

Comparison between the modeled and simulation of the Flickermeter based on the Standard IEC-61000-4-15 through the Discrete Wavelet Transform and Fast Fourier Transform

Dan El Montoya

*Departamento de Electrónica, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería,
Universidad Central de Venezuela. Caracas 1041-A, Venezuela.
dmontoya@elecrisc.ing.ucv.ve, daniel.montoya@ucv.ve*

Abstract

Voltage fluctuation is the first cause of the flicker light effect. Some definitions and standards have been proposed to measure the grade of the flicker. The standards define admissible flicker levels in function of the frequency. Algorithms based on the Fast Fourier Transform have been used a lot in digital analysis of flicker voltage. In the last decade it has been implemented the wavelet transform in many issues on power electric systems. The applications have been focused on the classification of the disturbances in measurement on power quality. The wavelet analysis has been used on steady state signal analysis. In this way the wavelet transform has been used to identify harmonics, sub harmonics and no-integer harmonics. Also the Morlet and the Gaussian wavelets have been used in the calculation of the flicker signal spectrum. This will be crucial to calculate or Pst of the standard IEC-41000-6-15. The objective of this paper is to calculate short-term flicker evaluation through the Discrete Wavelet Transform and the Fast Fourier Transform in order to compare results.

Keywords: Flicker, flickermeter, wavelet, power quality.

Comparación entre el modelaje y simulación del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 mediante la Transformada de Ondícula Discreta y mediante la Transformada Rápida de Fourier

Resumen

La fluctuación de voltaje es la primera causa del efecto lumínico flicker. Algunas definiciones y estándares han sido propuestos para medir el grado del flicker. Los estándares definen niveles de flicker admisibles en función de la frecuencia. Algoritmos basados sobre la Transformada Rápida de Fourier han sido ampliamente usados en el análisis digital del voltaje flicker. En la última década se ha usado la Transformada de Ondícula en muchos tópicos sobre sistemas eléctricos de potencia. Las aplicaciones han sido enfocadas principalmente en la clasificación de perturbaciones de la calidad de potencia. El análisis ondícula ha sido usado en el análisis de señales en régimen permanente. En este sentido la Transformada de Ondícula ha sido usada en la identificación de armónicos, subarmónicos e interarmónicos. También se ha usado las ondículas de Morlet y la Gaussiana en el cálculo del espectro de la señal flicker. Este cálculo sería crucial en la determinación del índice de severidad del flicker en tiempo corto (Pst) del estándar IEC-61000-4-15. El objetivo de este trabajo es el cálculo del índice de severidad del flicker a corto plazo

(Pst) de la norma IEC-61000-4-15 mediante la Transformada de Ondícula Discreta y mediante la Transformada Rápida de Fourier con la finalidad de comparar resultados.

Palabras clave: Flicker, flickermetro, ondícula, calidad de potencia, calidad de servicio eléctrico.

Introducción

La fluctuación en la magnitud de la tensión es la primera causa del efecto lumínico flicker. El principal problema en el análisis del flicker es el cálculo de esta fluctuación en función de la frecuencia. En este sentido es importante la extracción con una buena precisión, de las componentes flicker desde las mediciones de voltaje del sistema.

Los algoritmos basados en la Transformada Rápida de Fourier (FFT) han sido ampliamente usados en el análisis digital del voltaje flicker. Así lo reseñan los trabajos de Srinivasan [1], Bishop, Do y Mendis [2] y Girgis, Stephens y Makram [3]. Recientemente se ha aplicado la Transformada de Ondícula en el análisis de fenómenos que tienen que ver con los sistemas eléctricos de potencia. La mayoría de las aplicaciones se han enfocado en la clasificación de las perturbaciones típicas en las mediciones de calidad de potencia. Esto se observa en los trabajos de Robertson, Camps y Mayer [4], Santoso, Powers, Grady y Hofmann [5], Liu y Pillay [6], Gaouda, Salama, Sultan y Chikhani [7], Poisson, Roual y Meunier [8], Karimi, Mokhtari y Iravano [9], Angrisani [10], Hamid y Kawasaki [11], Huang y Hsieh [12], Ece y Gerek [13].

