

DESARROLLO DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL PARA MEDICIÓN DE PRESIÓN SONORA POR OCTAVAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Leonardo Melo^{*1}

¹Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda, Av. Ramón Franco 5050, Avellaneda. Argentina.

** Autor a quien la correspondencia debe ser dirigida
lmelo@fra.utn.edu.ar*

Resumen

La utilización de instrumentos virtuales para reemplazar instrumentos autónomos tradicionales es una tarea que desde hace años viene en continuo crecimiento gracias al desarrollo de la informática. El presente trabajo presenta un caso de estudio en donde se desarrolló y utilizó un software, que permite crear instrumentos virtuales, para reemplazar a un medidor de presión sonora por octavas. El sistema ha sido desarrollado para medir el espectro de ruido generado por un transformador de potencia durante el ensayo de vacío.

Palabras clave: Instrumento Virtual – Presión Sonora – Octavas – Transformador de Potencia.

Abstract

The use of virtual instruments to replace traditional stand-alone instruments is a task that has been steadily growing for years thanks to progress in computer science. This paper presents a case study where software is used for creating virtual instruments to replace an octave band digital sound level meter. The system has been developed to measure the noise spectrum generated by a power transformer during no-load test.

Key-words: Virtual Instrument – Pressure Level – Octaves – Power Transformer.

Introducción

Los instrumentos autónomos tradicionales digitales o analógicos, tales como osciloscopios y generadores de funciones, son muy poderosos, caros y diseñados para llevar a cabo una o más tareas específicas definidas por el fabricante. Sin embargo, el usuario, por lo general, no puede extender o personalizar esas tareas. Las perillas y botones del instrumento, sus circuitos electrónicos y las funciones disponibles para el usuario son todas específicas a la naturaleza del instrumento. Además, debe desarrollarse una tecnología especial y utilizar costosos componentes para construirlos, lo cual los hace muy onerosos y lentos para adaptarlos. Por el contrario, los instrumentos virtuales, debido a que están basados para utilizarse en una computadora personal, aprovechan inherentemente los beneficios de la última tecnología de estas [1].

Este trabajo trata sobre la implementación de un sistema de medición que permite medir el espectro por banda de octavas del ruido generado por un transformador de potencia durante el ensayo de vacío. Dicha medición se ha llevado a cabo a través de un instrumento virtual diseñado para tal fin.

Existen estudios previos que tratan sobre la medición del espectro de sonido en dichas máquinas eléctricas [2], [3]. El aporte de este trabajo radica en la posibilidad de realizar las mediciones antes mencionadas con un instrumento virtual. La señal a procesar es adquirida a través de la entrada de parlante de la placa de audio de una PC y se toma de la salida analógica de un sonómetro clase II.

Marco teórico

El marco teórico está dividido en dos apartados. El primero trata sobre la instrumentación virtual, mientras que el segundo introduce los conceptos inherentes a la medición de ruido en transformadores de potencia.

1. Instrumentación virtual

Un instrumento virtual (IV) consiste de una computadora del tipo industrial, una estación de trabajo, o una computadora personal equipada con programas (software), hardware, tales como placas para insertar, y manejadores (drivers) que cumplen, en conjunto, las funciones de instrumentos tradicionales.

Las características que destacan el uso de instrumentos virtuales son:

- **Flexibilidad:** La posibilidad que presenta un IV de ser programado lo transforma en una herramienta totalmente versátil que solo queda limitada por la potencia de cálculo del ordenador y de las características del software. Mientras que en los instrumentos autónomos tradicionales esa característica se ve truncada al momento de su fabricación.
- **Reducción de Costos:** Utilizando soluciones basadas en la instrumentación virtual, se puede reducir los costos de inversión, desarrollo de sistemas y mantenimiento en los casos donde gran cantidad de instrumentos sean requeridos.
- **Hardware para Insertar y de Red:** Existe una amplia variedad disponible de hardware que se puede o bien insertar en la computadora o bien acceder a través de una red. Estos dispositivos ofrecen un amplio rango de capacidades de adquisición de datos a un costo significativamente inferior que el correspondiente a dispositivos dedicados.

Para el presente trabajo se ha utilizado para la programación del instrumento virtual un software desarrollado por la firma National Instrument denominado LabView. Este programa contiene diferentes librerías de instrumentos y operaciones. Incluso se le puede adicionar una serie de herramientas específicas para ser utilizadas en las diferentes áreas de la ingeniería de medición y control. La utilizada en este caso es la denominada "Sound and Vibration Toolkit" [4].

"Sound and Vibration Toolkit" es una colección de instrumentos virtuales (IV) que se puede utilizar para realizar mediciones típicas requeridas en audio, acústica y aplicaciones en el campo de las vibraciones mecánicas. Se puede utilizar para realizar mediciones con datos digitalizados o mediciones simuladas. La figura 1 ilustra los diferentes procesos del programa.

