

**ANÁLISIS DE LOS ALGORITMOS DE MEDICIÓN DE FLICKER  
CONSIDERANDO LOS ESTÁNDARES INTERNACIONALES**

**TANIA ESPERANZA GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ  
DAGOBERTO MUÑOZ VARGAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2007**

**ANÁLISIS DE LOS ALGORITMOS DE MEDICIÓN DE FLICKER  
CONSIDERANDO LOS ESTÁNDARES INTERNACIONALES**

**TANIA ESPERANZA GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ  
DAGOBERTO MUÑOZ VARGAS**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista**

**Director  
Profesor Gabriel Ordóñez Plata**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2007**

## DEDICATORIA

*“A ella que como la luna, ilumina el sendero de esta caminante en busca de proezas, a ella que en mi vida ha puesto la constancia y al fe... A todos quienes creen en los sueños como la única posibilidad”.*

*Tania Esperanza*

*A DIOS, por concederme todo lo que he querido en la vida, especialmente aquello que se creía era imposible.*

*A mis padres ELIECER y MARÍA BETSY, quienes siempre tienen para mi un buen consejo, una buena enseñanza y un apoyo incondicional.*

*A mi abuela HILDA MARÍA. Sus anécdotas, dichos y cuentos me divierten.*

*A mis hermanos LOURDES y JORGE ELIECER. La presencia de ustedes, en pequeños y grandes momentos, me llena de vida.*

*A mi sobrino JUAN DIEGO, quien acaba de llegar a la familia para darle un toque de alegría y juventud.*

*A mis familiares, amigos y relacionados: BARELLY, MORLY, ADRIANA, ROSALINE, VICENTE, EURIPIDES, ANAIRE, JADER, NELSON, SANDRA, MARTHA, EDGAR ALFONSO, LUISA FERNANDA y DIEGO FERNANDO, quienes siempre me han acompañado en el logro de esta gran meta.*

*A LUIS ANTONIO VESGA y su FAMILIA, quienes con su guía certera, me ayudaron a seleccionar la carrera de la que ahora me gradúo y me siento orgulloso.*

*A todos ustedes gracias,  
Dagoberto*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi mamá, Esperanza mi "cacheticos", por darme la fuerza y el ejemplo para salir adelante. Me haces tanta falta, pero me dejaste los mejores recuerdos.

A mi papá, Néstor, por ese apoyo y amor a su manera tan única.

A mis hermanas, Dunia Oriana y Erika, por creer siempre en mí, consentirme y entregarme su amor y locura.

A mi tía, Bernarda, su amor y apoyo incondicional la convierten en una mamá.

A mis demás familiares, mis tías, mi tío, mis primos y primas, que ríen conmigo y me apoyan.

A Oscar Adolfo por su cariño, ternura, paciencia y confianza.

A nuestro director, el profesor Gabriel Ordóñez Plata, que ha terminado de perfilar al profesional que soy.

A mi compañero, Dagoberto, por su paciencia con mis locuras.

Y a mis amigas, amigos y todos los que de alguna forma me aprecian.

**Tania Esperanza**

Con sentido sincero,

A GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA, por asesorar y dirigir este proyecto con profesionalismo y calidad humana.

A VALDOMIRO y MIGUEL ÁNGEL, facilitadores de información valiosa para el desarrollo de este trabajo de grado.

A JULIO CESAR CHACÓN, quien con su colaboración facilitó el proceso de calificación.

**Dagoberto**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	16
<b>1. FLICKER</b> .....	18
1.1 DEFINICIÓN .....	18
1.2 MEDICIÓN DE FLICKER .....	20
1.2.1 Medida de $P_{st}$ . .....	22
1.3 TÉCNICAS PARA MEJORAR LA PRECISIÓN DE LA EVALUACIÓN DE FLICKER .....	28
1.3.1 Interpolación lineal .....	29
1.3.2 Interpolación no lineal.....	30
1.3.3 Efecto de la variación del número de clases sobre el valor del $P_{st}$ .....	31
1.4 MODELOS DE MEDIDORES DE FLICKER .....	35
<b>2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MEDICIÓN DE FLICKER SEGÚN EL ESTÁNDAR IEC 61000-4-15</b> .....	38
2.1 PRUEBA I: MODULACIÓN CON SEÑAL DE ONDA CUADRADA .....	39
2.1.1 Resultados y observaciones .....	40
2.2 PRUEBA II: LINEALIDAD PARA MODULACIÓN DE ONDA CUADRADA.....	41
2.2.1 Frecuencia de modulación de 0,917 Hz .....	41
2.2.2 Frecuencia de modulación de 13,5 Hz.....	42
2.2.3 Observaciones.....	43
2.3 PRUEBA III: LINEALIDAD DEL MEDIDOR PARA MODULACIÓN DE ONDA SENOIDAL .....	44
2.3.1 Frecuencia de muestreo de 1,0 Hz. ....	44
2.3.2 Frecuencia de muestreo de 8,8 Hz .....	45
2.3.3 Observaciones.....	46

2.4 PRUEBAS ADICIONALES .....	47
2.4.1 Huecos y elevaciones de tensión en la señal medida .....	47
2.4.1.1. Resultados y observaciones .....	48
2.4.2 Cambios en la frecuencia fundamental de la señal de entrada .....	48
2.4.2.1. Resultados y observaciones .....	50
2.5 MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA TRANSFORMACIÓN ANALÓGICA- DIGITAL .....	51
2.5.1 Observaciones.....	53

**3. COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE MEDICIÓN DE FLICKER  $P_{ST}$  ANTE  
PERTURBACIONES DE TENSIÓN .....**

3.1 RESPUESTA DEL ÍNDICE $P_{ST}$ ANTE HUECOS (CAÍDAS) Y ELEVACIONES DE TENSIÓN .....	55
3.1.1 Variación de la magnitud de los huecos y elevaciones .....	55
3.1.1.1. Resultados y observaciones. ....	56
3.1.2 Variación de la duración de los huecos y elevaciones .....	56
3.1.2.1. Resultados y observaciones.....	57
3.1.3 Variación de la fase de la señal de tensión debido a huecos de tensión. ....	61
3.1.3.1. Resultados y observaciones.....	63
3.1.4 Variación del número de eventos .....	65
3.1.4.1. Resultados y observaciones.....	66
3.2. RESPUESTA ANTE INTERRUPCIONES.....	70
3.2.1 Resultados y observaciones .....	71
3.3. RESPUESTA ANTE TRANSITORIOS DE TENSIÓN .....	73
3.3.1 Resultados y observaciones .....	75

**4. PRUEBAS COMPLEMENTARIAS DEL COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE  
 $P_{ST}$ .....**

4.1. COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE $P_{ST}$ ANTE CAMBIOS EN EL NÚMERO DE CLASES Y LA FRECUENCIA DE MUESTREO .....	76
--	----

4.1.1 Variación del número de clases.....	76
4.1.1.1. Resultados y observaciones.....	77
4.1.2 Variación de la frecuencia de muestreo.....	80
4.1.2.1. Resultados y observaciones.....	80
4.1.3 Variación del número de clases para huecos de tensión.....	82
4.2. COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE $P_{ST}$ ANTE VARIACIONES EN ESTADO ESTABLE.....	86
4.2.1 Respuesta ante variaciones en la regulación de tensión.....	87
4.2.1.1. Resultados y observaciones.....	88
4.2.2 Respuesta ante armónicos, subarmónicos e interarmónicos de tensión.....	91
4.2.2.1. Resultados y observaciones.....	91
<b>5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>96</b>
<b>ANEXO A. IMPLEMENTACIÓN DIGITAL FILTROS ANALÓGICOS DEL MEDIDOR DE FLICKER</b> .....	<b>99</b>
<b>ANEXO B. IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK DEL ALGORITMO DE MEDICIÓN DE FLICKER NORMALIZADO POR EL ESTÁNDAR IEC 61000 -4-15</b> .....	<b>102</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cambio en el flujo luminoso resultante de la variación de la tensión. ....	19
Figura 2. Curva de sensibilidad del sistema ojo-cerebro en función de la frecuencia. ....	20
Figura 3. Curva límite de la molestia del <i>flicker</i> . ....	21
Figura 4. Operaciones para determinar la intensidad de <i>flicker</i> $P_{st}$ . ....	22
Figura 5. Estructura del medidor de <i>flicker</i> propuesto por la IEC 61000-4-15. ....	23
Figura 6. Adaptador de la tensión de entrada. ....	23
Figura 7. Respuesta en frecuencia filtro pasa altas y pasa bajas butterworth. ....	25
Figura 8. Filtro pasa bandas. Modelo reacción ojo-cerebro. ....	26
Figura 9. Respuesta en frecuencia filtro pasa bajos de primer orden. ....	26
Figura 10. Proceso de evaluación de la función de probabilidad acumulada. ....	27
Figura 11. Perturbaciones a la entrada del medidor de <i>flicker</i> . ....	31
Figura 12. Nivel de <i>flicker</i> instantáneo y $P_{st}$ en función del número de clases usando interpolación lineal. ....	32
Figura 13. Factores $A_N$ y $D_N$ en función de número de clases usando interpolación lineal. ....	32
Figura 14. $P_{st}$ en función del número de clases interpolación no lineal. ....	33
Figura 15. Comparación entre interpolación lineal y no lineal. ....	34
Figura 16. Tensión sinusoidal modulada con señal de onda cuadrada. ....	39
Figura 17. Tensión sinusoidal modulada con señal de onda sinusoidal. ....	44
Figura 18. Señal descrita en la tabla 14. ....	47
Figura 19. Cambios escalonados de 0,1 Hz. ....	49
Figura 20. Cambio escalonado de 0,4 Hz. ....	49
Figura 21. $P_{st}$ ante la variación de la duración del evento, 64 clases. ....	58
Figura 22. $P_{st}$ ante la variación de la duración del evento menor a 500 ms, 64 clases. ....	58
Figura 23. $P_{st}$ ante variaciones en la duración de eventos de tensión, 64 y 140 clases. ....	60
Figura 24. Salto de fase debido a un hueco de tensión. ....	62
Figura 25. $P_{st}$ para un hueco de tensión de 0,8 p.u y 100 ms, considerando el cambio de fase. ....	63
Figura 26. $P_{st}$ para un hueco de tensión de 0,1 p.u y 100 ms, considerando el cambio de fase. ....	64
Figura 27. Tensión eficaz durante una secuencia de dos recierres y posterior reestablecimiento del sistema, en una red de alimentación fallada (línea azul) y en una barra antes del interruptor automático (línea roja). ....	65
Figura 28. Tensión eficaz durante una secuencia de dos recierres con apertura permanente, en una red de alimentación fallada (línea azul) y en una barra antes del interruptor automático (línea roja). ....	66

Figura 29. Nivel de <i>flicker</i> instantáneo para dos huecos sucesivos. ....	67
Figura 30. Tensión eficaz durante un recierre con posterior reestablecimiento del sistema, en una red de alimentación fallada (línea azul) y en una barra antes del interruptor automático (línea roja). ....	70
Figura 31. Transitorio de tensión en la señal de entrada.....	74
Figura 32. $P_{st}$ en función del número de clases, frecuencia de muestreo de 50 Hz para una perturbación severa. ....	78
Figura 33. $P_{st}$ en función del número de clases, frecuencia de muestreo de 1 kHz para una perturbación severa.....	78
Figura 34. $P_{st}$ en función del número de clases, frecuencia de muestreo de 50 Hz, para una perturbación leve.....	79
Figura 35. $P_{st}$ en función del número de clases, frecuencia de muestreo de 1 kHz, para una perturbación leve. ....	79
Figura 36. $P_{st}$ en función de la frecuencia de muestreo para 64 clases para perturbaciones severas. ....	80
Figura 37. $P_{st}$ en función de la frecuencia de muestreo para 4096 clases para perturbaciones severas. ....	81
Figura 38. $P_{st}$ en función de la frecuencia de muestreo para 64 clases para perturbaciones leves.....	81
Figura 39. Clasificación de huecos de tensión según ESKOM Sur África.....	82
Figura 40. $P_{st}$ en función de la duración de huecos de tensión, hasta 3 s.....	83
Figura 41. $P_{st}$ en función de la duración del hueco de tensión, hasta 60 s.....	84
Figura 42. $P_{st}$ en función de la duración de un hueco de tensión de 0 p.u.....	84
Figura 43. $P_{st}$ en función de la duración de un hueco de tensión de 0,9 p.u. .	85
Figura 44. $P_{st}$ en función de la duración de un hueco de tensión de 0,4 p.u. .	85
Figura 45. Comparación huecos de tensión de 0,9 y 0,4 p.u. ....	86
Figura 46. Variación de la regulación de tensión caso 1.....	87
Figura 47. Variación de la regulación de tensión caso 2.....	88
Figura 48. Variación de la regulación de tensión caso 3.....	88
Figura 49. $P_{st}$ ante interarmónicos y armónicos para diferentes magnitudes (en % de la fundamental). ....	92

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores indicativos para los parámetros en una lámpara a 120V/60Hz. .....	25
Tabla 2. Comparación de los diagramas funcionales de los medidores. ....	37
Tabla 3. Especificaciones medidores. ....	39
Tabla 4. Especificaciones de ensayo para el clasificador del medidor de <i>flicker</i> . .....	40
Tabla 5. Resultados prueba I.....	41
Tabla 6. Resultados de $P_{st}$ prueba II, $f_m=0,917$ Hz.....	42
Tabla 7. Resultados de $P_{st}$ prueba II, $f_m=0,917$ Hz dividiendo en $\kappa_i$ . ....	42
Tabla 8. Resultados de $P_{st}$ prueba II, $f_m=13,5$ Hz. ....	43
Tabla 9. Resultados de $P_{st}$ prueba II, $f_m=13,5$ Hz dividiendo en $\kappa_i$ . ....	43
Tabla 10. Resultados de $P_{st}$ prueba III, $f_m=1,0$ Hz. ....	45
Tabla 11. Resultados de $P_{st}$ prueba III, $f_m=1,0$ Hz dividiendo en $\kappa_i$ . ....	45
Tabla 12. Resultados de $P_{st}$ prueba III, $f_m=8,8$ Hz. ....	46
Tabla 13. Resultados de $P_{st}$ prueba III, $f_m=8,8$ Hz dividiendo en $\kappa_i$ . ....	46
Tabla 14. Cambios en los valores eficaces de tensión.....	47
Tabla 15. $P_{st}$ ante huecos y elevaciones en la señal de tensión. ....	48
Tabla 16. $P_{st}$ cambios en la frecuencia fundamental caso 1. ....	50
Tabla 17. Cambios en la frecuencia fundamental caso 2. ....	50
Tabla 18. Resultados de $P_{st}$ prueba I implementación digital. ....	51
Tabla 19. Resultados de $P_{st}$ prueba II, $f_m=0,917$ Hz implementación digital..	51
Tabla 20. Resultados de $P_{st}$ prueba II, $f_m=13,5$ Hz implementación digital....	52
Tabla 21. Resultados de $P_{st}$ prueba III, $f_m=1,0$ Hz implementación digital. ....	52
Tabla 22. Resultados de $P_{st}$ prueba III, $f_m=8,8$ Hz, implementación digital. ...	52
Tabla 23. Magnitud y duración de los huecos y picos de tensión. ....	55
Tabla 24. $P_{st}$ ante variaciones en la magnitud de eventos de tensión.....	56
Tabla 25. $P_{st}$ ante variaciones en la duración de eventos de tensión. ....	57
Tabla 26. Comparación valores de $P_{st}$ . ....	60
Tabla 27. Variación del número de eventos caso 1. ....	68
Tabla 28. Variación del número de eventos caso 2A.....	69
Tabla 29. Variación del número de eventos caso 2B.....	69
Tabla 30. Respuesta ante interrupciones caso 1. ....	71
Tabla 31. Respuesta ante interrupciones caso 2. ....	72
Tabla 32. Respuesta ante interrupciones caso 3. ....	72
Tabla 33. Respuesta ante interrupciones caso 4. ....	73
Tabla 34. Características del transitorio. ....	74
Tabla 35. $P_{st}$ para un transitorio de 5 kHz y 4 p.u, variando su duración. ....	75
Tabla 36. $P_{st}$ para un transitorio de 50 ms, variando su frecuencia y magnitud. .....	75

Tabla 37. Clasificación de huecos de tensión según Eskom Sur África. .... 82

Tabla 38.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 1, 64 clases. 89

Tabla 39.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 1, 4096 clases.  
..... 89

Tabla 40.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 2, 64 clases. 90

Tabla 41.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 2, 4096 clases.  
..... 90

Tabla 42.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 3, 64 clases. 90

Tabla 43.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 3, 4096 clases.  
..... 90

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE LOS ALGORITMOS DE MEDICIÓN DE FLICKER CONSIDERANDO LOS ESTÁNDARES INTERNACIONALES\*

**AUTORES:** GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ, Tania Esperanza y MUÑOZ VARGAS, Dagoberto\*\*

**Palabras claves:** Algoritmo, *flicker*, IEC 61000-4-15, medición, perturbaciones,  $P_{st}$ .

La adopción del  $P_{st}$  por parte de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) como indicador de la calidad de la onda de tensión y la diferencia entre respuestas de diferentes medidores de flicker, ante una misma perturbación, identificadas a través de varias investigaciones realizadas en diferentes países, hacen necesario el desarrollo de este proyecto, a través del cual se analiza la respuesta de diferentes algoritmos de medidores de flicker, que cumplan con lo establecido en la norma IEC 61000-4-15, ante diferentes perturbaciones de la señal de tensión.

En esta tesis de pregrado se describen y se simulan una serie de pruebas en la plataforma Simulink de Matlab, permitiendo determinar los parámetros responsables de la diferencia entre respuestas de diferentes medidores de flicker que cumplen con el estándar IEC 61000-4-15, ante una misma perturbación de tensión, así como también, el comportamiento del  $P_{st}$  para diferentes perturbaciones de tensión como huecos (caídas), elevaciones, interrupciones, transitorios, armónicos, y así como para variaciones en estado estable (regulación de tensión).

Al final de este trabajo se presentan las conclusiones, recomendaciones y futuros desarrollos, con lo cual se deja claro que el parámetro responsable de la diferencia entre respuestas de diferentes medidores de flicker es el número de clases utilizado en el proceso estadístico y por tal motivo debe ser normalizado si la CREG decide mantenerlo como un indicador de la calidad de la tensión en los sistemas eléctricos en Colombia.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Profesor Gabriel Ordóñez Plata, Phd.

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF FLICKERMETER ALGORITHMS CONSIDERING THE INTERNATIONAL STANDARDS \*

**AUTHORS:** GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ, Tania Esperanza y MUÑOZ VARGAS, Dagoberto\*\*

**Keywords:** Algorithm, flicker, IEC 61000-4-15, measurement, disturbs,  $P_{st}$ .

The adoption of the  $P_{st}$  for the Commission of Energy and Gas Regulation (CREG) as an indicator voltage quality, and the identification, through several investigations made for several countries, of the difference between responses to same voltage input of different flicker meters, done necessary the development this project. It presents the analysis of the response to several voltage signal perturbations of different flicker meters, that meet the performance tests defined in IEC 61000-4-15, .

In this degree project is describing and simulating a string of tests in the Simulink platform of Matlab. It allows to determine, the parameters responsible for difference responses of different flicker meters to same voltage input, and the behavior of  $P_{st}$  for different voltage perturbations as sags, swells, interruptions, transitories, harmonics, and variations in steady state (voltage regulation).

In the end of this work is presenting the conclusions, recommendations and future developments, which make clear that the classes number used in the statistical process is the parameter responsible that different flicker meters have different responses to same voltage input, and if the CREG decides keep the  $P_{st}$  as indicator of voltage quality in the electric systems in Colombia, the classes number has to be normalized.

---

\* Degree Project.

\*\* Faculty of Engineering Physic -Mechanicals, School of Engineering Electrical Electronics and Telecommunications. Director: Phd. Eng. Gabriel Ordóñez Plata.

## INTRODUCCIÓN

El *flicker* es una de las posibles perturbaciones de la señal de tensión, causada por disturbios introducidos en la generación, transmisión o distribución de la energía eléctrica, debido típicamente a la conexión de grandes cargas fluctuantes de potencias activa y reactiva. Estas variaciones originan la oscilación de las fuentes de luz (titilación) que pueden causar cansancio fisiológico significativo, malestar físico y psicológico, e incluso efectos patológicos para los seres humanos, así como problemas con la estabilidad de dispositivos eléctricos y de circuitos electrónicos<sup>1</sup>.

Los dispositivos desarrollados para la medición de esta perturbación de tensión fueron diseñados para detectar las fluctuaciones de tensión debidas a la modulación del valor eficaz y su procesamiento está basado en establecer la impresión visual de un observador por medio del indicador de perceptibilidad a corto plazo  $P_{st}$  y a largo plazo  $P_{lt}$ . La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en el estándar IEC 61000-4-15 normalizó un medidor de *flicker* que incorpora curvas de ponderación que representan la respuesta del ojo humano a variaciones en la iluminación producidas en un filamento de una lámpara incandescente de doble rollo, 60 W, 230 V, 50 Hz. La última actualización del 2003 hace los ajustes necesarios para su aplicación en lámparas de 60 W, 120 V, 60 Hz.

En Colombia, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) establece en las resoluciones 024 del 2005<sup>2</sup> y 016 de 2007<sup>3</sup> que el indicador de medición del

---

<sup>1</sup> HANZELKA, Zbigniew y BIEN, Andrzej. Power Quality Application Guide: Voltage Disturbances, Flicker Measurement. Poland: LPQI, 2005. Leonardo Power Quality Initiative (LPQI), AGH University of Science and Technology. p. 1.

<sup>2</sup> COMISIÓN DE REGULACION DE ENERGIA Y GAS CREG. Resolución 024 de 2005. Artículo 1º, Definiciones. Colombia: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2005. p. 3.

*flicker*  $P_{st}$  se utilice para establecer la calidad de la tensión de suministro. Sin embargo, en investigaciones realizadas en otros países<sup>4</sup> se evidencia que medidores de *flicker* diseñados de acuerdo con el estándar IEC 61000-4-15 muestran distintos valores de  $P_{st}$  ante una misma perturbación de la señal de tensión haciéndose necesario realizar un estudio donde se consideren diferentes perturbaciones en la onda de tensión para obtener los valores de  $P_{st}$  de diferentes algoritmos de medición de *flicker* que cumplan con el estándar IEC 61000-4-15, y poder establecer la conveniencia o no de que el  $P_{st}$  sea utilizado como un índice para valorar la calidad de la onda de tensión ante diferentes perturbaciones.

En este proyecto se realiza un análisis matemático del algoritmo de medición propuesto por el estándar IEC 61000-4-15, se modelan tres medidores por medio de la plataforma Simulink de Matlab para verificar que cumplen las especificaciones de diseño establecidas en el estándar y utilizando esta misma herramienta computacional se modela el algoritmo normalizado sobre el que se hacen una serie de pruebas para determinar el impacto que sobre el valor del  $P_{st}$  tienen los cambios en el número de clases y la frecuencia de muestreo del proceso estadístico, así como también, obtener el comportamiento del  $P_{st}$  para diferentes perturbaciones de tensión como huecos (caídas), elevaciones, interrupciones y transitorios de tensión; y para variaciones en estado estable como la regulación de tensión y la distorsión armónica.

---

<sup>3</sup> COMISIÓN DE REGULACION DE ENERGIA Y GAS CREG. Resolución 016 de 2007. Artículo 2º, Modificación del Artículo 3 de la Resolución CREG-024 de 2005. Colombia: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2007. p. 4.

<sup>4</sup> BIEN, Andrzej; HANZELKA, Zbigniew; STANKIEEWICZ, Antoni y SZLOSEK, Marcin. Comparative Tests of Flickermeters. Poland: University of Mining and Metallurgy, Dept. of Electrical Engineering, 2002. p. 1.

## 1. FLICKER

En este capítulo se presenta una introducción al fenómeno de *flicker*, su definición, caracterización y medición. Seguidamente se exponen dos técnicas para realizar una evaluación de *flicker* en un amplio margen de condiciones como son la interpolación lineal y no lineal.

Finalmente se describen los algoritmos de los medidores que se modelan en el segundo capítulo utilizando la plataforma Simulink de Matlab.

### 1.1 DEFINICIÓN

El *flicker* se define por norma como la impresión de inestabilidad de la sensación visual causada por un estímulo luminoso, cuya luminosidad o distribución espectral fluctúa en el tiempo<sup>5</sup>. Eléctricamente se define como la variación del valor eficaz o de la amplitud de la tensión en un rango menor al 10% del valor nominal. Esta variación de la amplitud de la tensión produce la fluctuación del flujo luminoso en lámparas (ver figura 1), induciendo a su vez la impresión de inestabilidad en la sensación visual<sup>6</sup>.

El nivel de *flicker* depende de la amplitud, frecuencia y duración de la fluctuación de tensión. Hay que reseñar que se trata de fluctuaciones cuya amplitud no supera la mayoría de las veces el  $\pm 10\%$  del valor nominal razón por la cual muchos equipos no se ven afectados por ellas, no así algunos receptores, como: lámparas incandescentes, monitores y receptores de

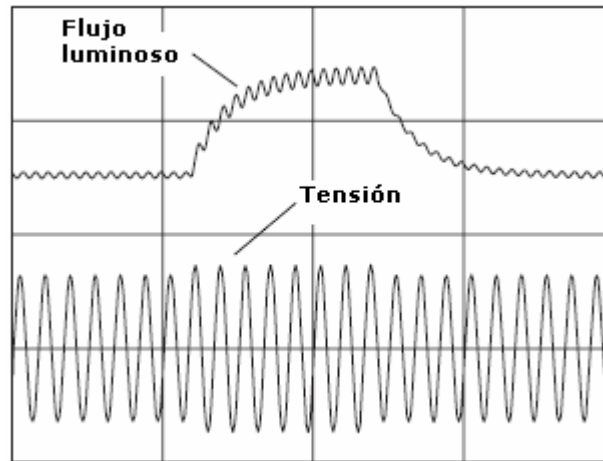
---

<sup>5</sup> COMISIÓN DE REGULACION DE ENERGIA Y GAS CREG. Resolución 024 de 2005. Artículo 1º, Definiciones. Colombia: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2005. p. 3.

<sup>6</sup> LEÓN, José Gregorio y ALVES BARACIARTE, Roberto. Tópico Especial Calidad de Servicio Eléctrico: Flicker. Caracas, 2005, 34 p. Universidad Simón Bolívar. Coordinación de Estudios de Postgrado. Especialización en Instalaciones Eléctricas. Calidad del Servicio Eléctrico.

televisión, que presentan una especial sensibilidad a dichas fluctuaciones de la tensión de alimentación. Existen, sin embargo, otras cargas como los tubos fluorescentes sin balastro electrónico, que presentan un nivel de sensibilidad menor.

Figura 1. Cambio en el flujo luminoso resultante de la variación de la tensión.



Fuente: *Power Quality Application Guide: Voltage Disturbances, Flicker Measurement*.

