

Calidad de la potencia: métodos de calibración de medidores industriales

René D. Carranza López Padilla, Sergio A. Campos Montiel, Eugenia García Fierro, Adrián Castruita Romero

Centro Nacional de Metrología, CENAM
km. 4,5 Carretera a Los Cués, El Marqués Querétaro
rcarranz@cenam.mx

Resumen. Se presenta un sistema de medición desarrollado en el CENAM para la calibración de calibradores patrón para medidores de calidad de la potencia eléctrica en condiciones estacionarias. Se presenta la estructura que provee trazabilidad a las mediciones de calidad de la potencia eléctrica hacia patrones nacionales de medición y métodos de medición de referencia. Se discuten las componentes principales de incertidumbre del sistema de calibración y la necesidad de contar con un método de calibración de referencia. Se presentan resultados de la calibración de un calibrador de medidores industriales de calidad de la potencia eléctrica.

1. INTRODUCCIÓN

En la medición de la calidad de la potencia eléctrica a nivel industrial, las señales de tensión o corriente eléctrica presentan afectaciones severas de parámetros críticos, como la amplitud, la frecuencia fundamental, frecuencias armónicas, ruido aditivo de alta frecuencia, así como fluctuaciones en el tiempo de los parámetros anteriores. Cuando una señal eléctrica presenta componentes de frecuencia diferentes de la frecuencia fundamental, se identifica a tal señal como no-sinusoidal. Cuando un sistema de potencia eléctrica enfrenta condiciones más severas, como alguna falla operativa, o cuando la demanda excede la capacidad del sistema, es común observar que las señales eléctricas de tensión o corriente muestran variaciones en tiempos relativamente cortos, y se dice que las señales eléctricas observadas están en un régimen no-estacionario.

En condiciones estacionarias, la trazabilidad de las mediciones de calidad de la potencia eléctrica hacia patrones nacionales puede asegurarse con una incertidumbre de medición relativamente pequeña. En contraste, en condiciones no-estacionarias, la incertidumbre de la medición de la calidad de la potencia eléctrica se incrementa significativamente. En ambos casos resulta indispensable contar con un método de medición que sea confiable y tenga aceptación internacional, además de contar con patrones de referencia trazables a patrones nacionales de medición.

La figura 1 muestra la forma en que la trazabilidad de las mediciones que se realizan a nivel industrial, tiene su origen en patrones nacionales y en métodos de referencia. En el establecimiento de la trazabilidad de las

mediciones aplicadas para la calibración de calibradores, resulta importante contar con un método de medición de referencia.

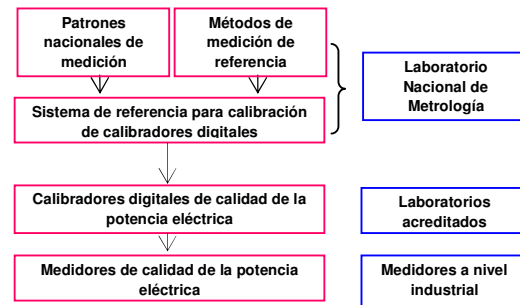


Fig. 1. Trazabilidad de las mediciones de calidad de la potencia eléctrica.

En la primera parte de este trabajo se presentan aspectos básicos de un sistema de referencia que se desarrolla en el Centro Nacional de Metrología, CENAM, para la calibración de calibradores de medidores de calidad de la potencia eléctrica. El alcance actual del sistema de referencia es para la medición de calidad de la potencia eléctrica en condiciones estacionarias. Para realizar mediciones en condiciones estacionarias, el sistema de referencia del CENAM realiza un análisis espectral de las señales de tensión y corriente eléctrica basado en la Transformada Discreta de Fourier (TDF).

Para evitar la fuga espectral al utilizar la TDF para el análisis espectral de las señales eléctricas de interés, el valor de la frecuencia de digitalización se hace igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la señal eléctrica. Para minimizar la fuga espectral, algunos autores [1, 2, 3] sincronizan la frecuencia de digitalización de su sistema de referencia con la frecuencia de digitalización

del calibrador bajo calibración. Además de reducir la incertidumbre en las mediciones causada por la fuga espectral, esta sincronización minimiza componentes de incertidumbre de medición asociadas con la variabilidad temporal (jitter) de las señales de digitalización, reduciendo aún más la incertidumbre de calibración.