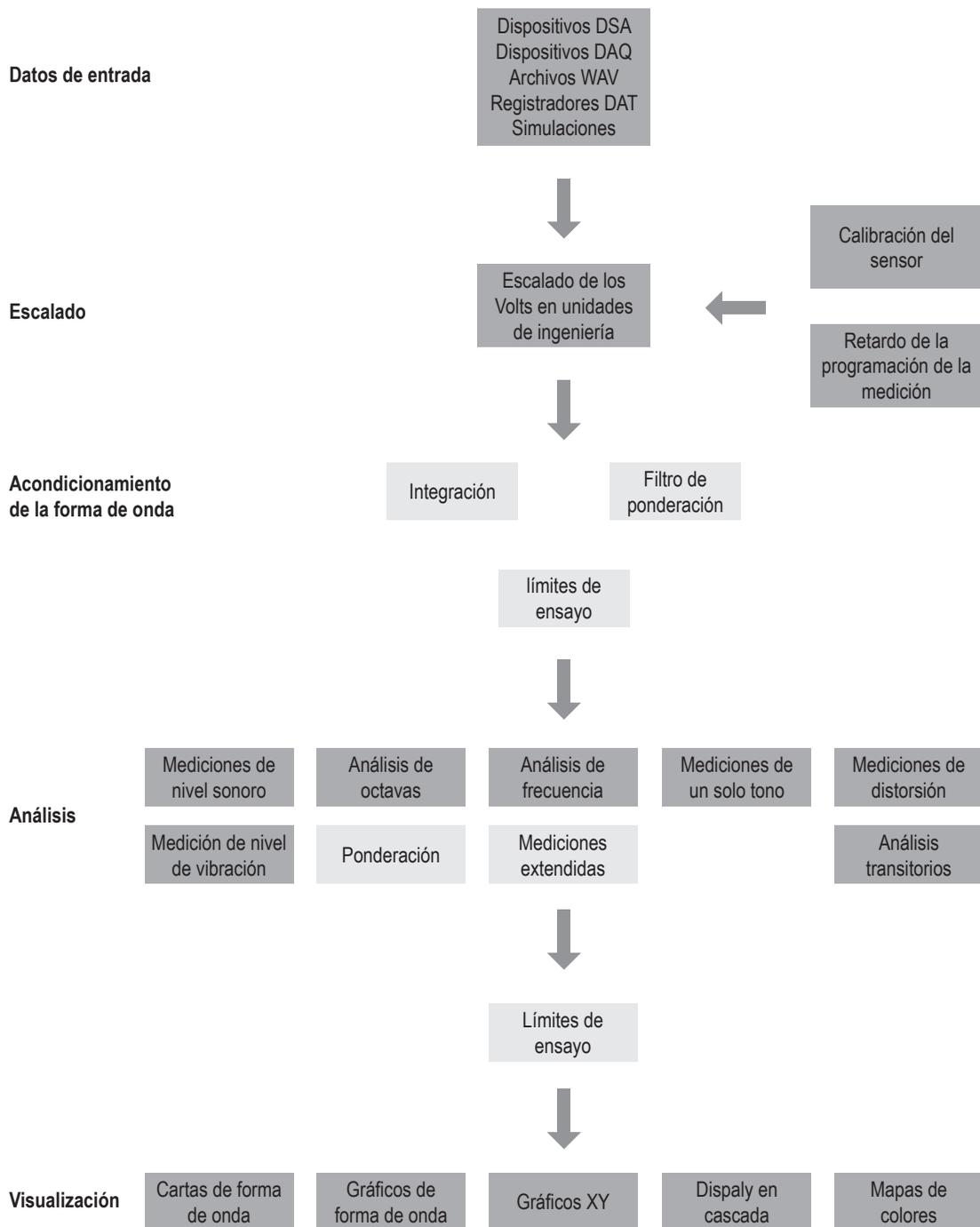


Figura 1: Las operaciones de medición mostradas en la línea de análisis no se realizan necesariamente al mismo tiempo. Los cuadros a trazos indican operaciones opcionales de medición.

2. Medición de ruido en transformadores [5].

2.1. Definiciones:

Presión sonora, p :

El sonido puede ser definido como cualquier variación de presión (en el aire, el agua u otros medios elásticos) que el oído humano puede detectar. Las variaciones de presión viajan a través del medio desde la fuente de sonido a los oídos del receptor. El número de variaciones cíclicas de presión por segundo se llama “frecuencia” del sonido, y se mide en Hertz (Hz). Cada frecuencia de un sonido produce un tono característico. El “zumbido” de un transformador es de baja frecuencia, del orden de 100 Hz o 120 Hz fundamentalmente (dependiendo de la frecuencia de la fuente de alimentación eléctrica), mientras que un silbido de alta frecuencia está típicamente por encima de los 3 kHz. El rango normal de audición de una persona joven y sana se extiende desde aproximadamente 20 Hz a 20 kHz.

Una característica utilizada para describir un sonido es la amplitud de las variaciones de presión que se mide en Pascales (Pa). El sonido más débil que el oído humano sano puede detectar es fuertemente dependiente de la frecuencia, a 1 kHz tiene una amplitud de $20\mu\text{Pa}$. Por el contrario el umbral de dolor corresponde a una presión de sonido de más de un millón de veces mayor que la anterior. Por lo tanto, el uso de números tan dispares se debe evitar, por lo que se utiliza comúnmente la escala de decibeles (dB). Esta escala es “logarítmica” y utiliza el valor de $20\mu\text{Pa}$ como nivel de referencia p_0 , que corresponde a 0 dB. Por lo tanto se define como “ L_p ” al “Nivel de presión sonora o acústica” (ecuación 1):

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (1)$$

Donde p es una magnitud escalar y es la presión acústica medida por un micrófono. Un aspecto útil de la escala de decibeles es que da una mejor aproximación a la percepción humana de sonoridad relativa que la escala lineal medida en Pascal, debido a que el oído responde al sonido logarítmicamente. Sin embargo, el oído humano no responde de la misma manera para cada frecuencia de valores, por lo tanto, es necesario colocar un filtro adecuado en el micrófono para garantizar mediciones que reflejen realmente el sonido percibido por el oído. Un filtro internacionalmente estandarizado es el denominado “A weighting” o “Ponderación A”. Las ecuaciones matemáticas que dan la respuesta del filtro son las mostradas en las ecuaciones 2 y 3, mientras que el gráfico de la respuesta del filtro es el mostrado en la figura 2.

$$\text{Ra}(f) = \frac{12200^2 \times f^4}{(f^2 + 20,6^2) \times (f^2 + 12200^2) \times \sqrt{f^2 + 107,7^2} \times \sqrt{f^2 + 737,9^2}} \quad (2)$$

$$A = 20 \times \log [\text{Ra}(f)] \text{dB} + 2,0 \text{dB} \quad (3)$$

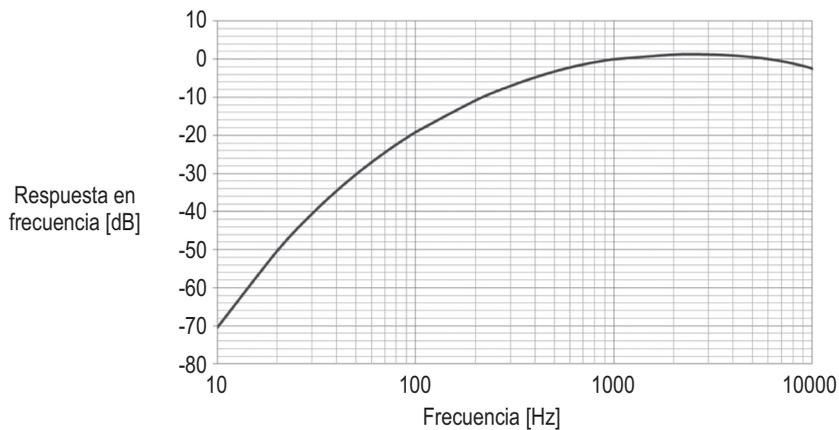


Figura 2: Curva de respuesta del filtro A

Velocidad de partícula, u:

Esta cantidad describe la velocidad de oscilación de las partículas del medio en el que las ondas de sonido se propagan. Se mide en metros por segundo, ms^{-1} y es una magnitud vectorial.