El análisis ondícula se ha usado también en el procesamiento de señales en régimen permanente. En este sentido se ha aplicado la transformada de ondícula continua para identificar armónicos, subarmónicos e interarmónicos como se puede apreciar en el trabajo de V.L.Pham y K.P.Wong [14].

La transformada de Fourier se ha usado en el modelado del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 [15] como se puede apreciar en el trabajo de Rogóz [16]. En la determinación del voltaje flicker se ha usado también el análisis ondícula. De la misma manera ha usado la ondícula de Morlet y la Gaussiana en la determinación del espectro de magnitud de la fluctuación de tensión que origina el flicker. Ejemplo de esto son los trabajos de Huang y Hsieh [17], Chen y Meliopoulos [18], Chen y Meliopoulos [19] y Huang y Wen

[20]. Estas aplicaciones han dado resultados más precisos para la determinación del estándar limitador del voltaje flicker ΔV_{10} que los encontrados a través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Dado que las ondículas de Morlet y la Gaussiana no son ortogonales no se puede obtener la fluctuación de voltaje flicker antitransformando el espectro encontrado. La obtención de la fluctuación de voltaje es vital en la determinación del índice de severidad del flicker (Pst) del estándar IEC-61000-4-15. En este trabajo se plantea la determinación del índice de severidad del flicker a corto plazo (Pst) del estándar IEC-61000-4-15 a través de la Transformada de Ondícula Discreta (DWT) y mediante la Transformada Rápida de Fourier con la finalidad de comparar resultados.

Transformada de Ondícula

La transformada de ondícula se ha convertido en la última década en una herramienta común en aplicaciones que involucran análisis de señales. Dada una función variante con el tiempo $f(t)$ la transformada de ondícula puede ser vista como el cálculo de los coeficientes del producto interno de la señal con las funciones basadas en familias de ondículas. Por definición las familias de funciones ondículas se originan al escalar y desplazar en el tiempo una ondícula madre o prototipo $\psi(t)$. En este sentido la transformada de ondícula continua se define como [22]:

$$CWT_r(a, b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle, \quad (1)$$

$$CWT_r(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (2)$$

La familia de ondículas es:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (3)$$

donde $\psi(t)$ es la función ondícula que tiene características de función pasabanda. El factor $1/a^{1/2}$ tiene como finalidad preservar o mantener la

energía de la señal. Si se eligen para el escalamiento y el desplazamiento en tiempo los valores $a = a_0^m$ y $b = na_0^m b_0$ con m y n valores enteros y se aproxima la integral a través de una sumatoria se obtiene la fórmula de la Transformada de Ondícula Discreta (CWT).

$$\text{DWT}_f(m, n) = a_0^{-m/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt. \quad (4)$$

Discretizando el tiempo $t = kT_d$, con T_d igual al período de discretización o muestreo, y asignando los valores $a_0 = 2$ y $b_0 = 1$ se obtiene, además de una computación eficiente, una representación compacta de la Transformada de Ondícula Discreta.

$$\text{DWT}_f(m, n) = 2^{-m/2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k) \psi(2^{-m} k - n). \quad (5)$$

A través del análisis multiresolución se pueden calcular los coeficientes que definen a la DWT a baja frecuencia mediante el filtrado de la señal con un filtro pasabajo $h(n)$ definido a partir de la función escalamiento $\phi(t)$ asociada a la ondícula $\psi(t)$. Los coeficientes correspondientes a la alta frecuencia se obtienen procesando la señal con un filtro pasabanda $g(n)$ definido a partir de la función ondícula $\psi(t)$. Este proceso se indica en las siguientes ecuaciones [22]:

$$a_{j+1}(n) = a_j(n) * \bar{h}(2n), \quad (6)$$

$$d_{j+1}(n) = a_j(n) * \bar{g}(2n). \quad (7)$$

En las ecuaciones anteriores la DWT correspondiente a las bajas frecuencias se expresa a través de los coeficientes a_{j+1} y la DWT correspondiente a las altas frecuencias se expresa a través de los coeficientes d_{j+1} . El índice j se asocia con el nivel de descomposición ondícula y corresponde al escalamiento 2^j y a la aproximación de la señal a la resolución 2^{-j} .