En el sistema de referencia del CENAM, la frecuencia de digitalización se obtiene midiendo la frecuencia fundamental de la señal de tensión o de corriente del calibrador bajo calibración, y multiplicándola por un número entero. Este procedimiento es válido cuando se miden señales eléctricas en condiciones estacionarias, tales como distorsión armónica y desbalance del sistema eléctrico. Este método de sincronización permite calibrar patrones de calibración como los instrumentos Fluke 5500A y 5520A¹, los cuales no permiten un acceso a la señal de digitalización interna. Este método también se puede aplicar para la calibración de instrumentos de la serie Fluke 6100A, aunque para calibrar estos patrones de calibración se prefiere utilizar la sincronización directa con la señal de digitalización interna [3, 4].

En este trabajo se discute la necesidad de contar con métodos de medición de referencia en condiciones estacionarias. Normas internacionales como la IEC 61000-4-7 [5], proponen métodos de medición para determinar el desempeño de instrumentos de medición de calidad de la potencia para señales eléctricas. Sin embargo, cuando se requiere calibrar a calibradores de medidores industriales de calidad de la potencia eléctrica con trazabilidad a patrones nacionales, es necesario disponer de un método de referencia que permita obtener una incertidumbre de medición que sea menor que las especificaciones técnicas de los calibradores que se desea calibrar.

El método de referencia para calibración debe considerar problemas que afectan seriamente la trazabilidad de las mediciones, particularmente aquellos asociados con el proceso de digitalización utilizado en los sistemas de calibración de referencia. Entre otros problemas, algunos de la mayor importancia son: la respuesta en frecuencia del proceso de integración en el tiempo del

convertidor analógico-digital del sistema de calibración de referencia; el error de calibración y la ganancia del convertidor analógico-digital; la variabilidad temporal (jitter) de los pulsos de digitalización.

En este artículo técnico no se presenta la incertidumbre de medición que puede alcanzar el sistema de calibración de referencia del CENAM.

2. DESARROLLO

Cuando se calibra un medidor industrial de calidad de la potencia eléctrica, el calibrador patrón necesita aplicar señales de tensión y corriente al medidor bajo calibración, que sean representativas de fenómenos que afectan la calidad de un suministro de potencia eléctrica. Los medidores de calidad de la potencia eléctrica a nivel industrial, utilizan diversas técnicas de análisis en los dominios del tiempo y de la frecuencia cuando las señales eléctricas bajo observación son no-sinusoidales, estacionarias y no-estacionarias. En este trabajo se presenta un sistema de calibración para calibradores patrón cuando las señales eléctricas están en condiciones estacionarias.

En la figura 2 se muestra un diagrama básico de un medidor de calidad de la potencia eléctrica. En general, un medidor de tipo industrial se utiliza transductores de tensión y de corriente, que convierten las señales de tensión y de corriente en niveles adecuados para los sistemas de conversión analógico a digital. A partir de las formas de onda digitalizadas de la tensión y la corriente, diversos mensurandos de la calidad de la potencia eléctrica son cuantificados y calificados por el medidor bajo calibración, MBC, utilizando métodos de análisis en el dominio de la frecuencia.

Un medidor de calidad de la potencia eléctrica, además de cuantificar algún parámetro de la calidad de la potencia, como el valor raíz cuadrático medio de la fundamental y sus armónicos, realiza otras actividades, como el conteo de eventos, evaluación de excursiones de los parámetros de calidad por arriba de niveles de umbral establecidos, reportar sobre la fecha y hora en que se presentó algún evento.

¹ La referencia a marcas comerciales de equipos e instrumentos de medición en este trabajo, no implica que el Centro Nacional de Metrología endosa o recomienda los mismos.

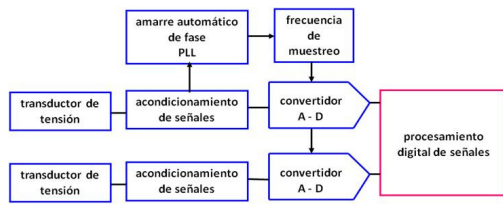


Fig. 2. Esquema básico de un medidor de calidad de la potencia eléctrica

En la calibración de medidores industriales de calidad de la potencia eléctrica, los laboratorios acreditados prefieren utilizar calibradores basados en la síntesis digital de señales eléctricas. El esquema básico del proceso de calibración de un medidor industrial de calidad de la potencia eléctrica se muestra en la figura 3.