Intensidad sonora, I:

La intensidad del sonido es una cantidad vectorial que describe la magnitud y la dirección del flujo neto de energía de sonido en una posición dada. Es el producto promediado en el tiempo de la presión sonora y la velocidad de la partícula en un punto dado.

$$I = \overline{p \times u} \tag{4}$$

Se mide en Watt por metro cuadrado, Wm^{-2} . La dirección del flujo de energía está dada por el ángulo de fase entre la presión de sonido y la velocidad de las partículas en la ubicación específica. La intensidad de sonido normal es la tasa de flujo de la energía del sonido a través de un área unitaria, medida en una dirección normal a la unidad de área especificada.

Potencia sonora, W:

Una fuente de sonido irradia energía en el aire circundante dando lugar a un campo de presión de sonido. La potencia sonora es la causa, mientras que la presión sonora es el efecto. La presión sonora que se escucha (o medida con un micrófono) depende de la distancia de la fuente y el entorno acústico. Por lo tanto, el ruido de una fuente no se puede cuantificar por la simple medición de presión de sonido solo. En su lugar, es necesario determinar su potencia de sonido, la que es independiente del medio ambiente y es un descriptor único del nivel de ruido de una fuente de sonido. La potencia sonora es la velocidad a la que la energía es irradiada (energía por unidad de tiempo) y se mide en Watt.

2.2. Fuentes de ruido en un transformador

Magnetoestricción:

La magnetoestricción es el cambio de dimensiones, que se observa en ciertos materiales, cuando son sometidos a un flujo magnético variable en el tiempo. En los núcleos de acero magnético, el cambio dimensional está en el orden de 0,1 a 10 μm por metro de longitud en los niveles de inducción típicos.

La Figura 3 muestra la magnetoestricción vs densidad de flujo magnético para un tipo de laminación típica de núcleo de un transformador con una inducción máxima de 1,7 Tesla. Para una calidad dada de acero, el estrés mecánico en las laminaciones del núcleo tendrá una fuerte influencia en la magnetoestricción [6].

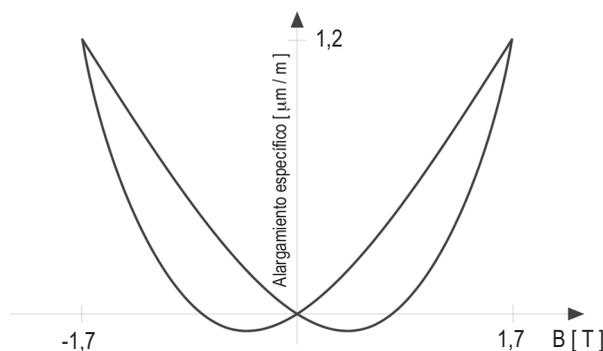


Figura 3

Este último no depende del signo de la densidad de flujo, sólo de su magnitud y orientación con respecto a ciertos ejes cristalográficos del material. Por lo tanto, cuando es excitado por un flujo sinusoidal, la frecuencia fundamental del cambio dimensional será el doble de la frecuencia de excitación. El efecto es altamente no lineal, especialmente en niveles elevados de inducción cerca de la saturación. La no linealidad se traducirá en un importante contenido de armónicos en el espectro de vibraciones del núcleo.

Fuerzas electromagnéticas en los arrollamientos:

La corriente de carga en los devanados de los transformadores genera un campo magnético que oscila a la frecuencia de la red. Las fuerzas electromagnéticas resultantes actúan en ambas direcciones, axial y radial, en los devanados. La magnitud de estas fuerzas depende sólo de la magnitud de la corriente de carga y del campo magnético local, que es también una función de la corriente de carga. Por lo tanto, las fuerzas magnéticas en los devanados son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga, mientras que su frecuencia es el doble de la de la red. Las amplitudes de las vibraciones resultantes dependen de las propiedades elásticas del conductor y del aislamiento eléctrico.

En un devanado firmemente fijado, las propiedades elásticas del material aislante son casi lineales en el rango de desplazamientos que se producen en virtud de las corrientes normales de operación. Los metales tienen módulos de elasticidad muy lineales. Por lo tanto los armónicos superiores son de escaso valor, y la primera armónica domina el espectro de vibración.

Pantallas magnéticas sobre el tanque del transformador

Las pantallas magnéticas se utilizan frecuentemente en grandes transformadores para reducir las pérdidas por corrientes parásitas debidas al flujo de dispersión que resulta de las corrientes de carga. A corrientes de plena carga, el flujo de dispersión en las pantallas magnéticas puede alcanzar valores que pueden superar la densidad nominal de flujo en el núcleo. Esto resulta en la generación de sonido magnetostrictivo en las pantallas magnéticas, y puede contribuir significativamente al nivel global del ruido en el transformador.

Ventiladores

El origen del ruido del ventilador es debido al flujo turbulento de aire, dando como resultado fluctuaciones de la presión en una amplia gama de frecuencias. El ancho de banda de este ruido tiene un pico ancho alrededor de la frecuencia en la que las palas del ventilador coincidan con la frecuencia natural de las partes estructurales del mismo o del motor que lo acciona.

Bombas de aceite

El flujo de aceite a través de los equipos auxiliares de enfriamiento puede causar vibraciones, sin embargo las bombas de aceite normalmente no aportan una cantidad significativa de potencia de sonora, excepto para los casos en donde el caudal de aceite es muy alto o en aplicaciones especiales donde el ruido debido a la magnetostricción es muy bajo.

2.3. Principios de medición del ruido

Medición del nivel de presión sonora:

Un sonómetro es un instrumento diseñado para dar mediciones objetivas y reproducibles del nivel de presión sonora. Hay muchos sistemas de medición disponibles. Aunque diferentes en detalle, cada sistema consta de un micrófono, una fase de procesamiento y una unidad de lectura.

