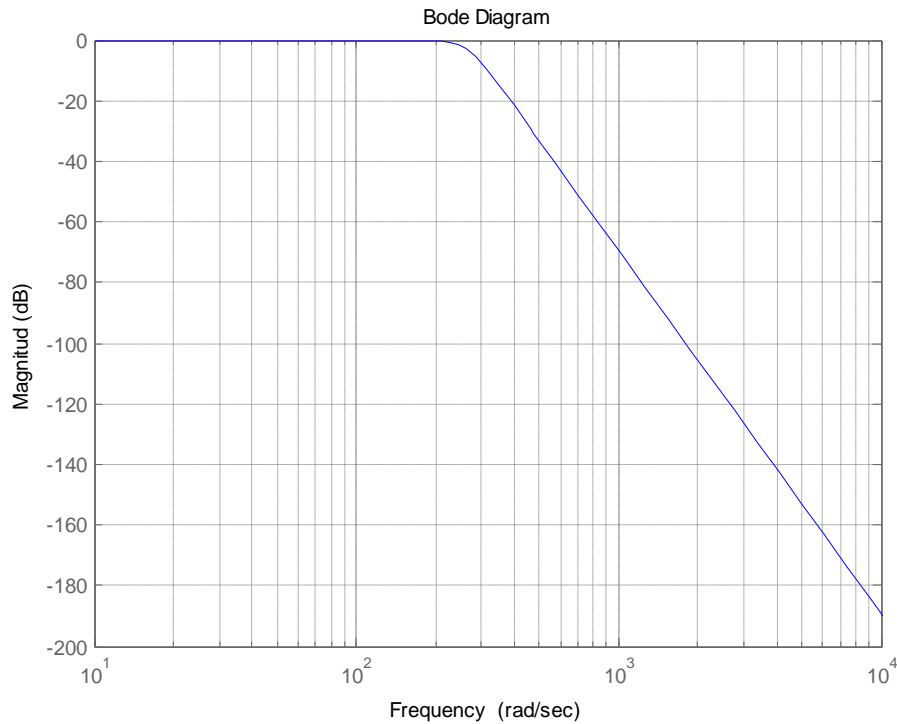


Filtro Pasa Bandas de ponderación.

Requerimientos del filtro según la CEI: Pasa Bandas, respuesta en frecuencia descrita por la Ecuación (A.1), cuyo parámetros fueron indicados en la Tabla 1.

$$F(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \times \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \quad (\text{A.1})$$

Figura A3. Diagrama de Bode Filtro Pasa Bandas de ponderación.



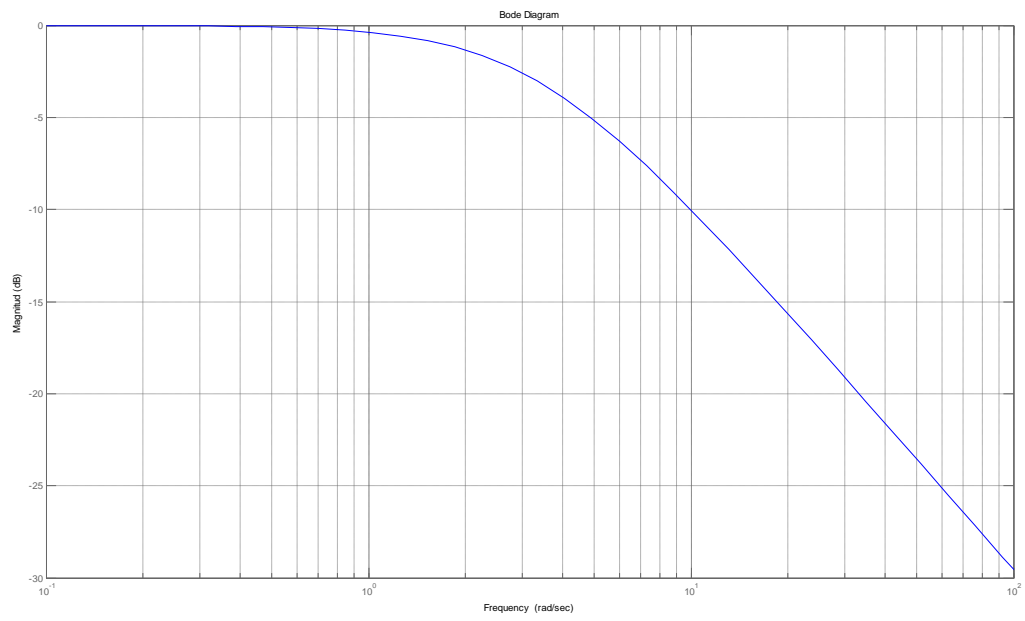
Filtro Pasa Bajas para recrear el efecto de almacenamiento de la sensación en el cerebro.

Requerimientos del filtro según la CEI: Pasa Bajas, función de transferencia de un filtro resistivo-capacitivo de primer orden, constante de tiempo de 300 ms.

La ecuación que describe un filtro de dichas características tiene la forma expresada por la ecuación siguiente:

$$F(s) = \frac{1}{0.3s + 1} \quad (\text{A.2})$$

Figura A4. Diagrama de Bode Filtro Pasa bajas para recrear efecto de almacenamiento.



ANEXO B. ESQUEMA EN SIMULINK DE MEDIDOR DE NIVEL INSTANTÁNEO DE FLICKER

En este anexo se presentan los esquemas de Simulink de MATLAB correspondientes al medidor analógico y digital de Flicker, hasta el bloque cuatro. La primera figura corresponde al medidor digital (que es idéntico en forma al analógico) y la segunda figura corresponde con el bloque de generación de una señal digital fluctuante en amplitud. Para el medidor analógico, el retenedor de orden cero no se utiliza.