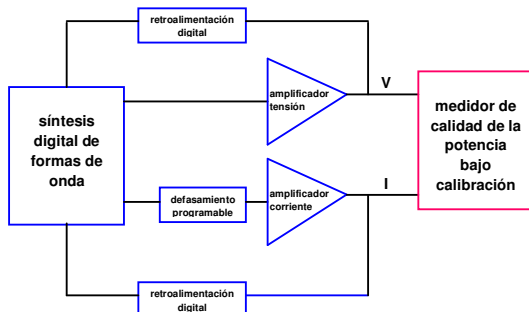


Fig. 3. Diagrama esquemático de la calibración de medidores de calidad de la potencia.

La figura 4 muestra un diagrama esquemático del sistema de referencia desarrollado en el CENAM para condiciones estacionarias.

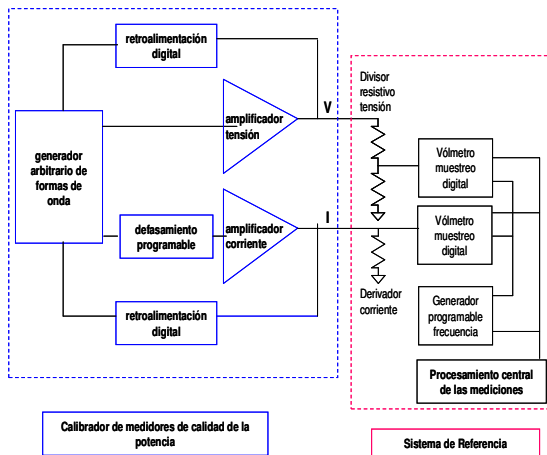


Fig. 4. Diagrama esquemático del sistema de referencia del CENAM para la calibración de calibradores de calidad de la potencia eléctrica.

Para la medición de tensión, el sistema del CENAM utiliza el divisor resistivo del

múltímetro Agilent 3458A. Para la medición de corriente, el sistema CENAM utiliza derivadores de corriente del tipo coaxial, cuyo valor de impedancia permite desarrollar una tensión que puede ser medida directamente en el intervalo de 10 V del múltímetro. La figura 5 muestra un derivador de corriente de 1 ohm para mediciones de 1 A, desarrollado en forma coaxial [6,7].

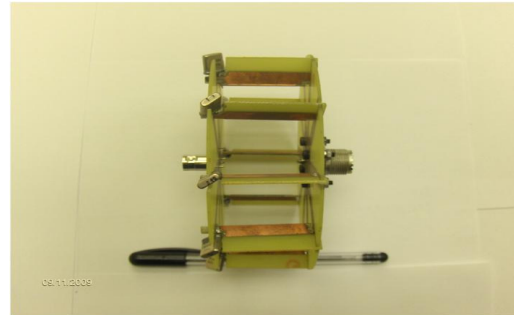


Fig. 5. Derivador de corriente de 1Ω/1A del tipo coaxial.

Con el propósito de minimizar el error de fase entre la tensión y la corriente medidas, algunos autores proponen el uso de un solo voltímetro digital. Sin embargo, en el patrón del CENAM se ha preferido utilizar dos voltímetros digitales de manera simultánea, porque permiten capturar transitorios que aparecen simultáneamente en las señales de tensión y corriente eléctrica. En el esquema de la figura 4 se muestran dos voltímetros de muestreo de alta resolución y linealidad que permiten digitalizar simultáneamente las señales de tensión y de corriente del calibrador bajo calibración. Se utilizan múltímetros digitales Agilent 3458A, los cuales utilizan convertidores analógico-digitales con resolución hasta 28 bits, cuando se les utiliza para la medición de señales eléctricas de muy baja frecuencia, además de que permiten configurar directamente sus parámetros principales para la digitalización de señales eléctricas, como el tiempo de integración de la señal, la frecuencia de muestreo, el inicio del proceso de muestreo en algún punto de la forma de onda. En el intervalo de 10 V, estos múltímetros presentan las mejores características de linealidad y ganancia, así como una respuesta en frecuencia muy plana, que impacta muy poco a la incertidumbre de amplitud y fase de las señales medidas.

2.1. Sistema de calibración de referencia del CENAM para mediciones bajo condiciones estacionarias.

El alcance de este trabajo es para mediciones de calidad de la potencia eléctrica en condiciones estacionarias.