Dado que la representación de una señal a través de los coeficientes DWT es ortogonal se puede recuperar la señal original a partir de los coeficientes calculados. Se puede demostrar que la recuperación de la señal puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación [22]:

$$a_j(n) = a_{j+1} \left(\frac{n}{2} \right) * h(n) + d_{j+1} \left(\frac{n}{2} \right) * g(n). \quad (8)$$

Flickermetro de la Norma IEC-61000-4-15

La norma IEC-61000-4-15 plantea el diseño de un medidor de flicker de cinco etapas. La primera etapa consta de un adaptador de tensión y un circuito para comprobación de calibración. La segunda etapa es un demodulador cuadrático recuperador de la fluctuación de tensión. La etapa 3 se compone de dos filtros dispuestos en cascada y un selector de margen. El primer filtro elimina las componentes de corriente continua y de rizado al doble de la frecuencia de salida del demodulador. El segundo filtro simula la respuesta en frecuencia a las fluctuaciones lumínicas del sistema de visión humana. La etapa 4 está compuesta por un multiplicador cuadrático y un filtro pasabajo de primer orden. La salida de esta etapa representa la sensación instantánea de flicker. La etapa 5 realiza un análisis estadístico del nivel de flicker permitiendo el cálculo de parámetros de evaluación significativos como el Pst y el Plt [15]. En la Figura 1 se presenta el diagrama de bloques del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 [15]. El objetivo de este trabajo es calcular mediante modelado y simulación sólo el Pst.

En el presente trabajo se ha propuesto modelar y simular el flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 con el programa Simulink del Matlab realizando el filtro digital de ponderación de la etapa 3 mediante la Transformada de Ondícula. Dado que la Transformada de Ondícula permite una mejor caracterización de las señales en el dominio de la frecuencia su aplicación en este filtro permitirá una mejor discriminación de la fluctuación propia de las señales flicker.

El Modelo del Flickermetro

El modelo del flickermetro desarrollado en Simulink en esta investigación se presenta en la Figura 2.

El modelo fue desarrollado y simulado en el ambiente Matlab a través del Simulink. Este modelo del flickermetro comprende los siguientes

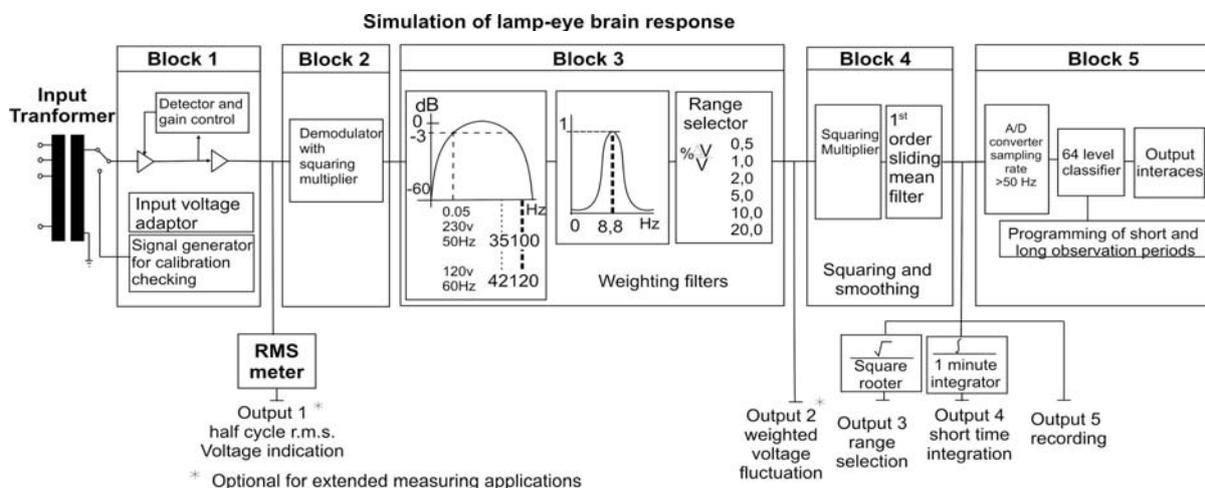


Figura 1. Diagrama de bloques del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 [15].