Figura B1. Esquema digital de extracción de la señal de nivel instantáneo de Flicker a partir de una señal de tensión fluctuante

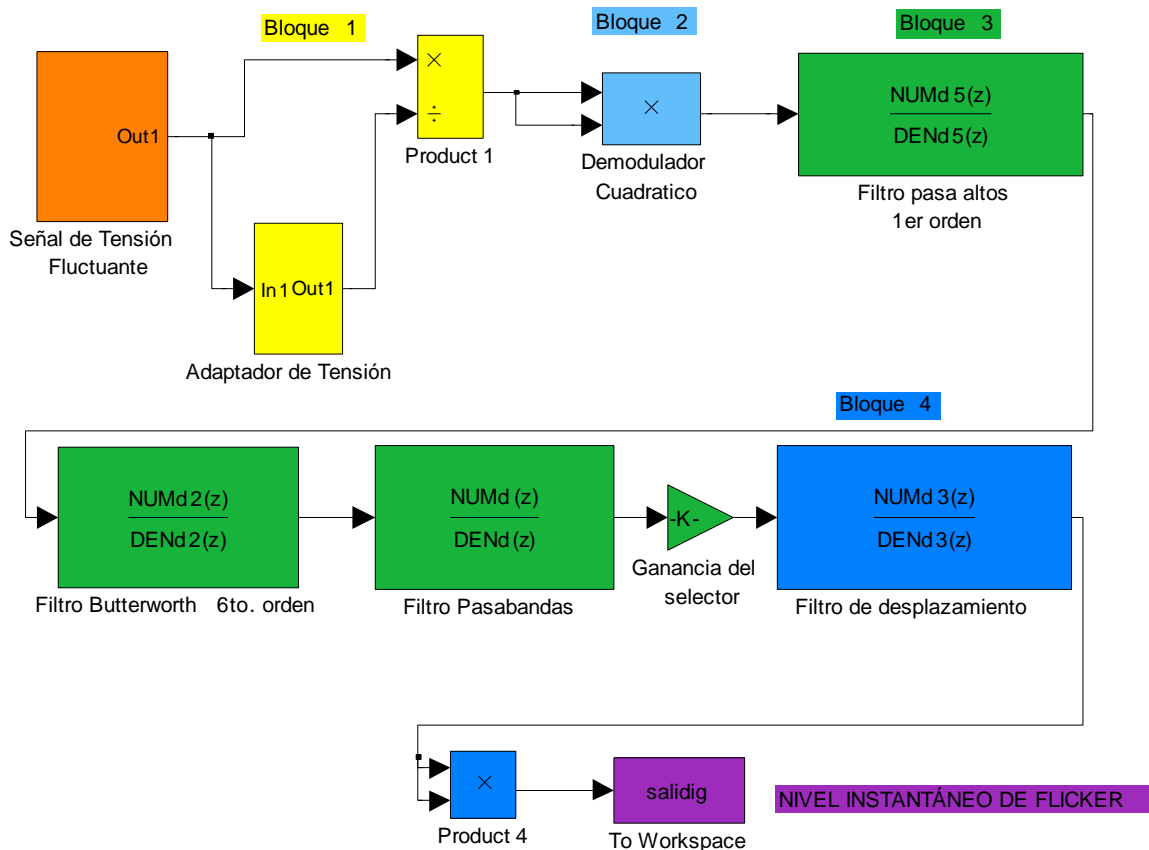
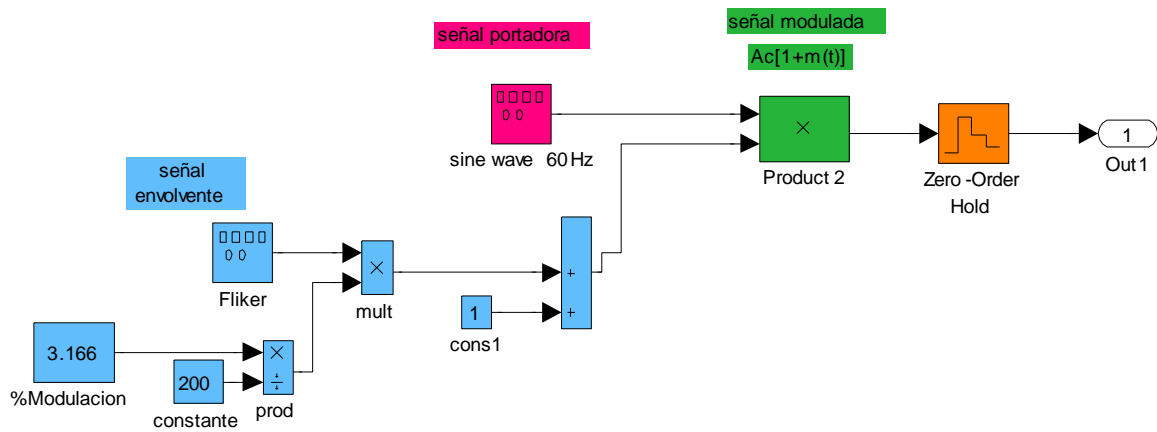


Figura B2. Esquema de generación de una señal de tensión modulada en amplitud.



ANEXO C. ALGORITMO DE EXTRACCIÓN DEL IFL A PARTIR DE LA SEÑAL DE TENSIÓN DE ENTRADA Y ALGORITMO DE EXTRACCIÓN DEL PST A PARTIR DEL IFL

```
clc
close all
format long eng

%definición de los Filtros%%

Fs=1024;
k=1.6357;
lamda=2*pi*4.167375;
w1=2*pi*9.077169;
w2=2*pi*2.939902;
w3=2*pi*1.394468;
w4=2*pi*17.31512;

% Filtro Pasa-altas%%
kt=k*w1;
num=conv([1 0],[1/w2,1]);
den=conv([1,2*lamda,w1^2],conv([1/w3,1],[1/w4,1]));
num1=[0,1,0];
den1=[0,1,0.3142];
[NUMd5,DEND5] = BILINEAR(num1,den1,Fs,0.05);

%Filtro Pasa-Bandas
[NUMd,DEND] = BILINEAR(kt*num,den,Fs,8.8);
save PSTpassband.mat NUMd DEND NUMd5 DEND5 Fs

%Filtro Pasa_bajas
kt2=3.37e14;
den1=conv([1,509.8,69639.93],[1,373.2,69639.93]);
```

```

den2=conv(den1,[1,136.6,69639.93]);
[NUMd2,DEND2] = BILINEAR(kt2,den2,Fs,42);

save PSTbutter.mat NUMd2 DEND2

%Filtro Pasa-Bajas
a=10/3;
kt3=a;
den3=[1,a];
[NUMd3,DEND3] = BILINEAR(kt3,den3,Fs,0.5305);

save PSTlowpass.mat NUMd3 DEND3