El concepto de condiciones estacionarias se refiere a un sistema de suministro de potencia eléctrica operando en un régimen estable. En condiciones estacionarias se tiene: 1) que el estado de potencia eléctrica entregada a la red no cambia, es decir, las cargas eléctricas se mantienen conectadas al sistema eléctrico; aunque las cargas presentan distorsión armónica, la componente fundamental y sus armónicos no muestran variaciones temporales de amplitud o de frecuencia; 2) las señales de tensión y corriente en el sistema eléctrico son periódicas, por lo cual es posible medir algunos parámetros de la calidad del suministro eléctrico, como el valor efectivo de la fundamental y sus armónicos, la amplitud, frecuencia y fase de la fundamental y la de los armónicos; distorsión armónica y el desbalance de tensión; 3) es aceptable que los medidores de calidad de la potencia eléctrica de nivel industrial utilicen la Transformada Discreta de Fourier para realizar un análisis espectral de las señales de tensión y corriente del suministro eléctrico.

Para condiciones estacionarias, la trazabilidad de las mediciones de calidad la potencia eléctrica del sistema de referencia CENAM se establece mediante: 1) el uso de transductores de tensión y corriente que se aplican al calibrador patrón bajo calibración y que proporcionan trazabilidad hacia los patrones nacionales de resistencia e impedancia; 2) el sistema de digitalización del sistema de referencia del CENAM es trazable a patrones de tensión en corriente continua y alterna, y de tiempo-frecuencia; 3) el método de medición espectral está basado en la transformada discreta de Fourier.

La trazabilidad de las mediciones de tensión en corriente alterna hacia el patrón nacional de tensión en corriente continua alterna cual está constituido por un conjunto de termoconvertidores de tensión desarrollados por el PTB de Alemania. Las mediciones de tensión en corriente continua son trazables al patrón nacional materializado con el Efecto Josephson.

Los termoconvertidores de tensión presentan limitaciones de uso para mediciones de calidad de la potencia eléctrica, pues no permiten discriminar información del contenido de energía en cada frecuencia dentro del espectro analizado. Sin embargo, los

termoconvertidores son el origen de la trazabilidad de las mediciones digitalizadas. Este proceso se explica más adelante.

En contraste, la digitalización de señales eléctricas permite realizar mediciones de contenido espectral con trazabilidad a patrones de tensión en corriente continua y de tiempo-frecuencia. Para asegurar la trazabilidad de la digitalización de las señales eléctricas, es necesario considerar lo siguiente:

i. La duración de la ventana de tiempo de observación de una señal eléctrica debe ser un múltiplo entero del periodo fundamental de la señal. Si se ya se tiene la forma de onda digitalizada de la señal eléctrica y se aplica la transformada discreta de Fourier sobre una ventana de tiempo de observación cuya duración no sea un múltiplo entero del periodo fundamental de la señal eléctrica, el espectro de Fourier mostrará componentes de energía, tanto en las frecuencias fundamental y sus armónicas, cuanto en frecuencias aledañas a éstas. Este fenómeno se conoce como fuga espectral [8]. Para minimizar este problema, se debe asegurar que: A) la señal eléctrica a medir está en condiciones estacionarias (periódica); B) se mide exactamente el valor de la frecuencia fundamental de la señal eléctrica; C) que la frecuencia de digitalización sea un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la señal; D) la digitalización se inicia en tiempos específicos en la ventana de tiempo de observación. En la Fig. 4, el multímetro Agilent 3458A mide la frecuencia de la señal eléctrica, y el procesador central de mediciones configura al generador programable de frecuencia para generar un tren de pulsos cuya frecuencia corresponde a un número entero del periodo fundamental. El multímetro se configura para una frecuencia de digitalización igual a la frecuencia del tren de pulsos externo y para iniciar la digitalización en el cruce por cero de la señal eléctrica.

ii. El inicio y término de la digitalización de la señal eléctrica se debe realizar de tal manera que la señal eléctrica no quede truncada. En la figura 5 se muestra el inicio de la digitalización en los cruces por cero de la señal eléctrica para evitar que la señal digitalizada quede truncada. Al utilizar la Transformada Discreta de Fourier en una señal digitalizada y truncada, aparecen componentes espurias de frecuencia en el espectro de la señal digitalizada. Para minimizar este efecto se utilizan ventanas de

atenuación sobre la señal digitalizada, como la ventana rectangular que tiene amplitud unitaria dentro del tiempo de observación, o la ventana de Hanning, la cual tiene consiste en una función cosenoidal que lleva a valor cero las muestras digitalizadas inicial y terminal [9]. En el sistema de referencia de calibración del CENAM se utiliza una ventana rectangular, cuya amplitud es unitaria, y cuya duración es igual a un número entero de periodos de la señal eléctrica (se aprovecha la periodicidad de la señal de interés), como se muestra en la ecuación 1.