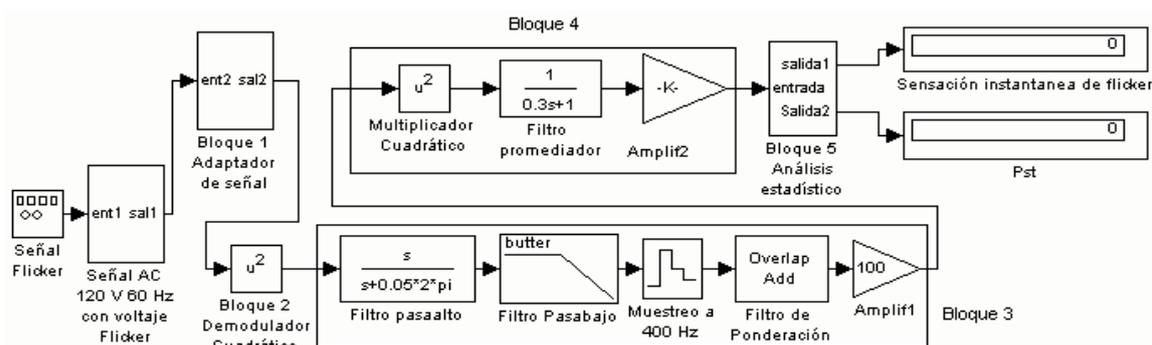


Figura 2. Diagrama de bloques del modelo del flickermetro.

bloques generales recomendados en el estándar IEC-61000-4-15:

Bloque 1: Adaptador de voltaje

En el estándar IEC-61000-4-15 se especifica que debe escalarse el valor eficaz de la tensión de entrada a un nivel de referencia interno. De esta manera pueden independizarse las medidas del flicker del nivel real de la tensión de entrada para así expresarlas en valores porcentuales. El valor RMS de la tensión de entrada se calculó sobre una ventana deslizante de 60 s. Como sugiere el trabajo de Rogóz [16] se ha promediado el valor RMS resultante mediante un filtro pasabajos de primer orden con constante de tiempo 10 s.

Bloque 2: Demodulador cuadrático

El propósito de este bloque es recuperar la fluctuación de tensión elevando al cuadrado la

tensión de entrada escalada con el fin de simular el comportamiento de una lámpara. Este bloque se modela en el Simulink mediante una función cuadrática.

Bloque 3: Filtros pasabajo, pasaalto y de ponderación

El bloque 3 está conformado por tres filtros, un retentor de orden cero y un amplificador. Los primeros dos filtros forman el filtro pasabanda que elimina la componente DC y la componente al doble de la frecuencia de alimentación. El primer filtro es pasaalto de primer orden con frecuencia de corte 0.05 Hz. El segundo filtro es Butterworth pasabajo de décimo orden con frecuencia de corte 42 Hz. El tercer filtro ponderador simula la respuesta en frecuencia a las fluctuaciones senoidales de tensión de una lámpara de gas (60 W-120 V) con filamento enrollado en

combinación con el sistema de visión humano. Este filtro se implementó primero usando la FFT y luego usando la DWT. La función de transferencia del filtro de ponderación se presenta en la siguiente ecuación:

$$H(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \frac{1 + s / \omega_2}{(1 + s / \omega_3)(1 + s / \omega_4)}, \quad (9)$$

donde $k = 1.74802$, $\omega_1 = 2\pi 9.15494$, $\omega_3 = 2\pi 1.22535$, $\lambda = 2\pi 4.05981$, $\omega_2 = 2\pi 2.27979$ y $\omega_4 = 2\pi 21.9$.