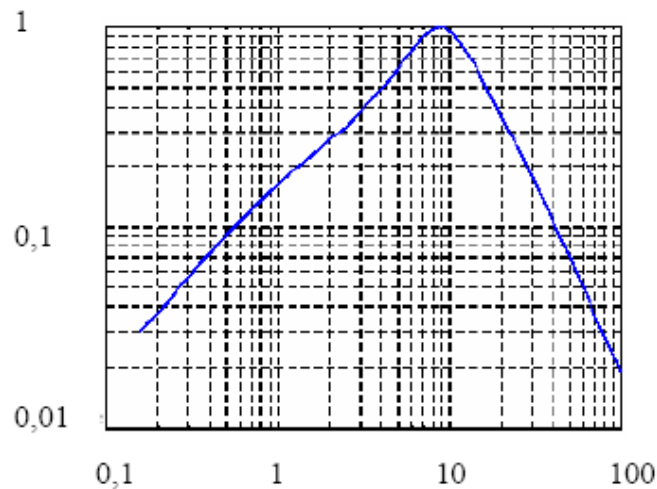
La frecuencia de *flicker* es detectada por el sistema humano ojo-cerebro, cuando está comprendida en un rango de frecuencias que se extiende desde 0,5 Hz hasta aproximadamente 25 Hz, con una sensibilidad que es función de la frecuencia y que presenta un máximo, en 8,8 Hz. En algunas ocasiones el rango de frecuencias de *flicker* apreciables puede llegar hasta los 30 Hz, en función de las condiciones de iluminación del entorno. En la figura 2 se muestra la curva de sensibilidad<sup>7</sup>.

Las frecuencias del *flicker* muy bajas (por debajo de 0,5 Hz) no son molestas porque el sistema ojo-cerebro es perfectamente capaz de separar los destellos, pero a partir de una cierta frecuencia, que se conoce como frecuencia de

<sup>7</sup> DÍEZ, G., EGUÍLUZ, L., MAÑANA, M., LAVANDERO, J. y ORTIZ, A. Revisión crítica del umbral de perceptibilidad del flicker. En: REUNIÓN DE GRUPOS DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA ELÉCTRICA .(12º: 2002: Córdoba). Córdoba: Universidad de Cantabria, 2002. p.4.

fusión, aparece el fenómeno de *flicker* causando una sensación desagradable a quien lo percibe. Superada una determinada frecuencia de *flicker*, que no tiene un valor fijo, sino que depende de las condiciones ambientales de iluminación, y que está en el entorno de los 30 Hz, la sensación de *flicker* desaparece y el sistema ojo-cerebro percibe una luz continua<sup>8</sup>.

Figura 2. Curva de sensibilidad del sistema ojo-cerebro en función de la frecuencia.



Fuente: Revisión crítica del umbral de perceptibilidad del *flicker*.

## 1.2 MEDICIÓN DE FLICKER

Inicialmente, los diseños del instrumento de medición fueron basados en la observación del flujo luminoso. El paso siguiente era desarrollar un modelo de la reacción humana bajo la forma de molestia a la fluctuación del flujo luminoso. El modelo fue basado en un bulbo de tungsteno 60 W, 230 V, 50 Hz, que era la fuente de luz de uso general en Europa en aquel momento.

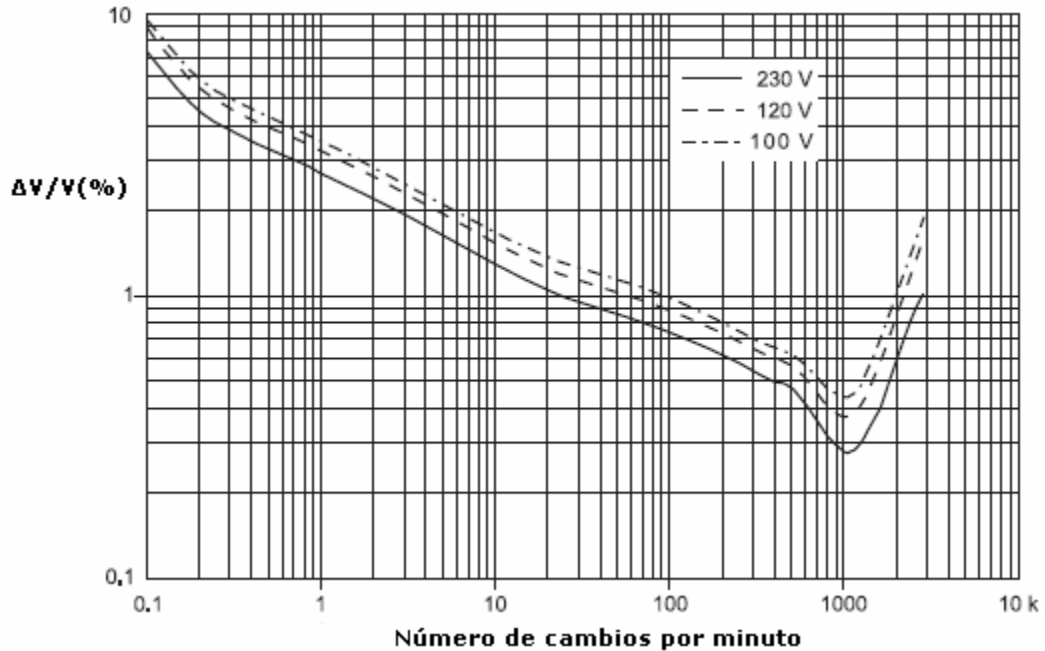
En la figura 3 se muestra la curva límite de la molestia de *flicker*, la amplitud de las fluctuaciones de tensión (eje y) en función de la frecuencia de repetición

---

<sup>8</sup> Díez, Op. Cit., p. 2.

(eje x). Donde la magnitud y la frecuencia de los cambios por encima de la curva indican que es la zona donde un observador humano percibe la titilación de la lámpara incandescente, mientras que por debajo de la curva esta perturbación es imperceptible<sup>9</sup>.

Figura 3. Curva límite de la molestia del *flicker*.



Fuente: *Power Quality Application Guide: Voltage Disturbances, Flicker Measurement*.

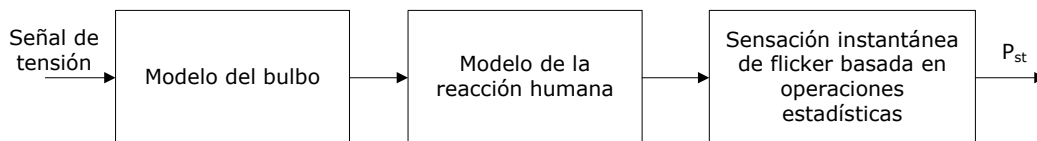
La Unión Internacional de Electrotecnia (UIE), elaboró un criterio de medidor de *flicker*, que más tarde fue adoptado por la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI); se derivan dos resultados de la medida, uno para el efecto a corto plazo del *flicker*,  $P_{st}$ , medido en un intervalo de diez minutos, y uno a largo plazo, el  $P_{lt}$ , que es un promedio del balanceo de valores de  $P_{st}$  sobre un intervalo de tiempo de dos horas. Las especificaciones funcionales y de diseño del medidor de *flicker*, quedan recogidas en el estándar IEC 61000-4-15; la última actualización del 2003 hace los ajustes de las curvas de ponderación que representan la respuesta del ojo humano a variaciones en la iluminación

<sup>9</sup> HANZELKA, Zbigniew y BIEN, Andrzej. *Power Quality Application Guide: Voltage Disturbances, Flicker Measurement*. p. 2.

producidas en un filamento de una lámpara incandescente de doble rollo de 60 W, 120 V, 60 Hz.

**1.2.1 Medida de  $P_{st}$ .** El diagrama de bloques del instrumento de medida de *flicker* propuesto por la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC) se muestra en la figura 4. La medida de la fluctuación de tensión es procesada usando un modelo de flujo luminoso contra la característica de tensión del bulbo de tungsteno, y un modelo de la reacción humana ante fluctuaciones del flujo luminoso. Esto da una medida instantánea de *flicker*. Sin embargo, cada persona reacciona de forma diferente a las variaciones del flujo luminoso, así que el valor del índice  $P_{st}$  se obtiene de un modelo estadístico basado en un trabajo experimental con un grupo grande de individuos<sup>10</sup>.

Figura 4. Operaciones para determinar la intensidad de *flicker*  $P_{st}$



Fuente: Autores del proyecto.

En la figura 5 se muestra detalladamente el diagrama de bloques del medidor de *flicker* propuesto por el estándar IEC 61000-4-15. El primer bloque contiene un generador de señal para comprobar la calibración del medidor y un circuito adaptador de tensión que escala el valor eficaz medio de la tensión de entrada a un nivel de referencia interno como se puede ver en la figura 6. El valor de la tensión referenciada matemáticamente es:

$$V_1(t) = \frac{V(t)}{V_{rms}} = \frac{V(t)}{\sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\tau} V^2(t)}} \quad (1)$$

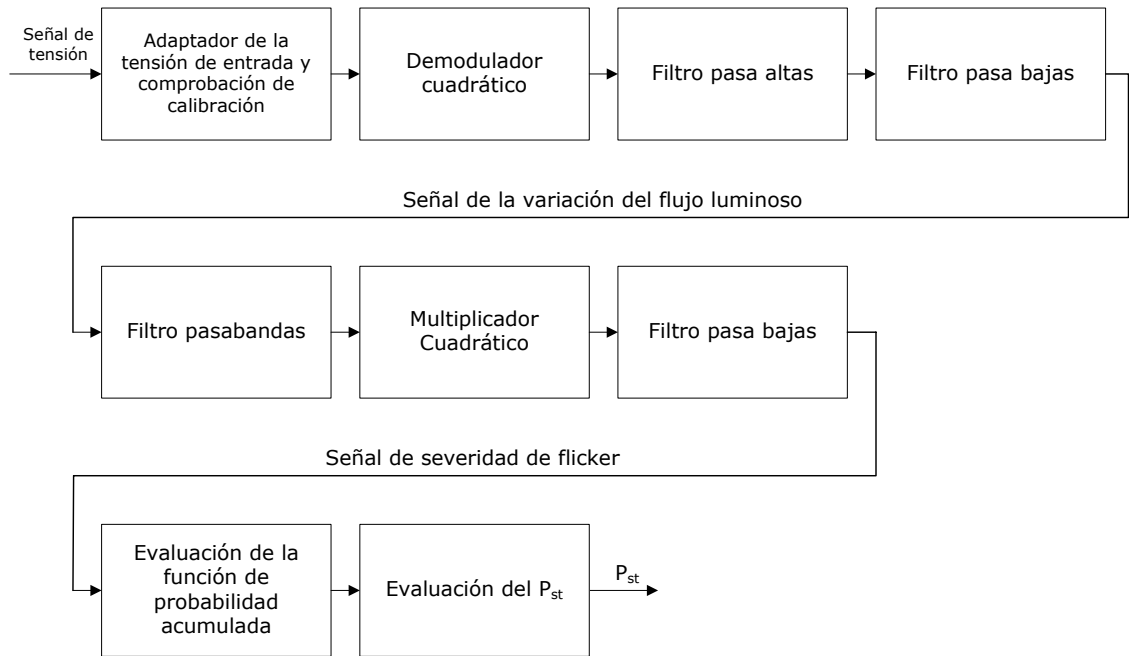
Siendo:

$$\tau = 1 \text{ min}$$

<sup>10</sup> HANZELKA, Op. cit., p. 3-5.

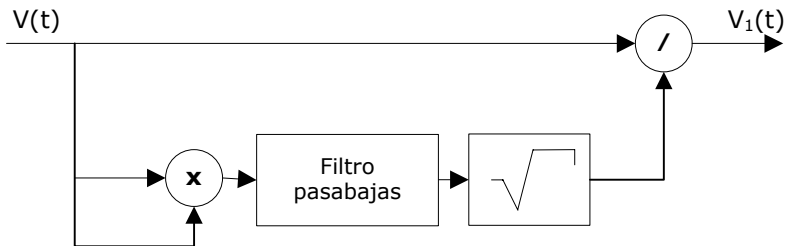
De acuerdo a la figura 6 el filtro pasa bajos con frecuencia de corte de 58,3 mHz, determina el valor medio del cuadrado de la señal de tensión de entrada; luego al aplicar raíz cuadrada se obtiene el valor eficaz de la tensión que se utiliza para escalar la entrada, con el objetivo de hacer las medidas de flicker independientes del nivel de tensión y expresarlas en relación porcentual.

Figura 5. Estructura del medidor de flicker propuesto por la IEC 61000-4-15.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 6. Adaptador de la tensión de entrada.



Fuente: Autores del proyecto.

El demodulador cuadrático, tiene el propósito de reestablecer la fluctuación de tensión, elevando al cuadrado la tensión de entrada escalada al nivel de referencia y, por tanto, simulando el comportamiento de la fluctuación en una lámpara incandescente. El margen de funcionamiento de entrada del demodulador debe ser capaz de aceptar hasta el 150% del valor de referencia.

El filtro pasa altas de primer orden elimina las componentes de corriente continua debido a que solo se miden las variaciones de flujo. Con una frecuencia de corte de 3 dB a alrededor de 0,05 Hz tiene una respuesta en frecuencia como se muestra en la figura 7 y su función de transferencia (transformada de Laplace) es:

$$F(s) = \frac{s}{s + 0,3142} \quad (2)$$

El filtro paso bajo Butterworth de sexto orden con una frecuencia de corte de 42 Hz a 3 dB se utiliza para eliminar el rizado a frecuencia doble de la red de la salida del demodulador (ver figura 7) y tiene la siguiente función de transferencia:

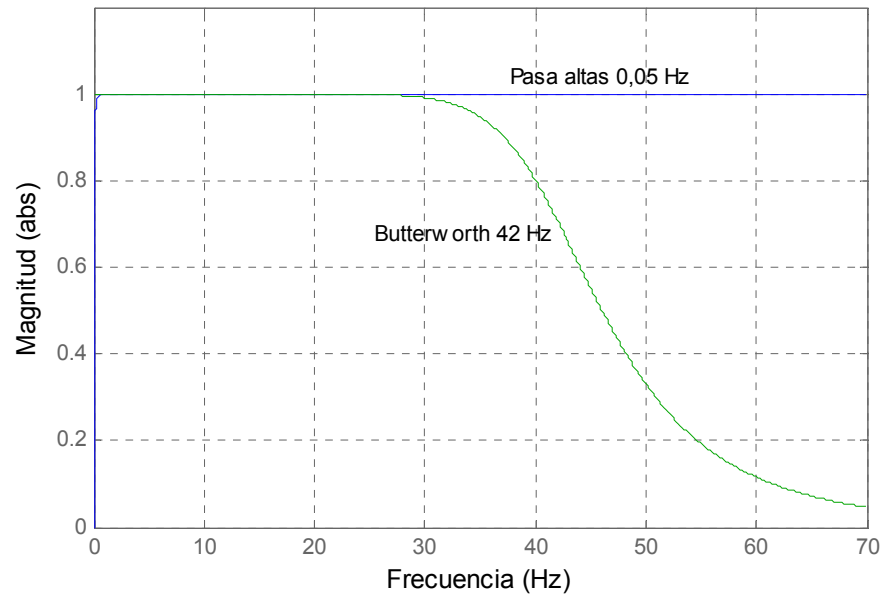
$$F(s) = \frac{3,37 \times 10^{14}}{(s^2 + 509,80s + 69639,93) \cdot (s^2 + 373,20s + 69639,93) \cdot (s^2 + 136,60s + 69639,93)} \quad (3)$$

En la segunda fila de la figura 5 se 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 la siguiente función de transferencia:

$$F(s) = \frac{\kappa \omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \times \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \quad (4)$$

Los valores indicativos para los parámetros están en la tabla 1 y en la figura 8 se muestra su respuesta en frecuencia. 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.

Figura 7. Respuesta en frecuencia filtro pasa altas y pasa bajas Butterworth.



Fuente: Autores del proyecto.

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

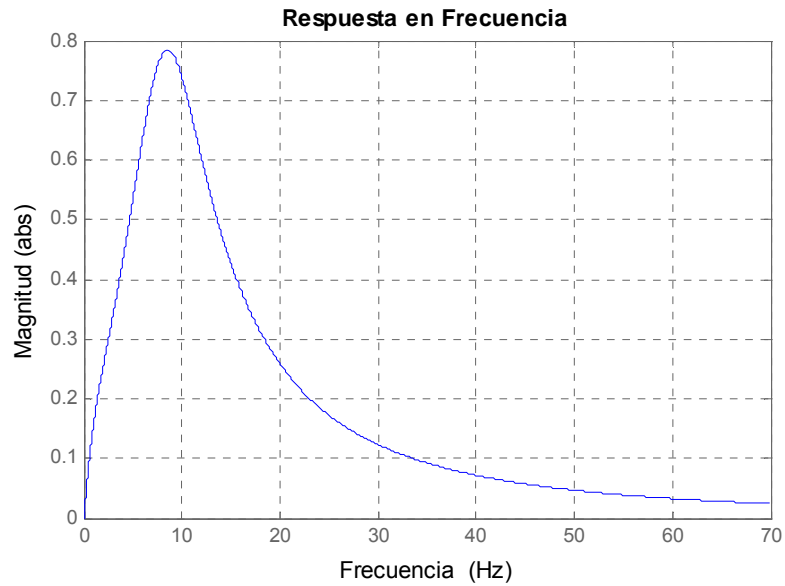
Variable	Lámpara 120 V / 60 Hz
$\kappa$	1,6357
$\lambda$	$2 \cdot \pi \cdot 4,167375$
$\omega_1$	$2 \cdot \pi \cdot 9,077169$
$\omega_2$	$2 \cdot \pi \cdot 2,939902$
$\omega_3$	$2 \cdot \pi \cdot 1,394468$
$\omega_4$	$2 \cdot \pi \cdot 17,31512$

Fuente: "Standard International 61000-4-15"

El convertidor cuadrático eleva al cuadrado la señal de *flicker* ponderada para simular la percepción no lineal del sistema ojo-cerebro y deberá tener unos

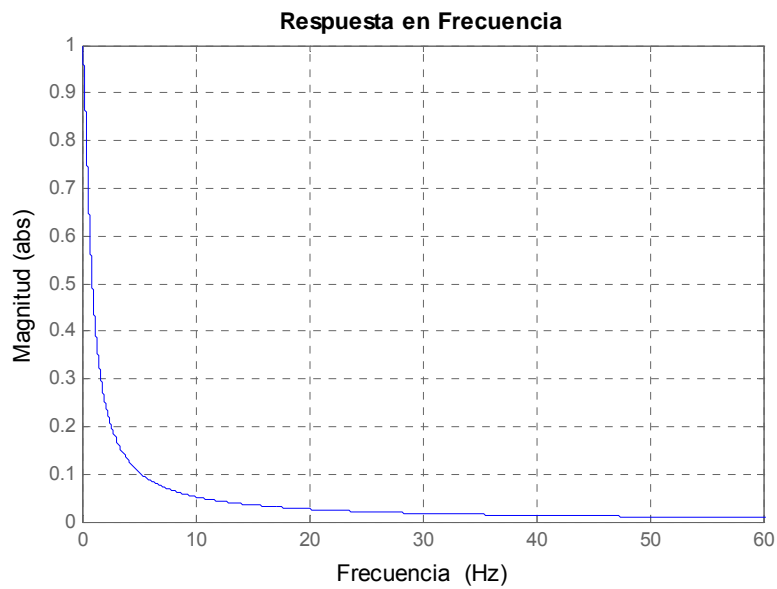
márgenes de funcionamiento de entrada-salida suficientes para situar el nivel admisible de *flicker* a 8,8 Hz.

Figura 8. Filtro pasa bandas. Modelo reacción ojo-cerebro.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 9. Respuesta en frecuencia filtro pasa bajos de primer orden.



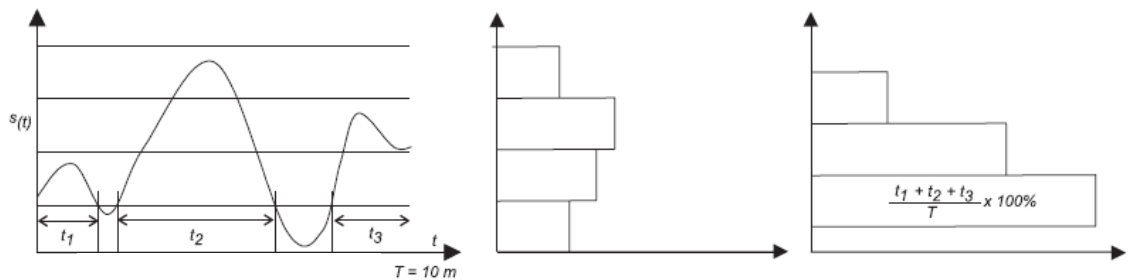
Fuente: Autores del proyecto.

El segundo filtro pasa bajas (ver figura 9) desplaza la media de la señal para simular el efecto de almacenamiento en el cerebro y deberá tener la función de transferencia de un filtro resistivo/capacitivo de primer orden de paso bajo con una constante de tiempo de 300 ms de la siguiente forma:

$$F(s) = \frac{1}{0,3s + 1} \quad (5)$$

La tercera fila de la figura 5 corresponde al procesamiento estadístico digital en tiempo real, éste se muestra a modo de ejemplo en la figura 10. Durante un intervalo de observación de 10 minutos la señal de nivel de *flicker* se divide en un determinado número de clases y se muestrea a una frecuencia constante. Una vez clasificada la señal se obtiene la función densidad de probabilidad de los niveles de *flicker*, que representa el porcentaje de permanencia de la señal en una clase; de ésta se obtiene la función de probabilidad acumulada que suministra información del porcentaje de tiempo para el cual la señal de *flicker* ha excedido un determinado nivel.

Figura 10. Proceso de evaluación de la función de probabilidad acumulada.



Fuente: *Power Quality Application Guide: Voltage Disturbances, Flicker Measurement*.

Partiendo de la función de probabilidad acumulada calculada según el estándar IEC 61000-4-15 con un mínimo de 6 bits de resolución, 64 clases, frecuencia

de muestreo de 50 muestras por segundo y un tiempo de observación de 10 minutos; se obtiene el  $P_{st}$  por medio de la siguiente ecuación:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_{1s} + 0,0657P_{3s} + 0,28P_{10s} + 0,08P_{50s}} \quad (6)$$

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 período de observación. El sufijo *s* en la fórmula indica que debería usarse el valor ponderado; los cuales se obtienen usando las ecuaciones siguientes:

$$P_{50s} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3 \quad (7)$$

$$P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5 \quad (8)$$

$$P_{3s} = (P_{2,2} + P_3 + P_4)/3 \quad (9)$$

$$P_{1s} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})/3 \quad (10)$$

### 1.3 TÉCNICAS PARA MEJORAR LA PRECISIÓN DE LA EVALUACIÓN DE FLICKER

Hay varias técnicas para obtener una evaluación de *flicker* adecuada en un amplio margen de condiciones. Algunas de estas técnicas se dan a continuación. Cualquiera de ellas puede usarse sola o en combinación con las demás<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. CEI/IEC 61000-4-15 International Standard, Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 5, Performance testing. Switzerland: IEC Central Office, 2003. p. 26.

En la mayoría de los casos los valores de puntos de percentil particulares,  $P_k$ , requeridos para calcular  $P_{st}$  no corresponderán con una única clase y deberán deducirse mediante interpolación (o extrapolación) de las clases disponibles<sup>12</sup>.

**1.3.1 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  $(n-1) \cdot (F_s/N)$ , que es superado por el  $y_{n-1}$  por ciento de las muestras y  $n \cdot (F_s/N)$ , 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:

$$P_k = \frac{F_s}{N} \left( n - \frac{y_k - y_n}{y_{n-1} - y_n} \right) = \frac{F_s}{N} d_k \quad (11)$$

$$d_k = n - \frac{y_k - y_n}{y_{n-1} - y_n}$$

Remplazando la ecuación (11) en la ecuación (6) se obtiene la siguiente expresión para el cálculo del  $P_{st}$ :

$$P_{st} = \left( \frac{F_s}{N} \right)^{1/2} \sqrt{0,0314 d_{0,1} + 0,0525 d_{1s} + 0,0657 d_{3s} + 0,28 d_{10s} + 0,08 d_{50s}} \quad (12)$$

Siendo:

$$d_{50s} = (d_{30} + d_{50} + d_{80})/3 \quad (13)$$

$$d_{10s} = (d_6 + d_8 + d_{10} + d_{13} + d_{17})/5 \quad (14)$$

$$d_{3s} = (d_{2,2} + d_3 + d_4)/3 \quad (15)$$

$$d_{1s} = (d_{0,7} + d_1 + d_{1,5})/3 \quad (16)$$

---

<sup>12</sup> Ibid. p. 26.

Por consiguiente:

$$P_{st} = A_N D_N \quad (17)$$

Donde:

$$A_N = \left( \frac{F_s}{N} \right)^{1/2} \quad (18)$$

$$D_N = \sqrt{0,0314 d_{0,1} + 0,0525 d_{1,s} + 0,0657 d_{3,s} + 0,28 d_{10,s} + 0,08 d_{50,s}} \quad (19)$$

**1.3.2 Interpolación no lineal.** Cuando la incertidumbre obtenida con la interpolación lineal no es adecuada, 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)<sup>13</sup>. El nivel de CPF se obtiene de la relación:

$$P_k = \frac{F_s}{N} \left( n - 1 + \frac{1}{2H_2} (H_1 - \sqrt{H_3}) \right) \quad (20)$$

$$P_k = \frac{F_s}{N} d_k$$

Donde:

$$d_k = n - 1 + \frac{1}{2H_2} (H_1 - \sqrt{H_3}) \quad (21)$$

$\frac{F_s}{N}$  es la amplitud de clase. Los factores  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$  son iguales a:

$$H_1 = \frac{3}{2} y_{n-1} - 2y_n + \frac{1}{2} y_{n+1} \quad (22)$$

$$H_2 = \frac{1}{2} y_{n-1} - y_n + \frac{1}{2} y_{n+1} \quad (23)$$

$$H_3 = H_1^2 - 4H_2(y_{n-1} - y_k) \quad (24)$$

---

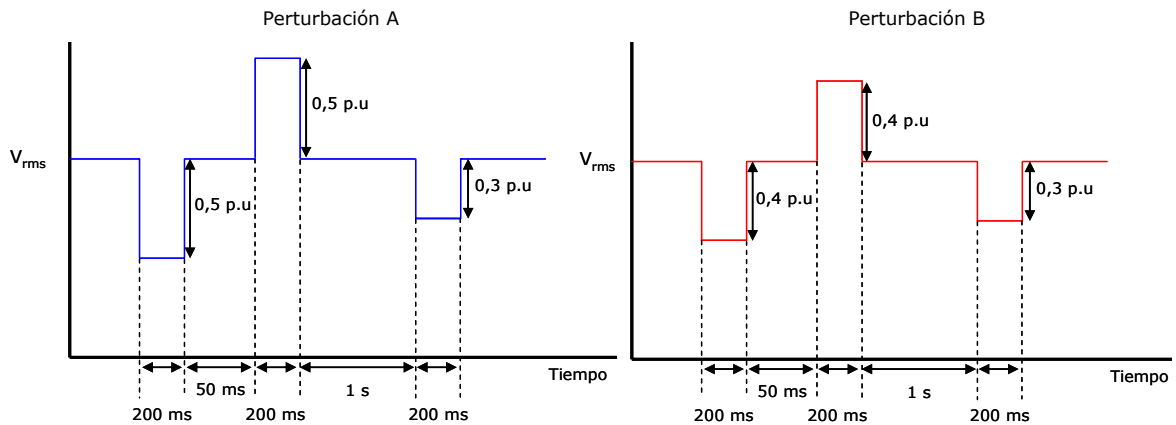
<sup>13</sup> Ibid. p. 26.

Siendo  $y_n$  la probabilidad en tanto por ciento correspondiente a la clase  $n$  y así sucesivamente.

Para el cálculo del  $P_{st}$  se utiliza la ecuación (17) con la diferencia que para el cálculo de  $d_k$  se utiliza la ecuación (21) en lugar de las ecuaciones (13-16).