iii. Determinar la incertidumbre de la medición asociada con los parámetros del proceso de digitalización del sistema de calibración de referencia, particularmente, la respuesta en frecuencia del proceso de integración del convertidor analógico-digital; la variabilidad temporal (jitter) de los pulsos de sincronización; el error de calibración y la ganancia del convertidor analógico-digital.

$$Rec(t) = 1 \text{ para } T_{inicio} < T_{observación} < T_{final} \quad (1)$$

En condiciones estacionarias es posible utilizar la Transformada Discreta de Fourier sobre una señal digitalizada $V(nT_m)$, siempre y cuando se asegure que la duración $T_{dig} = MT_0$ de la ventana de tiempo para digitalización, sea un número entero M del periodo fundamental T_0 de la señal eléctrica $v(t)$. De acuerdo con la IEC 61000-4-7, la duración M de la ventana de observación $Rec(t)$ debe ser igual a un número entero de periodos de la fundamental:

$$\begin{aligned} M &= 10 \text{ periodos para } f_0 = 50 \text{ Hz} \\ M &= 12 \text{ periodos para } f_0 = 60 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (2)$$

En la figura 5 se muestra una ventana de tiempo de digitalización, cuya duración es un número entero de periodos de $v(t)$:

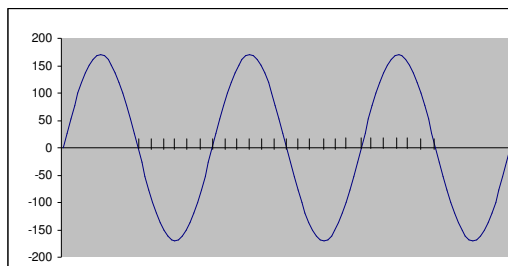


Fig. 5. Señal eléctrica y ventana de tiempo para la de una señal digitalizada no truncada.

2.2. Análisis espectral del proceso de digitalización utilizado en el Sistema de referencia del CENAM para condiciones estacionarias.

En la figura 6 se muestra el proceso de digitalización de una señal eléctrica. Este proceso se utiliza en el sistema de calibración de referencia del CENAM. La digitalización corresponde a una multiplicación en el dominio del tiempo entre $v(t)$ y un pulso $p(t)$ de amplitud unitaria:

$$\begin{aligned} p(t) &= 1 \text{ para } T_m < t < T_m + T_{int} \\ &= 0 \text{ para otro } t \end{aligned} \quad (3)$$

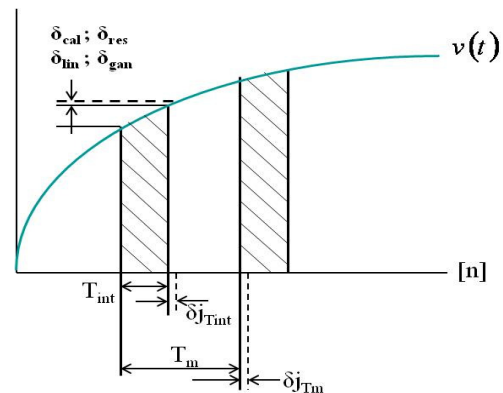


Fig. 6. Diagrama de tiempos de digitalización y relación de amplitudes entre señal analógica y señal digitalizada

Algunos autores [1,2,4], proponen un modelo matemático que representa la operación de digitalización de una señal eléctrica cuando se utiliza un convertidor analógico-digital que está activado por un tren de pulsos de muestreo. La ecuación 4 muestra un modelo matemático que permite identificar las componentes de incertidumbre en la medición digital de la amplitud de una señal eléctrica.

$$v[nT_m] = \frac{V_{AMPL} AB(f)}{T_{int} + \delta_{T_{int}}} \int_{nT_m + \delta_{T_m}}^{nT_m + \delta_{T_m} + T_{int} + \delta_{T_{int}}} v(t) p(t) dt + v_{Rvolt}(t) \quad (4)$$

en donde:

$v[nT_m]$ es el enésimo valor digital de la señal de interés $v(t)$ al tiempo $t = nT_m$;
 $v(t)$ es la señal eléctrica a ser digitalizada
 $p(t)$ es un pulso eléctrico de amplitud unitaria, que corresponde al proceso de digitalización de $v(t)$;

$$V_{AMPL} = 1 + \delta_{cal} + \delta_{gan} + (\delta_{res} + \delta_{lin}) \frac{V_{PE}}{|V_n|} \quad (5)$$

$AB(f)$ es el ancho de banda del voltmetro. En el Agilent 3458A, $AB(f) = 1$ para frecuencias hasta 150 kHz;

n es un índice de los valores digitalizados;