El micrófono convierte la señal de sonido en una señal eléctrica equivalente. El tipo más adecuado de micrófono para los medidores de nivel de sonido es el micrófono de condensador, el cual combina precisión con estabilidad y fiabilidad. La señal eléctrica producida por el micrófono es bastante pequeña. Por lo tanto, debe ser amplificada por un preamplificador antes de ser procesada.

Una simple medición del sonido no ponderado en el intervalo de frecuencia audible (normalmente se toma como 20 Hz a 20 kHz) se usa raramente debido a su pobre correlación con la respuesta subjetiva. Por consiguiente, los sonómetros suelen incorporar una red eléctrica de filtrado denominada "ponderación A" que modifica la respuesta de frecuencia para simular la del oído humano.

Medición de la intensidad de sonido:

La intensidad del sonido es el producto promediado en el tiempo de la presión y la velocidad de la partícula. Un único micrófono puede medir la presión. Sin embargo, la medición de velocidad de las partículas no es tan simple. Para poder medir intensidad de sonido es necesario tener dos micrófonos separados una pequeña distancia.

Mediciones de ruido por bandas de frecuencia:

Como ya se ha mencionado, el ruido de un transformador se caracteriza por contener tonos de frecuencia doble de la frecuencia eléctrica de alimentación de la red y de sus armónicos pares superiores (suponiendo excitación sinusoidal y sin componente de continua). Por lo tanto, el ruido a otras frecuencias puede ser suprimido mediante la aplicación de mediciones por bandas de frecuencia. El término "banda de frecuencia" se utiliza aquí para describir una medición donde se realiza un análisis de frecuencia del sonido, y, posteriormente, sólo las bandas de frecuencia que contienen los tonos característicos de transformadores se utilizan en la evaluación.

El análisis de frecuencia se puede lograr mediante el uso de cualquiera de los dos métodos de análisis en tiempo real siguientes: frecuencia logarítmica o bandas de octavas (1/1 de octava, 1/3 de octava, 1/12 de octava, etc.), o a través de la FFT (transformada rápida de Fourier) método, que da lugar a una resolución de ancho de banda constante (x Hz).

Los niveles son medidos sobre las bandas de frecuencias que contienen frecuencias iguales a dos veces la frecuencia nominal y múltiplos de los mismos. El nivel de presión sonora ponderado o nivel de intensidad sonora en cada posición de medición se puede calcular por la ecuación 5:

$$L_{Ai} = 10 \log \left(\sum_{v=1}^{v_{\max}} 10^{0,1 \times L_{Av}} \right) \quad (5)$$

Donde:

L_{Ai} es el nivel de presión sonora (o nivel de intensidad sonora) ponderada en A, a tensión y frecuencia nominales;

L_{Av} es el nivel de presión sonora (o nivel de intensidad sonora) ponderada en A medido sobre un ancho de banda Δf centrado en una frecuencia igual a $2fv$ a tensión y frecuencia nominales;

La ponderación A puede ser llevada a cabo de dos maneras:

- a) mediante el uso de un filtro análogo a la entrada del sistema de medición de modo que todos los valores medidos son A-ponderados desde el inicio;
- b) si la medición es lineal: aplicar una ponderación digital en el nivel medido en cada banda de frecuencia. Los valores de ponderación pueden ser extraídos de la figura 2;

f es la frecuencia nominal;

v Es el número de secuencia (1, 2, 3, etc.) de los múltiplos de los armónicos pares de la frecuencia nominal.

La suma de las primeras 10 bandas de los niveles de ruido es adecuado para la mayoría de los transformadores que operan a tensión y corriente senoidales. Sin embargo, en la presencia de armónicos de tensión y/o corriente, las frecuencias más altas pueden contribuir significativamente al nivel de sonido total. En este caso, más bandas de frecuencia deben ser tomadas en consideración.

Caso de estudio

La norma IEC 60076-1 [7] establece como ensayo de rutina para transformadores de potencia, la medición del nivel de presión sonora promedio durante en el ensayo de vacío. Adicionalmente la norma IEC 60076-10 [8] es la que establece la metodología de cómo medir dicho parámetro. En esta última se establece que la medición será el nivel de presión sonora total, sin tener en cuenta el espectro de ruido. Para este caso de estudio se estableció apartarse de la norma y realizar un análisis por octavas del espectro del ruido que dicho transformador genera. Para lograr dicho cometido se desarrolló un instrumento virtual instalado en una computadora portátil. Además se muestra una comparación de los resultados obtenidos con los medidos por un sonómetro con filtro de octavas. A continuación se detalla la programación del IV, las mediciones realizadas con él, las mediciones realizadas con el sonómetro y la comparación de los resultados.

1. Desarrollo del instrumento virtual

El software utilizado para el desarrollo del instrumento virtual fue el LabView, cuyo desarrollador es la firma National Instruments. En las figuras 4 y 5 se pueden ver las dos pantallas del programa desarrollado. Una es la denominada “panel de cableado”, es la que permite realizar el “conexión” del instrumento virtual. La segunda pantalla, la denominada “panel frontal”, que es la que funciona de interface hombre-máquina y es la que permite controlar, medir, visualizar y almacenar los resultados del ensayo.