**1.3.3 Efecto de la variación del número de clases sobre el valor del  $P_{st}$ .** Para observar el efecto que produce la variación del número de clases sobre el cálculo del  $P_{st}$  se obtiene la respuesta del medidor de *flicker* propuesto por el estándar IEC 61000-4-15 para las perturbaciones en la tensión eficaz de la figura 11.

Figura 11. Perturbaciones a la entrada del medidor de *flicker*.



Fuente: Autores del proyecto.

En la figura 12 se presenta las curvas de nivel de *flicker* instantáneo para las perturbaciones A y B, y sus respectivas curvas de  $P_{st}$  en función del número de clases. Según la ecuación 17 el valor de  $P_{st}$  depende de los factores  $A_N$  y  $D_N$ , los cuales son calculados por interpolación lineal y se muestran en la figura 13 en función del número de clases.

El incremento de la amplitud del nivel de *flicker* produce un incremento en el factor  $A_N$  así como también una insignificante disminución en el factor  $D_N$ . Esto se refleja en el valor del  $P_{st}$  como una mayor ponderación a los niveles de *flicker* con mayores amplitudes.

Figura 12. Nivel de *flicker* instantáneo y  $P_{st}$  en función del número de clases usando interpolación lineal.

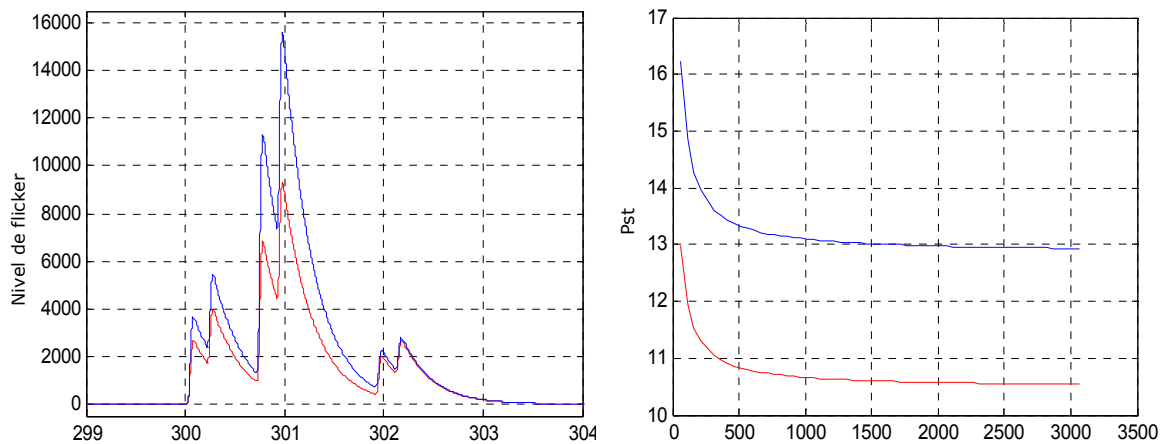
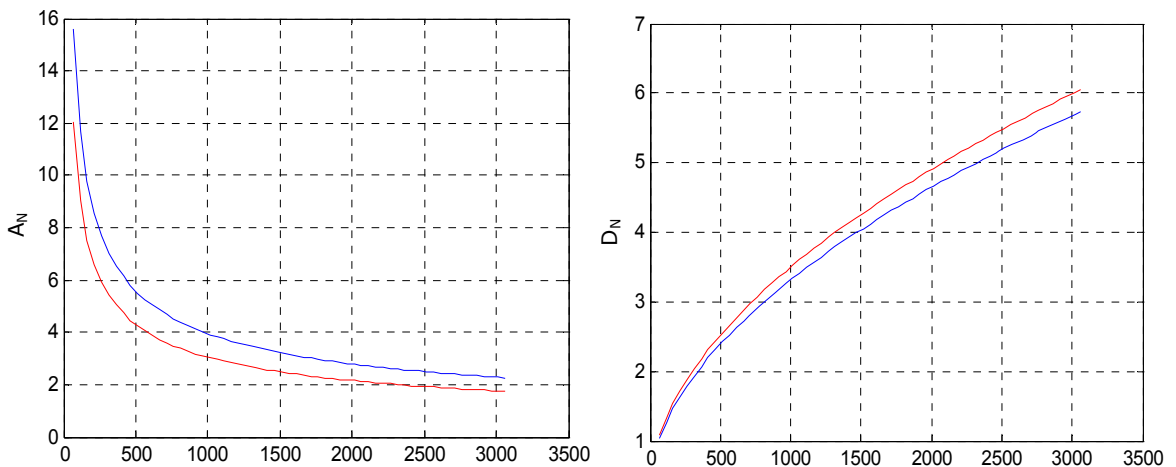


Figura 13. Factores  $A_N$  y  $D_N$  en función de número de clases usando interpolación lineal.



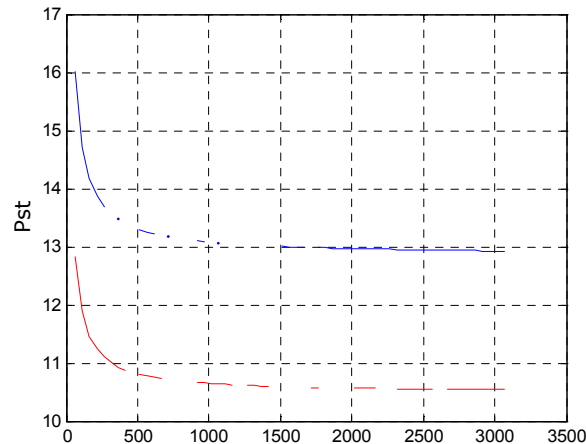
B

La razón de cambio del  $P_{st}$  con respecto al número de clases (ecuación 25) se obtiene derivando la ecuación 17. En esta expresión se visualiza que un aumento en la amplitud en el nivel de *flicker* ( $F_s$ ) produce un aumento en el factor  $A_N$  y por consiguiente un mayor incremento negativo de la razón de cambio del  $P_{st}$  con respecto al número de clases. Es decir, grandes valores de  $P_{st}$  sufren grandes caídas al incrementarse el número de clases. Es importante notar que  $P_{st}$  decae exponencialmente con el aumento del número de clases (ver figura 12). Este comportamiento se puede corroborar con los resultados de las pruebas presentadas en la sección 4.1.1.

$$\frac{dP_{st}}{dN} = -\frac{1}{2} \left( \frac{F_s}{N} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{N} D_N + 2 \frac{dD_D}{dN} \right) \quad (25)$$

Utilizando interpolación no lineal se calculan las curvas de  $P_{st}$  en función del número de clases (ver figura 14) para las perturbaciones A y B presentadas en la figura 11. Para ciertos números de clase,  $H_2$  (ecuación 23) toma un valor de cero, haciendo indefinido el  $P_{st}$ .

Figura 14.  $P_{st}$  en función del número de clases interpolación no lineal.

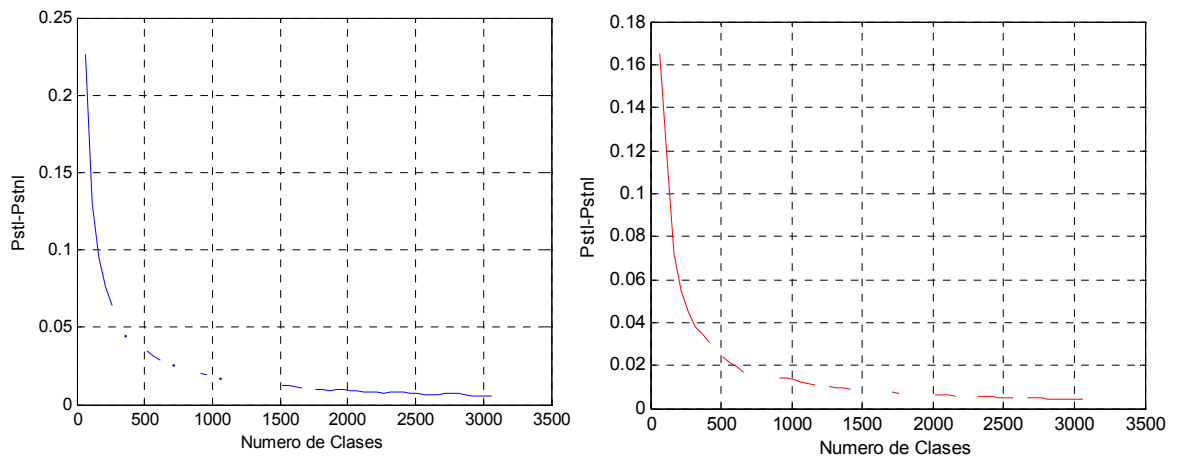


En la figura 15 se realiza una comparación entre los métodos de interpolación para cada nivel de *flicker*. La diferencia entre el valor del  $P_{st}$  obtenido a través de la interpolación lineal ( $P_{stl}$ ) y el valor del  $P_{st}$  calculado utilizando la interpolación no lineal ( $P_{stnl}$ ), depende tanto del número de clases utilizado en el proceso estadístico como de la máxima amplitud del nivel de *flicker* instantáneo. Esto es, a menor número de clases mayor será la diferencia entre valores de  $P_{st}$  obtenidos por diferentes técnicas de interpolación. Lo contrario sucede con el aumento en la amplitud de la señal de nivel de *flicker* instantáneo puesto que la diferencia se incrementa.

Debido a la mejora en la incertidumbre para el cálculo del  $P_{st}$ , la interpolación no lineal es más adecuada cuando el número de clases es bajo y las amplitudes son altas en el nivel de *flicker* instantáneo.

Aunque se utilice interpolación no lineal para el cálculo del  $P_{st}$ , el número de clases sigue siendo el parámetro determinante en el incremento de la diferencia entre resultados de diferentes medidores de *flicker* con diferentes valores en el número de clases.

Figura 15. Comparación entre interpolación lineal y no lineal.



## 1.4 MODELOS DE MEDIDORES DE FLICKER

Los algoritmos de medidores de *flicker* seleccionados para el análisis son: El Sistema de Análisis y Diagnóstico de la Calidad de la Potencia "SIDAQEE"<sup>14</sup>, un prototipo digital colombiano que se está desarrollando con la asesoría de la Universidad Industrial de Santander y que busca la certificación como analizador de la calidad de la potencia eléctrica denominado "Registrador de Eventos de Tensión RET1000T" y el algoritmo del medidor de *flicker* "MEF"<sup>15</sup>.

Los tres algoritmos cumplen el estándar IEC 61000-4-15 actualización 2003 que aplica a lámparas de 60 W, 120 V, 60 Hz y en general muestran una estructura del proceso de medición similar a la presentada en este estándar, aunque con algunas diferencias en la implementación de los bloques que la constituyen. La diferencia entre éstos radica en que algunos algoritmos digitalizan el proceso de medida, utilizando diferentes técnicas de transformación analógica-digital A/D.

SIDAQEE es un instrumento digital que utiliza la transformada bilineal con una frecuencia de muestreo de 1 804 Hz para transformar el diagrama de bloques analógico propuesto por el estándar IEC 61000-4-15 en un diagrama digital; El Registrador de Eventos de Tensión RET1000T utiliza el comando 'c2dm' de Matlab como método para la conversión de sistemas continuos en sistemas discretos asumiendo un retenedor de orden cero, con una frecuencia de muestreo de 1 200 Hz; y MEF usa un diagrama de bloques analógico igual al propuesto por el estándar IEC 61000-4-15.

---

<sup>14</sup> MEDEIROS C., BELCHIOR F., OLIVEIRA J. "A Proposal for UIE/IEC Flicker Measurement Using Digital Filters: Equipment Prototype and Validation". Brazil: Federal University of Uberlandia, 2004. p. 6.

<sup>15</sup> JASTKEVICH J., WASYNCZUK O. "A Method of Evaluating Flicker and Flicker-Reductions Strategies in Power Systems". USA: IEEE Transactions on Power Delivery, 1998. School of Electrical and Computer Engineering, Purdue University. p. 7.

En la tabla 2 se muestran las ecuaciones utilizadas en los tres medidores de *flicker* arriba mencionados mostrando las similitudes y diferencias entre ellos.

Los medidores de *flicker*, SIDAQEE y MEF no especifican el método utilizado en el cálculo de los percentiles ni el valor de los parámetros requeridos en el proceso estadístico, como el número de clases y la frecuencia de muestreo.

Tabla 2. Comparación de los diagramas funcionales de los medidores.

PARÁMETRO	SIDAQEE	RET1000T	MEF
<b>Adaptador de entrada</b>	$V_1(t) = \frac{V(t)}{V_{rms}} = \frac{V(t)}{\sqrt{\frac{1}{T_{min}} \int_{T_{min}} V^2(t) dt}}$		
<b>Demodulador cuadrático</b>	Descripción figura 6		
<b>Filtro pasa altos 1er orden</b>	$\frac{9,9991e^{-1}(1-z^{-1})}{1-9,9983e^{-1}z^{-1}}$	$\frac{1-z^{-1}}{1-0,9997 \cdot z^{-1}}$	$\frac{s}{s+0,3142}$
<b>Filtro Butterworth 6to orden</b>	$\frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4} + a_5 z^{-5} + a_6 z^{-6}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4} + b_5 z^{-5} + b_6 z^{-6}}$	$\frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4} + a_5 z^{-5} + a_6 z^{-6}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4} + b_5 z^{-5} + b_6 z^{-6}}$	Ecuación (3)
	$a_0=1,154e-7$ $a_1=6,9926e-7$ $a_2=1,731e-6$ $a_3=2,309e-6$ $a_4=1,731e-6$ $a_5=6,926e-7$ $a_6=1,154e-7$	$b_0=1$ $b_1=-5,436$ $b_2=12,34$ $b_3=-14,96$ $b_4=10,22$ $b_5=-3,731$ $b_6=0,5685$	
<b>Filtro pasabandas</b>	$\frac{0,02548 \cdot (1-z^{-2}) \cdot (0,01392 + 0,1418e^{-3} \cdot z^{-1} - 0,01378 \cdot z^{-2})}{(1-1,9704 \cdot z^{-1} + 0,9714 \cdot z^{-2}) \cdot (1-1,9366 \cdot z^{-1} + 0,9369 \cdot z^{-2})}$	$\frac{0,01211 \cdot (z^{-1} - z^{-2})}{1-1,993 \cdot z^{-1} + 0,993 \cdot z^{-2}} \times \frac{0,007699 \cdot (z^{-1} - 0,9976 \cdot z^{-2})}{1-1,9847 \cdot z^{-1} + 0,9848 \cdot z^{-2}}$	Ecuación (4)
<b>Multiplicador cuadrático</b>	(Señal de flicker ponderada) <sup>2</sup>		
<b>Filtro basa bajos 1er orden</b>	$\frac{9,2302e^{-4} \cdot (1-z^{-1})}{1-9,9815e^{-1} \cdot z^{-1}}$	$\frac{11,5329 \cdot z^{-1}}{1-0,9996 \cdot z^{-1}}$	$\frac{1}{0,3 \cdot s + 1}$
<b>Proceso estadístico</b>	No especifica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interpolación lineal para el cálculo de percentiles.</li> <li>• Número de clases=64</li> <li>• Frecuencia de muestreo=1200 Hz</li> </ul>	No especifica.

## **2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MEDICIÓN DE FLICKER SEGÚN EL ESTÁNDAR IEC 61000-4-15**

La medida del *flicker* es, como se describió anteriormente, un proceso complejo. Diferentes medidores pueden producir resultados diferentes para una misma perturbación, por tanto, se deben hacer pruebas para validar que el diseño cumple las especificaciones del estándar IEC 61000-4-15, aplicando señales predeterminadas y supervisando la salida. Las señales de prueba son definidas en términos de la forma de onda de la modulación (sinusoidal o rectangular), la amplitud y frecuencia de modo que sean reproducibles y fiables.

El numeral quinto del estándar IEC 61000-4-15 propone someter a cada medidor de *flicker*, con su clasificador, a series regulares de variaciones de tensión rectangulares, con el fin de comprobar el cumplimiento de las especificaciones funcionales y de diseño. También se debe determinar el margen de la magnitud de las variaciones de tensión para los cuales los correspondientes valores de  $P_{st}$  se dan con una incertidumbre del 5% o menor (prueba de linealidad)<sup>16</sup>.

Debido a que los algoritmos de los medidores de *flicker* SIDAQEE y MEF no especifican el número de clases, ni la frecuencia de muestreo utilizados en el análisis estadístico, las pruebas de simulación se realizan con base en los valores especificados en la tabla 3.

Al final de este capítulo se extienden las pruebas a la implementación digital del algoritmo de medición de *flicker* presentado en el estándar IEC 61000-4-15, a través de diferentes técnicas de transformación analógica-digital.

---

<sup>16</sup> INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Op. Cit., p. 13-14.

Tabla 3. Especificaciones medidores.

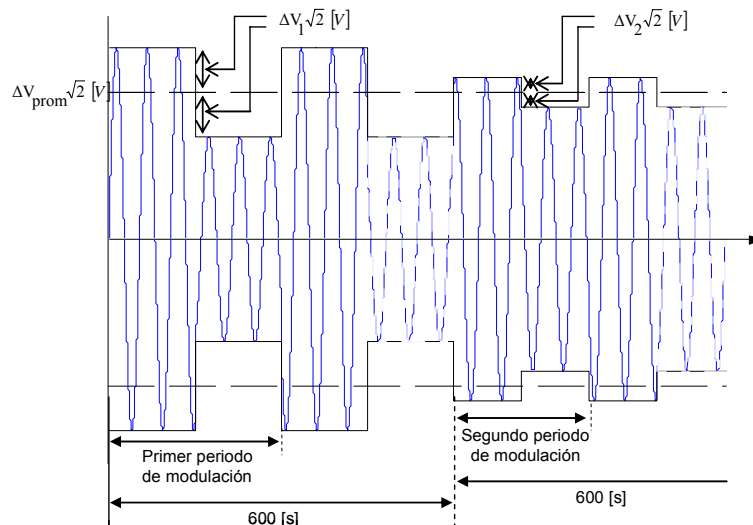
Algoritmo	Número de clases	Frecuencia de muestreo (Hz)
<b>SIDAQEE</b>	64	1 804
<b>MEF</b>	64	1 000
<b>RET1000T</b>	64	1 200

## 2.1 PRUEBA I: MODULACIÓN CON SEÑAL DE ONDA CUADRADA

Los algoritmos de los medidores de *flicker* se someten a una serie regulares de variaciones de tensión rectangulares de acuerdo con las recomendaciones del estándar IEC 61000-4-15 en su tabla V<sup>17</sup>.

Una tensión sinusoidal, modulada con una señal de onda cuadrada, se aplica a la entrada de cada algoritmo, como se muestra en la figura 16. Los puntos en la tabla 4 corresponden a los valores de frecuencia de modulación y profundidad de modulación para un intervalo de medición de 10 minutos. En cada caso, el índice de severidad del *flicker*,  $P_{st}$ , deberá ser  $1,00 \pm 0,05$ .

Figura 16. Tensión sinusoidal modulada con señal de onda cuadrada.



Fuente: Autores del proyecto.

<sup>17</sup> INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Op. Cit., p. 13.

Tabla 4. Especificaciones de ensayo para el clasificador del medidor de *flicker*.

Cambios rectangulares por minuto	Cambios de tensión ( $\Delta V/V$ ) %
	Lámpara de 120 V sistema de 60 Hz
1	3,166
2	2,568
7	1,695
39	1,044
110	0,841
1 620	0,547
4 000	Ensayo no requerido
4 800	4,834

NOTA -1620 cambios rectangulares por minuto corresponden a 13,5 Hz.

Fuente: Standard International 61000-4-15.

**2.1.1 Resultados y observaciones.** Los resultados de la prueba se presentan en la tabla 5. Para un número de clases igual a 64, los valores del  $P_{st}$  para los tres medidores de *flicker* superan el margen permitido por el estándar IEC 61000-4-15 (+0,05) cuando se aplica una señal sinusoidal con modulación de onda cuadrada de 1 cambio por minuto y con una profundidad de modulación de 3,166%. Para una onda sinusoidal con modulación de onda cuadrada de 2 a 4 300 cambios por minuto con su respectiva profundidad de modulación, los valores de  $P_{st}$  están dentro del intervalo permitido por la norma  $1,00 \pm 0,05$ .

El algoritmo MEF supera en un 22,4% el límite superior permitido, mientras que el SIDAQEE y el RET1000T lo superan en un 20% y 15,6%, respectivamente.

Lo anterior se puede mejorar si los medidores de flicker, SIDAQEE y MEF, incrementan el número de clases a 77, y el medidor RET1000T a 75. Para estos números de clases, el total de los valores del  $P_{st}$  correspondientes a la aplicación de los ensayos de funcionamientos especificados en la tabla 4, quedan dentro del intervalo permitido por la norma.

Tabla 5. Resultados prueba I.

No.	SIDAQEE	MEF	RET1000T
1	1,0610	1,0612	1,0578
2	1,0354	1,0354	1,0387
3	1,0032	1,0031	1,0012
4	0,9994	0,9996	0,9974
5	0,9969	0,9969	0,9944
6	0,9992	0,9992	0,9974
7	1,0341	0,9997	0,9903

## 2.2 PRUEBA II: LINEALIDAD PARA MODULACIÓN DE ONDA CUADRADA

El objetivo de esta prueba es encontrar un rango de cambios del  $P_{st}$  con una relación lineal entre las respuestas del medidor y la profundidad de modulación, para cambios de tensión con forma de onda cuadrada. La amplitud de la onda moduladora varía en un rango de 0,2% a 20% de la magnitud de la onda modulada para dos frecuencias diferentes. El resultado de la prueba es considerado positivo si los resultados finales de la medida (convertidos por medio del factor de ganancia estático del medidor  $\kappa_i$ ) están contenidos en el rango  $P_{st} = 1 \pm 5 \%$ .

**2.2.1 Frecuencia de modulación de 0,917 Hz.** La señal de entrada (figura 16) es modulada por una señal de onda cuadrada con un valor de frecuencia de modulación de 0,917 Hz, constante en todos los intervalos de tiempo, el cual corresponde a 110 cambios por minuto. El valor de amplitud de modulación en por ciento correspondiente a este número de cambios para el cual el  $P_{st}$  toma un valor de  $1 \pm 5\%$ , es  $\Delta V/V = 0,841\%$ . El valor absoluto de la amplitud de modulación con respecto a la magnitud de tensión nominal  $U_N=120$  (V) es  $\Delta U = 0,505(V)$ .

La amplitud de la onda moduladora  $\Delta U$ , para cada subsiguiente medida de diez minutos de duración, es determinada por la relación  $\Delta U_i = \kappa_i \cdot \Delta U$  para

$\kappa_i \in [1;10;20]$ ,  $i = 1,2,3$  e igual a:

- Primer intervalo de medida:  $\Delta U_1 = 0,505(V)$
- Segundo intervalo de medida:  $\Delta U_2 = 5,0046(V)$
- Tercer intervalo de medida:  $\Delta U_3 = 10,09(V)$

En la tabla 6 se muestran los valores de severidad de *flicker*  $P_{st}$  obtenidos para esta prueba para los tres medidores bajo estudio; en la tabla 7, se han dividido las respuestas por el respectivo  $\kappa_i$ , para comprobar que se esté en el rango de  $1 \pm 5\%$

Tabla 6. Resultados de  $P_{st}$  prueba II,  $f_m=0,917$  Hz.

No.		SIDAQEE	MEF	RET1000T
1	$P_{st1}$	0,9969	0,9969	0,9944
2	$P_{st2}$	9,9514	9,9514	9,9274
3	$P_{st3}$	19,799	19,798	19,7522

Tabla 7. Resultados de  $P_{st}$  prueba II,  $f_m=0,917$  Hz dividiendo en  $\kappa_i$ .

	SIDAQEE	MEF	RET1000T
$P_{st1}$	0,9969	0,9969	0,9944
$P_{st2}/10$	0,9951	0,9951	0,9927
$P_{st3}/20$	0,9899	0,9899	0,9876

**2.2.2 Frecuencia de modulación de 13,5 Hz.** Del mismo modo que en la prueba anterior para  $f_m=13,5$  Hz, constante en todo el intervalo de tiempo, el cual corresponde a un número de cambios por minuto de 1 620,  $\Delta V/V = 0,547\%$  para el cual el  $P_{st}$  toma un valor de  $1 \pm 5\%$  y  $\Delta U = 0,328(V)$ .

La amplitud de la onda moduladora de los intervalos de medida para un  $\kappa_i \in [0,2;1;2;5;10;20]$ ,  $i = 1,2,3,4,5,6$  es:

- Primer intervalo de medida:  $\Delta U_1 = 0,066(V)$
- Segundo intervalo de medida:  $\Delta U_2 = 0,328(V)$

- Tercer intervalo de medida:  $\Delta U_3 = 0,656(V)$
- Cuarto intervalo de medida:  $\Delta U_4 = 1,641(V)$
- Quinto intervalo de medida:  $\Delta U_5 = 3,282(V)$
- Sexto intervalo de medida:  $\Delta U_6 = 6,564(V)$

La respuesta de cada medidor se muestra en las tablas 8 y 9.

Tabla 8. Resultados de  $P_{st}$  prueba II,  $f_m=13,5$  Hz.

No.		SIDAQEE	MEF	RET1000T
1	$P_{st1}$	0,1999	0,1999	0,1995
2	$P_{st2}$	0,9992	0,9992	0,9974
3	$P_{st3}$	1,9983	1,9983	1,9948
4	$P_{st4}$	4,9950	4,9949	4,9863
5	$P_{st5}$	9,9845	9,9841	9,9669
6	$P_{st6}$	19,924	19,924	19,8892

Tabla 9. Resultados de  $P_{st}$  prueba II,  $f_m=13,5$  Hz dividiendo en  $\kappa_i$ .

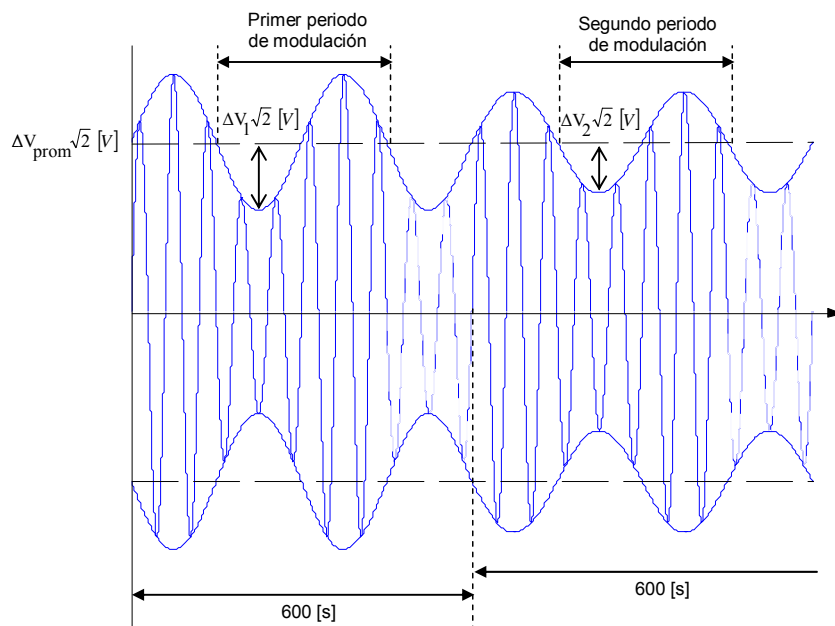
	SIDAQEE	MEF	RET1000T
$P_{st1}/0,2$	0,9994	0,9994	0,9975
$P_{st2}$	0,9992	0,9992	0,9974
$P_{st3}/2$	0,9992	0,9992	0,9974
$P_{st4}/5$	0,9990	0,9990	0,9973
$P_{st5}/10$	0,9985	0,9984	0,9967
$P_{st6}/20$	0,9962	0,9962	0,9945

**2.2.3 Observaciones.** Los algoritmos SIDAQEE, MEF y RET1000T tienen un margen de 0,2% a 20% en la magnitud de las variaciones de tensión dentro del cual los correspondientes valores de  $P_{st}$  se dan con una incertidumbre del 5% o menor, cuando la onda moduladora presenta una forma de onda cuadrada.