```

```

% _____ CALCULO DEL IFL _____

```

```

Flicker=myvar; % myvar es la variable de salida de el generador de
Flicker en Simulink.
b=0;
producto=0;
producto_punto=0;
ganancia=0;
valor_RMS=0;
valor_normalizado=0;
demodulado=[];
salida_primer_filtro=0;
salida_segundo_filtro=0;
salida_tercer_filtro=0;
entrada_demodulador=0;
demodulado2=0;
ifl=0;
b=0;
a=0;
st=[];
conta1=0;
smin=0;

```

```

smax=0;
ultima=0;
FDP=[];
L=0;
FPAC=[];
Nc=0;
Na=0;
ifl_10_minutos=[];
acu=0;
PST=[];
reporte=[];
acu1=0;
%_____rutina de cálculo del porcentaje de modulación____%%

Ec=120*sqrt(2);
maxima=max(Flicker);
delta_de_v_medios=maxima-Ec;
minima=Ec-delta_de_v_medios;
coef=(maxima-minima)/Ec*100;

if coef <=3,
    ganancia_selector=1/(18.1e-004);
elseif coef > 3 && coef<= 4;
    ganancia_selector= 1/(19.2e-004);
elseif coef >4 && coef<=15,
    ganancia_selector= 1/(17.9e-004);
elseif coef>15 && coef<18.1,
    ganancia_selector=1/(17.85e-004);
else
    ganancia_selector=1/(17.8e-004);

end

%_____rutina de cálculo de IFL_____

```

```

numero_de_medidas=fix(max(size(Flicker))/(1024*660));% Calcula, según el
tamaño de la entrada, cuántas medidas completas de PST se pueden
calcular.

for e=1:numero_de_medidas, % ciclo para varias medidas de PST

    a1=1024*60;
        for m=0:10,

            b=Flicker((a1*m)+1:(a1*(m+1))); % refrescando el valor RMS
cada 60 segundos.
            producto=b.^2;

                for j=1:max(size(producto));%suma acumulada entrega el
producto punto.
                    acu=acu+producto(j);
                end
            producto_punto=acu;
            ganancia=producto_punto./a1;      % divide entre 1024*60.
            valor_RMS=sqrt(ganancia);        % valor RMS de un minuto.
            valor_normalizado=b./valor_RMS; %normaliza entre el valor rms
            demodulado(:,m+1)=valor_normalizado.^2; %demodulador cuadrático
            acu=0;
        end

    ifl_primer_minuto=demodulado(:,1); % almacena las mediciones desde
el 1 minuto
    ifl_segundo_minuto=demodulado(:,2);
    ifl_tercer_minuto=demodulado(:,3);
    ifl_cuarto_minuto=demodulado(:,4);
    ifl_quinto_minuto=demodulado(:,5);
    ifl_sexto_minuto=demodulado(:,6);
    ifl_septimo_minuto=demodulado(:,7);
    ifl_octavo_minuto=demodulado(:,8);

```

```

ifl_noveno_minuto=demodulado (:,9);
ifl_decimo_minuto=demodulado (:,10);
ifl_onceavo_minuto=demodulado(:,11);

total=
cat(1,ifl_primer_minuto,ifl_segundo_minuto,ifl_tercer_minuto,ifl_cu
arto_minuto,ifl_quinto_minuto,ifl_sexto_minuto,ifl_septimo_minuto,i
fl_octavo_minuto,ifl_noveno_minuto,ifl_decimo_minuto,ifl_onceavo_mi
nuto);
%concatena las mediciones
salida_primer_filtro=filter(NUMd5,DENd5,total);% paso por los
filtros
salida_segundo_filtro=filter(NUMd2,DENd2,salida_primer_filtro);
salida_tercer_filtro=filter(NUMd,DENd,salida_segundo_filtro);
entrada_demodulador=salida_tercer_filtro.*ganancia_selector;
demodulado2=entrada_demodulador.^2; % elevación al cuadrado para
efecto no lineal
ifl=filter(NUMd3,DENd3,demodulado2); % NIVEL INSTANTANEO DE FLICKER
% stem(ifl);

%_____rutina de calculo del PST a partir de la señal de IFL%

fin=max(size(ifl));
inicio=fix((fin/660)*60);
st=ifl(inicio:fin); % Muestras útiles para 1 medida de PST,
correspondientes a 10 minutos.

Na=max(size(st));
smin=min(st);
smax=max(st);
Nc=64;
L=(smax-smin)/Nc; %Ancho de Clase

```

```

S=0;

S(1)=smin;

for l=2:(Nc-1)
    S(l)=smin+(l-1)*L; % Vector con los límites de las clases
end
S(Nc)=smax;

% Clasificador, distribuye las muestras de una medida en el número de
% clases, según los límites de las mismas, en S.
Contal=zeros(1,max(size(S))); % vector de las frecuencias
for g=1:(max(size(S))-1)
    x= find (st>=S(g) & st<S(g+1));
    if isempty(x),
        Contal(g)=0;
    else
        Contal(g)=max(size(x));
    end
end

ultima=find(st>=S(max(size(S))-1) & st<S(max(size(S))));
if isempty(ultima),
    Contal(max(size(S)))=0;
else
    ultima=Contal(max(size(S)));
end

FDP=(Contal./Na)*100;
%stem(FDP);

%figure(2)
FPAC(1)=100;
%line([0 0],[0 100]);line([0 1],[100 100]);line([1 1],[100 0]);
sum=0;