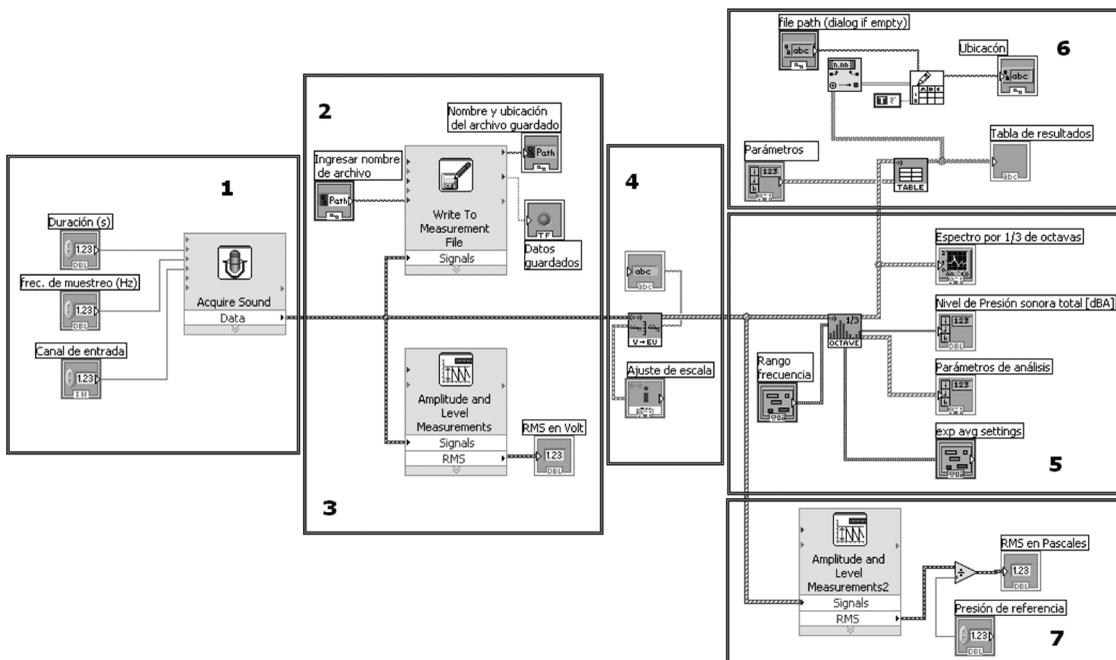


Figura 4

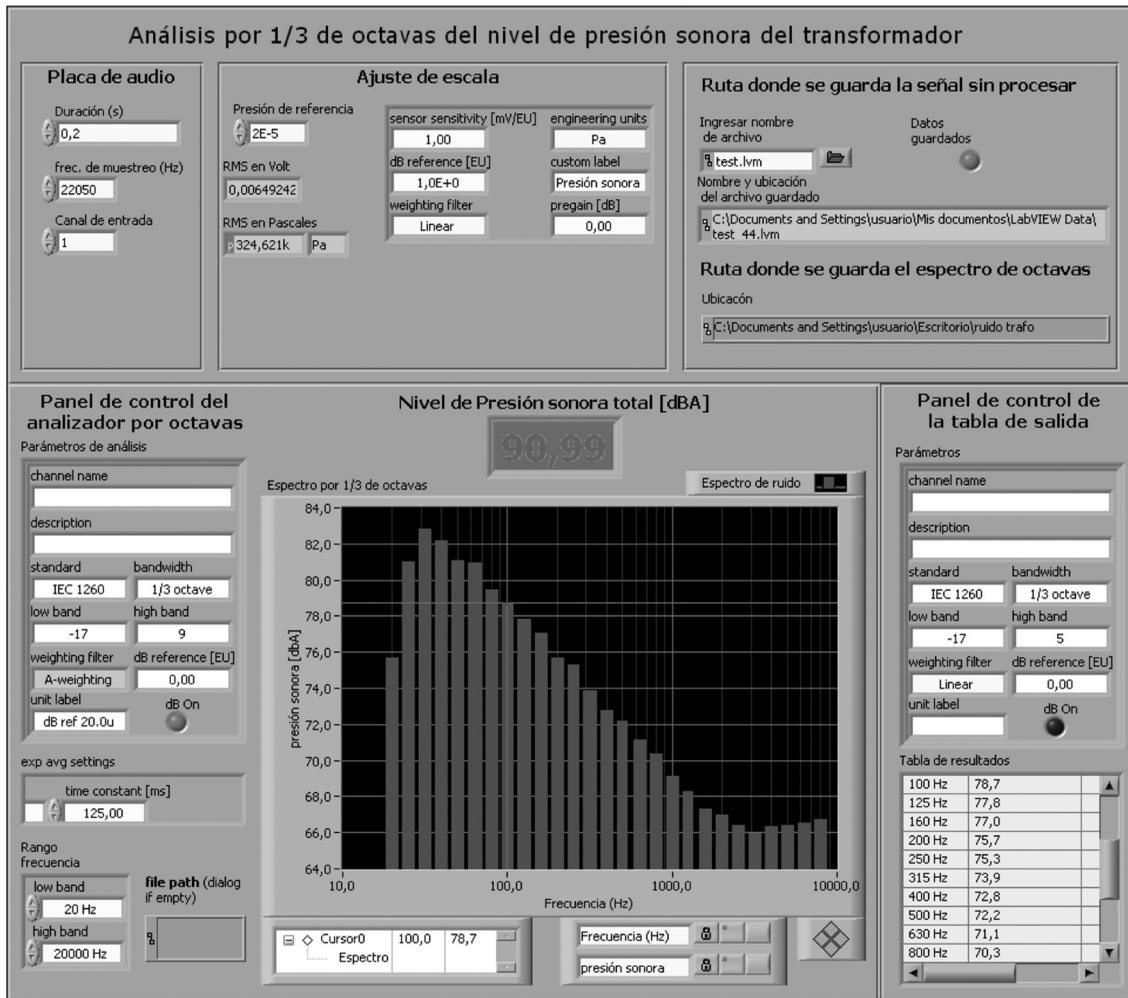


Figura 5

A continuación se describen los procesos que conforman el instrumento virtual:

La primera etapa o proceso del IV es la adquisición de datos, para lo cual se programaron los parámetros necesarios para que el IV lea los datos directamente de la entrada de la placa de audio de la computadora portátil – la cual está conectada a la salida analógica del sonómetro – (figura 6).

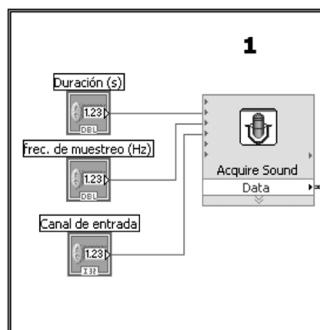


Figura 6

La figura 7 muestra dos procesos, por un lado se genera el guardado de los datos de la señal de entrada sin procesar o “raw data” (proceso 2), y por el otro, se calcula y muestra en pantalla el valor RMS (valor eficaz) de dicha señal (proceso 3).