Antitransformando en el dominio de Laplace la ecuación (9) se obtiene la respuesta impulsiva del filtro:

$$h(t) = \left(2e^{-4.17t} (25.25 \cos(8.06t) + 7.6 \sin(8.06t)) - 1.43e^{-2\pi 1.39t} - 49.66e^{-2\pi 17.32t} \right) u(t). \quad (10)$$

El valor de $h(t)$ se utilizó para filtrar la señal a la salida del primer filtro de la etapa 3 utilizando el método de solapamiento y suma y la FFT. Para esto se muestrea con un retentor de orden cero la señal a una frecuencia de 400 Hz formándose secciones de 1024 muestras de longitud. Adicionalmente se muestrea la respuesta impulsiva del filtro a la misma frecuencia formándose tramas de la misma longitud. La señal a filtrar se divide en secciones de longitud finita y cada sección se convoluciona con la respuesta impulsiva del filtro de longitud finita combinándose luego las secciones filtradas de forma que se solapen y sumen para construir la salida. El filtrado lineal de cada bloque se realiza a través de la FFT. Asumiendo que los bloques $x(n)$ tienen longitud "L" y el filtro $h(n)$ longitud "M" a cada bloque de datos se le añaden "M-1" ceros y a la respuesta impulsiva del filtro se le añaden "L-1" ceros. El solapamiento se produce debido a que la convolución lineal de cada sección aumentada con la respuesta al impulso aumentada es de longitud "L+M-1", que es mayor que la longitud de la sección. El Simulink dispone de un bloque que realiza el filtrado FFT con el método de solapamiento y suma sobre el que se puede especificar la respuesta impulsiva del filtro.

El modelo del filtro de ponderación digital implementado a través del método de solapamiento y suma se inicia con la formación de la trama de 1024 muestras a partir del muestreo a

400 Hz de la señal de entrada $x(n)$. Si se muestrea la respuesta impulsiva $h(n)$ del filtro a la misma frecuencia y se forman tramas de la misma longitud se deben insertar a las tramas de $x(n)$ y $h(n)$ 1023 ceros para aplicar el método de solapamiento y suma.

Se puede demostrar que para un filtro con respuesta impulsiva $h(n)$ [22]:

$$DWT_y(m, n) = DWT_x(m, n) * h(n2^m). \quad (11)$$

La ecuación (11) muestra que la Transformada de Ondícula Discreta a la salida del filtro será la DWT de la entrada procesada mediante el filtro de ponderación con respuesta impulsiva $h(n)$ submuestreada por el factor 2^m . El coeficiente "m" representa el nivel de descomposición en la DWT. El filtro DWT de solapamiento y suma recibe la señal muestreada a 400 Hz en un primer bloque que se encarga de formar la trama de muestras. A continuación se completa la longitud de la trama con la inserción de 1023 ceros. Una vez hecho esto se aplica la DWT que en el Matlab arroja tanto los coeficientes de baja y alta frecuencia. Estas tramas de coeficientes se procesan aplicando el método de solapamiento y suma mediante la FFT con el filtro $h(n)$ submuestreado. Los coeficientes filtrados forman la DWT de la salida del filtro que se invierte con el bloque IDWT del Matlab. Luego se solapan y suman las sucesivas tramas generadas. Para la realización del filtro a través de la Transformada de Ondícula Discreta se utilizó la ondícula de Daubechies con momentos de desvanecimiento $p = 20$ y nivel de descomposición uno como lo indica Parameswariah y Cox [21] para el análisis de señales en régimen permanente.

Bloque 4: Multiplicador cuadrático y filtro promediador

El propósito de elevar al cuadrado la señal flicker ponderada es la simulación del modelo de percepción visual no lineal del sistema ojo-cerebro [15]. El filtro promediador se emplea para simular el efecto de almacenamiento en el cerebro. Este filtro es modelado con un filtro pasabajo de primer orden con constante de tiempo $\tau = 300$ ms. El último elemento del bloque 4 es un amplificador lineal que calibra la medición total a la salida del bloque. Como se ha comentado, la salida del

bloque 4 es una medida de los cambios de voltaje ponderados por la sensibilidad del sistema lámpara-ojo-cerebro y representa la sensación instantánea de flicker.