```

```

for i=1:Nc-1,
    sum=sum+Contal(i);
    FPAC(i+1)=(Na-sum)/Na*100; % Función de Probabilidad acumulada
    %line([i i+1],[FPAC(i+1) FPAC(i+1)]);line([i+1 i+1],[FPAC(i+1)
0]);
end
% grid on

%-----interpolación lineal y no lineal empleando la fórmula de
interpolación de la norma-----

P30=pcnt(30,L,smin,FPAC);P50=pcnt(50,L,smin,FPAC);P80=pcnt(80,L,smin,FPAC
);

P6=pcnt(6,L,smin,FPAC);P8=pcnt(8,L,smin,FPAC);P10=pcnt(10,L,smin,FPAC);P1
3=pcnt(13,L,smin,FPAC);P17=pcnt(17,L,smin,FPAC);

P2_2=pcnt(2.2,L,smin,FPAC);P3=pcnt(3,L,smin,FPAC);P4=pcnt(4,L,smin,FPAC);

P0_7=pcnt(0.7,L,smin,FPAC);P1=pcnt(1,L,smin,FPAC);P1_5=pcnt(1.5,L,smin,FP
AC);

% La funcion PST se encuentra definida en pcnt.m, lo que hace es calcular
% el percentil pedido, con diferentes formas de interpolación, de las
% cuales, la mas apropiada es lineal(mod).
P50s=(P30+P50+P80)/3;
P10s=(P6+P8+P10+P13+P17)/5;
P3s=(P2_2+P3+P4)/3;
P1s=(P0_7+P1+P1_5)/3;
P0_1=pcnt(0.1,L,smin,FPAC);
PST = sqrt(0.0314*P0_1+0.0525*P1s+0.0657*P3s+0.28*P10s+0.08*P50s)
sprintf('Date: %d/%d/%d Time: %d:%d:%2.3f\n', clock)
reporte(e)=PST;
end

```

```

if max(size(reporte))==12,
    cubo=reporte.^3;
    for h=1:12,
        acul=acul+cubo(h);
    end
    division=acul/12;
    Plt=(division)^(1/3);

end

```

función pcnt (percentiles)

```

% _____INTERPOLACION LINEAL (mod) _____

function p=pcnt(k,L,smin,M);
a=max(size(M));
M(a+1)=0;
n=min(find(M<k));
yn=M(n);
yn_1=M(n-1);
p=(n-1-(k-yn)/(yn_1-yn))*L+smin;

```

ANEXO D. VERIFICACIÓN DE LA CONFORMIDAD DE LOS MÉTODOS DE MEDIDA Y OBTENCIÓN DEL MARGEN DE VARIACIÓN DE LAS MAGNITUDES DE INFLUENCIA.

En este anexo se presentan los resultados de las pruebas sugeridas por el estándar CEI 61000-4-30, para la validación de un medidor de *Flicker* clase A. Las pruebas se realizaron con un generador de señales sintéticas en el entorno de Matlab³⁴, que se encuentra en desarrollo en la Universidad Industrial de Santander. Todos los valores obtenidos se acotaron a dos cifras decimales.

D.1. Condiciones de Ensayo Uno

Tabla D.1. Resultados del algoritmo ante condiciones de ensayo uno.

Magnitudes de Influencia-Ensayo uno	Cambios por minuto	Valor esperado de PST	Valor medido de PST	Error (%)	Cumple
Amplitud de tensión (U _{din})=120 V	39	1	1,00	0,04	SI
		5	4,99	0,08	SI
		10	9,97	0,28	SI

³⁴ COBOS, Jorge y VARGAS, Juan Carlos. Simulación de un generador de perturbaciones de los parámetros de Calidad de la Potencia Eléctrica-Estándar CEI 61000-4-30. Bucaramanga, 2009, Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, electrónica y de Telecomunicaciones.

Desequilibrio= 0 Armónicos= 0 Interarmónicos=0 Frecuencia= 60 Hz		15	15,03	0,22	SI
		20	19,95	0,25	SI
	110	1	1,00	0,65	SI
		5	5,03	0,53	SI
		10	10,04	0,39	SI
		15	15,02	0,16	SI
		20	19,97	0,15	SI
	1620	1	1,011	1,08	SI
		5	5,044	0,88	SI
		10	10,08	0,82	SI
15		15,11	0,74	SI	
20		20,12	0,61	SI	
Amplitud de tensión (U _{din})=118,8 V Desequilibrio= 0% a 0,5% de U _{din} Armónicos= 0% a 3% de U _{din} Interarmónicos=0% a 0,5% de U _{din} Frecuencia= 59,5 Hz	39	1	1,00	0,03	SI
		5	4,99	0,08	SI
		10	9,97	0,29	SI
		15	14,90	0,62	SI
		20	19,78	1,09	SI
	110	1	1,00	0,19	SI
		5	4,98	0,30	SI
		10	9,95	0,44	SI
		15	14,90	0,67	SI

		20	19,80	0,98	SI	
	1620	1	1,011	1,08	SI	
		5	5,04	0,90	SI	
		10	10,08	0,84	SI	
		15	15,11	0,75	SI	
		20	20,13	0,63	SI	
<p>Amplitud de tensión (U_{din})=119,4 V</p> <p>Desequilibrio= 0% a 0,5% de U_{din}</p> <p>Armónicos= 0% a 3% de U_{din}</p> <p>Interarmónicos=0% a 0,5% de U_{din}</p> <p>Frecuencia= 59,5 Hz</p>	39	1	1,00	0,03	SI	
		5	4,99	0,08	SI	
		10	9,97	0,29	SI	
		15	14,91	0,62	SI	
		20	19,78	1,09	SI	
		110	1	1,00	0,19	SI
			5	4,98	0,30	SI
			10	9,95	0,44	SI
			15	14,90	0,67	SI
			20	19,80	0,98	SI
		1620	1	1,01	1,08	SI
			5	5,04	0,89	SI
			10	10,08	0,84	SI
			15	15,11	0,75	SI
			20	20,13	0,63	SI