## 2.3 PRUEBA III: LINEALIDAD DEL MEDIDOR PARA MODULACIÓN DE ONDA SENOIDAL

La meta de la prueba es encontrar un rango de cambios del índice  $P_{str}$  en el cual el valor es linealmente dependiente de la profundidad de la modulación para cambios de tensión sinusoidal. La amplitud de la onda moduladora esta en el rango de 0,2% a 20% de la magnitud de la onda modulada. El resultado de la prueba es considerado positivo si los resultados finales están en el rango  $1 \pm 5\%$ .

Figura 17. Tensión sinusoidal modulada con señal de onda sinusoidal.



Fuente: Autores del proyecto.

**2.3.1 Frecuencia de muestreo de 1,0 Hz.** La señal de entrada (figura 17) es modulada por una onda sinusoidal de frecuencia de modulación de 1 Hz, constante en todos los intervalos de tiempo. La amplitud de la modulación en por ciento correspondiente a esta frecuencia de la onda de modulación ha sido leída de la tabla 1 en el estándar IEC 61000-4-15 y tiene un valor

$\Delta V/V = 1,463\%$ . El valor absoluto de la amplitud de modulación con respecto a la magnitud de tensión nominal  $U_N=120$  (V) es  $\Delta U = 0,878(V)$ .

La amplitud de la onda moduladora  $\Delta U$ , para cada subsiguiente medida de diez minutos de duración, es determinada por la relación  $\Delta U_i = \kappa_i \cdot \Delta U$  para  $\kappa_i \in [1;10;20]$ ,  $i = 1,2,3$  e igual a:

- Primer intervalo de medida:  $\Delta U_1 = 0,878(V)$
- Segundo intervalo de medida:  $\Delta U_2 = 8,778(V)$
- Tercer intervalo de medida:  $\Delta U_3 = 17,56(V)$

En las tablas 10 y 11 se observan los resultados.

Tabla 10. Resultados de  $P_{st}$  prueba III,  $f_m=1,0$  Hz.

No.		SIDAQEE	MEF	RET1000T
1	$P_{st1}$	0,9877	0,9877	0,9850
2	$P_{st2}$	9,8595	9,8595	9,8363
3	$P_{st3}$	19,6109	19,6109	19,5686

Tabla 11. Resultados de  $P_{st}$  prueba III,  $f_m=1,0$  Hz dividiendo en  $\kappa_i$ .

	SIDAQEE	MEF	RET1000T
$P_{st1}$	0,9877	0,9877	0,9850
$P_{st2}/10$	0,9859	0,9859	0,9836
$P_{st3}/20$	0,9805	0,9805	0,9784

**2.3.2 Frecuencia de muestreo de 8,8 Hz.** Se repite la prueba anterior para  $f_m=8,8$  Hz, constante en todo el intervalo de tiempo, amplitud de modulación  $\Delta V/V = 0,321\%$  y  $\Delta U = 0,1926(V)$ .

La amplitud de la onda moduladora de los intervalos de medida para un  $\kappa_i \in [0,2;1;2;5;10;20]$ ,  $i = 1,2,3,4,5,6$  es:

- Primer intervalo de medida:  $\Delta U_1 = 0,039(V)$
- Segundo intervalo de medida:  $\Delta U_2 = 0,193(V)$
- Tercer intervalo de medida:  $\Delta U_3 = 0,385(V)$
- Cuarto intervalo de medida:  $\Delta U_4 = 0,963(V)$
- Quinto intervalo de medida:  $\Delta U_5 = 1,926(V)$
- Sexto intervalo de medida:  $\Delta U_6 = 3,852(V)$

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 12 y 13.

Tabla 12. Resultados de  $P_{st}$  prueba III,  $f_m=8,8$  Hz.

No.		SIDAQEE	MEF	RET1000T
1	$P_{st1}$	0,2015	0,2015	0,2011
2	$P_{st2}$	1,0071	1,0071	1,0051
3	$P_{st3}$	2,0140	2,0140	2,0102
4	$P_{st4}$	5,0349	5,0350	5,0251
5	$P_{st5}$	10,0689	10,0691	10,0494
6	$P_{st6}$	20,1299	20,1299	20,0903

Tabla 13. Resultados de  $P_{st}$  prueba III,  $f_m=8,8$  Hz dividiendo en  $\kappa_i$ .

	SIDAQEE	MEF	RET1000T
$P_{st1}/0,2$	1,0076	1,0076	1,0055
$P_{st2}$	1,0071	1,0071	1,0051
$P_{st3}/2$	1,0070	1,0070	1,0051
$P_{st4}/5$	1,0070	1,0070	1,0050
$P_{st5}/10$	1,0069	1,0069	1,0049
$P_{st6}/20$	1,0065	1,0065	1,0045

**2.3.3 Observaciones.** Los tres algoritmos tienen un margen de 0,2% a 20% en la magnitud de las variaciones de tensión dentro del cual los correspondientes valores de  $P_{st}$  se dan con una incertidumbre del 5% o menor, cuando la onda moduladora presenta una forma de onda sinusoidal.

## 2.4 PRUEBAS ADICIONALES

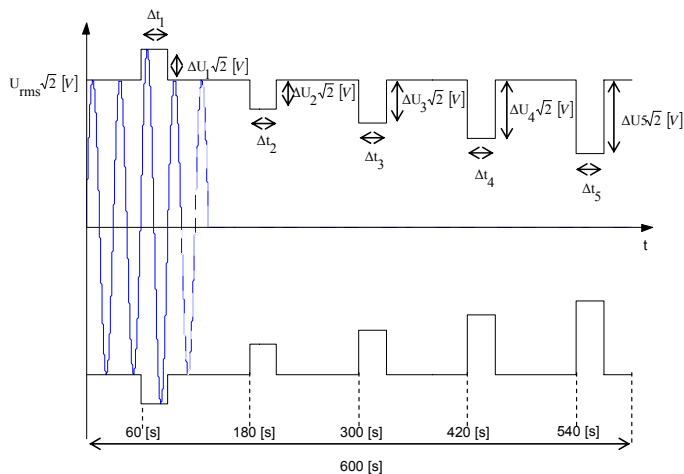
A continuación se hacen pruebas que no están contempladas en el estándar IEC 61000-4-15, pero que permiten comparar la respuesta de los tres medidores bajo estudio.

**2.4.1 Huecos y elevaciones de tensión en la señal medida.** Una tensión sinusoidal sin modulación se aplica a la entrada de cada algoritmo, durante un intervalo de medida de diez minutos se consideran los cambios de tensión, descritos en la tabla 14. Los cambios en los valores eficaces de tensión no están sincronizados con respecto al cruce por cero de la onda de tensión (ver figura 18).

Tabla 14. Cambios en los valores eficaces de tensión.

No.	Tiempo de ocurrencia del inicio del intervalo (s)	Magnitud de tensión $U_{RMS} \pm \Delta U_i$ (V)	Duración de la distorsión $\Delta t_i$ (ms)
1	60	138	200
2	180	102	200
3	300	60	200
4	420	36	200
5	540	12	600

Figura 18. Señal descrita en la tabla 14.



Fuente: Autores del proyecto.

**2.4.1.1. Resultados y observaciones.** Los resultados de  $P_{st}$  obtenidos a la salida de los algoritmos de los medidores de *flicker* bajo estudio se presentan en la tabla 15. La diferencia entre los resultados para cada medidor es mínima, debido a que los tres medidores se simulan con igual número de clases en el bloque estadístico. Esto nos muestra que si los medidores cumplen con el estándar y tienen igual número de clases no se presenta una diferencia significativa entre los resultados. En el capítulo 4 se presenta con más detalle la dependencia del  $P_{st}$  con el número de clases.

Tabla 15.  $P_{st}$  ante huecos y elevaciones en la señal de tensión.

<b>Instrumento</b>	<b><math>P_{st}</math></b>
SIDAQUEE	14,5708
MEF	14,5622
RET1000T	14,6102

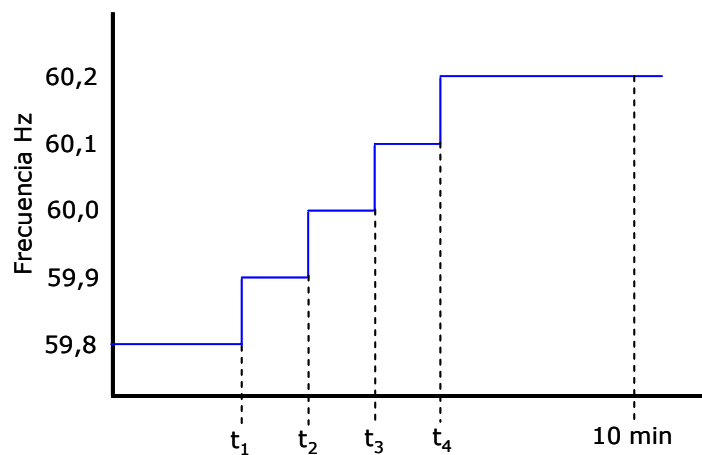
**2.4.2 Cambios en la frecuencia fundamental de la señal de entrada.**

Esta prueba permite establecer la respuesta del instrumento a cambios en la frecuencia fundamental de la tensión de entrada, contenida en un rango de variación dado. La tensión de entrada es modulada por una onda cuadrada con  $f_m=13,5$  Hz y  $\Delta U=0,328$  V (ver figura 16), que da un resultado de  $P_{st}=1$ , para una frecuencia de 60 Hz. Se analizan dos casos:

- Caso 1. La prueba se realiza para cinco intervalos de tiempo de diez minutos. La frecuencia de la señal de tensión de entrada es constante durante cada intervalo de medida e igual a:
  - Primeros diez minutos:  $f_1=58,8$  Hz
  - Segundos diez minutos:  $f_2=59,4$  Hz
  - Terceros diez minutos:  $f_3=60$  Hz
  - Cuartos diez minutos:  $f_4=60,6$  Hz
  - Quintos diez minutos:  $f_5=61,2$  Hz

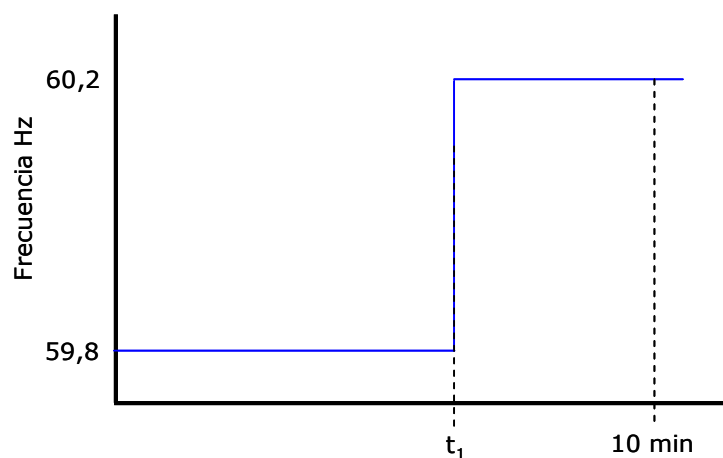
- Caso 2. Esta prueba se hace en general para el medidor establecido por el estándar IEC 61000-4-15, y consiste en llevar la frecuencia fundamental desde 59,8 Hz hasta 60,2 Hz (intervalo de variación de la frecuencia permitido por la CREG) por medio de cambios escalonados de 0,1 Hz (ver figura 19). En esta prueba también se incluye el caso en el que la frecuencia cambia desde 59,8 Hz hasta 60,2 Hz por medio de un solo escalón (ver figura 20).

Figura 19. Cambios escalonados de 0,1 Hz.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 20. Cambio escalonado de 0,4 Hz.



Fuente: Autores del proyecto.

**2.4.2.1. Resultados y observaciones.** Los valores  $P_{st}$  obtenidos a la salida de los instrumentos para el caso 1 se leen para cada intervalo de medida como se puede ver en la tabla 16. Asumiendo la condición  $P_{st}=1\pm 0,05$  como un criterio de adecuada operación, los tres algoritmos han pasado la prueba para una variación de la frecuencia fundamental de  $\pm 2\%$ .

Tabla 16.  $P_{st}$  cambios en la frecuencia fundamental caso 1.

No.	SIDAQEE	MEF	RET1000T
1	1,0004	1,0005	0,9986
2	0,9996	0,9997	0,9977
3	0,9992	0,9992	0,9974
4	0,9988	0,9988	0,9969
5	0,9988	0,9989	0,9969

En la tabla 17 se presenta los valores del  $P_{st}$  para el caso 2, se puede observar que los cambios de frecuencia fundamental en forma escalonada dentro del intervalo  $60\pm 0,2$  Hz, tienen un efecto despreciable en el valor del  $P_{st}$ .

Lo anterior se puede ver mejor al comparar el valor del  $P_{st}$  cuando la frecuencia de red es 60 Hz y no varía dentro del intervalo de medida (0,9992, tomado de la tabla 16) con los valores de la tabla 17.

Tabla 17. Cambios en la frecuencia fundamental caso 2.

Instante de tiempo en el que cambia la frecuencia fundamental				Nivel de perceptibilidad
$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$P_{st}$
334,4481	334,7820	335,1153	335,4481	0,9991
334,4481	335,1159	335,7825	336,4481	0,9991
334,4481	335,4498	336,4498	337,4481	0,9991
334,4481	--	--	--	0,9992

## 2.5 MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA TRANSFORMACIÓN ANALÓGICA-DIGITAL

Aunque el estándar IEC 61000-4-15 describe una implementación analógica del medidor de *flicker* antes de la evaluación estadística actualmente la mayoría de estos medidores son parcial o totalmente digitales, proceso en el cual intervienen parámetros que no están contemplados en el estándar. A continuación se presenta una comparación de los valores de  $P_{st}$  obtenidos cuando se utilizan diferentes métodos de transformación analógica-digital, para las pruebas descritas en los numerales anteriores.

Tabla 18. Resultados de  $P_{st}$  prueba I implementación digital.

No.		1	2	3	4	5	6	7
Método de Transformación	<i>Backward Difference</i>	1,0400	1,0148	0,9835	0,9798	0,9773	0,9318	0,7061
	<i>Bilinear Transformation</i>	1,0610	1,0354	1,0032	0,9994	0,9969	0,9992	1,0341
	<i>Prewarping</i>	1,0610	1,0354	1,0032	0,9994	0,9969	0,9992	1,0378
	<i>Impulse Invariance</i>	10,7702	10,6781	10,5603	10,4797	10,4613	10,454	10,454
	<i>Step Invariance</i>	1,48e6	1,48e6	1,51e6	1,59e6	1,63e6	1,99e6	8,86e6
	<i>Matched pole zero mapping</i>	0,0885	0,0863	0,0837	0,0833	0,0831	1,37e6	0,0858
<b>Modelo IEC 61000-4-15</b>		1,0612	1,0354	1,0031	0,9996	0,9969	0,9992	0,9997

Tabla 19. Resultados de  $P_{st}$  prueba II,  $f_m=0,917$  Hz implementación digital.

MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN	$P_{st1}$	$P_{st2}/10$	$P_{st3}/20$
<i>Backward Difference</i>	0,9773	0,9756	0,9704
<i>Bilinear Transformation</i>	0,9969	0,9951	0,9899
<i>Bilinear Transformation whit frequency Prewarping</i>	0,9969	0,9951	0,9899
<i>Impulse Invariance</i>	10,461	1,0591	0,5372
<i>Step Invariance</i>	1,634e6	0,548e6	0,529e6
<i>Matched pole-zero mapping</i>	0,0831	0,0810	0,0826
<b>Modelo IEC 61000-4-15</b>	0,9969	0,9951	0,9899

Tabla 20. Resultados de  $P_{st}$  prueba II,  $f_m=13,5$  Hz implementación digital.

<b>MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN</b>	<b><math>P_{st1}/0,2</math></b>	<b><math>P_{st2}/1</math></b>	<b><math>P_{st3}/2</math></b>	<b><math>P_{st4}/5</math></b>	<b><math>P_{st5}/10</math></b>	<b><math>P_{st6}/20</math></b>
<i>Backward Difference</i>	0,9320	0,9318	0,9318	0,9316	0,9311	0,9290
<i>Bilinear Transformation</i>	0,9994	0,9992	0,9992	0,9990	0,9985	0,9962
<i>Bilinear Transformation Whit frequency Prewarping</i>	0,9994	0,9992	0,9992	0,9990	0,9985	0,9962
<i>Impulse Invariance</i>	52,2702	10,4540	5,2270	2,0909	1,0455	0,5229
<i>Step Invariance</i>	7,598e6	1,988e6	1,310e6	0,901e6	0,774e6	0,730e6
<i>Matched pole-zero Mapping</i>	0,0833	0,0833	0,0832	0,0832	0,0832	0,0830
<b>Modelo IEC 61000-4-15</b>	0,9994	0,9992	0,9992	0,9990	0,9984	0,9962

Tabla 21. Resultados de  $P_{st}$  prueba III,  $f_m=1,0$  Hz implementación digital.

<b>METODO DE TRANSFORMACIÓN</b>	<b><math>P_{st1}</math></b>	<b><math>P_{st2}/10</math></b>	<b><math>P_{st3}/20</math></b>
<i>Backward Difference</i>	0,9868	0,9850	0,9796
<i>Bilinear Transformation</i>	0,9877	0,9860	0,9806
<i>Bilinear Transformation Whit Frequency Prewarping</i>	0,9877	0,9860	0,9806
<i>Impulse Invariance</i>	14,7983	1,5019	0,7641
<i>Step Invariance</i>	2,069e6	2,305e5	1,315e5
<i>Matched pole-zero Mapping</i>	0,0824	0,0823	0,0817
<b>Modelo IEC 61000-4-15</b>	0,9877	0,9859	0,9805

Tabla 22. Resultados de  $P_{st}$  prueba III,  $f_m=8,8$  Hz, implementación digital.

<b>MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN</b>	<b><math>P_{st1}/0,2</math></b>	<b><math>P_{st2}/1</math></b>	<b><math>P_{st3}/2</math></b>	<b><math>P_{st4}/5</math></b>	<b><math>P_{st5}/10</math></b>	<b><math>P_{st6}/20</math></b>
<i>Backward Difference</i>	0,9588	0,9586	0,9586	0,9586	0,9584	0,9581
<i>Bilinear Transformation</i>	1,0073	1,0071	1,0071	1,0069	1,0069	1,0065
<i>Bilinear Transformation Whit Frequency Prewarping</i>	1,0073	1,0071	1,0071	1,0069	1,0069	1,0065
<i>Impulse Invariance</i>	73,9212	14,7842	7,3921	2,9568	1,4786	0,7394

<i>Step Invariance</i>	1,034e7	2,107e6	1,099e6	5,006e5	3,069e5	2,036e5
<i>Matched pole-zero mapping</i>	0,0840	0,0840	0,0840	0,0840	0,0840	0,0839
<b>Modelo IEC 61000-4-15</b>	1,0076	1,0071	1,0070	1,0070	1,0069	1,0065

**2.5.1 Observaciones.** Los métodos de transformación de los filtros analógicos en digitales que aproximan adecuadamente las funciones de transferencia analógicas del medidor de *flicker* propuesto por el estándar IEC 61000-4-15 y que cumplen los ensayos de funcionamiento establecidos por este mismo estándar son: la transformación bilineal y la transformación bilineal con frecuencia “*prewarping*”. Esto se evidencia en las tablas 18-22, debido a que las respuestas de estos métodos de transformación están dentro del intervalo de  $1 \pm 5\%$  establecido por el estándar.

En el Anexo A se muestra la respuesta en frecuencia de los diferentes filtros digitales resultantes al realizar la transformación.

### **3. COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE MEDICIÓN DE FLICKER $P_{st}$ ANTE PERTURBACIONES DE TENSIÓN**

Con el fin de diseñar un único índice de la calidad de la señal de tensión que permita condensar una gran cantidad en el tiempo y cuantificar adecuadamente el impacto de las fluctuaciones de tensión en el corto plazo, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) en sus resoluciones 024 del 2005 y 016 de 2007 propone el índice  $P_{st}$  como un indicador de la calidad de la señal de tensión ante perturbaciones de estado transitorio y establece los siguientes requerimientos que debe cumplir para aprobar su adopción<sup>18</sup>:

- Indicador único para fluctuaciones de tensión (hundimientos, elevaciones, etc.) y *flicker*.
- Asigna una mayor perceptibilidad a las elevaciones que a los hundimientos (con igual  $\Delta V$  y demás parámetros).
- Pondera de forma adecuada la perceptibilidad a eventos repetitivos.
- Pondera de forma adecuada la perceptibilidad en función de la severidad del evento.
- Puede ser usado fácilmente para cuantificar el periodo de tiempo durante el cual los equipos son susceptibles de operar incorrectamente debido a fluctuaciones de tensión y parpadeo.

Siendo un índice originalmente diseñado para medir el *flicker*, es importante comprobar que el indicador  $P_{st}$  si permite establecer las características y severidad de las diferentes perturbaciones de tensión que se pueden presentar en un sistema eléctrico.

---

<sup>18</sup> COMISIÓN DE REGULACION DE ENERGIA Y GAS CREG. Documento GREG-017 de 2005. Numeral 3, Antecedentes. Colombia: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2005. p. 3.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del índice  $P_{st}$  para diferentes simulaciones que incluyen diferentes perturbaciones de la señal tensión como huecos (caídas), elevaciones, interrupciones y transitorios.

En el Anexo B se muestra el algoritmo de medición de *flicker*, normalizado por el estándar IEC 61000-4-15, implementado a través de la plataforma Simulink de Matlab.

### 3.1 RESPUESTA DEL ÍNDICE $P_{ST}$ ANTE HUECOS (CAÍDAS) Y ELEVACIONES DE TENSIÓN

En estas pruebas se evalúa el comportamiento de la respuesta del algoritmo del medidor del índice  $P_{st}$  propuesto por el estándar IEC 61000-4-15 (número de clases de 64 y una frecuencia de muestreo de 1 kHz a menos que se especifique otro valor) ante variaciones en la magnitud, la duración y la fase de los huecos y elevaciones de tensión, así como su respuesta con relación al número de eventos.

**3.1.1 Variación de la magnitud de los huecos y elevaciones.** Para simular esta prueba, una señal sin modulación es aplicada a la entrada del algoritmo durante un intervalo de medida de 10 minutos; después de transcurrir 370 segundos un evento (hueco o elevación) de tensión ocurre, con un valor de magnitud y duración de acuerdo con los datos de la tabla 23.

Tabla 23. Magnitud y duración de los huecos y picos de tensión.

Tipo de Variación	Duración (s)	Magnitud (p.u.)	
		Hueco	Elevación
Muy rápido	0,5	0,9; 0,8;... 0,2	1,1; 1,2;... 1,8
Rápido	3	0,9;0,8;... 0,6	1,1; 1,2;... 1,4
Lento	60	0,9; 0,8	1,1; 1,2

Fuente: Resolución 024 de 2005.

**3.1.1.1. Resultados y observaciones.** De los resultados obtenidos del  $P_{st}$  que se muestran en la tabla 24 se observa que si se mantiene la duración del evento constante y se incrementa su magnitud, el valor del  $P_{st}$  aumenta, teniendo mayor ponderación para un evento tipo elevación, excepto para eventos lentos (ver celdas con sombreado rosado). Además, valores de  $P_{st}$  para huecos con cierta magnitud y duración pueden coincidir con valores de  $P_{st}$  para una elevación con otra magnitud y otra duración, lo que dificulta diferenciar si un valor de  $P_{st}$  pertenece a un evento de tipo hueco o de tipo elevación (ver celdas con sombreado azul y anaranjado).

Tabla 24.  $P_{st}$  ante variaciones en la magnitud de eventos de tensión.

	Magnitud de la perturbación de tensión	Duración (s)	$P_{st}$	
			Elevación	Hueco
<b>Muy rápidos</b>	0,8	0,5	26,857	11,880
	0,7	0,5	22,7425	11,254
	0,6	0,5	18,8261	10,383
	0,5	0,5	15,1330	9,2635
	0,4	0,5	11,6531	7,8925
	0,3	0,5	8,3978	6,2810
	0,2	0,5	5,3669	4,4266
	0,1	0,5	2,5680	2,3330
<b>Rápidos</b>	0,4	3	10,6186	7,6848
	0,3	3	7,6987	6,0666
	0,2	3	4,9499	4,2361
	0,1	3	2,3821	2,2086
<b>Lentos</b>	0,2	60	4,4924	5,3151
	0,1	60	2,2549	2,4437

**3.1.2 Variación de la duración de los huecos y elevaciones.** Para esta prueba, una señal sinusoidal sin modulación es aplicada a la entrada del algoritmo durante un intervalo de medida de 10 minutos, durante el cual ocurre un evento (hueco o elevación) con un incremento de 0,2 p.u. Manteniendo el incremento del evento constante y variando su duración, se obtienen diferentes valores de  $P_{st}$ .

El valor de 0,2 p.u. en el incremento del evento permite determinar el comportamiento del  $P_{st}$  para todo tipo de variaciones definidas por la resolución CREG 024 de 2005 (muy rápidas, rápidas y lentas).

**3.1.2.1. Resultados y observaciones.** En la figura 21 se observa el comportamiento general del  $P_{st}$  en función de la duración del evento ya sea hueco o elevación, la

**3.1.2.2.** figura 22 presenta una ampliación de la figura 21 en un intervalo de tiempo de 0-0,5 s. De acuerdo a estas gráficas y a la tabla 25 se puede establecer que:

- Si se mantiene la magnitud del evento constante y se incrementa su duración desde 0,0088 s hasta 0,131 s, el valor del índice  $P_{st}$  se incrementa rápidamente (ver figura 22).
- Después de 0,131 s hasta 60 s de duración, el valor del índice  $P_{st}$  decrece para un evento tipo elevación.
- Para eventos tipo hueco con duración entre 0,131 s y 2 s el valor del  $P_{st}$  disminuye, después de 2 s se incrementa.
- Para eventos lentos (después de 20 s) la salida del algoritmo se torna mayor para huecos de tensión que para elevaciones de tensión.

Tabla 25.  $P_{st}$  ante variaciones en la duración de eventos de tensión.

	Magnitud de la perturbación de tensión	Duración (s)	$P_{st}$	
			Elevación	Hueco
<b>Muy rápidos</b>	0,2	8,33e-3	1,2417	1,0161
	0,2	10,00e-3	1,6347	1,3377
	0,2	20,00e-3	2,8349	2,3202
	0,2	100,00e-3	5,0742	4,1581
	0,2	131,25e-3	5,6811	4,6710
	0,2	254,17e-3	5,6701	4,6615
	0,2	377,09e-3	5,5335	4,5535
	0,2	0,5	5,3669	4,4266
<b>Rápidos</b>	0,2	1	5,0967	4,2457
	0,2	2	4,9872	4,2173
	0,2	3	4,9499	4,2361

<b>Lentos</b>	0,2	10	4,7934	4,4297
	0,2	20	4,6702	4,7015
	0,2	30	4,5969	4,9199
	0,2	40	4,5471	5,0902
	0,2	50	4,5142	5,2204
	0,2	60	4,4924	5,3151

Figura 21.  $P_{st}$  ante la variación de la duración del evento, 64 clases.