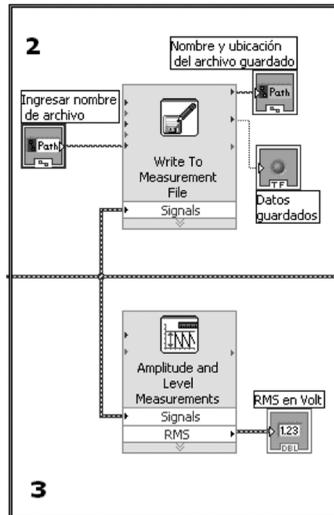


Figura 7

En el cuarto proceso se escala la señal. Es decir se la transforma de Volt a Pascales (figura 8)

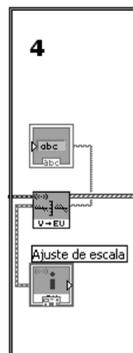


Figura 8

El proceso 5 es el que contiene el IV de medición por octavas. En este módulo se puede elegir entre 1/1 octavas o 1/3 de octavas. Este proceso genera el espectro, lo muestra en el panel frontal y además recompone el nivel de presión sonora total y lo muestra en pantalla. Aquí también es el lugar donde se elige el filtro de ponderación A (según [9]) además del rango de octavas a mostrar. (Figura 9)

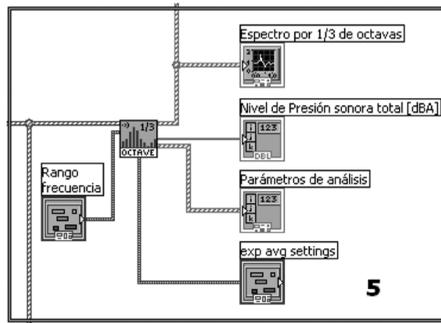


Figura 9

El proceso 6 es el que genera los datos de salida en formato tabla. Por un lado muestra en el panel frontal la tabla de resultados y por otro lado guarda esa misma tabla en un archivo de texto. Ese mismo archivo luego se puede leer con cualquier programa del tipo de planilla de cálculo (Figura 10).

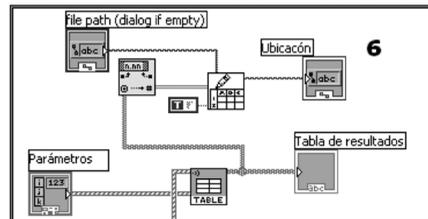


Figura 10

En el proceso 7 se define la presión sonora de referencia ($20\mu\text{Pa}$) y se refiere la señal escalada en RMS a ese valor. (Ver figura 11).

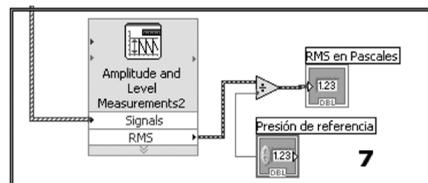


Figura 11

Escalado del sistema de medición

Para el escalado del instrumento virtual se inyecta con un calibrador en el sonómetro un tono puro de 94dB a 1kHz. De acuerdo a la ecuación (1) el valor de la presión sonora será entonces

de 1Pa. Por lo tanto en el proceso de escalado se programa el valor del factor de escala [mv/Pa] a partir de la lectura en volts obtenida en la salida del sonómetro para que la lectura en Pascales sea de 1Pa. De esa manera el sistema de medición queda escalado [10].

2. Desarrollo del ensayo

Las mediciones fueron realizadas sobre un transformador trifásico de potencia de 80MVA con tensiones nominales de 132/13,2kV. La máquina fue alimentada por los bornes de baja tensión con 13,2kV (tensión nominal) con los bornes de alta tensión en condiciones de vacío (según lo prescrito en el punto 6.2 de la norma IEC 60076-10 [7]). La ubicación de los micrófonos fue la que se muestra en la figura 12. El contorno de medición acordado entre cliente y proveedor fue de 1,5m a partir de la superficie de emisión de ruido. Las alturas de medición fueron dos, 1,5m y 2,5m. El total de mediciones realizadas por lo tanto fue de 28.

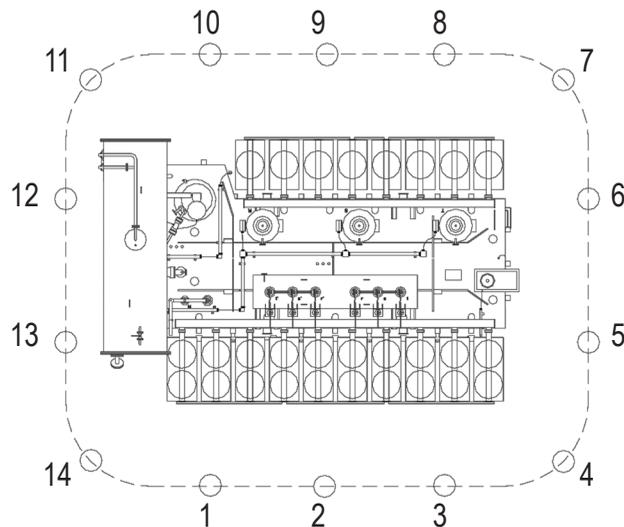


Figura 12

2.1. Mediciones realizadas con el Instrumento virtual

A continuación se muestra la tabla de resultados de los valores medidos con el instrumento virtual desarrollado. Las posiciones indicadas en la tabla 1 son las mostradas en la figura 12.

Tabla 1: Valores de L_{Ai} (en dBA) medidos con el instrumento virtual.

Posición	Altura	Distancia	Frecuencia				
			100Hz	200Hz	400Hz	800Hz	1600Hz
1	2,5m	1,5m	49,3	44,6	47,2	59,7	43,1
2	2,5m	1,5m	46,3	55,4	56,9	55,7	50,8
3	2,5m	1,5m	50,4	50,5	48,9	57,6	44,1
4	2,5m	1,5m	44,9	37,1	54,0	60,0	42,7
5	2,5m	1,5m	44,6	52,7	51,0	57,8	43,8
6	2,5m	1,5m	46,4	42,5	55,7	53,0	43,7
7	2,5m	1,5m	53,5	52,6	59,8	59,4	43,0
8	2,5m	1,5m	46,8	53,5	54,8	55,1	41,8
9	2,5m	1,5m	41,4	48,7	53,7	59,7	39,2
10	2,5m	1,5m	50,4	55,7	57,3	53,5	42,7
11	2,5m	1,5m	38,7	58,0	54,2	57,4	45,4
12	2,5m	1,5m	43,8	37,9	46,2	60,6	43,0
13	2,5m	1,5m	45,6	43,2	55,3	56,2	40,7
14	2,5m	1,5m	48,3	54,7	54,5	55,0	39,3
1	1,5m	1,5m	49,4	51,5	54,6	54,4	41,8
2	1,5m	1,5m	45,8	49,1	61,3	53,7	44,0
3	1,5m	1,5m	50,5	49,8	58,2	58,1	43,9
4	1,5m	1,5m	41,2	46,7	55,5	55,6	45,3
5	1,5m	1,5m	44,7	46,3	52,0	60,8	40,9
6	1,5m	1,5m	48,5	48,2	52,8	57,1	38,2
7	1,5m	1,5m	53,1	44,7	55,7	55,6	41,0
8	1,5m	1,5m	52,5	42,3	54,8	54,7	38,9
9	1,5m	1,5m	44,9	54,8	55,4	59,6	43,8
10	1,5m	1,5m	53,2	56,3	56,2	62,5	42,6
11	1,5m	1,5m	50,5	46,6	55,8	57,9	46,3
12	1,5m	1,5m	54,4	49,7	55,7	57,7	42,9
13	1,5m	1,5m	40,3	52,8	59,3	54,2	45,4
14	1,5m	1,5m	51,7	52,3	52,3	53,2	40,0