T_{int} es el tiempo en que el convertidor analógico-digital realiza la digitalización de $v(t)$;

T_m es el periodo del tren de pulsos $p(t)$. En el sistema de referencia CENAM, $T_m = kT_0$, en donde k es un entero y T_0 es el periodo fundamental de $v(t)$;

δ_{Tm} es la desviación por el jitter en el pulso de muestreo digital;

δ_{Tint} es la desviación por el jitter en el tiempo de integración del convertidor analógico-digital;

δ_{cal} es la desviación del valor de calibración del convertidor analógico-digital; incluye desviaciones por deriva de la referencia interna del voltmetro, diferencia entre la temperatura de calibración y la de operación;

δ_{gan} es la desviación del valor de la ganancia del convertidor analógico-digital;

δ_{lin} es la desviación causada por la linealidad del convertidor analógico-digital, e incluyen efectos por no-linealidad integral o diferencial del convertidor;

δ_{res} es la desviación causada por la resolución del convertidor analógico-digital

$v_{Rvolt}(t)$ es el ruido de digitalización del voltmetro de muestreo

V_{PE} es el valor a plena escala del convertidor analógico-digital

V_n es el valor digitalizado al tiempo $t = nT_m$.

La ecuación 4 presenta aspectos relevantes del proceso de digitalización:

1. la digitalización es una multiplicación en el dominio del tiempo, entre la señal eléctrica $v(t)$ y pulsos $p(t)$; este producto corresponde al proceso de integración del convertidor analógico-digital;

2. el proceso de digitalización de $v(t)$, se realiza durante el tiempo de integración, el cual está definido desde $t = nT_m$ hasta $t = nT_m + T_{int}$;

3. muestra la contribución de las desviaciones (jitter) del tren de pulsos de muestreo digital δ_{Tm} y del proceso de integración sobre el valor digitalizado;

4. indica que en el proceso de digitalización, algunas componentes de incertidumbre de medición mantienen un valor constante durante el tiempo de integración, de manera que se tratan como constantes en la ecuación 4;

5. muestra que la medición de la amplitud de la señal digitalizada V_{AMPL} y de los tiempos de integración, puede ser trazable a patrones nacionales de tensión en corriente continua y de tiempo-frecuencia.

La Tabla 1 muestra los valores de incertidumbre de los parámetros de digitalización propios del voltmetro digital Agilent 3458A cuando se utiliza en el intervalo de 10 V.

Parámetros de digitalización Agilent 3458A [10]	
Incertidumbre en la calibración del intervalo de 10 V	$\pm 0,5 \mu\text{V/V}$
No linealidad diferencial	$0,01 \mu\text{V/V}$
No linealidad integral	$0,1 \mu\text{V/V}$
Error de ganancia del convertidor analógico-digital [4]	INT(0,002/ T_{int}) Límite máximo de $30 \mu\text{V/V}$
Ganancia en el ancho de banda 3458A	AB = 1 hasta 10 kHz
Jitter en disparo externo [10],	Latencia: < 175 ns Jitter: < 50 ns rms
T_{int} tiempo de integración del convertidor analógico-digital. Corresponde al tiempo de APER del Agilent 3458A	50 ns

Tabla 1. parámetros del proceso de digitalización y su valor de incertidumbre.

En el sistema de calibración de referencia del CENAM se ha filtrado la componente de ruido v_{Rvolt} que aparece en el modelo matemático en la ecuación 4, con el propósito de evitar el fenómeno de traslape de frecuencias (frequency aliasing), asociado con el ancho de banda de la señal $v(t)$ y la frecuencia de digitalización. Con esta consideración, la Transformada Discreta de Fourier aplicada sobre la señal digitalizada $V(nT_m)$ es:

$$V_{T_m}(k) = \frac{2e^{-j\left(\frac{\pi T_{int}k}{NT_m}\right)}}{L} \frac{\frac{\pi T_{int}k}{NT_m}}{\text{sen}\left(\frac{\pi T_{int}k}{NT_m}\right)} \sum_{n=0}^{L-1} v[nT_m] e^{-j\frac{2\pi kn}{L}}$$

(6)

En la ecuación 6, $k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$, son los puntos (bin) de frecuencia en el espectro; $L = NM$, es el número total de puntos de frecuencia del análisis espectral; N es el número de muestras digitalizadas dentro de un periodo fundamental T_0 de la señal $v(t)$; M es el número total de periodos fundamentales dentro de la ventana de tiempo para digitalización de la señal $v(t)$.

En la ecuación 6, la respuesta en frecuencia del pulso $p(t)$, que corresponde al proceso de integración del convertidor analógico-digital, está considerada en el factor:

$$e^{-j\left(\frac{kT_{int}k}{LT_m}\right)} \frac{\left(\frac{\pi T_{int}k}{LT_m}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\pi T_{int}k}{LT_m}\right)} \quad (7)$$

En la ecuación 7, el término exponencial proporciona la información de fase respecto de la frecuencia, mientras que la función SINC(x), muestra la amplitud espectral respecto de la frecuencia. Se puede apreciar que cuando el tiempo de integración T_{int} es muy pequeño, la incertidumbre asociada con el jitter tiene un efecto mayúsculo, por lo que resulta necesario corregir la respuesta en frecuencia del análisis espectral al utilizar la TDF, cuando se requiere obtener una incertidumbre de medición que permita realizar la calibración de algunos calibradores como el Fluke 61000A.

3. RESULTADOS

Desempeño del Sistema de referencia del CENAM para condiciones estacionarias.

En un primer experimento se determinó el error de medición de tensión en corriente alterna del sistema de calibración del CENAM. Las mediciones se realizaron para una tensión de 120 V_{RMS} a la frecuencia de 60 Hz. El patrón de referencia para esta prueba es una transferencia térmica de estado sólido Fluke 792A, trazable al conjunto de

termoconvertidores de unión múltiple desarrollados por el PTB de Alemania, los cuales constituyen el patrón nacional de tensión en corriente alterna en el CENAM.

La Tabla 2 muestra los parámetros y resultados de esta prueba.

Valor medido Sistema de Referencia del CENAM = 119,999 8 V	Valor medido patrón de referencia Fluke 792A = 119,999 7 V ± 4 μV/V
Frecuencia señal de prueba (f ₀)	59,999 1 Hz
Frecuencia de muestreo (f _m)	5 999,1 Hz
Duración ventana de tiempo	M = 12 ciclos
Número de muestras dentro del periodo fundamental	N = 100 muestras

Tabla 2. Parámetros y resultados de la medición de tensión alterna a una sola frecuencia.

La diferencia entre los resultados de medición del sistema de medición de referencia del CENAM y el patrón de referencia Fluke 792A, es cercana a 1 μV/V. Los resultados de medición de tensión en corriente alterna del Sistema de referencia del CENAM se pueden considerar satisfactorios pues están dentro de la incertidumbre de medición del patrón de referencia Fluke 792A.

En el segundo experimento, se realizaron mediciones de tensión en corriente alterna con armónicos en un calibrador Fluke 5520 A. La figura 7 muestra el arreglo experimental en donde aparece el calibrador bajo calibración, y los instrumentos del sistema de medición de referencia del CENAM. En estas mediciones se utilizó un medidor de potencia-energía RADIAN RD-22, el cual permite medir señales no-sinusoidales.

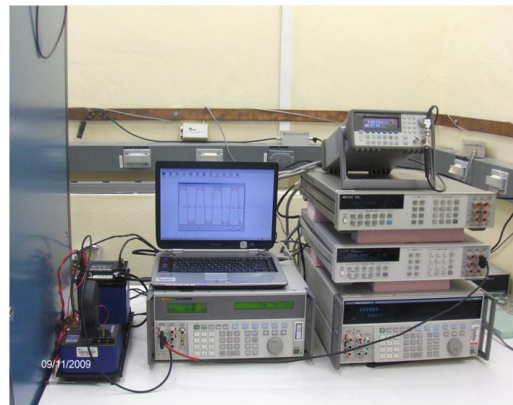


Figura 7. Arreglo experimental de mediciones realizadas en un calibrador de medidores de calidad de la potencia eléctrica. La computadora despliega la forma de onda de la señal no-sinusoidal bajo prueba.

La Tabla 3 muestra los valores nominales de amplitudes de una señal no-sinusoidal, que consiste de la componente de frecuencia fundamental y de las 3 primeras armónicas impares. La frecuencia de muestreo es igual a 100 veces la frecuencia fundamental, esto es $f_m = 6\,000,02$ Hz. En la Tabla 3 se muestran los resultados de medición del sistema de referencia del CENAM y los resultados del medidor de potencia RADIAN RD-22:

frecuencia [Hz]	valor programado [V_{RMS}]	valor medido sistema CENAM	valor medido RD-22
60,000 2	120,0	112,408 1	112,404 5
180,000 6	36,0	33,674 0	33,676 5
300,001 0	24,0	22,421 9	22,425 1
420,001 4	12,0	11,199 7	11,201 3

Tabla 3. Resultados de medición de un calibrador de medidores de calidad de la potencia eléctrica para una señal de tensión con armónicos.

La Tabla 3 muestra la cercanía conseguida entre los resultados de medición del sistema de referencia del CENAM y el medidor RD-22. En contraste, ambos patrones muestran un error significativo del calibrador Fluke 5520A.

4. TRABAJO A FUTURO

En las etapas siguientes de desarrollo del sistema de referencia del CENAM, se incluye un divisor inductivo de tensión, que permita escalar tensiones de 120 V y 240 V a valores de 5 V, para utilizar el intervalo de 10 V del multímetro digital. Es necesario desarrollar otros derivadores de corriente del tipo coaxial para otras corrientes.

La sincronización directa del sistema de referencia del CENAM con la base de tiempo del calibrador bajo calibración, como lo han propuesto algunos autores [1 a 5], reducirá en una menor incertidumbre de medición.

El tema de mayor importancia que se tratará en el futuro, es la medición de señales eléctricas no-sinusoidales que se presentan en sistemas eléctricos de potencia en condiciones no-estacionarias. La referencia [10] presenta

una investigación sobre un método de medición de la envolvente de una señal sinusoidal. Esta técnica de medición es un candidato potencial para la medición de transitorios en sistemas eléctricos de potencia como parpadeo (flicker), abatimiento (dip), crecimiento (swell).

5. CONCLUSIONES

El avance conseguido en el sistema de referencia del CENAM para la calibración de calibradores de medidores de calidad de la potencia eléctrica, permite realizar mediciones de señales no-sinusoidales en condiciones estacionarias. La trazabilidad de este tipo de mediciones utilizando el sistema de referencia del CENAM, es hacia patrones nacionales de tensión en corriente continua (efecto Josephson), corriente alterna (termoconvertidores de unión múltiple PTB); tiempo-frecuencia (relojes atómicos de cesio); resistencia eléctrica (efecto Hall cuántico).

En el trabajo que se reporta, se esbozan los aspectos principales de un método de medición de referencia para la calibración de calibradores de medidores de calidad de la potencia eléctrica. Entre otros aspectos importantes, el método de medición de referencia requiere indicar las precauciones a tomar cuando se realiza el análisis espectral de una señal eléctrica no-sinusoidal, tanto en condiciones estacionarias cuanto no-estacionarias.

REFERENCIAS

- [1] W. G. Kürten Ihlenfeld, E. Mohns, "Ac-dc transfer measurements of highest accuracy with synchronous analogue-to-digital conversion", *Metrologia* 41, 2004, pp. 11-115.
- [2] W. G. Kürten Ihlenfeld, E. Mohns, M. Serra, K. Dauke, A. Suchy, "Quasi-synchronous microcontroller-based highly accurate digital sampling of AC signals", *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. 56, No. 2, Abr. 2007, pp. 414-417.
- [3] R. Iuzzolino y W. G. Kürten Ihlenfeld, "High-accuracy methods and measurement procedures for quality parameters using the digital synchronous sampling technique", *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. 56, No. 2, Abr. 2007, pp. 426-430.
- [4] M. Bierzychudek, R. Iuzzolino, H. Laiz. R. García y L. Di Lillo, "Calibration system for a digital standard power source for power quality parameters", VII SEMETRO, Brazil.

- [5] IEC 61000 Part 4-7, Testing and measurement techniques-General Guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Segunda edición, 2002-08.
- [6] S. Svenson, *A precision wattmeter for non-sinusoidal conditions*. Technical Report No. 223L, Departamento de Ingeniería de Potencia Eléctrica, 1996, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Cómputo. Chalmers University of Technology, Göteborg, Suecia.
- [7] P. S. Filipski y M. Boecker, "AC-DC Current Shunts and System for Extended Current and Frequency Ranges", IEEE Trans. Instr. and Meas., Vol. 55, No. 4, Ago. 2006, pp.1222-1226.
- [8] A V. Oppenheim y A. S. Willsky, *Señales y Sistemas*, Prentice-Hall Hispanoamericana S. A, 1983.
- [9] D. J. DeFatta, J. G. Lucas y W. S. Hodkiss, *Digital Signal Processing: A System Design Approach*, John Wiley & Sons, 1988.
- [10] *Digitizing Specifications*. User's Guide, p. 295-296, Agilent Technologies 3458A Multimeter.
- [11] R. Carranza, *Digital Measurement of Power System Frequency*, PhD Thesis, Universidad de Bath, Inglaterra, 1994.