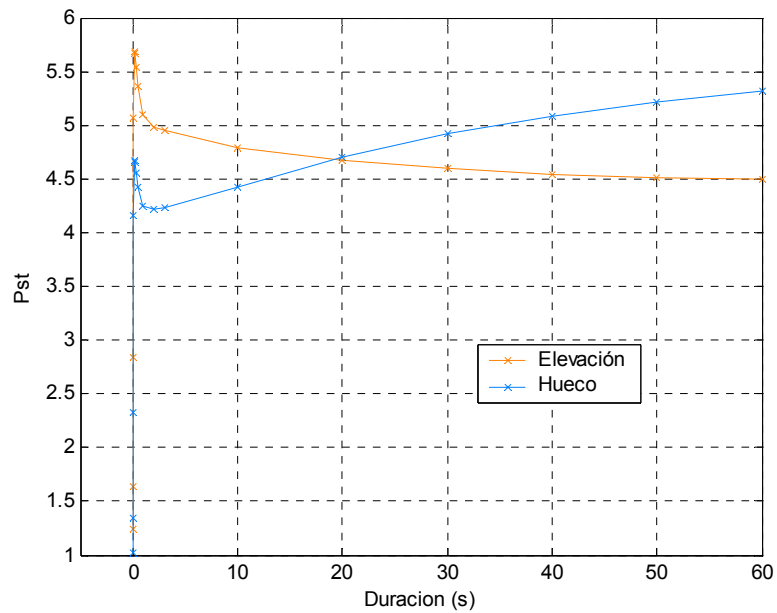
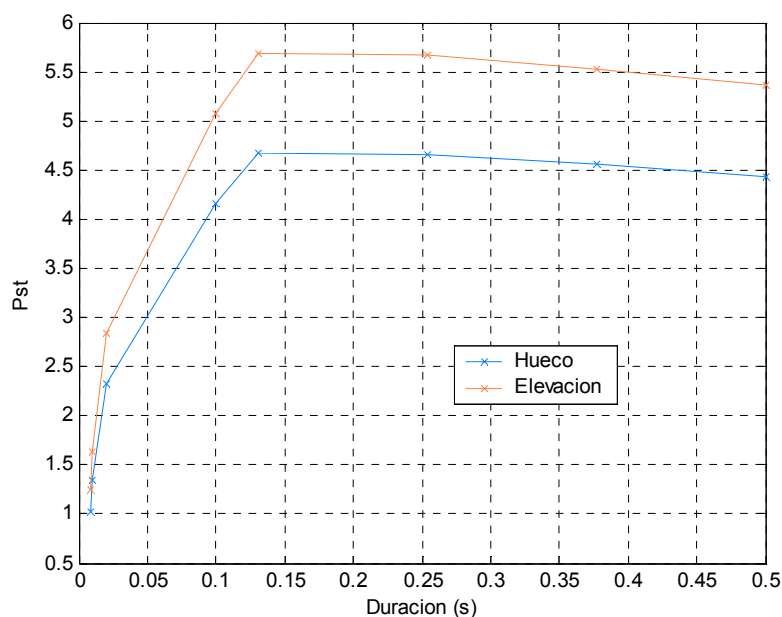


Figura 22.  $P_{st}$  ante la variación de la duración del evento menor a 500 ms, 64 clases.



En el documento CREG-017 de marzo 8 de 2005, se menciona que la severidad de las fluctuaciones de tensión se incrementa al aumentar el valor de variables como el número de eventos, la caída o elevación de tensión ( $\Delta V$ ), la duración y el tipo de las fluctuaciones de tensión. Además, resalta que esta afirmación es aceptada internacionalmente, lo cual se refleja en el hecho de que organizaciones como CBEMA, EPRI, IEEE, IEC, etc. modelan la severidad en función de estas variables.

Para analizar la veracidad de la propuesta, la CREG<sup>19</sup> presenta algunas figuras en las que se muestra el comportamiento del nivel instantáneo de *flicker* y el valor de  $P_{st}$ , así como las fluctuaciones de tensión simuladas.

Una de las figuras presentadas en este documento muestra que 3,5730; 1,9937 y 1,0691 son los valores del  $P_{st}$  correspondientes a los huecos rectangulares de tensión de 0,8 p.u y con duración de 100 ms, 20 ms y 10 ms,

<sup>19</sup> COMISIÓN DE REGULACION DE ENERGIA Y GAS CREG. Documento GREG-017 de 2005. Numeral 3, Antecedentes. Colombia: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2005. p. 5-11.

respectivamente, con lo cual comprueba que el  $P_{st}$  es función creciente en la variable  $\Delta t$ .

De la figura 21 y la tabla 25 se observa que la tendencia creciente del  $P_{st}$  con el incremento en la duración del hueco de tensión es cierta hasta los 0,131 s de duración, así como también, desde 2 s hasta 60 s. Para un  $\Delta t$  entre 0,131 s y 2 s el  $P_{st}$  decrece.

Como los valores del  $P_{st}$  correspondientes a los huecos rectangulares de tensión de 0,8 p.u y con duración de 100 ms, 20 ms y 10 ms presentados en la tabla 25 no son iguales a los mostrados por la CREG<sup>20</sup>, se incrementa el número de clases a 140 para obtener valores similares de  $P_{st}$  (ver tabla 26).

Tabla 26. Comparación valores de  $P_{st}$ .

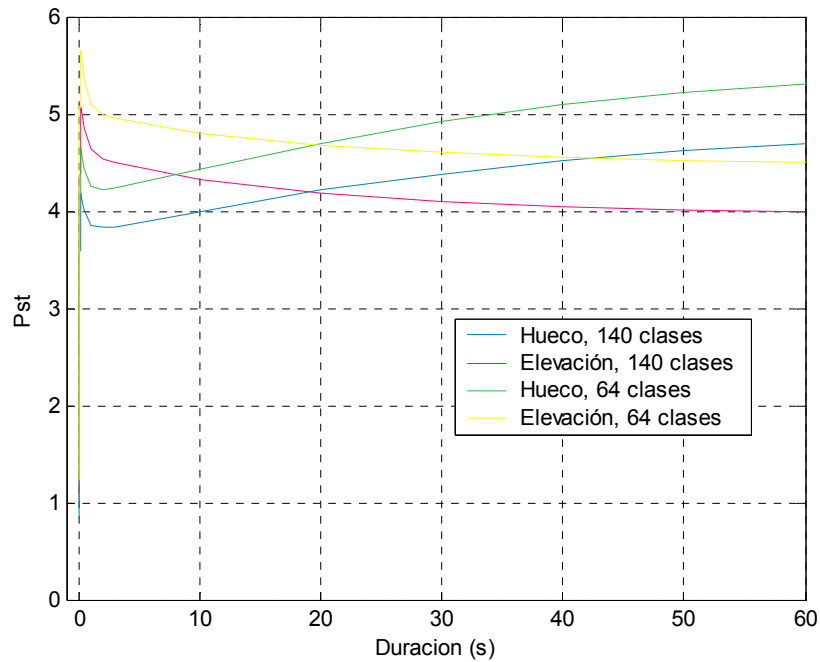
<b>Duración (ms)</b>	100	20	10
<b>Documento CREG-017 de 2005</b>	3,5730	1,9937	1,0691
<b>140 clases</b>	3,5740	1,9577	1,1278

En la figura 23 se presentan los valores de  $P_{st}$  ante variaciones en la duración de eventos de tensión para un número de clases de 64 y 140; en esta se observa que al aumentar el número de clases se mantiene el comportamiento descrito para 64 clases. La ponderación del  $P_{st}$  es menor para un número de clases mayor.

Figura 23.  $P_{st}$  ante variaciones en la duración de eventos de tensión, 64 y 140 clases.

---

<sup>20</sup> Ibid., p. 10.



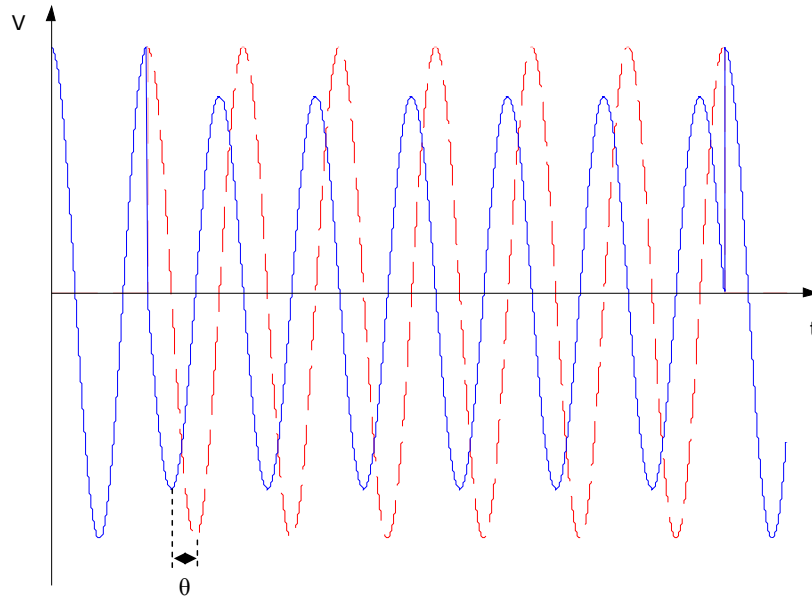
En otra de las figuras presentadas por la CREG, se muestra que 4,3672 y 3,5730 son los valores de  $P_{st}$  como resultado de un evento de tipo elevación de 1,1 p.u y hueco de tensión de 0,8 p.u, respectivamente. Con lo anterior la CREG afirma que el  $P_{st}$  es función creciente en la variable tipo de fluctuación de tensión, lo cual no se cumple para eventos lentos en donde el  $P_{st}$  da una mayor ponderación a los huecos que a las elevaciones de tensión (ver tabla 25, celdas sombreadas en amarillo). Es decir, este indicador no permite diferenciar la severidad de una elevación y un hueco.

**3.1.3 Variación de la fase de la señal de tensión debido a huecos de tensión.** Un cambio en un sistema eléctrico, como un corto circuito, causa un cambio tanto en la magnitud como en el ángulo de fase ( $\theta$ ) de la tensión. El salto del ángulo de fase se manifiesta como un cambio en el cruce por cero de la tensión instantánea.

El salto de fase puede ser causado durante una falla trifásica debido a la diferencia en la relación  $X/R$  entre la fuente y la red de alimentación.

También puede ser causado por un hueco debido a la transformación a un nivel más bajo de tensión (ver figura 24).

Figura 24. Salto de fase debido a un hueco de tensión.



Fuente: Autores del proyecto.

Los huecos de tensión se clasifican según la clase de falla de cortocircuito que los origina y estos pueden ser de tipo A, tipo B, tipo C, tipo D, tipo E, tipo F y tipo G. El valor en el ángulo de salto de fase depende del tipo y de la magnitud del hueco de tensión<sup>21</sup>.

Con el objeto de determinar el efecto del salto de fase en el  $P_{st}$ , se simula la ocurrencia de un hueco de tensión de 0,8 p.u y 0,1 p.u, cada uno con una duración de 100 ms, y se varía el ángulo de salto de fase dentro del intervalo  $[-180^\circ \ 180^\circ]$ . Este intervalo tiene una gran amplitud para lo que suele ser común en los sistemas eléctricos cuando se presenta un hueco de 0,8 p.u y 0,1 p.u.

---

<sup>21</sup> BOLLEN, Math H. J.. Understanding Power Quality Problems: Voltage sags and interruptions. USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 2000. p. 174-231.

**3.1.3.1. Resultados y observaciones.** En la figura 25 se observa que a medida que se incrementa el ángulo de salto de fase tanto negativa como positivamente, se incrementa el  $P_{st}$  hasta obtener un valor máximo de 4,2317 en  $-120^\circ$  y  $60^\circ$ . Desde  $-120^\circ$  hasta  $-180^\circ$  y desde  $60^\circ$  hasta  $180^\circ$  el valor del  $P_{st}$  disminuye hasta alcanzar un valor de 4,1835 igual al obtenido cuando no se presenta salto de fase.

La incertidumbre de los resultados del índice  $P_{st}$  presentados en la figura 25 (0,0166), es mayor que la de los resultados de la figura 26 (0,0002). Es decir, cuanto menor sea la profundidad del hueco de tensión con saltos de fase entre  $-180^\circ$  y  $180^\circ$ , mayor será la incertidumbre en los valores del  $P_{st}$ .

Es importante aclarar que para un hueco de tensión con una magnitud 0,9 p.u y 100 ms de duración con saltos de fase entre  $-180^\circ$  y  $180^\circ$  tiene una incertidumbre de 0,0322, la cual es mínima, y se hace más pequeña cuando el salto de fase está entre  $-40^\circ$  y  $40^\circ$ . Este último intervalo suele ser común en los sistemas eléctricos cuando se presentan huecos de tensión con esta magnitud.

Figura 25.  $P_{st}$  para un hueco de tensión de 0,8 p.u y 100 ms, considerando el cambio de fase.

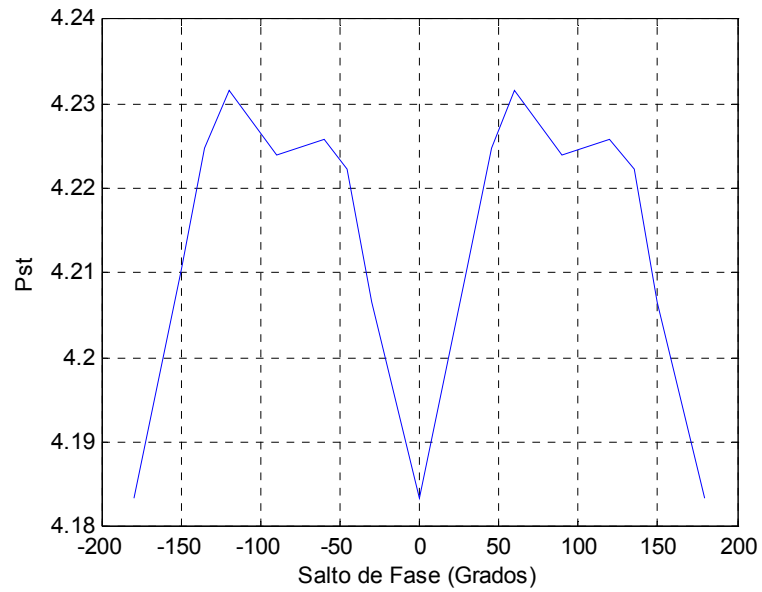
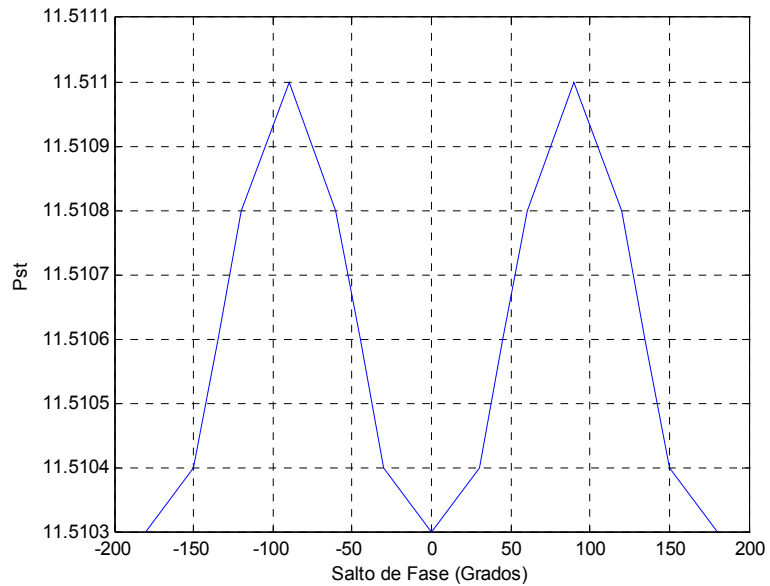


Figura 26.  $P_{st}$  para un hueco de tensión de 0,1 p.u y 100 ms, considerando el cambio de fase.



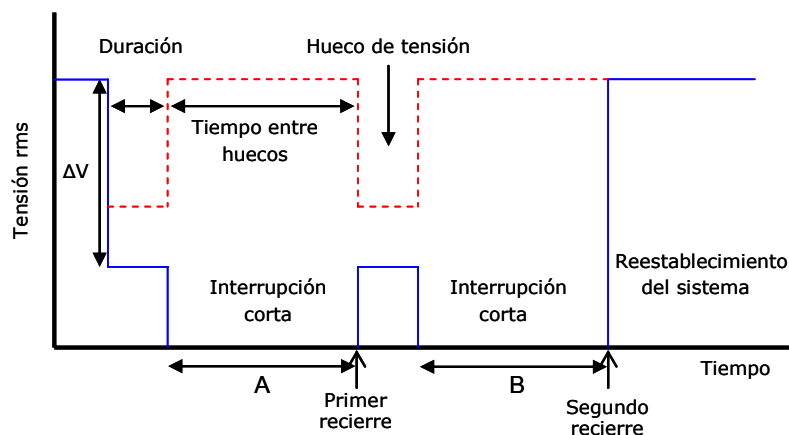
En general, la longitud del intervalo en el cual varía el ángulo de salto de fase asociado con un hueco de tensión, disminuye con el incremento de la profundidad del hueco y por tanto, disminuye la incertidumbre de los valores

del  $P_{st}$ . Es decir, los valores del salto de fase originados por huecos de tensión no tienen efectos apreciables en la estimación del  $P_{st}$ .

**3.1.4 Variación del número de eventos.** Con el fin de establecer el efecto del tiempo entre eventos sucesivos sobre el valor del  $P_{st}$  se aplica una señal sinusoidal sin modulación a la entrada del algoritmo; después de transcurridos 370 s se simulan dos casos de huecos de tensión debido al recierre de un interruptor automático en una red eléctrica (la operación de los interruptores está normalizada<sup>22</sup>). En general, los casos analizados son los siguientes:

- Caso 1. Consiste en una secuencia de dos caídas de tensión debido a dos intentos de recierre; en el segundo recierre ya no está presente la falla y por consiguiente se restablece el suministro de energía (ver figura 27). Esta prueba se realiza para duraciones distintas entre eventos de tensión manteniendo la magnitud y la duración de cada evento de tensión constante.

Figura 27. Tensión eficaz durante una secuencia de dos recierres y posterior reestablecimiento del sistema, en una red de alimentación fallada (línea azul) y en una barra antes del interruptor automático (línea roja).



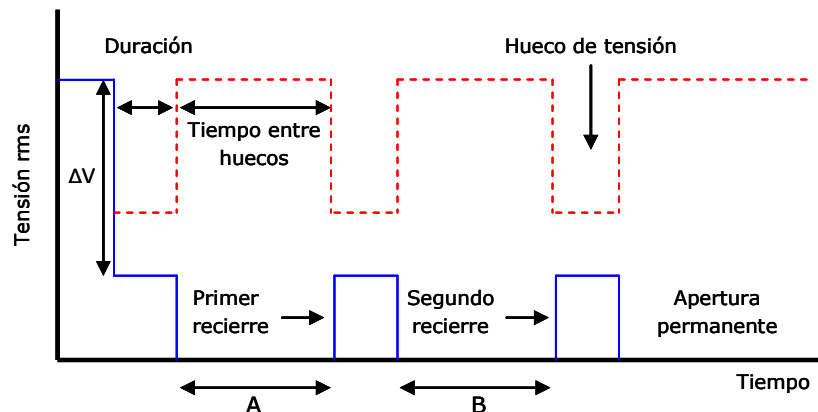
Fuente: Autores del proyecto.

<sup>22</sup> BOLLEN, . Op. cit., p. 115-120.

- Caso 2. Ilustrado en la figura 28, consiste en una secuencia de tres huecos de tensión debido a dos intentos de recierre; en el segundo recierre aún está presente la falla la cual es detectada de nuevo por el interruptor automático y sin un tercer intento de recierre es aislada la red fallada del suministro de energía.

Esta prueba se realiza de dos formas diferentes. La primera consiste en la simulación del evento haciendo el tiempo B igual al tiempo A y obteniendo los valores del  $P_{st}$  para cinco duraciones distintas. La segunda obtiene los valores del  $P_{st}$  para cinco valores distintos de tiempo B y manteniendo el tiempo A constante. Esto permite considerar diferentes tiempos en la coordinación de las protecciones.

Figura 28. Tensión eficaz durante una secuencia de dos recierres con apertura permanente, en una red de alimentación fallada (línea azul) y en una barra antes del interruptor automático (línea roja).



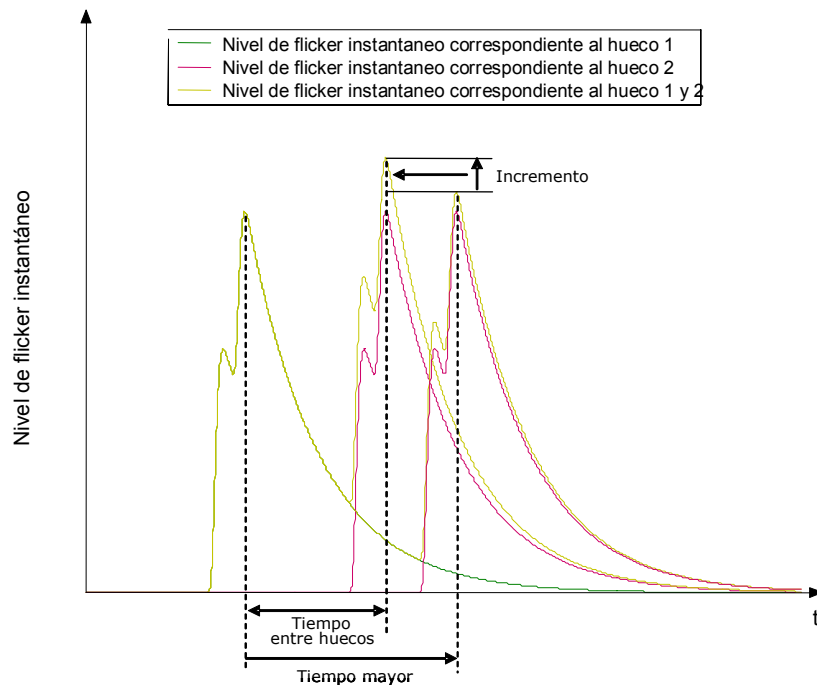
Fuente: Autores del proyecto.

**3.1.4.1. Resultados y observaciones.** La ocurrencia de dos eventos sucesivos (hueco o elevación) dentro del intervalo de medida, se refleja en la señal de nivel *flicker* instantáneo como dos picos separados uno del otro por un tiempo igual al tiempo entre eventos.

Debido a que la señal de nivel de *flicker* instantáneo correspondiente a la ocurrencia de dos eventos sucesivos es igual a la superposición de las señales individuales de nivel de flicker instantáneo correspondientes a la ocurrencia de cada evento por separado, la amplitud del segundo pico se incrementa con la disminución del tiempo entre eventos (ver figura 29), lo que se refleja a la vez como un aumento en el valor del  $P_{st}$ . Este comportamiento es igual cuando ocurren más de dos eventos durante el intervalo de medida y se puede observar en los resultados obtenidos de la simulación del caso 1 y 2, y que se presentan en las tablas 27, 28 y 29.

Cuando el tiempo entre eventos es lo suficientemente grande como para que el nivel de *flicker* instantáneo correspondiente al primer evento sea tan pequeño que no produzca un aumento en el nivel de *flicker* correspondiente al segundo evento, no se presenta variación significativa en el valor del  $P_{st}$  con el incremento en el tiempo.

Figura 29. Nivel de *flicker* instantáneo para dos huecos sucesivos.



Fuente: Autores del proyecto.

Comparando los resultados de las tablas 27 y 28 se observa que el valor del  $P_{st}$  se incrementa al aumentar el número de eventos que ocurren durante el intervalo de medida, así como también, con el incremento de la magnitud de la perturbación de la tensión.

Es importante notar, que aunque el  $P_{st}$  tiene una tendencia creciente con el número de eventos, a partir de este indicador no se puede determinar si su valor corresponde a la ocurrencia de uno o dos eventos durante el intervalo de medida. Así por ejemplo, la ocurrencia de un hueco de tensión de 0,85 p.u y 42,9 ms de duración, se refleja con un valor de 2,9454 en el  $P_{st}$ ; de igual forma, la ocurrencia de dos huecos de tensión de magnitud 0,9 p.u., 100 ms de duración y 3 s entre eventos, origina un  $P_{st}$  de 2,9425 (celda sombreado azul, tabla 27), valor similar al anterior, que no permite discriminar y diferenciar las características de la perturbación de tensión.

Tabla 27. Variación del número de eventos caso 1.

Magnitud del incremento de tensión ( $\Delta V$ )	Duración (s)	Tiempo entre eventos (s)	$P_{st}$	
			Elevación	Hueco
0,1	100e-3	100e-3	3,4955	3,1675
		1	3,2773	2,9700
		3	3,2477	2,9425
		30	3,2481	2,9417
		60	3,2481	2,9413
0,2	100e-3	100e-3	7,3190	6,0059
		1	6,8583	5,6321
		3	6,7985	5,5803
		30	6,8016	5,5768
		60	6,8024	5,5751
0,3	100e-3	100e-3	11,4651	8,5139
		1	10,7458	7,9818
		3	10,6551	7,9079
		30	10,6609	7,9032
		60	10,6622	7,9009
0,4	100e-3	100e-3	15,9366	10,6902
		1	14,9361	10,0234
		3	14,8095	9,9304
		30	14,8248	9,9218
		60	14,8266	9,9179

Tabla 28. Variación del número de eventos caso 2A.

Magnitud del incremento de tensión ( $\Delta V$ )	Duración (s)	Tiempo entre eventos A=B (s)	$P_{st}$	
			Elevación	Hueco
0,1	100e-3	100e-3	4,1951	3,8026
		1	3,4697	3,1474
		3	3,4181	3,0987
		30	3,4186	3,0960
		60	3,4190	3,0955
0,2	100e-3	100e-3	7,3423	6,0270
		1	7,2622	5,9699
		3	7,1557	5,8774
		30	7,1595	5,8692
		60	7,1604	5,8671
0,3	100e-3	100e-3	11,5035	8,5429
		1	11,3744	8,4637
		3	11,2134	8,3345
		30	11,2197	8,3180
		60	11,2233	8,3136
0,4	100e-3	100e-3	15,9985	10,7248
		1	15,8030	10,6323
		3	15,5848	10,4669
		30	15,6017	10,4423
		60	15,6068	10,4360

Tabla 29. Variación del número de eventos caso 2B.