Bloque 5: Analizador estadístico en línea de la señal flicker

El análisis estadístico comienza con el muestreo de la sensación instantánea de flicker a la frecuencia de 100 Hz. Luego, se almacenan 60000 muestras que corresponde a un tiempo de 10 minutos. Con las muestras almacenadas se realiza un histograma de 64 clases que ayuda a construir la función distribución acumulativa de la permanencia de la señal flicker en cada una de las clases del histograma. Con ayuda de la función distribución acumulativa se calculan por interpolación lineal los percentiles alisados $P_{0.1}$, P_1 , P_3 , P_{10} y P_{50} que son los niveles de flicker excedidos en el 0.1, 1, 3, 10 y 50% del tiempo de medición, respectivamente. Con estos percentiles se calcula el Pst o índice de severidad del flicker a corto plazo a través de la ecuación 12. El cálculo del histograma de la función distribución de probabilidades y del Pst se realizó con rutinas escritas en Matlab.

$$Pst = \sqrt{0,0314P_{0.1} + 0,0525P_{1s} + 0,0657P_{3s} + 0,28P_{10s} + 0,08P_{50s}} \quad (12)$$

Resultados

Para validar los filtros de ponderación realizados a través del procesamiento con la DWT se trabajó conjuntamente con la FFT para comprobar las pruebas de sensación instantánea de flicker sugeridas por la norma IEC-61000-4-15. Para ciertos valores de frecuencia y de amplitud relativa de la fluctuación de tensión $\Delta V/V$ mostrados en la norma IEC-61000-4-15, el valor de la sensación instantánea de flicker ideal es uno. El modelo del flickermetro propuesto se sometió tanto a las fluctuaciones de tensión senoidales y rectangulares descritas en la norma.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de las pruebas de respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión senoidales implementando el filtro de ponderación a través de la FFT y a través de la DWT. En estas pruebas el error pro-

medio porcentual usando la Transformada Rápida de Fourier fue de 1.1622%. Mientras que el error promedio porcentual usando la Transformada de Ondícula Discreta fue de 1.16%. En base a los resultados anteriores se puede decir que se logró una mejora poco significativa en la implementación del filtro de ponderación del flickermetro usando la DWT respecto al uso de la FFT en la determinación de la respuesta del flickermetro a fluctuaciones de tensión senoidales.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de las pruebas de respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión rectangulares implementando el filtro de ponderación a través de la FFT y de la DWT.

En las pruebas de respuesta del flickermetro ante variaciones de tensión rectangulares el error porcentual promedio usando la FFT en la realización del filtro de ponderación fue de 1.2238%. Mientras que el error porcentual promedio usando la DWT en la realización del filtro de ponderación fue de 1.1975%. En base a los resultados anteriores se puede decir que realizando el filtro de ponderación del flickermetro mediante la DWT se obtiene una mejora poco significativa en la respuesta del mismo ante variaciones de tensión rectangulares.

La norma IEC-61000-4-15 especifica que cada medidor de flicker debe someterse a series regulares de variaciones de tensión rectangulares. Para los valores de variaciones de tensión y variaciones por minuto especificadas, la severidad del flicker o Pst debe ser 1.00 ± 0.05 . En este sentido se presentan en la Tabla 3 los resultados obtenidos al someter el modelo del flickermetro a las variaciones rectangulares especificadas en la norma implementando el filtro de ponderación primero con la FFT y luego con la DWT.

En las pruebas de Pst del flickermetro para fluctuaciones de tensión rectangulares se obtuvo un error promedio porcentual de 2.3915% implementando el filtro de ponderación mediante la FFT. Por otra parte se obtuvo un error promedio porcentual de 2.2629% al implementar el filtro de ponderación a través de la DWT. De los resultados obtenidos ante estas pruebas se puede decir que se obtuvo una mejora poco significativa (0.1%) en la respuesta del flickermetro usando la DWT respecto a la FFT.