Instrumento real con filtro por octavas

Para el estudio de análisis de frecuencia se utilizó un instrumental de medición de nivel sonoro integrador por lectura directa, en escala de compensación "A" y en respuesta lenta, acoplado a un filtro de bandas de octavas. En la tabla 2 se muestran los valores medidos con el instrumento.

Datos del Equipo Utilizado:

- Decibelímetro marca QUEST MODEL 2900
- Filtro de frecuencias marca QUEST OB 300



Figura 13

Tabla 2: Valores de L_{Ai} (en dBA) medidos con el instrumento con filtro de octavas.

Posición	Altura	Distancia	Frecuencia				
			100Hz	200Hz	400Hz	800Hz	1600Hz
1	2,5m	1,5m	50,6	50,1	51,2	57,9	42,8
2	2,5m	1,5m	47,4	45,6	48,9	56,3	43,5
3	2,5m	1,5m	53,2	53,4	50,3	54,4	44,3
4	2,5m	1,5m	41	48,5	51,6	58	44,3
5	2,5m	1,5m	47,7	50	47,8	53,9	44,9
6	2,5m	1,5m	36,5	57,8	52,7	62,3	45,4
7	2,5m	1,5m	55,8	45,2	55,6	63,9	45,1
8	2,5m	1,5m	49,5	51,7	43,6	54	42,5
9	2,5m	1,5m	44,3	56,7	57,3	59,8	42,5
10	2,5m	1,5m	51,9	55,3	56,7	55,1	46,3
11	2,5m	1,5m	43	52,5	53,7	54,9	42,7
12	2,5m	1,5m	50,1	53,9	48,7	62,4	43,2
13	2,5m	1,5m	41,7	53,3	51	62,1	44
14	2,5m	1,5m	51,2	51	45,7	56,2	42,6
1	1,5m	1,5m	47,8	46,9	51	58,8	42
2	1,5m	1,5m	49	53	55,2	56,8	42,6
3	1,5m	1,5m	52,9	52,7	57,6	58,9	44
4	1,5m	1,5m	46	50	55,4	59,2	43
5	1,5m	1,5m	40,8	49,4	55,9	58,3	42,6
6	1,5m	1,5m	43	45,5	50,7	52	41,8
7	1,5m	1,5m	54,9	47,6	48,2	53,4	42,8
8	1,5m	1,5m	52,5	53,4	61,8	60	42,1
9	1,5m	1,5m	46,2	49,5	50,3	55,9	42,8
10	1,5m	1,5m	54,7	55,6	53,9	55	45
11	1,5m	1,5m	51,5	44,3	55,1	59,3	42,4
12	1,5m	1,5m	56,8	43,2	46,1	59,8	42,9
13	1,5m	1,5m	32,1	59	60,5	55,8	42,4
14	1,5m	1,5m	53,3	52,6	60	57,1	40,4

2.2. Análisis de los resultados.

De acuerdo a los valores obtenidos en las tablas 1 y 2 se confeccionó la tabla 3 que muestra los errores obtenidos en cada medición, tomando como valor convencional el medido por el sonómetro con filtro de octavas.

Tabla 3: Diferencia en dBA entre las mediciones realizadas con el IV comparadas con el sonómetro.

Posición	Altura	Distancia	Frecuencia				
			100Hz	200Hz	400Hz	800Hz	1600Hz
1	2,5m	1,5m	-1,3	-5,5	-4	1,8	0,3
2	2,5m	1,5m	-1,1	9,8	8	-0,6	7,3
3	2,5m	1,5m	-2,8	-2,9	-1,4	3,2	-0,2
4	2,5m	1,5m	3,9	-11,4	2,4	2	-1,6
5	2,5m	1,5m	-3,1	2,7	3,2	3,9	-1,1
6	2,5m	1,5m	9,9	-15,3	3	-9,3	-1,7
7	2,5m	1,5m	-2,3	7,4	4,2	-4,5	-2,1
8	2,5m	1,5m	-2,7	1,8	11,2	1,1	-0,7
9	2,5m	1,5m	-2,9	-8	-3,6	-0,1	-3,3
10	2,5m	1,5m	-1,5	0,4	0,6	-1,6	-3,6
11	2,5m	1,5m	-4,3	5,5	0,5	2,5	2,7
12	2,5m	1,5m	-6,3	-16	-2,5	-1,8	-0,2
13	2,5m	1,5m	3,9	-10,1	4,3	-5,9	-3,3
14	2,5m	1,5m	-2,9	3,7	8,8	-1,2	-3,3
1	1,5m	1,5m	1,6	4,6	3,6	-4,4	-0,2
2	1,5m	1,5m	-3,2	-3,9	6,1	-3,1	1,4
3	1,5m	1,5m	-2,4	-2,9	0,6	-0,8	-0,1
4	1,5m	1,5m	-4,8	-3,3	0,1	-3,6	2,3
5	1,5m	1,5m	3,9	-3,1	-3,9	2,5	-1,7
6	1,5m	1,5m	5,5	2,7	2,1	5,1	-3,6
7	1,5m	1,5m	-1,8	-2,9	7,5	2,2	-1,8
8	1,5m	1,5m	0	-11,1	-7	-5,3	-3,2
9	1,5m	1,5m	-1,3	5,3	5,1	3,7	1
10	1,5m	1,5m	-1,5	0,7	2,3	7,5	-2,4
11	1,5m	1,5m	-1	2,3	0,7	-1,4	3,9
12	1,5m	1,5m	-2,4	6,5	9,6	-2,1	0
13	1,5m	1,5m	8,2	-6,2	-1,2	-1,6	3
14	1,5m	1,5m	-1,6	-0,3	-7,7	-3,9	-0,4

En la figura 14 se pueden observar los histogramas y la distribución normal equivalente de los errores para cada valor de octava (muestra de tamaño 28) y para todos los valores juntos (muestra de tamaño 140). Allí podemos ver que la estimación del promedio para cada frecuencia es: -0,51dBA, -1,77dBA, 1,88dBA, -0,56dBA, -0,45dBA; y, además, que cuando el tamaño de

muestra crece la estimación es de $-0,28\text{dBA}$. Los valores de la desviación estándar para cada caso también se muestran en la figura 14.