<p>Amplitud de tensión (U_{din})=120,6V</p> <p>Desequilibrio= 0% a 0,5% de U_{din}</p> <p>Armónicos= 0% a 3% de U_{din}</p> <p>Interarmónicos=0% a 0,5% de U_{din}</p> <p>Frecuencia= 59,5 Hz</p>	39	1	1,00	0,03	SI
		5	4,99	0,08	SI
		10	9,971	0,28	SI
		15	14,91	0,62	SI
		20	19,78	1,09	SI
	110	1	1,00	0,19	SI
		5	4,98	0,30	SI
		10	9,95	0,44	SI
		15	14,90	0,67	SI
		20	19,80	0,98	SI
	1620	1	1,01	1,08	SI
		5	5,04	0,90	SI
		10	10,08	0,84	SI
		15	15,11	0,75	SI
		20	20,13	0,63	SI
<p>Amplitud de tensión (U_{din})=121,2 V</p> <p>Desequilibrio= 0% a 0,5% de U_{din}</p> <p>Armónicos= 0% a 3% de U_{din}</p> <p>Interarmónicos=0% a</p>	39	1	1,00	0,03	SI
		5	4,99	0,08	SI
		10	9,97	0,28	SI
		15	14,91	0,62	SI
		20	19,78	1,09	SI
	110	1	1,00	0,19	SI

0,5% de U _{din} Frecuencia= 59,5 Hz		5	4,98	0,30	SI
		10	9,95	0,44	SI
		15	14,90	0,67	SI
		20	19,80	0,98	SI
	1620	1	1,01	1,08	SI
		5	5,04	0,90	SI
		10	10,08	0,84	SI
		15	15,11	0,75	SI
		20	20,13	0,63	SI
	Amplitud de tensión (U _{din})=120 V Desequilibrio= 0% a 0,5% de U _{din} Armónicos= 0% a 3% de U _{din} Interarmónicos=0% a 0,5% de U _{din} Frecuencia= 59,75 Hz	39	1	1,00	0,03
5			4,99	0,08	SI
10			9,97	0,28	SI
15			14,91	0,62	SI
20			19,78	1,09	SI
110		1	1,00	0,19	SI
		5	4,98	0,30	SI
		10	9,95	0,45	SI
		15	14,90	0,67	SI
		20	19,80	0,99	SI
1620		1	1,01	1,08	SI
		5	5,04	0,88	SI

		10	10,08	0,83	SI
		15	15,11	0,74	SI
		20	20,12	0,61	SI
Amplitud de tensión (U _{din})=120 V Desequilibrio= 0% a 0,5% de U _{din} Armónicos= 0% a 3% de U _{din} Interarmónicos=0% a 0,5% de U _{din} Frecuencia= 60,25 Hz	39	1	1,00	0,04	SI
		5	4,99	0,08	SI
		10	9,97	0,28	SI
		15	14,91	0,62	SI
		20	19,78	1,09	SI
	110	1	1,00	0,18	SI
		5	4,98	0,30	SI
		10	9,95	0,44	SI
		15	14,90	0,67	SI
		20	19,80	0,98	SI
	1620	1	1,01	1,08	SI
		5	5,04	0,88	SI
		10	10,08	0,82	SI
		15	15,11	0,73	SI
		20	20,12	0,60	SI
Amplitud de tensión (U _{din})=120 V Desequilibrio= 0% a	39	1	1,00	0,43	SI
		5	5,00	0,06	SI
		10	9,97	0,28	SI

0,5% de U _{din} Armónicos= 0% a 3% de U _{din} Interarmónicos=0% a 0,5% de U _{din} Frecuencia= 60,5Hz		15	14,91	0,62	SI
		20	19,78	1,09	SI
	110	1	1,00	0,47	SI
		5	4,99	0,26	SI
		10	9,96	0,43	SI
		15	14,90	0,66	SI
		20	19,80	0,98	SI
	1620	1	1,01	1,36	SI
		5	5,04	0,89	SI
		10	10,08	0,83	SI
		15	15,11	0,73	SI
		20	20,12	0,60	SI

D.2. Condiciones de Ensayo Dos

Tabla D.2. Resultados del algoritmo ante condiciones de ensayo dos.

Magnitudes de Influencia- Ensayo dos	Cambios por minuto	Valor esperado de PST	Valor medido de PST	Error (%)	Cumple
Amplitud de tensión (Udin)=120 V Desequilibrio= V1 0,23% Udin Fase A V2 0,30% Udin Fase B V3 0,37% Udin Fase C	39	1	1,00	0,15	SI
		5	4,99	0,22	SI
		10	9,96	0,41	SI
		15	14,89	0,75	SI
		20	19,76	1,22	SI
	110	1	0,99	0,45	SI
		5	4,97	0,50	SI
		10	9,94	0,64	SI
		15	14,87	0,86	SI
		20	19,77	1,18	SI
- Armónicos= 3° armónico 7% Udin 0° 5° armónico 2% Udin 0° 29° armónico 2% Udin 0° Interarmónicos=0,5% Udin a 450 Hz Frecuencia= 59Hz	1620	1	1,00	0,15	SI
		5	5,01	0,17	SI
		10	10,01	0,12	SI
		15	15,00	0,03	SI
		20	19,98	0,10	SI
Amplitud de tensión (Udin)=120 V	39	1	1,00	0,15	SI
		5	4,99	0,21	SI