Tabla 1
Pruebas de respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión senoidales

Hz	Flicker instantáneo		Hz	Flicker instantáneo	
	FFT	DWT		FFT	DWT
0,5	0,994622	0,994870	10,0	0,990239	0,991468
1	0,989329	0,989214	10,5	0,999825	0,999823
1,5	0,988531	0,988686	11,0	1,005951	1,005923
2	0,988343	0,989285	11,5	1,002665	1,002678
2,5	0,991035	0,990338	12,0	1,017281	1,017277
03	0,991140	0,991350	13,0	1,007988	1,008034
3,5	0,991276	0,991339	14,0	1,014206	1,014194
4	0,990798	0,990670	15,0	1,010403	1,011210
4,5	0,996465	0,996529	16,0	1,012663	1,012748
5	0,990229	0,991365	17,0	1,018887	1,012748
5,5	0,996457	0,996530	18,0	1,021243	1,021370
r6	0,997268	0,997423	19,0	1,023479	1,023602
6,5	0,995628	0,995662	20,0	1,021110	1,021246
7	0,997997	0,997964	21,0	1,024145	1,024275
7,5	1,000338	1,000264	22,0	1,025006	1,025180
8	0,997642	0,997671	23,0	1,027921	1,028004
8,8	1,000000	1,000000	24,0	1,032320	1,032353
9,5	1,004287	1,004294	25,0	1,028305	1,036190
			40	1,224181	1,244799

Conclusiones y Recomendaciones

Después de la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT) y de la Transformada de Ondícula Discreta (DWT) en la implementación digital de los filtros de ponderación del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 se concluye lo siguiente:

- El modelaje del filtro de ponderación del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 puede realizarse a través de la Transformada de Ondícula Discreta con la ondícula madre de Daubechies veinte (20 momentos de desvanecimiento) en la plataforma de simulación Simulink de Matlab.
- Para la frecuencia de muestreo de 400 Hz, tramas de 1024 muestras, la ondícula madre de Daubechies veinte (20 momentos de desvanecimiento) y el primer nivel de descomposición la implementación del filtro de ponderación a través de la FFT y de la DWT del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 arroja un error promedio menor al 3% en la determinación de la sensación instantánea de flicker. Este error está por debajo del mínimo permitido (menor al 5%).
- Para la frecuencia de muestreo de 400 Hz, tramas de 1024 muestras, la ondícula madre de Daubechies veinte (20 momentos de desvanecimiento) y el primer nivel de descomposición, la Transformada de Ondícula

Tabla 2
Pruebas de respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión rectangulares

Hz	Flicker instantáneo		Hz	Flicker instantáneo	
	FFT	DWT		FFT	DWT
0,5	0,99976	1,003696	10,0	0,98872	0,987327
1,0	0,99226	0,992739	10,5	1,01386	1,014639
1,5	1,00189	1,001913	11,0	1,03242	1,031019
2,0	1,00645	1,002793	11,5	1,01053	1,010379
2,5	0,99591	0,995524	12,0	0,99657	0,996773
3,0	1,0059	1,005365	13,0	1,01402	1,013446
3,5	0,99156	0,990608	14,0	1,00029	1,003696
4,0	0,99814	0,999804	15,0	1,01284	1,012742
4,5	0,9905	0,990642	16,0	1,02277	1,022938
5,0	1,00228	0,999711	17,0	1,02681	1,028247
5,5	0,98838	0,99085	18,0	1,02979	1,030229
6,0	0,99724	0,997649	19,0	1,02036	1,018037
6,5	0,98707	0,988783	20,0	1,02734	1,027558
7,0	0,99565	0,99429	21,0	1,02181	1,022895
7,5	0,99542	0,995243	22,0	1,01608	1,007174
8,0	1,01206	1,011969	23,0	1,01361	1,016357
8,8	1,01118	1,011102	24,0	1,03266	1,03266
9,5	0,98942	0,989794	40	1,21149	1,211821

Tabla 3
Pruebas de Pst del flickermetro para fluctuaciones de tensión rectangulares

Variaciones por minuto	Pst (FFT)	Pst (DWT)
1	1,02262903	1,02142048
2	1,0221574	1,02115365
7	0,98529865	0,99043776
39	0,98941842	0,99024687
110	0,99511778	0,99569212
1620	0,99527907	0,99552433
4800	1,08773598	1,08773598

Discreta (DWT) no reduce de manera significativa el error que se puede cometer en la determinación de la sensación instantánea de flicker del medidor de flicker de la norma IEC-61000-4-15 respecto a la transformada Rápida de Fourier.