Magnitud del incremento de tensión ( $\Delta V$ )	Duración (s)	Tiempo entre eventos (s)		$P_{st}$	
		A	B	Elevación	Hueco
0,1	100e-3	1	2	3,4429	3,1236
			3	3,4428	3,1215
			4	3,4428	3,1215
			5	3,4428	3,1215
			60	3,4428	3,1215
0,2	100e-3	1	2	7,2079	5,9237
			3	7,2077	5,9190
			4	7,2077	5,9190
			5	7,2077	5,9190
			60	7,2095	5,9173
0,3	100e-3	1	2	11,2931	8,3987
			3	11,2928	8,3941
			4	11,2930	8,3923
			5	11,2930	8,3921
			60	11,3058	8,3893
0,4	100e-3	1	2	15,6932	10,5506
			3	15,6930	10,5428

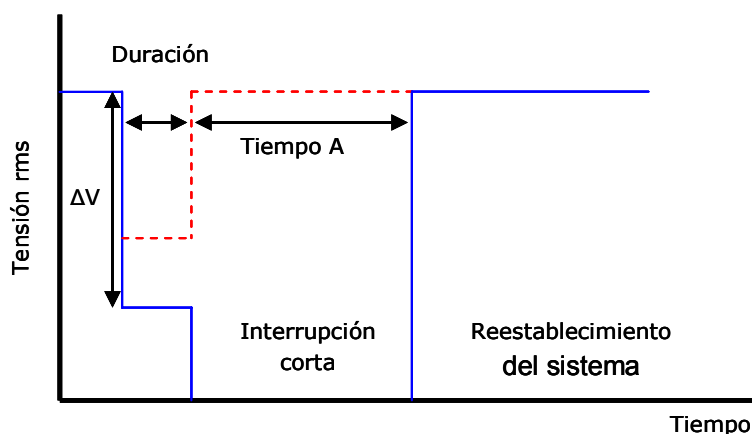
			4	15,6930	10,5403
			5	15,6950	10,5403
			60	15,7250	10,5342

### 3.2. RESPUESTA ANTE INTERRUPCIONES

Esta prueba se realizó con el objetivo de determinar la tendencia del  $P_{st}$  ante variaciones en la duración de interrupciones debidas a la operación de un interruptor automático. Utilizando 64 clases y 1 kHz de frecuencia de muestreo en el proceso estadístico, en un tiempo de observación de 10 minutos.

- Caso 1. El objetivo de la prueba es determinar la tendencia del  $P_{st}$  ante variaciones en la duración de interrupciones de corta duración debido a un recierre y posterior reestablecimiento del sistema (línea azul figura 30).

Figura 30. Tensión eficaz durante un recierre con posterior reestablecimiento del sistema, en una red de alimentación fallada (línea azul) y en una barra antes del interruptor automático (línea roja).



Fuente: Autores del proyecto.

- Caso 2. Consiste en una interrupción de corta duración debido a una secuencia de dos recierres con reposición del sistema en el segundo recierre como se muestra en la línea azul de la figura 27.

- Caso 3. Similar al caso 2 con la diferencia que no hay restablecimiento del sistema después del segundo recierre (línea azul figura 28). Este evento se identifica como una interrupción de larga duración.
- Caso 4. Consiste en una interrupción debido a un recierre y posterior reestablecimiento del sistema (ver figura 30, línea azul). La simulación se realiza para tiempos mayores a 60 s, lo cual corresponde a una interrupción de larga duración.

**3.2.1 Resultados y observaciones.** Los resultados se presentan en las tablas 30, 31, 32 y 33 las cuales corresponden a los casos 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

Tabla 30. Respuesta ante interrupciones caso 1.

$\Delta V$	Duración (s)	Tiempo A (s)	$P_{st}$
0,5	100e-3	1	11,2307
		5	12,1939
		30	25,9844
		60	77,5058

Comparando los resultados de la simulación del caso 1 y 2 con los resultados del caso 3, se observa que el medidor de *flicker* da una mayor ponderación a los valores del  $P_{st}$  en las interrupciones de corta duración (tablas 30 y 31), que en las interrupciones de larga duración (tabla 32).

Para los cuatro casos se incrementa el valor del  $P_{st}$  con el incremento en el tiempo de interrupción.

Tabla 31. Respuesta ante interrupciones caso 2.

$\Delta V$	Duración (s)	Tiempo A (s)	Tiempo B (s)	$P_{st}$
0,1	100e-3	1	1	13,4270
			3	13,7669
			5	14,2617
			30	26,9200
			60	80,2515
0,2	100e-3	1	1	12,1292
			3	12,4424
			5	12,8978
			30	26,9512
			60	80,3521
0,3	100e-3	1	1	11,1943
			3	11,5883
			5	12,0713
			30	26,9797
			60	80,4412
0,4	100e-3	1	1	11,1805
			3	11,5833
			5	12,0651
			30	27,0034
			60	80,5185
0,5	100e-3	1	1	11,4270
			3	11,9378
			5	12,5230
			30	27,0228
			60	80,5840

Tabla 32. Respuesta ante interrupciones caso 3.

$\Delta V$	Duración (s)	Tiempo A (s)	Tiempo B (s)	$P_{st}$
0,5	100e-3	1	1	6,9202
			3	7,0104
			5	7,1720
			30	11,0029
			60	27,0110

En las simulaciones realizadas se obtuvo que un valor de  $P_{st}$  de 70,8839 corresponde a un hueco de tensión con profundidad de 0,9 p.u y 60 s de duración, el cual es el más severo que se puede presentar según la

clasificación de las variaciones de corta duración presentada en resolución CREG 024-2005. Este valor es más pequeño que el mínimo valor que se puede presentar en las interrupciones simuladas en el caso 4. Lo anterior permite concluir que es posible diferenciar entre la ocurrencia de una interrupción como la descrita en el caso 4 de un hueco y elevación de tensión por medio del  $P_{st}$ .

Tabla 33. Respuesta ante interrupciones caso 4.

$\Delta V$	Duración (s)	Tiempo A (s)	$P_{st}$
0,1	100e-3	60	80,2515
		90	237,3217
		120	681,3357
0,2	100e-3	60	80,3521
		90	237,6139
		120	682,1351
0,3	100e-3	60	80,4412
		90	237,8724
		120	682,8420
0,4	100e-3	60	80,5185
		90	238,0969
		120	683,4559
0,5	100e-3	60	80,5840
		90	238,2871
		120	683,9762

### 3.3. RESPUESTA ANTE TRANSITORIOS DE TENSIÓN

Los transitorios de tensión se clasifican como impulsivos u oscilatorios, siendo estos últimos de baja frecuencia, mediana frecuencia o de alta frecuencia dependiendo del valor de la frecuencia de oscilación (ver tabla 34).

En esta prueba se evalúa el comportamiento de la respuesta del algoritmo del medidor de *flicker* propuesto por el estándar IEC 61000-4-15 ante la variación de la frecuencia, duración y magnitud de los transitorios oscilatorios de tensión de baja frecuencia (ver figura 31). El análisis no se extiende a los transitorios

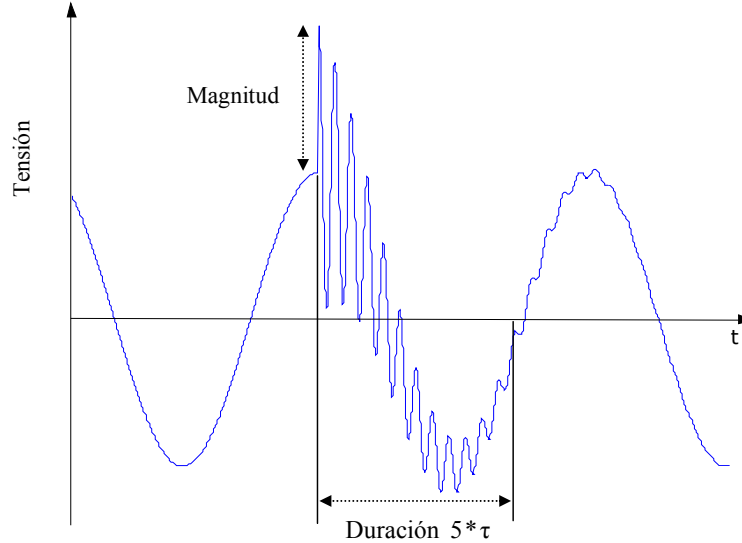
de mediana y alta frecuencia debido a que se requiere grandes recursos computacionales para su simulación.

Tabla 34. Características del transitorio.

Transitorio		Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud de tensión típica
Impulsivo	Nanosegundos	Ocurrencia del Pico 5 ns	<50 ns	
	Microsegundos	Ocurrencia del Pico 1 $\mu$ s	50 ns-1 ms	
	Milisegundos	Ocurrencia del Pico 0,1 ms	>1 ms	
Oscilatorio	Baja frecuencia	<5 kHz	0,3-50 ms	0-4 p.u
	Mediana frecuencia	5-500 kHz	20 $\mu$ s	0-8 p.u
	Alta frecuencia	0,5-5 MHz	5 $\mu$ s	0-4 p.u

Fuente: IEEE Std 1159-1995.

Figura 31. Transitorio de tensión en la señal de entrada.



Fuente: Autores del proyecto.

**3.3.1 Resultados y observaciones.** De las tablas 35 y 36 se puede observar que:

- El  $P_{st}$  se aumenta con el incremento de la magnitud del transitorio de tensión.
- Un aumento en la duración del transitorio produce un incremento en el valor del  $P_{st}$ .
- Un incremento en la frecuencia de oscilación del transitorio, produce una insignificante caída en el valor del  $P_{st}$ . Por tanto la frecuencia del transitorio no tiene efectos apreciables sobre la medida del  $P_{st}$ .

Tabla 35.  $P_{st}$  para un transitorio de 5 kHz y 4 p.u, variando su duración.

Frecuencia (kHz)	Duración (ms)	Magnitud (p.u)	$P_{st}$
5	0,3	4	0,2718
	12,725		6,9058
	25,15		13,4728
	37,575		19,7316
	50		25,6412

Tabla 36.  $P_{st}$  para un transitorio de 50 ms, variando su frecuencia y magnitud.

Frecuencia (kHz)	Magnitud (p.u)			
	1	2	3	4
0,5	1,6505	6,5278	14,6272	25,7396
1,0	1,6212	6,4591	14,5084	25,6603
2,0	1,6117	6,4351	14,4653	25,6449
3,0	1,6011	6,4071	14,4131	25,6424
4,0	1,6080	6,4256	14,4478	25,6416
5,0	1,6073	6,4240	14,4448	25,6412

## **4. PRUEBAS COMPLEMENTARIAS DEL COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE**

### **P<sub>ST</sub>**

El algoritmo propuesto por el estándar IEC 61000-4-15 especifica una frecuencia mínima de muestreo de 50 Hz y un número mínimo de clases de 64 para el proceso estadístico<sup>23</sup>. En este capítulo se hace un estudio del comportamiento del nivel de severidad de *flicker* a corto plazo (P<sub>st</sub>) con relación a estos parámetros.

Dado que el P<sub>st</sub> ha sido establecido en Colombia por la CREG como un indicador único para las perturbaciones de la señal de tensión, también se ha analizado el comportamiento del P<sub>st</sub> cuando la señal de tensión tiene armónicos y ante las variaciones en la regulación de tensión.

#### **4.1. COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE P<sub>ST</sub> ANTE CAMBIOS EN EL NÚMERO DE CLASES Y LA FRECUENCIA DE MUESTREO**

Estas pruebas permiten establecer el impacto que tiene sobre el índice P<sub>st</sub> los cambios de parámetros de construcción del medidor de *flicker* permitido por el estándar IEC 61000-4-15, tales como el número de clases y la frecuencia de muestreo del proceso estadístico.

**4.1.1 Variación del número de clases.** Para analizar el efecto del número de clases se obtiene el valor del P<sub>st</sub> para la onda de entrada presentada en la figura 18 (perturbación severa), manteniendo la frecuencia de muestreo constante e igual a 50 HZ y variando el número de clases del algoritmo desde

---

<sup>23</sup> INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. p. 23.

64 hasta 4096, que corresponde a una resolución de 6 y 12 bits respectivamente. La prueba también se realiza para una frecuencia de 1 kHz.

Para el mismo intervalo, número de clases y frecuencia de muestreo constante se cambia la onda de entrada por una onda de tensión senoidal con una modulación de onda cuadrada (figura 16) de frecuencia 13,5 Hz y magnitud 0,547%, que tiene un valor de  $P_{st}$  de 1.

**4.1.1.1. Resultados y observaciones.** De las figuras 32 y 33 se puede establecer que el  $P_{st}$  tiende a decrecer exponencialmente al incrementar el número de clases.

Comparando las figuras 32 y 33 se observa valores del  $P_{st}$  mayores para la frecuencia de muestreo de 1 kHz. La mayor diferencia entre el valor del  $P_{st}$  para una frecuencia de 1 kHz y el valor del  $P_{st}$  para una frecuencia de 50 Hz se presenta cuando el número de clases es 4096.

Contrastando las figuras 32 y 33 con las figuras 34 y 35 se observa que para valores grandes de  $P_{st}$ , un cambio en el número de clases produce cambios apreciables a la salida del algoritmo (en las décimas y unidades del valor del  $P_{st}$ ), mientras que para valores pequeños los cambios son menores y se reflejan en las milésimas del valor del  $P_{st}$ ; es decir, para valores grandes de  $P_{st}$  existe una incertidumbre mayor que para valores pequeños del mismo al cambiar el número de clases. Se concluye que la incertidumbre en el índice  $P_{st}$  esta afectada por el número de clases cuando el  $P_{st}$  tiene valores elevados, lo cual se presenta en perturbaciones severas.

Cuando el número de clases se incrementa, la dependencia de la incertidumbre del índice  $P_{st}$  es menor. Esto permite concluir que se pueden presentar diferentes valores de  $P_{st}$  para una misma perturbación en diferentes medidores de *flicker* de diferentes clases.

Figura 32.  $P_{st}$  en función del número de clases, frecuencia de muestreo de 50 Hz para una perturbación severa.

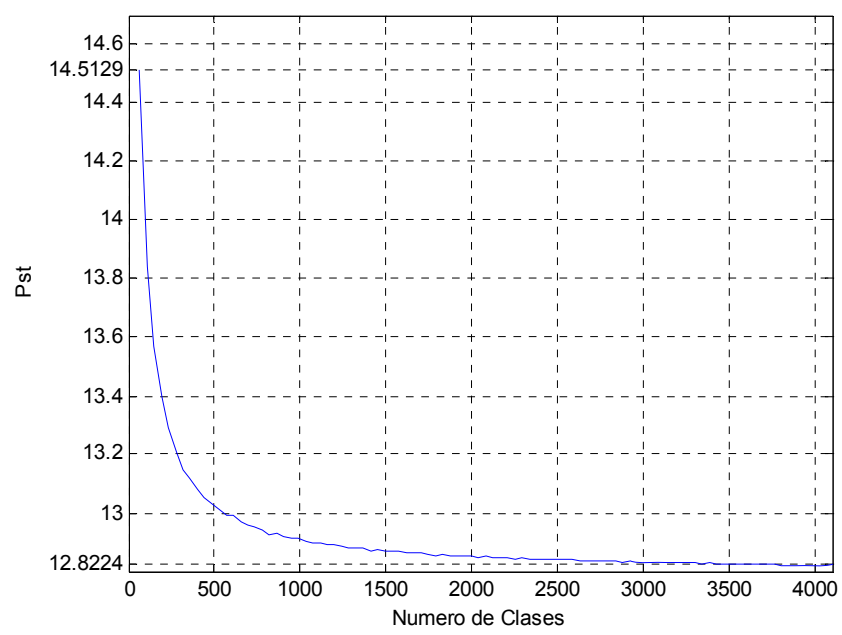


Figura 33.  $P_{st}$  en función del número de clases, frecuencia de muestreo de 1 kHz para una perturbación severa.

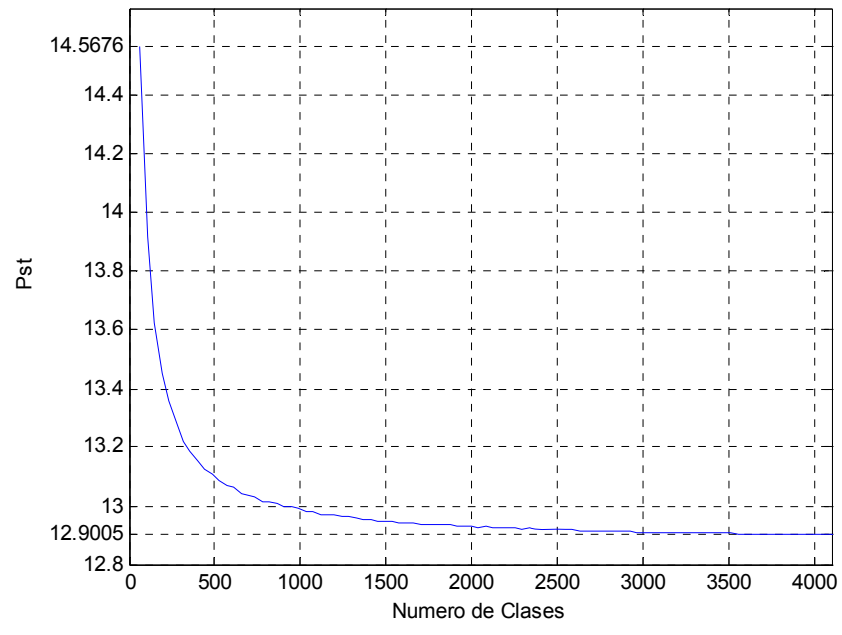


Figura 34.  $P_{st}$  en función del número de clases, frecuencia de muestreo de 50 Hz, para una perturbación leve.

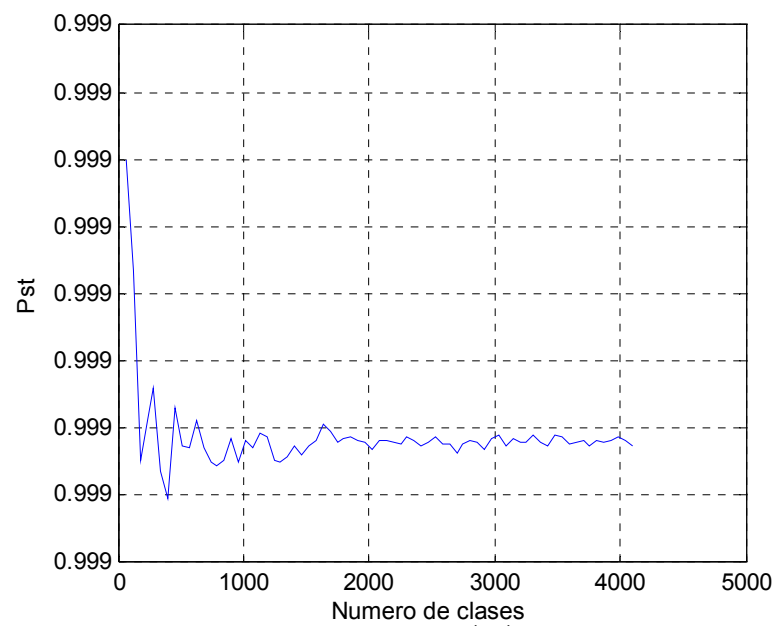
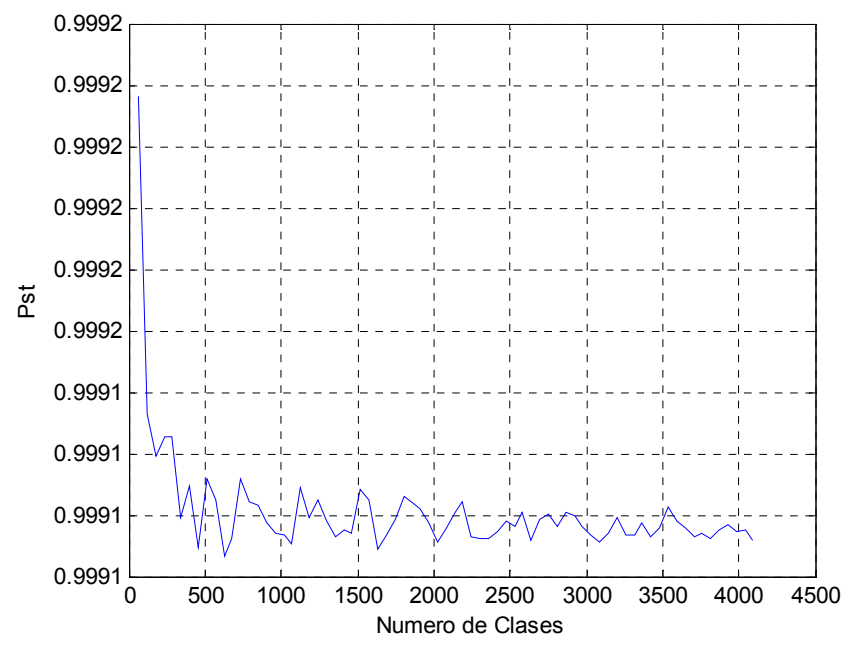


Figura 35.  $P_{st}$  en función del número de clases, frecuencia de muestreo de 1 kHz, para una perturbación leve.



**4.1.2 Variación de la frecuencia de muestreo.** En esta prueba se mantiene el valor del número de clases en 64 y 4096, y se varía la frecuencia de muestreo en un rango de 50 Hz a 4096 Hz; para las ondas de entrada utilizadas en la prueba anterior.

**4.1.2.1. Resultados y observaciones.** Las figuras 36 y 37 permiten observar el rápido incremento en el valor del  $P_{st}$  cuando se varía la frecuencia de muestreo desde 50 Hz hasta 250 Hz. Para frecuencias entre 250 y 1250, se presentan oscilaciones en el  $P_{st}$ , siendo más significativas cuando el número de clases es 4096. Para frecuencias mayores de 2 kHz se estabiliza el valor del  $P_{st}$ .

La diferencia entre el valor del  $P_{st}$  para la frecuencia mínima de muestreo y para una frecuencia de 4096 Hz, es menor del 5%, por consiguiente la incertidumbre está dentro de los límites permitidos. En la figura 38 se muestra la curva de  $P_{st}$  en función de la frecuencia de muestreo para 64 clases, considerando una perturbación leve; para 4096 clases tiene el mismo comportamiento.

Figura 36.  $P_{st}$  en función de la frecuencia de muestreo para 64 clases para perturbaciones severas.

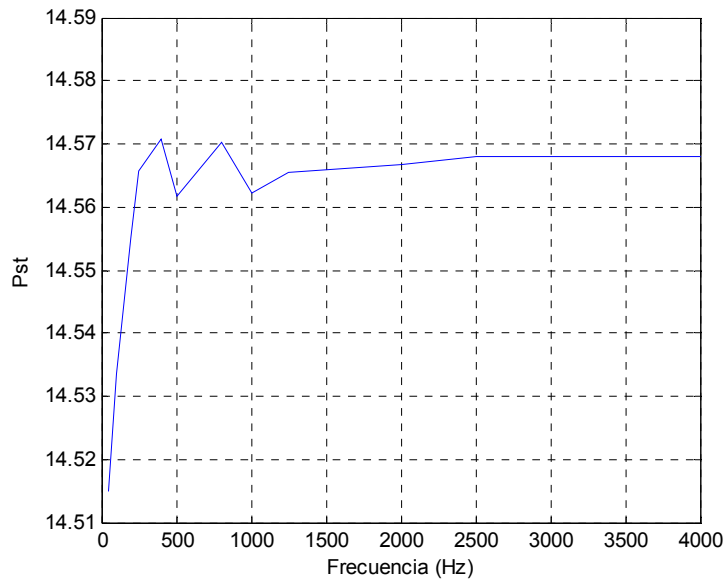


Figura 37.  $P_{st}$  en función de la frecuencia de muestreo para 4096 clases para perturbaciones severas.

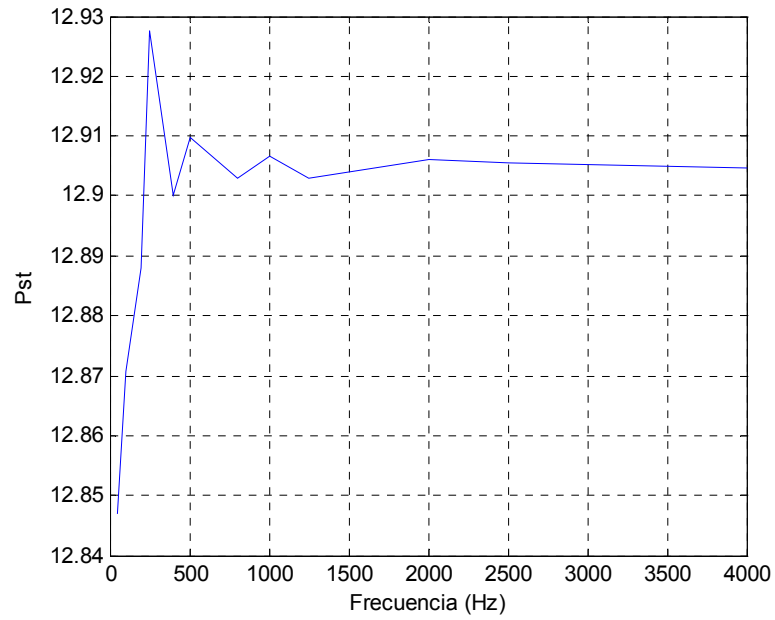
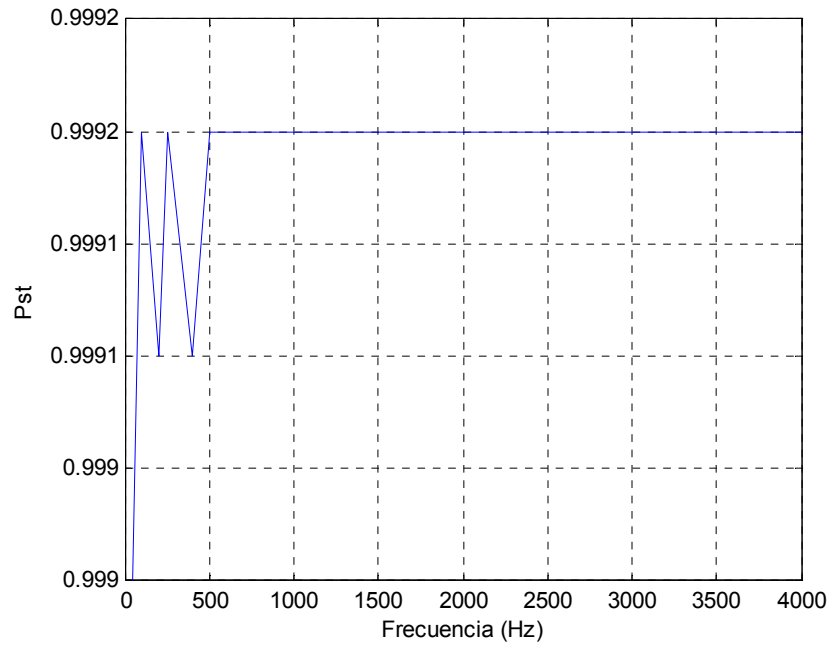


Figura 38.  $P_{st}$  en función de la frecuencia de muestreo para 64 clases para perturbaciones leves.



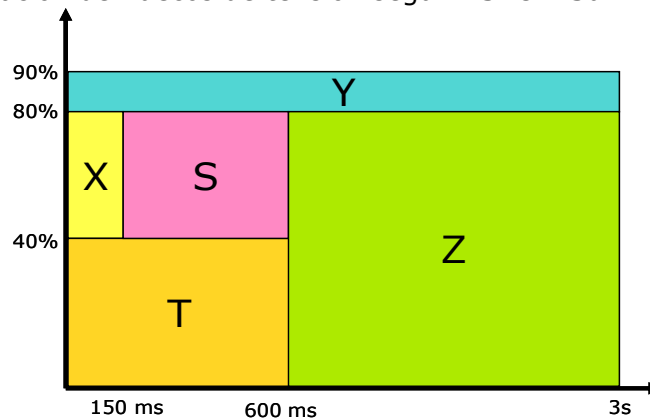
Esta prueba permite concluir que la frecuencia de muestreo del proceso estadístico no afecta de manera significativa la respuesta del medidor ante cualquier perturbación.

**4.1.3 Variación del número de clases para huecos de tensión.** En la actualidad se discuten a nivel internacional normas que permiten clasificar las perturbaciones de tensión, especialmente los huecos de tensión. Una norma establecida es la ESKOM de Sur África, la cual define cinco grupos de huecos de tensión como se especifica en la tabla 37 y figura 39. Teniendo en cuenta esta clasificación, se calculan los diferentes valores del  $P_{st}$  para establecer si con ellos se podría clasificar los eventos de forma similar a la norma ESKOM. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 40 y de ellos se dedujo que no se pueden obtener regiones definidas que permitan identificar la magnitud y duración del hueco correspondiente a un determinado valor de  $P_{st}$ .

Tabla 37. Clasificación de huecos de tensión según ESKOM Sur África.

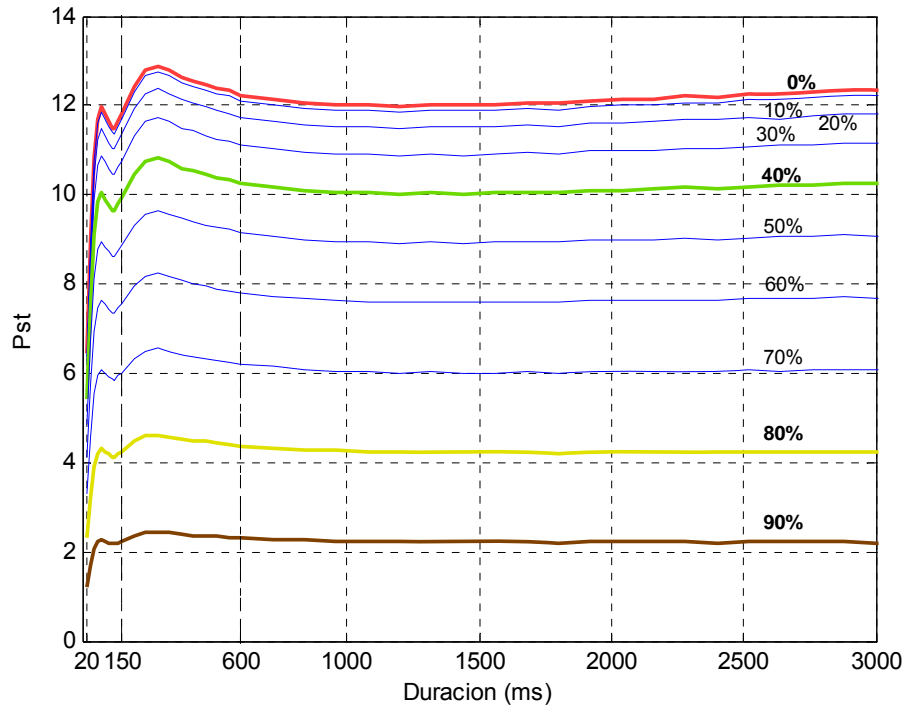
Clase	Magnitud (%)	Duración (ms)
Y	80-90	20-3000
X	40-80	20-150
S	40-80	150-600
T	0-40	20-600
Z	0-80	600-3000

Figura 39. Clasificación de huecos de tensión según ESKOM Sur África.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 40.  $P_{st}$  en función de la duración de huecos de tensión, hasta 3 s.



Extendiendo la duración de los huecos hasta 60 segundos como lo define la CREG<sup>24</sup> y para diferentes valores en su magnitud se obtienen las curvas de  $P_{st}$  (ver figura 41). Para huecos de tensión leves al incrementarse la duración del mismo el índice  $P_{st}$  tiende a estabilizar su valor; mientras para huecos de tensión severos (10% - 60%) se incrementa al aumentar la duración, con una mayor rapidez al ser mayor dicha perturbación.

Ahora para magnitudes de huecos de tensión de 0,9; 0,4 y 0 p.u, con duraciones entre 20 y 3000 ms, se varía el número de clases desde 64 hasta 4096 (figuras 42, 43 y 44). Se observa que al aumentar el número de clases el valor del  $P_{st}$  se hace menor, siendo la medida y su incertidumbre mayor para perturbaciones severas.

<sup>24</sup> COMISIÓN DE REGULACION DE ENERGIA Y GAS CREG. Resolución 024 de 2005. Artículo 1º, Definiciones. Colombia: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2005. p. 4.

Figura 41.  $P_{st}$  en función de la duración del hueco de tensión, hasta 60 s.

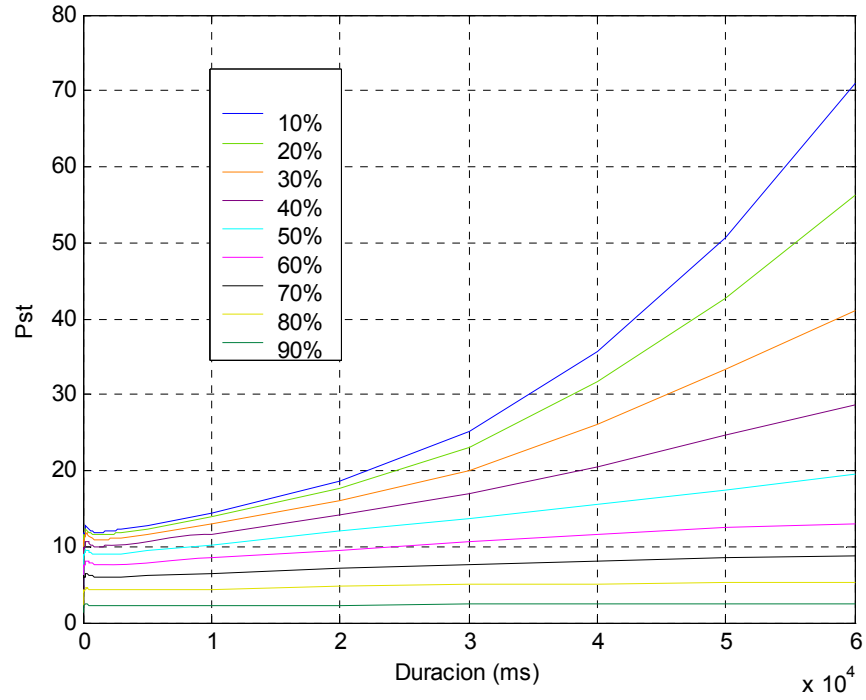


Figura 42.  $P_{st}$  en función de la duración de un hueco de tensión de 0 p.u.

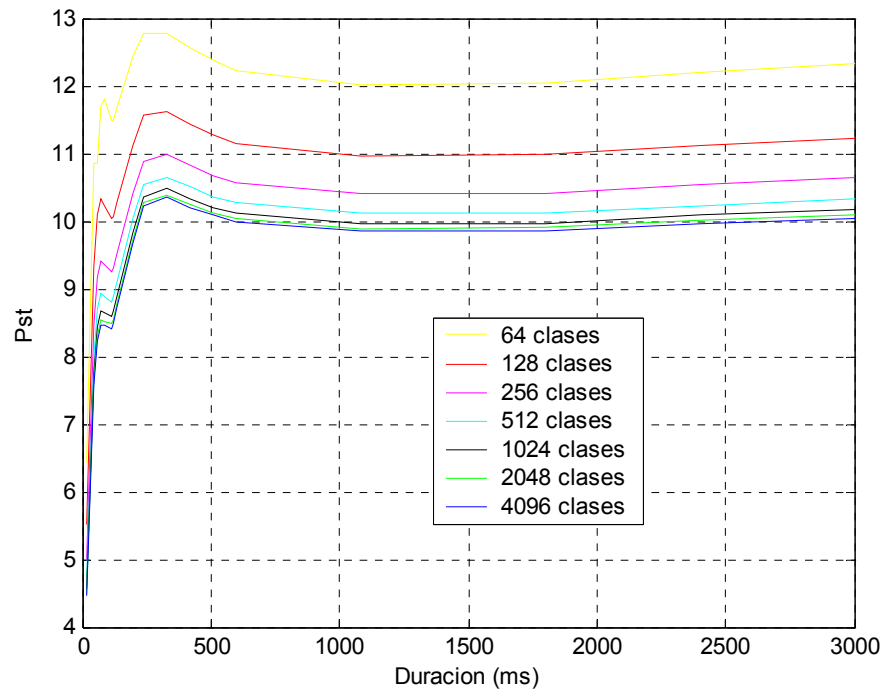


Figura 43.  $P_{st}$  en función de la duración de un hueco de tensión de 0,9 p.u.

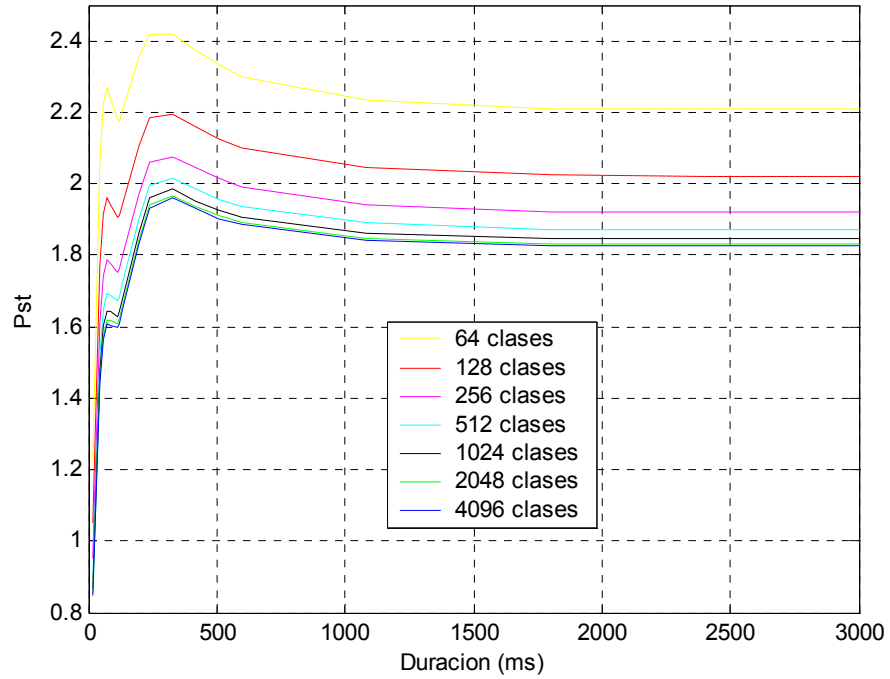
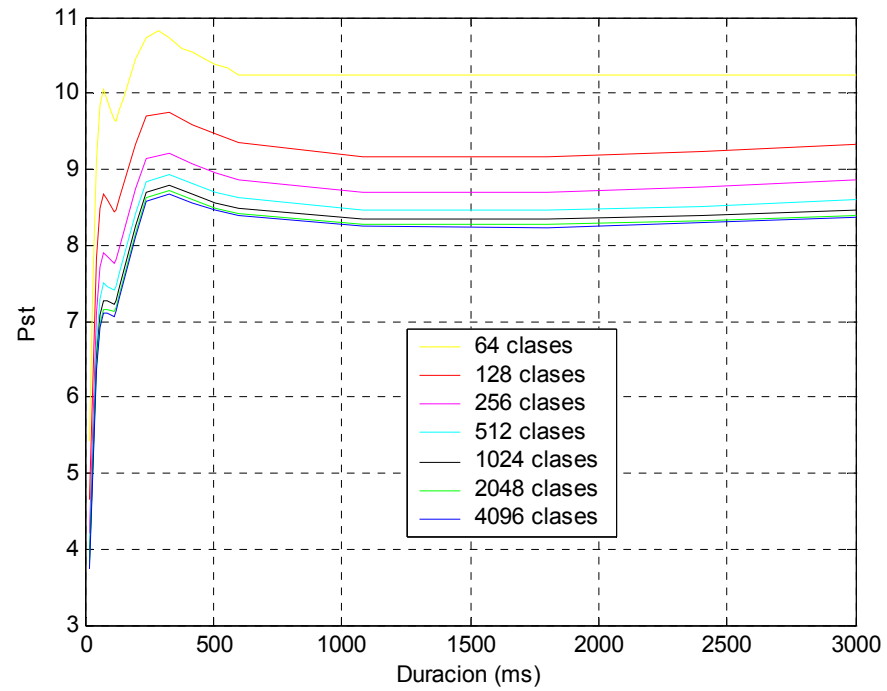
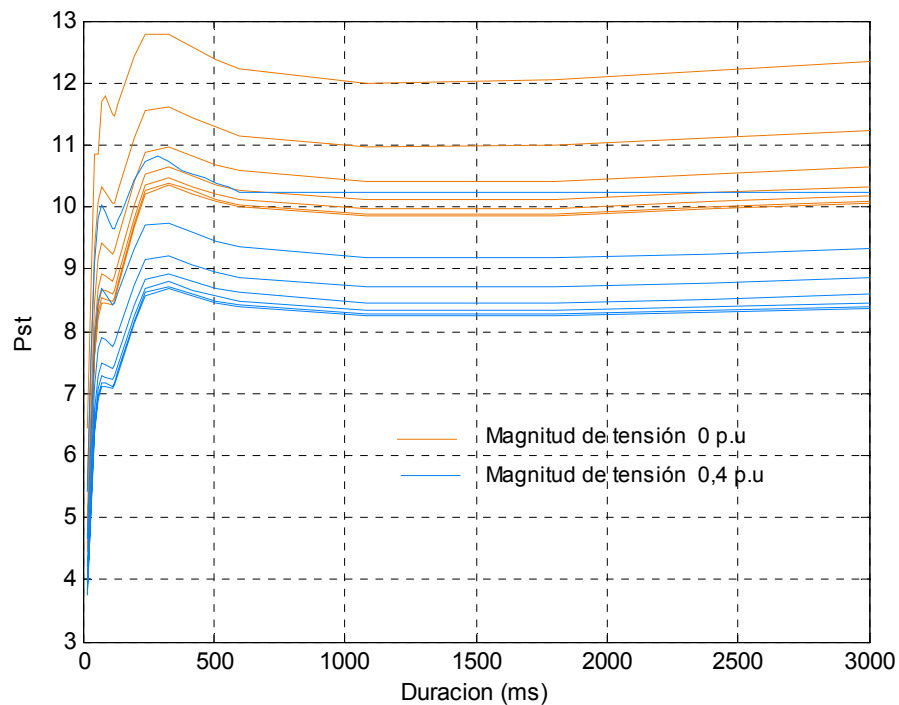


Figura 44.  $P_{st}$  en función de la duración de un hueco de tensión de 0,4 p.u.



En la figura 45 se hace una comparación entre las curvas para diferentes números de clases de huecos de tensión de 0 y 0,4 p.u. En ésta se evidencia que el índice  $P_{st}$  no permite caracterizar una perturbación de tensión y que medidores con diferentes números de clases obtienen valores diferentes para un mismo evento en la señal de tensión. Estos resultados permiten concluir que con el índice  $P_{st}$  no es posible establecer un criterio de clasificación de perturbaciones de tensión.

Figura 45. Comparación huecos de tensión de 0 y 0,4 p.u.



#### 4.2. COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE $P_{ST}$ ANTE VARIACIONES EN ESTADO ESTABLE

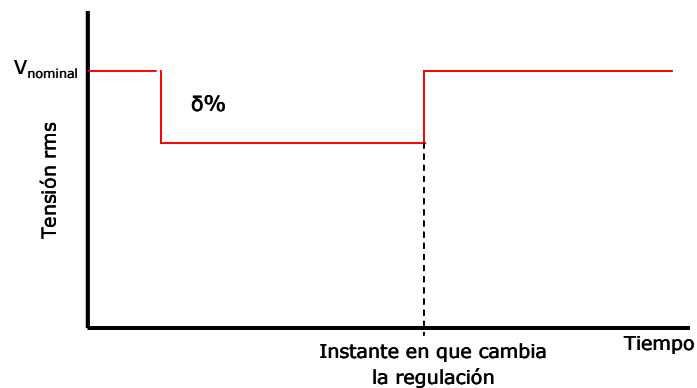
A continuación se muestran los resultados obtenidos en simulaciones del algoritmo de medición de *flicker* normalizado para determinar el efecto que tienen cambios en la regulación de tensión y la presencia de armónicos,

subarmónicos e interarmónicos de tensión sobre éste indicador de calidad de energía eléctrica ( $P_{st}$ ).

**4.2.1 Respuesta ante variaciones en la regulación de tensión.** Esta prueba permite determinar la tendencia del  $P_{st}$  ante variaciones de la regulación de tensión en un periodo de observación de 10 minutos. Se simularon tres casos de cambios en el nivel de tensión, considerando cuatro opciones:  $\pm 2,5\%$ ,  $\pm 5,0\%$ ,  $\pm 7,5\%$  y  $\pm 10\%$ . Los casos simulados se describen a continuación:

- Caso 1. Consiste en una señal de tensión senoidal a la entrada del algoritmo, después de 5 segundos se produce una variación de la regulación que permanece durante un periodo de tiempo; al final de este intervalo la tensión retorna a su valor nominal (ver figura 46).

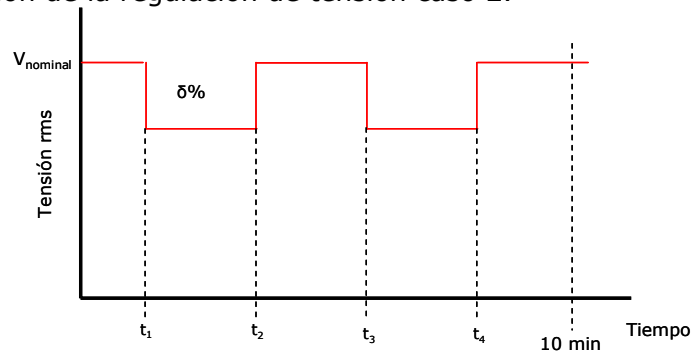
Figura 46. Variación de la regulación de tensión caso 1.



Fuente: Autores del proyecto.

- Caso 2. Consiste en la ocurrencia de cuatro cambios en la regulación de tensión en cuatro instantes de tiempo distintos como se ilustra en la figura 47. Los instantes de tiempo  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  son constantes y toman valores de 2, 4 y 6 minutos, respectivamente. El instante de tiempo  $t_4$  es variable y toma valores de 8, 9, 10 y 12 minutos.

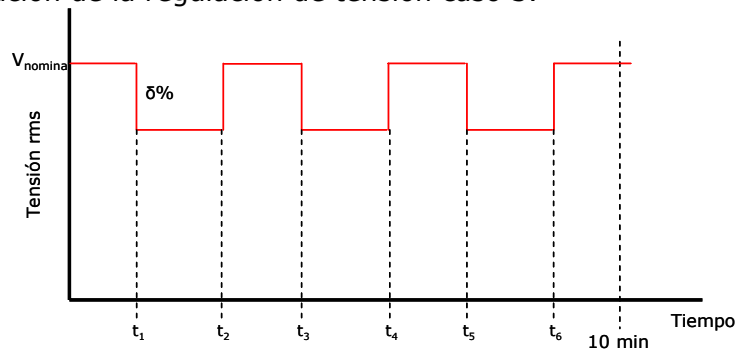
Figura 47. Variación de la regulación de tensión caso 2.



Fuente: Autores del proyecto.

- Caso 3. Se ilustra en la figura 48. Los instantes de tiempo en los que ocurre el cambio en la regulación son: 1,43; 2,86; 4,29; 5,72 y 7,15 minutos para  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  y  $t_5$ , respectivamente. El instante de tiempo  $t_6$  es variable y toma valores de: 8,5; 9; 9,5; 10 y 12 minutos.

Figura 48. Variación de la regulación de tensión caso 3.



Fuente: Autores del proyecto.

**4.2.1.1. Resultados y observaciones.** Los resultados de la simulación de los casos 1, 2 y 3, para 64 y 4096 clases, se muestran en las tablas 38-43, de los cuales se percibe una mayor perceptibilidad cuando el medidor detecta todas las posibles variaciones de regulación de tensión durante el intervalo de 10 minutos. Además el  $P_{st}$  tiene una tendencia creciente con el incremento en el valor de la magnitud de la regulación, así como también con el aumento en el número de cambios.

Es importante resaltar que en el sistema eléctrico colombiano, se considera que se cumple la regulación de tensión si las variaciones en el valor eficaz se sitúan en un intervalo de  $\pm 10\%$ <sup>25</sup>. Partiendo de este planteamiento se observa que para variaciones dentro de este intervalo el  $P_{st}$  tiene valores por encima de uno, lo cual indicaría que hay una perturbación de la señal de tensión, cuando la tensión presente cumple con lo establecido como regulación de tensión.

Además, cabe la posibilidad que el valor del  $P_{st}$  correspondiente a un evento de cambio en la regulación de tensión de  $+10\%$  ( $P_{st}=1,6512$ ; tabla 38) sea confundido con el  $P_{st}$  para un hueco de tensión de 20 ms de duración y con magnitud un poco por encima de 0,85 p.u ( $P_{st}=1,7878$ ).

Tabla 38.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 1, 64 clases.

Instante de cambio en la regulación (min)	$P_{st}$							
	Regulación (%)							
	10	7,5	5,0	2,5	-2,5	-5	-7,5	-10
2,5	2,4887	1,6924	1,1310	0,5681	0,5815	1,1877	1,8235	2,2482
5,0	2,4908	1,6915	1,1310	0,5681	0,5816	1,1882	1,8240	2,2474
7,5	2,4908	1,6915	1,1310	0,5681	0,5816	1,1882	1,8240	2,2474
10,0	1,6512	1,3520	0,8906	0,4400	0,4292	0,8473	1,2547	1,8243
12,0	1,6512	1,3520	0,8906	0,4400	0,4292	0,8473	1,2547	1,8243

Tabla 39.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 1, 4096 clases.

Instante de cambio en la regulación (min)	$P_{st}$							
	Regulación (%)							
	10	7,5	5,0	2,5	-2,5	-5	-7,5	-10
2,5	1,8097	1,3714	0,9245	0,4680	0,4795	0,9721	1,4783	1,9974
5,0	1,8078	1,3714	0,9245	0,4678	0,4796	0,9723	1,4786	1,9990
7,5	1,8078	1,3714	0,9245	0,4678	0,4796	0,9723	1,4786	1,9990
10,0	1,2372	0,9170	0,6041	0,2986	0,2912	0,5747	0,8509	1,1198
12,0	1,2372	0,9170	0,6041	0,2986	0,2912	0,5747	0,8509	1,1198

<sup>25</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS CREG. Resolución 024 de 2005. ANEXO 1. Colombia: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2005. p. 9.

Tabla 40.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 2, 64 clases.

$t_4$ (min)	$P_{st}$							
	Regulación (%)							
	10	7,5	5	2,5	-2,5	-5	-7,5	-10
8,0	2,6434	1,9955	1,3398	0,6753	0,6916	1,4086	2,1514	2,9242
9,0	2,6420	1,9950	1,3394	0,6750	0,6920	1,4092	2,1526	2,9276
10,0	2,5452	1,9093	1,2730	1,1558	1,3069	1,3069	1,9888	2,6938
12,0	2,5452	1,9093	1,2730	1,1558	1,3069	1,3069	1,9888	2,6938

Tabla 41.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 2, 4096 clases.

$t_4$ (min)	$P_{st}$							
	Regulación (%)							
	10	7,5	5	2,5	-2,5	-5	-7,5	-10
8,0	2,3088	1,7532	1,1835	0,5994	0,6142	1,2432	1,8877	2,5481
9,0	2,3069	1,7523	1,1834	0,5994	0,6144	1,2435	1,8881	2,5506
10,0	2,1858	1,6465	1,1030	0,5535	0,5586	1,1214	1,6899	2,2632
12,0	2,1858	1,6465	1,1030	0,5535	0,5586	1,1214	1,6899	2,2632

Tabla 42.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 3, 64 clases.

$t_6$ (min)	$P_{st}$							
	Regulación (%)							
	10	7,5	5	2,5	-2,5	-5	-7,5	-10
8,5	2,8734	2,1707	1,4571	0,7336	0,7514	1,5294	2,3338	3,1654
9,0	2,8712	2,1692	1,4565	0,7334	0,7518	1,5306	2,3372	3,1719
9,5	2,8702	2,1688	1,4563	0,7333	0,7518	1,5309	2,3389	3,1705
10,0	2,8069	2,1125	1,4138	0,7096	0,7212	1,4612	2,2210	3,0031
12,0	2,8069	2,1125	1,4138	0,7096	0,7212	1,4612	2,2210	3,0031

Tabla 43.  $P_{st}$  ante variaciones en la regulación de tensión caso 3, 4096 clases.

$t_6$ (min)	$P_{st}$							
	Regulación (%)							
	10	7,5	5	2,5	-2,5	-5	-7,5	-10
8,5	2,5822	1,9599	1,3216	0,6683	0,6846	1,3869	2,1071	2,8418
9,0	2,5794	1,9585	1,3206	0,6681	0,6847	1,3876	2,1087	2,8457
9,5	2,5780	1,9575	1,3205	0,6680	0,6848	1,3880	2,1093	2,8464
10,0	2,5023	1,8900	1,2691	0,6396	0,6495	1,3080	1,9748	2,6538
12,0	2,5023	1,8900	1,2691	0,6396	0,6495	1,3080	1,9748	2,6538

Si aumentamos el número de clases a 4096, el cual es el máximo posible, se esperaría que el valor del  $P_{st}$  correspondiente a una variación de la regulación del  $\pm 10\%$ , para el caso 1, disminuya con la posibilidad de que caiga por debajo de  $1 \pm 5\%$  y por tanto no se consideraría como una perturbación. Para 4096 el valor del  $P_{st}$  disminuyó, pero, no fue lo suficiente como para que el cambio en la regulación no se considere como una perturbación.

Por consiguiente, sin importar el número de clases, el indicador  $P_{st}$  para algunos cambios del nivel de tensión, permitidos por la regulación de tensión, daría resultados por encima de uno, que se consideran como inadecuada calidad de la señal.

#### **4.2.2 Respuesta ante armónicos, subarmónicos e interarmónicos de tensión.**

El objetivo de esta prueba es obtener el impacto de los subarmónicos, armónicos e interarmónicos, en el valor del  $P_{st}$ . A la onda de tensión de frecuencia fundamental 60 Hz se le suma una onda sinusoidal con una amplitud del 1 % de la fundamental y con un valor de frecuencia variable en el intervalo de 5 Hz a 240 Hz. Para cada frecuencia se obtiene el respectivo valor de  $P_{st}$ . También se realiza la misma prueba considerando una amplitud del 2, 3, 4% de la fundamental.

**4.2.2.1. Resultados y observaciones.** Cuando a la señal de tensión de frecuencia fundamental se superpone otra onda sinusoidal, con valores de frecuencia entre 5 Hz y 120 Hz, se produce una modulación en la magnitud de la tensión y por consiguiente una fluctuación en el valor eficaz de la tensión que es detectado por el medidor de flicker, cuya respuesta exhibe simetría con respecto a la frecuencia de 60 Hz y linealidad con el aumento de la amplitud del interarmónico (ver figura 49).

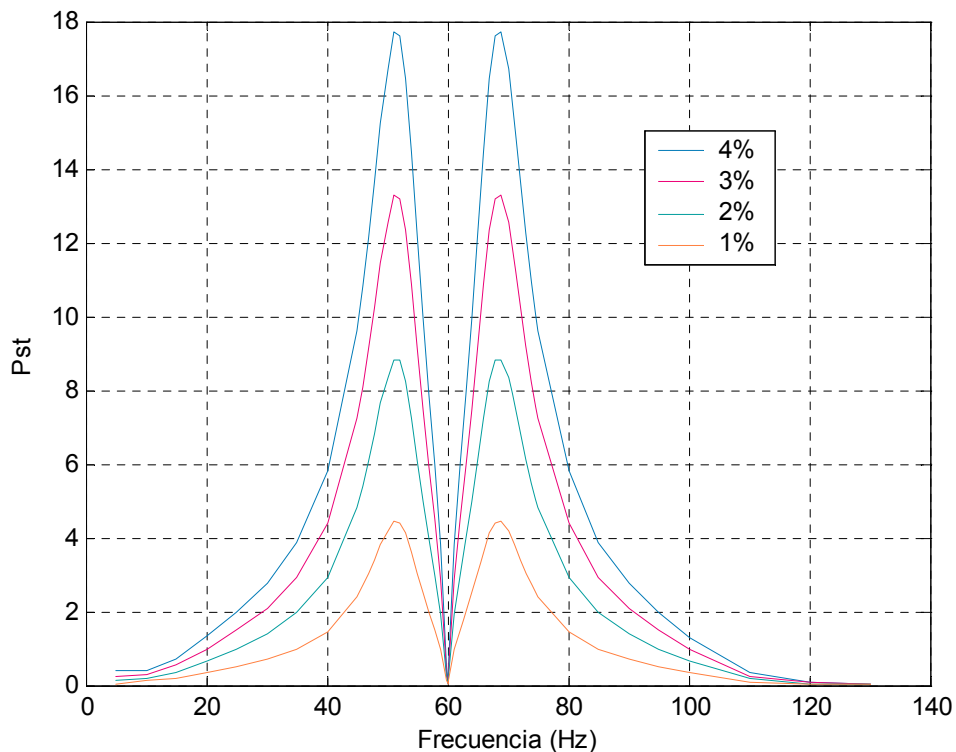
La frecuencia de modulación de la magnitud de la señal de tensión es:

$$f_M = |60 - f_i|$$

Donde  $f_i$  es la frecuencia del interarmónico. Debido a esta relación el valor máximo de  $P_{st}$  se presenta para la frecuencia subarmónica de 51,2 Hz y para la frecuencia interarmónica de 68,8 Hz, las cuales originan una frecuencia de modulación de 8,8 Hz, valor en donde el medidor de *flicker* es más sensible. De lo anterior se concluye que la presencia de interarmónicos y subarmónicos son considerados como fenómenos de *flicker* por el medidor de  $P_{st}$ .

Los armónicos de tensión no son detectados por el medidor de *flicker* debido a los filtros que este tiene, además debido a que éstos no producen modulación en la señal de tensión.

Figura 49.  $P_{st}$  ante interarmónicos y armónicos para diferentes magnitudes (en % de la fundamental).



## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

A continuación se establecen las conclusiones principales obtenidas una vez realizado este trabajo de grado y se hacen las recomendaciones y posibles futuros desarrollos asociados al mismo.

El cumplimiento de los ensayos de funcionamiento propuesto por el estándar IEC 61000-4-15 garantiza un adecuado comportamiento del medidor de  $P_{st}$  cuando la perturbación es el *flicker*. No obstante, esto no implica que diferentes medidores de *flicker* tengan la misma respuesta ante una misma entrada.

Se ha identificado el número de clases como el parámetro responsable de la diferencia entre valores de  $P_{st}$  obtenidos por medio de diferentes medidores de *flicker*, cuando la onda de perturbación a la entrada de los algoritmos es igual para todos. La variación del número de clases del medidor propuesto por el estándar IEC 61000-4-15 afecta la medición de fluctuaciones de tensión que producen valores grandes de  $P_{st}$ , por consiguiente, dependiendo del número de clases del medidor de *flicker* el resultado variará, lo que coincide con las conclusiones del estudio realizado a medidores de *flicker* en "*Comparative Test of Flickermeters*".

La diferencia entre valores de  $P_{st}$ , obtenidos por diferentes medidores de *flicker* con diferente número de clases, ante una misma entrada, es más notoria con el incremento en la severidad de la perturbación.

Al igual que para el número de clases, la frecuencia de muestreo es un parámetro al cual se le permite un margen de libertad en su selección, con la diferencia que una frecuencia de muestreo mayor o igual a la mínima

establecida por la IEC 61000-4-15 para el proceso estadístico, no afecta de manera significativa la respuesta del medidor ante cualquier perturbación.

Además de identificar el efecto del número de clases y la frecuencia de muestreo sobre la respuesta del medidor de flicker, también se pudo analizar el comportamiento del  $P_{st}$  para diferentes perturbaciones de tensión como huecos (caídas), elevaciones e interrupciones de tensión, y así como para variaciones en estado estable (regulación de tensión). De este análisis se obtuvieron características relevantes como:

- El  $P_{st}$  sirve la mayoría de las veces como un indicador de la ocurrencia de perturbaciones en la señal de tensión, pero no permite caracterizarlas, es decir, no se puede establecer siempre ni el tipo de perturbación ni el número de eventos, ni la duración y magnitud de los mismos, para lo cual es necesario realizar un seguimiento del valor eficaz de la tensión y registrar su comportamiento en el tiempo.
- La ponderación como perturbación de algunas variaciones de la regulación de tensión dentro del  $\pm 10\%$  permitido por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), se toma como una desventaja al usar el  $P_{st}$  como indicador de la calidad de la señal de tensión.
- La presencia de subarmónicos e interarmónicos producen una modulación en la amplitud de la señal de tensión con frecuencias alrededor de 8,8 Hz, lo que hace que el medidor los pondere como una perturbación de tensión con características de *flicker*.
- El índice de nivel de severidad de *flicker* a corto plazo ( $P_{st}$ ) aumenta con el incremento en la magnitud de la fluctuación de tensión y el número de eventos consecutivos como huecos y elevaciones, lo que no sucede

cuando se aumenta la duración del evento. Por tal motivo este indicador no permite establecer la severidad de las fluctuaciones de tensión.

Desventajas tales como la percepción de interarmónicos, subarmónicos y variaciones en la regulación de tensión como perturbaciones por parte del medidor de *flicker*, así como la no caracterización de todas las perturbaciones de tensión del sistema, hace que se recomiende una reevaluación de la conveniencia de mantener el  $P_{st}$  como único índice para establecer la calidad de la señal de tensión.

Se espera que en un futuro se realicen estudios que permitan proponer un número de clases para el proceso estadístico del índice  $P_{st}$ , con el objetivo de disminuir la diferencia de valores de este índice entre diferentes medidores de *flicker* ante una misma perturbación.

Este trabajo como etapa final de nuestra formación como ingenieros, finalmente nos afianzó nuestra capacidad para la realización de estudios en temas teóricos que se complementan a los realizados a lo largo de la carrera y que permitieron la apropiación de los conocimientos relacionados con la ingeniería eléctrica; como lo es el análisis de la calidad de la señal de tensión. También, se resalta que se fortalecieron las relaciones humanas y el trabajo en equipo que consideramos parte fundamental del desarrollo profesional.

## BIBLIOGRAFÍA

ALVES BARACIARTE, Roberto y LEÓN, José Gregorio. Tópico Especial Calidad de Servicio Eléctrico: Flicker. Caracas: Universidad Simón Bolívar. Coordinación de Estudios de Postgrado. Especialización en Instalaciones Eléctricas. Calidad del Servicio Eléctrico, 2005. 34 p.

BELCHIOR, Fernando y MEDEIROS, Carlos Augusto. Uma proposta de adequação de um medidor para avaliação da cintilação luminosa (*flicker*) nos termos da uie/iec, usando filtros digitais: protótipo e validação. En: VISBQEE, Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Brasil: IUESO-GO, UFU, 2005.

BELCHIOR F.; MEDEIROS C. y OLIVEIRA J. A Proposal for UIE/IEC Flicker Measurement Using Digital Filters: Equipment Prototype and Validation. Brazil: Federal University of Uberlandia, 2004. 6 p.

BIEN, Andrzej; HANZELKA, Zbigniew; STANKIEEWICZ, Antoni y SZLOSEK, Marcin. Comparative Tests of Flickermeters. En: CIRED, 17th International Conference on Electricity Distribution. Barcelona: University of Mining and Metallurgy, Dept. of Electrical Engineering, Electrotechnical Institute, Gdansk, Technical University of Radom and Institute of Power Engineering , 2003. 5 p.

-----, -----, Poland: University of Mining and Metallurgy, Dept. of Electrical Engineering, Electrotechnical Institute, Gdansk, Technical University of Radom and Institute of Power Engineering, 2002. 8 p.

BOLLEN, Math H. J. Understanding Power Quality Problems: Voltage sags and interruptions. USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 2000. 543 p.

COMISIÓN DE REGULACION DE ENERGIA Y GAS CREG. Resolución 016 de 2007. Colombia: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2007. 6 p.

------. Documento GREG-017 de 2005. Colombia: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2005. 100 p.

------. Resolución 024 de 2005. Colombia: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2005. 10 p.

DAN EL MONTOYA. Implementation of the Flickermeter Based on the Standard IEC 61000-4-15 through the Discrete Wavelet Transform. Venezuela: Universidad Central de Venezuela. 3 p.

DÍEZ, G., EGUÍLUZ, L., MAÑANA, M., LAVANDERO, J. y ORTIZ, A. Revisión crítica del umbral de perceptibilidad del flicker. En: REUNIÓN DE GRUPOS DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA ELÉCTRICA (12º: 2002: Córdoba). Córdoba: Universidad de Cantabria, 2002. p 4.

GALLO, Daniele; LANDI, Carmine; LANGELLA, Roberto y TESTA, Alfredo. Implementation of a Test System for Advanced Calibration and Performance Analyses of Flickermeters. Italy: Seconda Università degli Studi di Napoli, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, 2003. 6 p.

GALLO, Daniele; LANGELLA, Roberto y TESTA, Alfredo. Interharmonic, Part 2: Aspects Related to Measurement and Limits. Italy: Seconda Università degli Studi di Napoli, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, 2004. 8 p.

DE KOSTER M.; DE JAEGER E.; VANCOETSEM W.. Light Flicker Caused by Interharmonics. Belgium: LABORELEC. 10 p.

HANZELKA, Zbigniew y BIEN, Andrzej. Power Quality Application Guide: Voltage Disturbances, Flicker Measurement. Poland: LPQI, 2005. Leonardo Power Quality Initiative (LPQI), AGH University of Science and Technology. 8 p.

----- . Power Quality Application Guide: Voltage Disturbances, Flicker. Poland: LPQI, 2006. Leonardo Power Quality Initiative (LPQI), AGH University of Science and Technology. 13 p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. CEI/IEC 61000-4-15 International Standard, Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 5, Performance testing. Switzerland: IEC Central Office, 2003. 47 p.

JASTKEVICH J., WASYNCZUK O. "A Method of Evaluating Flicker and Flicker-Reductions Strategies in Power Systems". USA: IEEE Transactions on Power Delivery, 1998. School of Electrical and Computer Engineering, Purdue University. 7 p.

MOMBAUER W. Flicker Simulation and Minimization. En: CIRED 1989. Alemania.

OPPENHEIM, Alan V. y SCHAFER, Ronald W.. Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto. 2 ed. España: PRENTICE HALL, 2000. 873 p.

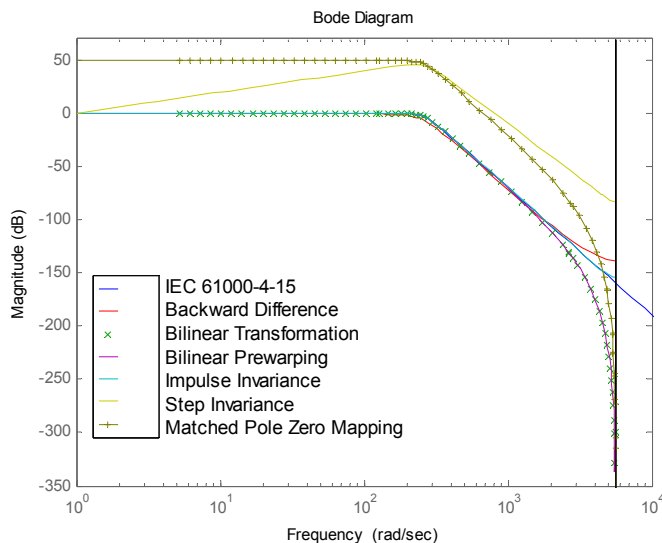
ORDOÑEZ PLATA, Gabriel. Medición Digital de magnitudes eléctricas mediante transformada discreta de Fourier, algoritmos de adaptación de la frecuencia de muestreo. Madrid, 1993, 248 p. Tesis doctoral. Universidad Pontificia Comillas. Escuela Técnica superior de Ingenieros Industriales.

WIERDA, René. Flicker o Parpadeo de las Fuentes Luminosas. Cuaderno Técnico Nº 176. España: Schneider Electric, 2001. 37 p.

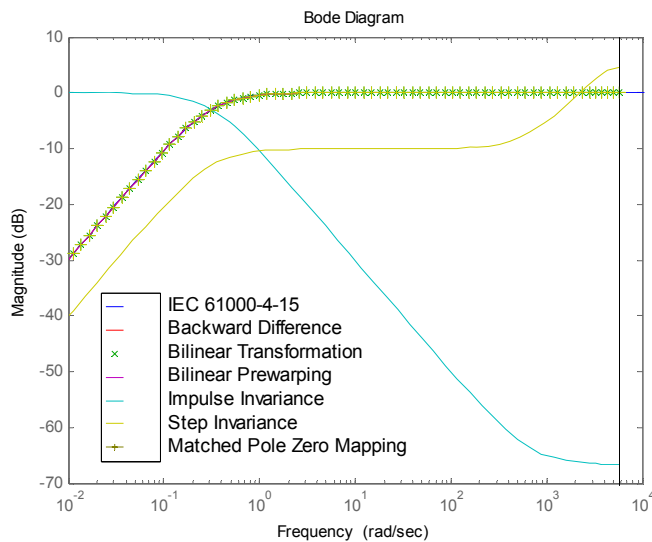
## ANEXO A. IMPLEMENTACIÓN DIGITAL FILTROS ANALÓGICOS DEL MEDIDOR DE FLICKER

En este anexo se presentan las respuestas en frecuencia de los filtros del medidor de flicker, utilizando diferentes técnicas de transformación analógica-digital.

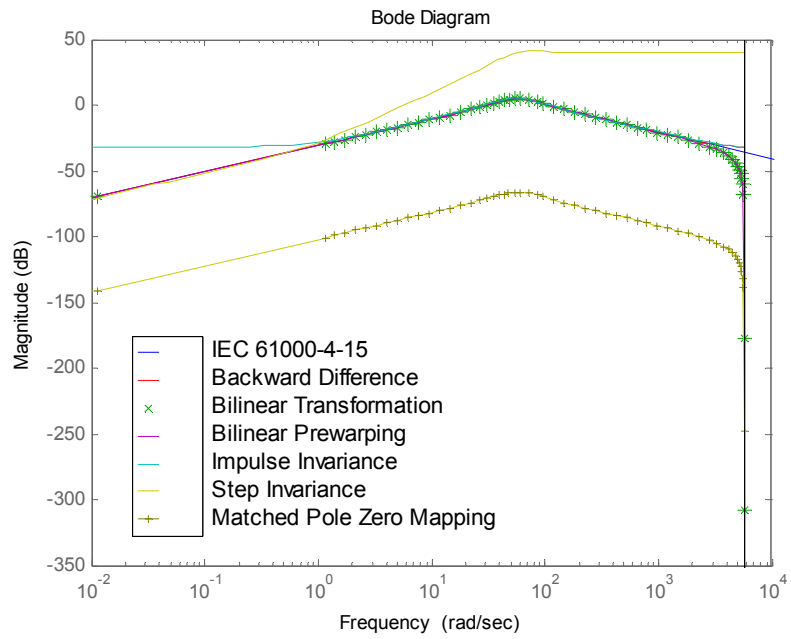
Filtro pasa bajos Butterworth con frecuencia de corte de 42 Hz.



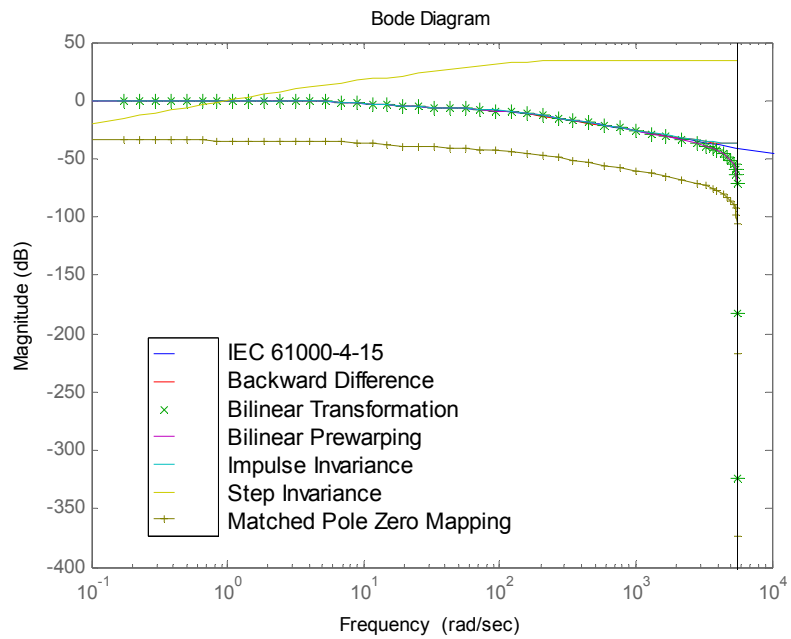
Filtro pasa altas con frecuencia de corte de 0,05 Hz.



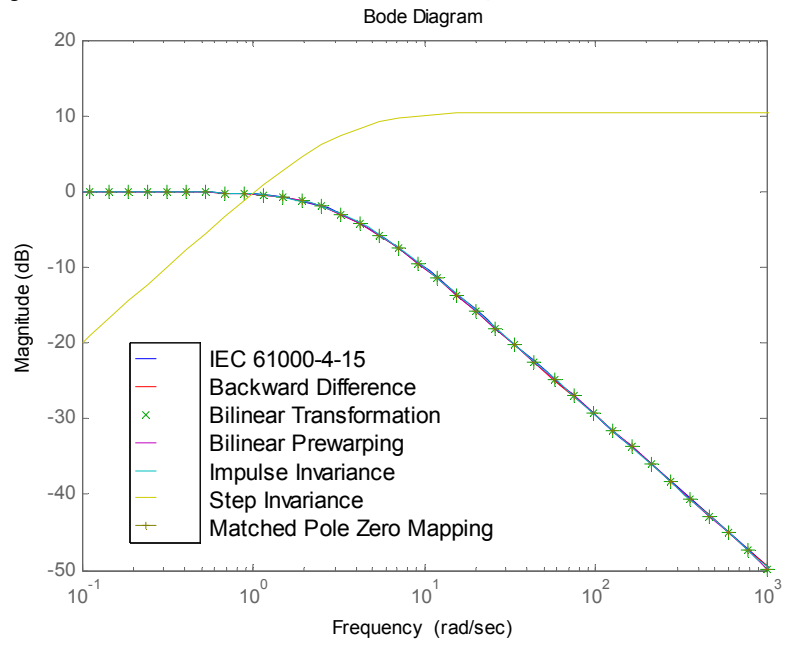
### Filtro de ponderación uno.



### Filtro de ponderación dos.



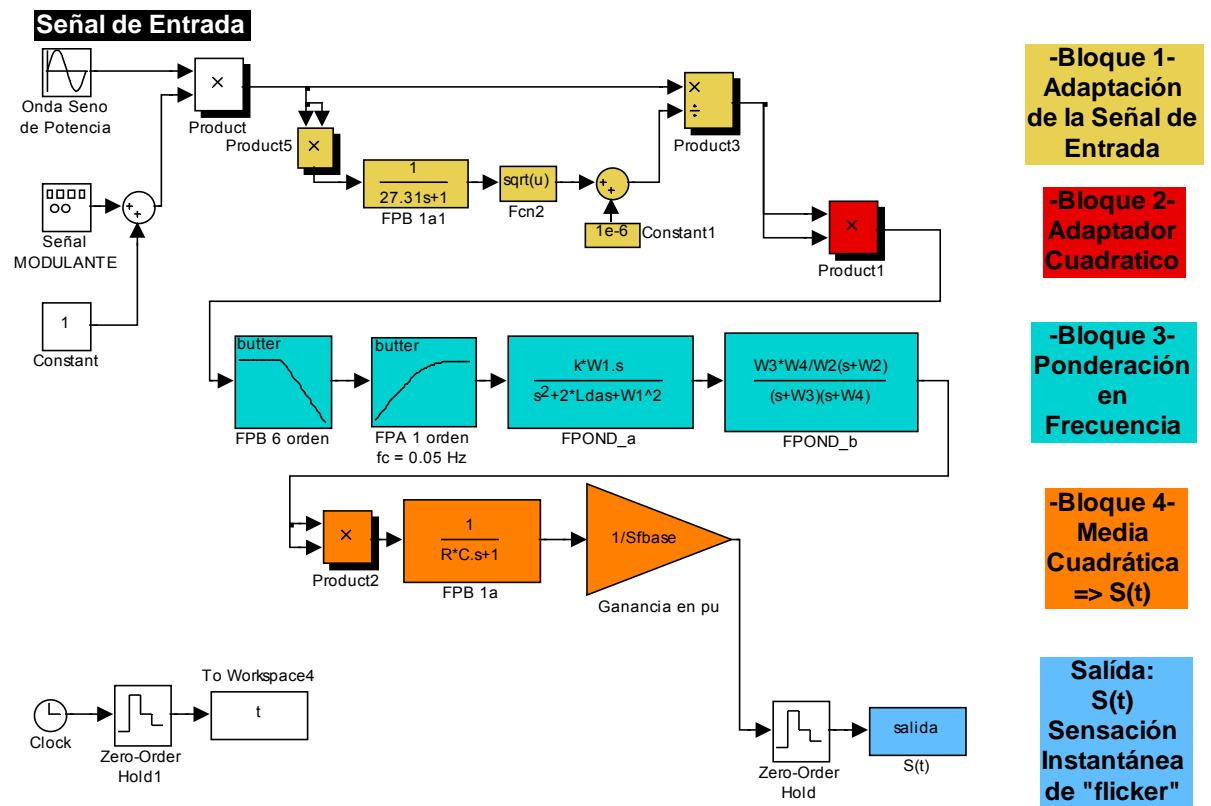
### Filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 0,53 Hz.



## ANEXO B. IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK DEL ALGORITMO DE MEDICIÓN DE FLICKER NORMALIZADO POR EL ESTÁNDAR IEC 61000 -4-15

En este anexo se presenta el modelo utilizado para la simulación del algoritmo de medición de *flicker* normalizado por el estándar IEC 61000-4-15. Además, se incluyen los parámetros necesarios para el desarrollo de la simulación y el programa .m que realiza el análisis estadístico.

**Modelo simulado utilizando la plataforma Simulink de Matlab.**



A continuación se listan los valores necesarios en el desarrollo de la simulación del algoritmo dependiendo del tipo de lámpara.

- Lámpara de 120 V / 60 W
  - $k = 1,6357$
  - $Lda = 2 \cdot \pi \cdot 4,167375$
  - $W1 = 2 \cdot \pi \cdot 9,077169$
  - $W2 = 2 \cdot \pi \cdot 2,939902$
  - $W3 = 2 \cdot \pi \cdot 1,394468$
  - $W4 = 2 \cdot \pi \cdot 17,31512$
  - $S_{fbase} = 3,251071511544107e-006$
  - $R \cdot C = 0,3$
- Lámpara de 230 V / 60 W')
  - $k = 1,74802$
  - $Lda = 2 \cdot \pi \cdot 4,05981$
  - $W1 = 2 \cdot \pi \cdot 9,15494$
  - $W2 = 2 \cdot \pi \cdot 2,27979$
  - $W3 = 2 \cdot \pi \cdot 1,22535$
  - $W4 = 2 \cdot \pi \cdot 21,9$
  - $S_{fbase} = 3,231584920317423e-006$
  - $R \cdot C = 0,3$

### **Programa para la evaluación estadística del nivel de flicker instantáneo**

```

%Bloque5.m                                     %
%=== Datos de entrada por el usuario ===%
ti = input('Ingrese el tiempo inicial (luego del transitorio de los
filtros;Recomendado 140s)), ti... = ');
tf = input('Ingrese el tiempo final tf....., tf... = ');
Nc = input('Ingrese el número de clases ( = 64, como minimo).....:
');

%Cantidad de niveles, Np (= Nc clases + 1)
Np = Nc + 1;
j1 = find(t <= ti);
j1 = j1(length(j1)); %índice de ti

```

```

j2 = find(t <= tf);
j2 = j2(length(j2)); %índice de tf
Vets = [];
Vets = salida(j1:j2);

%Vets = Vector con las muestras de S(t) en regimen permanente

%          Clasificación          %
% Ancho L de las clases %
Smax = max(Vets);
Smin = min(Vets);
L = (Smax-Smin)/(Nc);
% S = Vector Np de niveles de S(t)          %
% sensación instantánea de flicker muestreada a la frecuencia fa %
S = [];
S(1) = Smin;
for i = 2:Nc %Nc = Np-1
    S(i) = Smin + (i-1)*L;
end
S(Np) = Smax;

% Clasificación %
MatrizClas = zeros(1,Np);
for i = 1:length(Vets)
    J = fix((Vets(i)-Smin)/L)+1; %J = posición
    MatrizClas(J) = MatrizClas(J)+1;
end

% VP = valores de Función de Probabilidad Acumulativa %
%Total = número de niveles que fueron clasificados de Vets (S(t)), por tanto
aprox = length(Vets)
VP = [];
Total = sum(MatrizClas);
for i=1:Np
    VP(i) = sum(MatrizClas(i:Np))/Total;
end

%Np niveles x Porcentajes que exceden el tiempo total
%= Función de Probabilidad Acumulativa de Sf(t)
figure,plot(S,VP*100,'b')
hold
xlabel('Niveles de S(t), (pu)')
ylabel('FPAC %')
set(gcf,'Color',[1 1 1])

```

```

%                               RUTINAS PARA EL CÁLCULO DEL PST                               %

%K = coeficientes del método multipunto
K = [3.14 5.25/3 5.25/3 5.25/3 6.57/3 6.57/3 6.57/3 28/5 28/5 28/5 28/5
28/5 8/3 8/3 8/3];

Y = [.1 .7 1 1.5 2.2 3 4 6 8 10 13 17 30 50 80]/100;
for j = 1:length(Y)
    I2 = find(Y(j) <= VP);
    if isempty(I2) %Prueba para Y solicitado mayor que VPmaximo => I2 = []
        disp('Algún Y solicitado que es mayor a VPmax')
        return
    end
    I2 = I2(length(I2));
    I1 = I2 + 1;
    if VP(I2) == Y(j) %Valor igual, pero indice mayor => X(j) = S(I2) corresp.
a Y(I2).
        X(j) = S(I2);
    elseif Y(j) < VP(length(VP)) %Extrapolación lineal
        if VP(I2-1)~=VP(I2) & S(I2-1)~=S(I2)
            disp('Extrapolación lineal, esta conformada por sus últimos dos puntos
de VP y S')
            j
            X(j) = S(I2) + (S(I2-1)-S(I2))/(VP(I2-1)-VP(I2)) * (Y(j)-VP(I2));
        else
            disp('EXTRAPOLACIÓN NECESARIA MAS NO POSIBLE: (I2=ind final)')
            disp('Analizar extrapolación con S(I2-1)==S(I2)')
            disp('Intente disminuir el número de Clases de VP(I2-1)==VP(I2)')
            return
        end
    else %Interpolación lineal, conformada con dos puntos de VP y S
        X(j) = S(I1) + (S(I2)-S(I1))/(VP(I2)-VP(I1)) * (Y(j)-VP(I1));
    end
end

%Colocando la curva de los valores normalizados
stem(X,Y*100,'r.')

%Calculo del Pst:
Pst = 0.1*sqrt(sum(K.*X))

```