Desequilibrio= V1 0,23% Udin Fase A V2 0,30% Udin Fase B V3 0,37% Udin Fase C Armónicos= 3° armónico 7% Udin 0° 5°armónico 2% Udin 0° 29° armónico 2% Udin 0° Interarmónicos=0,5% Udin a 450 Hz Frecuencia= 58,5 Hz Frecuencia= 59 Hz		10	9,96	0,41	SI
		15	14,89	0,74	SI
		20	19,76	1,21	SI
	110	1	0,99	0,45	SI
		5	4,97	0,50	SI
		10	9,94	0,64	SI
		15	14,87	0,86	SI
	1620	20	19,77	1,18	SI
		1	1,00	0,15	SI
		5	5,01	0,26	SI
10		10,02	0,20	SI	
15		15,01	0,11	SI	
Amplitud de tensión (Udin)=120 V Desequilibrio V1 0,23% Udin Fase A V2 0,30% Udin Fase B V3 0,37% Udin Fase C Armónicos 3° armónico 7% Udin 0°	39	20	19,99	0,02	SI
		1	1,00	0,15	SI
		5	4,99	0,21	SI
		10	9,96	0,41	SI
		15	14,89	0,75	SI
	110	20	19,76	1,21	SI
		1	0,99	0,45	SI
		5	4,97	0,50	SI
		10	9,94	0,64	SI

5° armónico 2% U _{din} 0° 29° armónico 2% U _{din} 0° Interarmónicos=0,5% U _{din} a 450 Hz Frecuencia= 58,5 Hz		15	14,87	0,86	SI
		20	19,77	1,17	SI
	1620	1	1,00	0,15	SI
		5	5,01	0,26	SI
		10	10,02	0,20	SI
		15	15,02	0,10	SI
Amplitud de tensión (U _{din})=120 V Desequilibrio V1 0,73% U _{din} Fase A V2 0,80% U _{din} Fase B V3 0,87% U _{din} Fase C Armónicos 3° armónico 10% U _{din} 0° 5° armónico 5% U _{din} 0° 29° armónico 5% U _{din} 0° Interarmónicos=1% U _{din} a 450 Hz Frecuencia= 58,75Hz	39	1	1,00	0,15	SI
		5	4,99	0,22	SI
		10	9,96	0,41	SI
		15	14,89	0,75	SI
		20	19,76	1,21	SI
	110	1	0,99	0,45	SI
		5	4,97	0,50	SI
		10	9,94	0,63	SI
		15	14,87	0,86	SI
		20	19,77	1,17	SI
	1620	1	1,00	0,15	SI
		5	5,01	0,21	SI
		10	10,01	0,15	SI
		15	15,01	0,06	SI

		20	19,99	0,06	SI
Amplitud de tensión (U _{din})=120 V Desequilibrio V1 1,23% U _{din} Fase A V2 1,30% U _{din} Fase B V3 1,37% U _{din} Fase C Armónicos 3° armónico 13% U _{din} 0° 5° armónico 8% U _{din} 0° 29° armónico 8% U _{din} 0° Interarmónicos=1,5% U _{din} a 450 Hz Frecuencia= 59,25 Hz	39	1	1,00	0,16	SI
		5	4,99	0,22	SI
		10	9,96	0,41	SI
		15	14,89	0,75	SI
		20	19,76	1,22	SI
	110	1	0,99	0,46	SI
		5	4,97	0,50	SI
		10	9,94	0,64	SI
		15	14,87	0,87	SI
		20	19,77	1,18	SI
	1620	1	1,00	0,16	SI
		5	5,01	0,14	SI
		10	10,01	0,08	SI
		15	15,00	0,00	SI
		20	19,97	0,13	SI
Amplitud de tensión (U _{din})=120 V Desequilibrio V1 1,23% U _{din} Fase A V2 1,30% U _{din} Fase B	39	1	1,00	0,16	SI
		5	4,99	0,22	SI
		10	9,96	0,42	SI
		15	14,89	0,75	SI
		20	19,76	1,22	SI

V3 1,37% Udin Fase C	110	1	0,99	0,45	SI
Armónicos		5	4,97	0,50	SI
3° armónico 13% Udin 0°		10	9,93	0,64	SI
5° armónico 8% Udin 0°		15	14,87	0,86	SI
29° armónico 8% Udin 0°		20	19,77	1,18	SI
Interarmónicos=1,5% Udin a 450 Hz Frecuencia= 59,5 Hz	1620	1	1,00	0,19	SI
		5	5,00	0,11	SI
		10	10,00	0,06	SI
		15	14,99	0,03	SI
		20	19,97	0,16	SI

D.3. Condiciones de Ensayo Tres

Tabla D.3. Respuesta del algoritmo ante las condiciones de ensayo tres.

Magnitudes de Influencia	Cambios por minuto	Valor esperado de PST	Valor medido de PST	Error (%)	Cumple
Amplitud de tensión (Udin)=120 V	39	1	1,00	0,16	SI
		5	4,99	0,22	SI
		10	9,96	0,42	SI

Desequilibrio		15	14,89	0,75	SI
V1 1,52% Udin Fase A		20	19,76	1,22	SI
V2 1,40% Udin Fase B	110	1	1,00	0,46	SI
V3 1,28% Udin Fase C		5	4,97	0,51	SI
Armónicos		10	9,94	0,64	SI
7° armónico 10% Udin 180°		15	14,87	0,88	SI
13° armónico 5% Udin 0°		20	19,77	1,19	SI
25° armónico 5% Udin 0°	1620	1	1,00	0,16	SI
		5	5,00	0,05	SI
Interarmónicos=1 % Udin a 210 Hz		10	10,00	0,01	SI
Frecuencia= 61Hz		15	14,98	0,10	SI
		20	19,95	0,23	SI
Amplitud de tensión (Udin)=120 V	39	1	1,00	0,16	SI
		5	4,99	0,22	SI
Desequilibrio		10	9,96	0,47	SI
V1 1,52% Udin Fase A		15	14,89	0,75	SI
V2 1,40% Udin Fase B		20	19,76	1,22	SI
V3 1,28% Udin Fase C	110	1	1,00	0,46	SI
		5	4,97	0,50	SI

Armónicos		10	9,94	0,64	SI
7° armónico 10% U _{din} 180°		15	14,87	0,87	SI
13° armónico 5% U _{din} 0°		20	19,49	2,63	SI
25° armónico 5% U _{din} 0°	1620	1	1,00	0,16	SI
		5	5,00	0,06	SI
Interarmónicos=1 % U _{din} a 210 Hz		10	10,00	0,00	SI
		15	14,99	0,09	SI
Frecuencia= 61Hz		20	19,96	0,22	SI
	39	1	1,00	0,16	SI
Amplitud de tensión (U _{din})=120 V		5	4,99	0,22	SI
Desequilibrio		10	9,96	0,42	SI
V1 2,02% U _{din} Fase A		15	14,89	0,75	SI
V2 1,9% U _{din} Fase B		20	19,76	1,22	SI
V3 1,78% U _{din} Fase C	110	1	1,00	0,45	SI
Armónicos		5	4,98	0,50	SI
7° armónico 13% U _{din} 180°		10	9,94	0,64	SI
		15	14,87	0,86	SI
13° armónico 5% U _{din} 0°		20	19,77	1,18	SI
	1620	1	1,00	0,16	SI

25° armónico 8% U _{din} 0° Interarmónicos=1,5 % U _{din} a 210 Hz Frecuencia=60,5 Hz		5	5,00	0,04	SI
		10	10,00	0,01	SI
		15	14,98	0,10	SI
		20	19,95	0,23	SI
Amplitud de tensión (U _{din})=120 V Desequilibrio V1 2,02% U _{din} Fase A V2 0,9% U _{din} Fase B V3 1,78% U _{din} Fase C Armónicos 7° armónico 7% U _{din} 180° 13° armónico 8% U _{din} 0° 25° armónico 8% U _{din} 0° Interarmónicos1 % U _{din} a 210 Hz	39	1	1,00	0,15	SI
		5	4,99	0,22	SI
		10	9,96	0,42	SI
		15	14,89	0,76	SI
		20	19,76	1,23	SI
	110	1	1,00	0,45	SI
		5	4,97	0,50	SI
		10	9,94	0,64	SI
		15	14,87	0,87	SI
		20	19,77	1,18	SI
1620	1	1,00	0,15	SI	
	5	5,00	0,06	SI	
	10	10,00	0,01	SI	
	15	14,99	0,09	SI	

Frecuencia=61,25 Hz		20	19,96	0,22	SI
Amplitud de tensión (Udin)=120 V Desequilibrio V1 1,02% Udin Fase A V2 1,9% Udin Fase B V3 1,78% Udin Fase C Armónicos 7° armónico 13% Udin 180° 13° armónico 8% Udin 0° 25° armónico 8% Udin 0° Interarmónicos=1,5 % Udin a 210 Hz Frecuencia=61,5 Hz	39	1	1,00	0,14	SI
		5	4,99	0,22	SI
		10	9,96	0,41	SI
		15	14,89	0,75	SI
		20	19,76	1,22	SI
		110	1	1,00	0,45
	5	4,97	0,50	SI	
	10	9,94	0,64	SI	
	15	14,87	0,87	SI	
	20	19,77	1,18	SI	
	1620	1	1,00	0,14	SI
	5	5,00	0,01	SI	
	10	10,00	0,03	SI	
	15	14,99	0,06	SI	
	20	19,96	0,19	SI	

D.4. Ejemplo de configuración del Generador de Perturbaciones que produce las señales sintéticas para validar el medidor de acuerdo al estándar CEI 61000-4-30.

Para generar las magnitudes de influencia es necesario realizar unas configuraciones previas en el generador de perturbaciones. Las configuraciones previas son: Tiempo de simulación, número de muestras por segundo y tensión de operación en Vrms. Los valores para las pruebas relacionadas con una algoritmo de medición de *Flicker* fueron de 660 segundos, 1024 muestras por segundo y tensión de 120 Vrms, respectivamente.

Configuración de un desbalance: Se deben incluir los desbalances en el sistema ya que por defecto este es equilibrado. Posteriormente se configuran las magnitudes de la tensión especificando el valor porcentual de magnitud con respecto a la tensión nominal para cada una de las fases, y por último se configuran las fases especificando el desfase en grados respecto a 0° para cada una de las fases. Los valores porcentuales de magnitud y de fase a especificar se toman de la Tabla 3 de la norma CEI 61000-4-30 dependiendo de las condiciones de ensayo.

Configuración de armónicos: El generador propone una tabla que sirve como referencia para los valores límites de las tensiones armónicas permitidas por la norma CEI 61000-2-4, pero para las pruebas referentes a un medidor de *Flicker* se deben cambiar los valores porcentuales por los que establecen las condiciones de ensayo de incertidumbre para los métodos de clase A de la norma CEI 61000-4-30.

Para configurar los armónicos se debe establecer el orden del máximo armónico que se desea incluir en la señal. Para el medidor de *Flicker* en cuestión el valor tomado fue de 30 y se incluyeron uno a uno el valor porcentual para cada

armónico, estos valores porcentuales se tomaron de la Tabla 3 de la norma CEI 61000-4-30 dependiendo de la condición de ensayo a realizar.

Configuración de los Interarmónicos: El valor porcentual de los interarmónicos se incluye según los intervalos de frecuencia propuestos por el generador de perturbaciones, este valor es especificado por la norma CEI 61000-4-30 en la Tabla 3, y por último se indica el número de interarmónicos entre dos armónicos. Para las pruebas correspondientes al algoritmo de medición de *Flicker* se usó $N=11$, es decir 11 interarmónicos entre 2 armónicos.

A continuación se presenta el ejemplo de configuración de las magnitudes de influencia para las condiciones de ensayo 2 (valores tomados de la Tabla 3 de la norma CEI 61000-4-30):

Amplitud de tensión (U_{din})= **120 V**

Desequilibrio= V1 **0,23%** (0,73% - 0,5%) de U_{din} Fase A

V2 **0,30%** (0,80% - 0,5%) de U_{din} Fase B

V3 **0,37%** (0,87% - 0,5%) de U_{din} Fase C

Armónicos= 3° armónico **7%** (10% - 3%) de U_{din} 0°

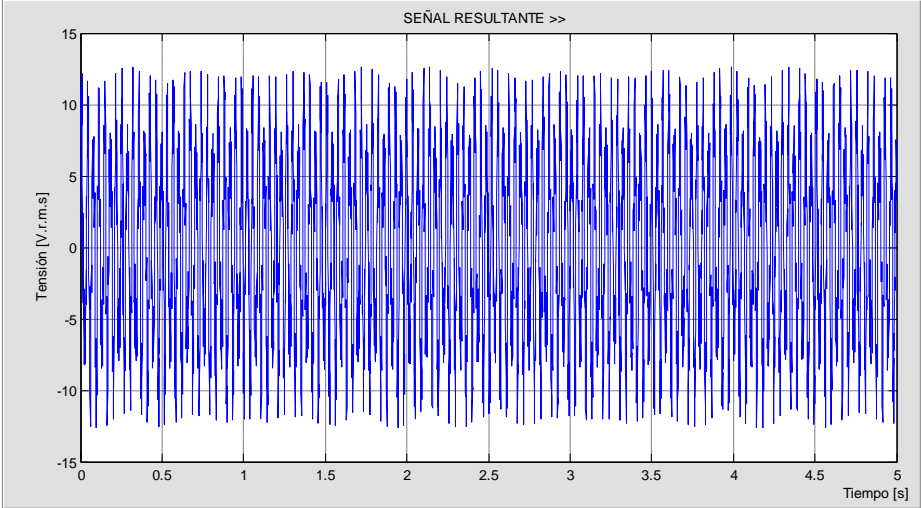
5° armónico **2%** (5% - 3%) de U_{din} 0°

29° armónico **2%** (5% - 3%) de U_{din} 0°

Interarmónicos= **0,5%** (1% - 0,5%) de U_{din} a **450 Hz** ($7,5 \cdot f_{nom}$)

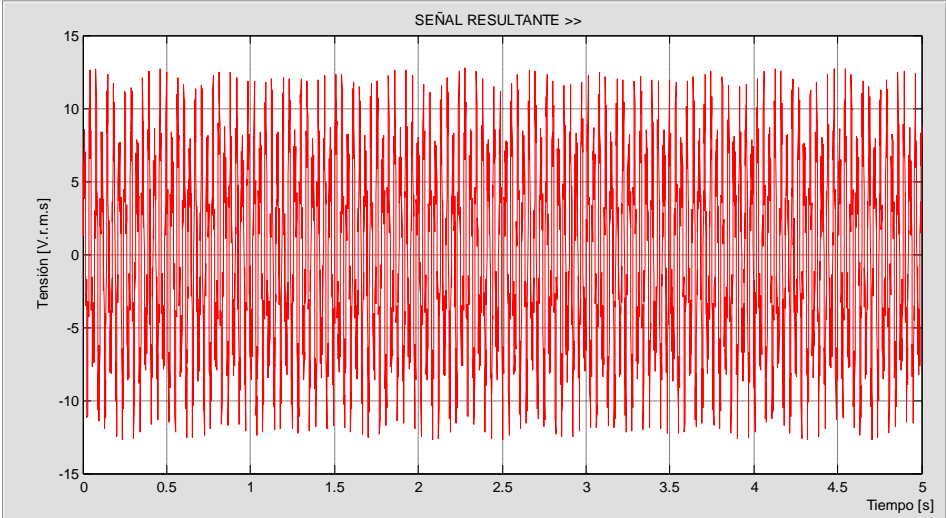
Frecuencia= **59 Hz** ($f_{nom} - 1\text{Hz} \pm 0,5\text{Hz}$)

Las siguientes figuras enseñan la señal sintética resultante generada por el simulador de perturbaciones para las fases A, B y C:



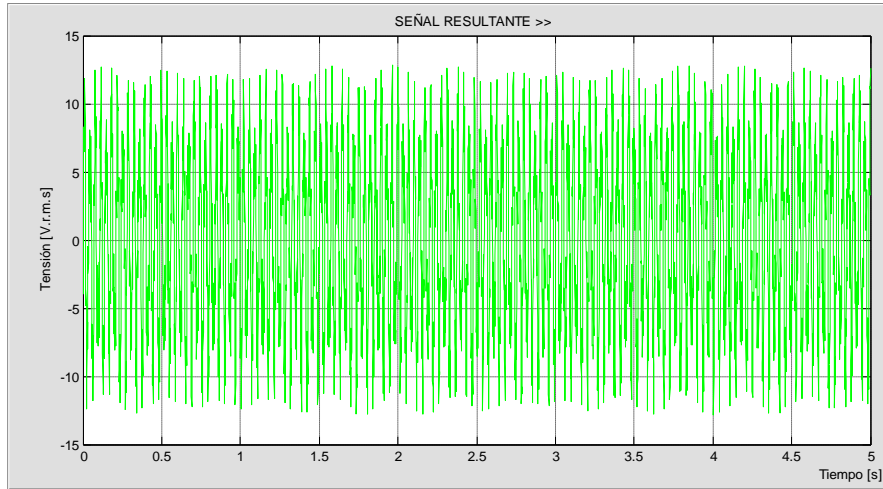
Jorge Cobos -- Juan Vargas (UIS) © 2009

Figura D.1. Señal sintética de prueba FASE A



Jorge Cobos -- Juan Vargas (UIS) © 2009

Figura D.2. Señal sintética de prueba FASE B



Jorge Cobos -- Juan Vargas (UIS) © 2009

Figura D.3. Señal sintética de prueba FASE C