En base a las conclusiones obtenidas se pueden recomendar las siguientes actividades para completar la investigación iniciada en este trabajo:

- Se recomienda extender el estudio a otros tamaños de tramas, niveles de descomposi-

ción superiores y otras ondículas madres con el fin de reducir el error en la implementación del filtro de ponderación mediante la DWT.

- Se recomienda diseñar una ondícula que permita reducir de manera significativa el error en la implementación del filtro de ponderación mediante la DWT.

Referencias Bibliográficas

1. Srinivasan, K. "Digital measurement of voltage flicker". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, (1991) 1593-1598.
2. Bishop, M., A. Do y S. Mendis. "Voltage flicker, measurement and analysis system". IEEE Computer Applications in Power, (1994) 34-37.
3. Girgis, A., J. Stephens, y E. Makram. "Measurement and prediction of voltage flicker, magnitude and frequency". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 10, No. 3, (1995) 1600-1605.
4. Robertson, D. C., O. I. Camps, and J. S. Mayer. "Wavelets and electromagnetics power system transients". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, (1995) 1050-1058.
5. Santoso, S., E. J. Powers, W. M. Grady y P. Hofmann. "Power quality assessment via wavelet transform analysis". IEEE Transactions and Power Delivery, Vol. 11, No 2, (1996) 924-930.
6. Liu, J. y P. Pillay. "An insight into power quality disturbances using wavelet multiresolution analysis". IEEE Power Engineering Review, (1999) 59-60.
7. Gaouda, A., M. Salama, M. Sultan, & A. Chikhani. "Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No.4, (1999) 1469-1476.
8. Poisson, O., P. Roual, y M. Meunier. "Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform. IEEE Transactions on Power Delivery", Vol 15, No. 3, (2000) 1039-1044.
9. Karimi, M., H. Mokhtari, y R. Iravano. "Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.15, No. 4, (2000) 1212-1220.
10. Angrisani, L. 2001. Wavelet network-based detection and classification of transients. IEEE Transactions on Instrumentations and Measurement 50(5), 1425-1435.
11. Hamid, E. Y. y Z.-I. Kawasaki. "Instrument for the quality analysis of power systems based on the wavelet packet". IEEE Power Engineering Review, (2002) 52-54.
12. Huang, S.-J. y C.-T. Hsieh. "Coiflet wavelet transform applied to inspect power system disturbance-generated signal". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 38, No. 1, (2002) 204-210.
13. Ece, D. G. y O. N. Gerek. "Power quality event detection using joint 2-dwavelet subspaces". IEEE Transactions on Instrumentations and Measurement, Vol. 53, No. 4, (2004) 1040-1046.
14. V.L.Pham y K.P.Wong. "Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms". Proceeding of Generation, Transmission and Distribution Vol. 146, No. 3, (1999) 249-254.
15. IEC 2003. INTERNATIONAL STANDARD IEC 61000-4-15 (1.1 ed.). IEC International Electrotechnical Commission.
16. Rogóz, M. "The IEC flicker meter model. Technical report", Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Electronics at the University of Science and Technology in Krakow, (2003).
17. Huang, S.-J. y C.-T. Hsieh. "Application of continuous wavelet transform for study of voltage flicker-generated signal"s. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol. 36, No. 3, (2000) 925-1032.
18. Chen, M. y P. Meliopoulos. "Hybrid digital algorithm for harmonic and flicker measurements". IEEE PES Winter Meeting. (2002) 1488-1493.
19. Chen, M.-T. y A. S. Meliopoulos. "Wavelet-based algorithm for voltage flicker analysis". In Proceedings of Ninth International

-
- Conference on Harmonics and Quality Power (2000) 732-738.
20. Huang, S. y C. Wen. "Enhancement of digital equivalent voltage flicker measurement via continuous wavelet transform". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, (2004) 663-670.
21. Parameswariah, C. & M. Cox. "Frequency characteristics of wavelets". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 3, (2002) 800-804.
22. Mallat S.: "Wavelet Tour of Signal Processing", Academic Press, San Diego, 1998.

Recibido el 27 de Noviembre de 2006
En forma revisada el 29 de Octubre de 2007