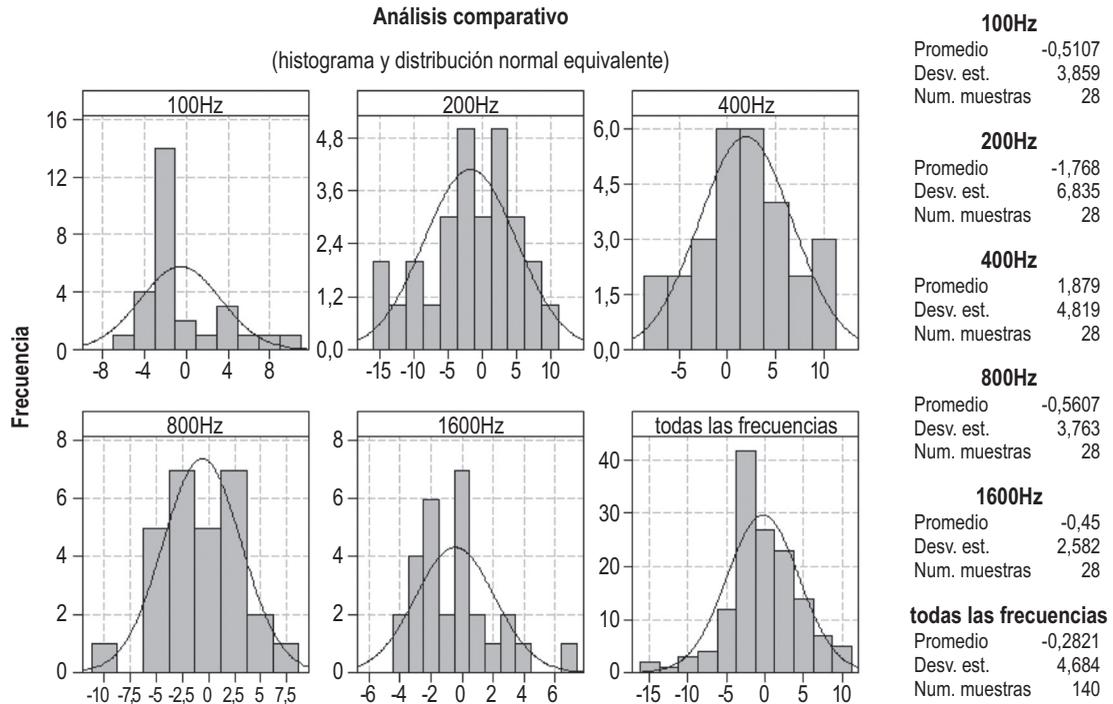


Figura 14

Conclusiones

Para obtener algunas conclusiones sobre la posibilidad de reemplazar el uso de un sonómetro con filtros por octavas por el instrumento virtual presentado en este trabajo podemos estudiar las comparaciones individuales entre mediciones realizadas por un lado; y por otro, la estimación de los errores promedio para cada valor de octava. De este último análisis se puede observar que el error promedio utilizando el instrumento virtual no supera el valor de 2dBA para cada octava. También se puede advertir que los valores de la desviación estándar son altos (el máximo es de $6,85\text{dBA}$). Además, cuando el tamaño de la muestra aumenta, (140) la estimación del error promedio es de $-0,28\text{dBA}$, y su dispersión es de $4,69\text{dBA}$.

A raíz de los últimos resultados mostrados podemos decir que a medida que el tamaño de muestra aumenta el error promedio tiende a 0. Con lo que, en principio, se podría concluir que el uso del instrumento virtual arroja resultados que están en el mismo orden de magnitud que los del sonómetro.

Si bien el error promedio obtenido para una gran cantidad de muestras es bajo, la dispersión no lo es. Esto lleva a pensar que para poder validar el sistema de medición se requiere realizar nuevas pruebas que tengan en cuenta detalles no tenidos durante los ensayos mostrados en este trabajo.

Queda a futuro mejorar el procedimiento de la comparación entre ambos sistemas de modo tal que el instrumento virtual pueda ser calibrado y así su incertidumbre sea tal que pueda ser mucho menor que las tolerancias que exigen las normas de medición de ruido en transformadores de potencia (IEC 60076-10).

Referencias

- [1] National Instruments, "La instrumentación Virtual". Traducción al castellano a cargo de Tracnova. Fecha de publicación 10 de mayo de 2003.
- [2] KAWASHIMA. "Recent features of Fuji Low-sound-level transformers". http://www.fujielectric.com/company/tech_archives/pdf/14-05/FER-14-05-139-1968.pdf Página visitada 06-06-2013.
- [3] GRINSCHPUN, MARTUCCI. "Nuevo enfoque en el control ambiental de ruidos en Transformadores de Potencia". CIDEL (Congreso Internacional de Distribución Eléctrica). Argentina. 2010.
- [4] National Instruments, "LabView - Sound and Vibration Toolkit. User Manual". Abril de 2004
- [5] IEC 60076-10-1:2005 "Power transformers - Part 10-1: Determination of sound levels - Application guide"
- [6] BEAN, CHACKAN y otros. "Transformadores para la industria eléctrica". Compañía Editorial Continental. 1963.
- [7] IEC 60076-1: 2012 "Power transformers - Part 1: General requirements"
- [8] IEC 60076-10:2001 "Power transformers - Part 10: Determination of sound levels"
- [9] IEC 61260: 1995 "Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters"
- [10] IEC 61672-1:2002 "Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications"