

Data Acquisition System for Variables Evaluation of AC Electrical Machines

Luis David Pabón Fernández, Eng.¹, Jorge Luis Díaz Rodríguez, Ms.¹, Jaider Luis Canabal Sampayo, Eng.²

¹ Universidad de Pamplona, Colombia, davidpabon@hotmail.es, jdiazcu@gmail.com

² ELECTRICARIBE, Colombia, jaidercanabal@gmail.com

Abstract– This paper presents the development of a platform to get the real time variables of the AC electrical machines. Also it includes the development of an assessment module for power quality complying with the Standard IEEE 1159-1995. The system uses the NI-USB6009 board for data acquisition. The graphical user interface was developed in LabVIEW and the hardware integrates all the necessary sensors to determine electrical currents and voltages, speed and temperature of electrical machines. This system provides an economical solution to the problem to obtaining real-time variables to establish steady state parameters of an experimental way, including power quality assessment. This way its can perform continuous monitoring of the variables on electric machines and determine the power quality, and also to do the power and performance assessment.

Keywords– Data acquisition, electric machines, power quality, Labview, total harmonic distortion.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.077>

ISBN: 978-0-9822896-9-3

ISSN: 2414-6390

Data acquisition system for variables evaluation of AC electrical machines

Luis David Pabón Fernández, Eng.¹, Jorge Luis Díaz Rodríguez, Ms.¹, Jaider Luis Canabal Sampayo, Eng.²

¹ Universidad de Pamplona, Colombia, davidpabon@hotmail.es, jdiazcu@gmail.com

² ELECTRICARIBE, Colombia, jaidercanabal@gmail.com

Abstract– This paper presents the development of a platform to get the real time variables of the AC electrical machines. Also it includes the development of an assessment module for power quality complying with the Standard IEEE 1159-1995. The system uses the NI-USB6009 board for data acquisition. The graphical user interface was developed in LabVIEW and the hardware integrates all the necessary sensors to determine electrical currents and voltages, speed and temperature of electrical machines. This system provides an economical solution to the problem to obtaining real-time variables to establish steady state parameters of an experimental way, including power quality assessment. This way it can perform continuous monitoring of the variables on electric machines and determine the power quality, and also to do the power and performance assessment.

Keywords– Data acquisition, electric machines, power quality, Labview, total harmonic distortion.

I. INTRODUCCIÓN

Las máquinas eléctricas son la columna vertebral del sistema eléctrico a nivel general en todo el mundo, su importancia en la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica es fundamental para que los sistemas actuales puedan funcionar [1]. El desarrollo productivo y funcionamiento de las industrias no sería posible en la actualidad sin energía eléctrica, y sus procesos complejos no se pudieran desarrollar sin la utilización de máquinas eléctricas. En la actualidad es de tal importancia estas máquinas que muchos trabajos de investigación se centran en metodologías para determinar los parámetros de los modelos de estas máquinas, para su análisis en estado estacionario o en estado transitorio. Los sistemas de cómputo brindan la posibilidad de crear sistemas de adquisición de datos para estos fines, permitiendo adquirir, almacenar, procesar y tratar señales, con una mayor precisión y exactitud. Lo que da lugar a modelos de máquinas eléctricas con parámetros más precisos [2] y llegando hasta obtener modelos con parámetros autoajustables.

La adquisición de datos se está convirtiendo en la herramienta más completa para evaluar tanto los parámetros de la máquina, como también monitorear las condiciones de trabajo de estas [3]. Son variadas las técnicas usadas para el desarrollo de los sistemas de adquisición, algunos usan técnicas termográfica para evaluar parámetros de manera específica y precisa con gran exactitud, con la inclusión de software especializados [4]. Otros utilizan sistemas flexibles que les permiten tanto evaluar parámetros como realizar

control sobre las mediciones para determinar puntos de operación específicos [5], [6].

Referente al hardware de estos sistemas de adquisición, son muchos los factores que condicionan la utilización de uno u otro, por ejemplo, las condiciones económicas, la precisión y exactitud deseada, la velocidad de respuesta, la complejidad del sistema, si es de uso académico o industrial etc. En algunos trabajos realizados con este fin, utilizan analizadores de red y módulos comerciales para determinar los parámetros de las máquinas [7], otros prefieren utilizar sensores de efecto de Hall, con módulos UART y el GUIDE de Matlab para desarrollar la interfaz gráfica [8].

El sistema presentado en este trabajo permite evaluar los variables reales de las máquinas eléctricas, de manera más precisa, exacta y personalizada, además de contar con recursos gráficos como las curvas de las variables posibilitando la observación de los estados de funcionamiento de la máquina evaluada.

II. HARDWARE DEL SISTEMA

El hardware está formado por la sensórica, el sistema de acondicionamiento, el circuito de protección y la tarjeta de adquisición. El sistema completo se muestra en la figura 1.

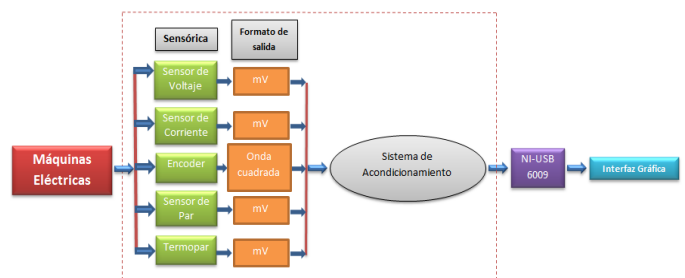


Fig. 1 Diagrama esquemático del Hardware del sistema.

A. Sensórica del sistema

A continuación se describe el equipo sensor que se requiere en el sistema diseñado:

Sonda de corriente Fluke 80i-110s:

Es una sonda de corriente de CA/CC, diseñada para reproducir formas de onda de corriente encontradas en sistemas comerciales e industriales modernos de distribución de energía eléctrica. El funcionamiento de la sonda se ha optimizado para la reproducción precisa de corrientes a la frecuencia de red y hasta el armónico 50 [9].



Fig. 21 Sonda de corriente de CA/CC 80i-110s [9].

Sonda de tensión diferencial Fluke DP120:

Es una sonda de tensión diferencial de diseño seguro para realizar mediciones de alta tensión flotante. La sonda puede utilizarse en convertidores electrónicos de alta potencia, controles de velocidad de motores, fuentes de alimentación y otros circuitos de alto voltaje [10].



Fig. 3 Sonda de tensión diferencial Fluke DP120 [10].

Termocupla tipo J:

Está hecha con un alambre de hierro y otro de Constantán (aleación de cobre y níquel). Su rango de utilización es de -270/+750°C. Necesitan compensación de cero, la dependencia entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura es no lineal, pero eso no es un problema ya que las termocuplas comerciales están estandarizadas y sus diferentes valores de voltajes de salida vs. temperatura ya están tabulados según criterios de normas y estándares, como por ejemplo la IEC 584-1:1995 [11].



Fig. 4 Termocupla tipo J [14].

Encoder en cuadratura 716-0500-O-S-6-S-S-N:

El dispositivo se muestra en la figura 5, mientras que en la figura 6 se muestra el diagrama de la forma de onda de la salida de los dos canales presentes en el encoder [12].



Fig. 5 Encoder de cuadratura modelo 716 [23].

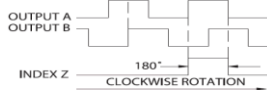


Fig. 6 Diagrama de la forma de onda de salida del encoder 716 [12].

SensorData Rotary Transformer Torque Sensor:

Los sensores de torque de rotación de eje, de uso común, utilizan como tecnología en base láminas de bandas extensiométricas para la medición del par. En aplicaciones de rotación del eje, varios métodos se utilizan para proporcionar

la entrada de energía de excitación para el puente de Wheatstone y recoger la señal de salida resultante. La figura 7



Fig. 7 Fotos del SensorData Rotary Transformer Torque Sensor usado.

Hay dos técnicas empleadas en la fabricación de transformadores rotativos a diferentes niveles de éxito. El método básico, se muestra en la Figura 8, consiste de una bobina concéntrica dividida en dos partes (una fija y una de rotación), rodeada por un núcleo de alta permeabilidad (generalmente un material de ferrita) para concentrar el flujo en un camino magnético y mejorar el acoplamiento entre las bobinas [16].

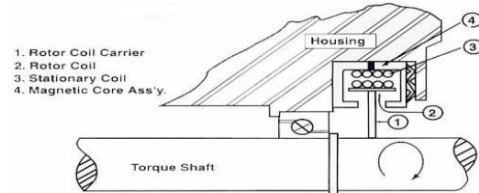


Fig. 8 Diseño de transformadores rotativos en sensores de par [16].

Una apertura mecánica permite a la bobina giratoria tener acceso al miembro estacionario (véase la figura 8, los elementos 2 y 3). El control de esta “brecha” incide muy fuertemente en la eficiencia y el rendimiento del transformador.

B. DAQ Ni-Usb6009

La tarjeta NI USB-6009 es una tarjeta de adquisición de datos multifuncional para Linux, Mac OS, Pocket PC, Windows; brinda funcionalidad DAQ básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Es accesible para uso de estudiantes y lo suficientemente poderoso para aplicaciones de medida más sofisticadas. Conector a PC tipo USB [13]. La figura 9 muestra la tarjeta.



Fig. 9 Tarjeta NI-USB 6009 [13].

Esta tarjeta se utiliza para captar las señales de los sensores y enviarlas al computador para su procesamiento y visualización en la interfaz gráfica.

C. Acondicionamiento de señales

Para lograr enlace seguro y eficiente entre la tarjeta de adquisición y los elementos de medida utilizados, es necesario realizar un acondicionamiento a las señales provenientes de los sensores, con el fin de adecuar tanto el tipo de salida como su magnitud a los rangos aceptados por la tarjeta NI-USB 6009.

Acondicionamiento de las señales de salida del encoder 716:

Con la señal de salida del encoder se obtendrá los parámetros de velocidad y posición de las máquinas eléctricas rotativas. El voltaje de salida del encoder es una onda cuadrada con magnitud pico de 5V, equivalente al 50% del voltaje de entrada analógico de la tarjeta DAQ, La corriente de salida del encoder es de 250 mA mientras que la corriente máxima que soporta la tarjeta NI-USB 6009 es de 1mA. Como medida de diseño, para adecuar la corriente del encoder que excede 249 veces la aceptada por la tarjeta, se uso opto acopladores para mantener aislado los dos circuitos eléctricos. La frecuencia de la señal del encoder es de 125 kHz. Basándonos en el teorema de Nyquist, según el cual, para poder replicar con exactitud la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear. La tarjeta NI-USB 6009 tiene una tasa de muestreo máximo (todos los canales) de 48 kS/s; Para solucionar este inconveniente se utilizó un divisor de frecuencia (HEF4040B). Con el fin de poder determinar la velocidad con la tasa de muestreo de la tarjeta.

- Escalamiento de la frecuencia de la señal del encoder. La frecuencia de la señal de salida acondicionada del encoder queda determinada mediante la ecuación (1):

$$f_{encoder} = \frac{125000Hz}{128} \quad (1)$$

- Diseño del circuito de sentido de giro:

La salida del encoder posee dos señales en cuadratura A y B. La señal B es la guía para la rotación y se adelanta 90 grados a la señal A cuando el eje del encoder gira en sentido horario, esta señal se atrasa 90 cuando gira en sentido antihorario. Cada vez que el encoder gire en sentido horario y ocurra un flanco de subida en la entrada de reloj, la señal B entregará un nivel lógico Bajo (L) a la entrada D; por lo cual en la salida Q se tendrá un nivel lógico Bajo (L). Cuando el sentido del giro sea en sentido antihorario se tendrá en la salida Q un nivel lógico Alto (H). En las tablas I y II se resumen los estados.

TABLA I
SENTIDO DE GIRO HORARIO

Entradas		Salidas	Entradas		Salidas
D	CLK		D	CLK	
(Señal B)	(Señal A)	Q	(Señal B)	(Señal A)	Q
0	↑	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0
1	1	0	0	↑	0

TABLA II
SENTIDO DE GIRO ANTI-HORARIO

Entradas		Salidas	Entradas		Salidas
D	CLK		D	CLK	
(Señal B)	(Señal A)	Q	(Señal B)	(Señal A)	Q
1	↑	1	0	0	1
1	1	1	1	0	1
0	1	1	1	↑	1

Acondicionamiento de la salida de la termocupla tipo J:

El rango de temperatura a censar en las máquinas eléctricas de AC usadas en este sistema va desde los 10 °C hasta 220 °C. Los problemas presentes en el uso de este tipo de sensor en esta aplicación es que debido a que la magnitud de salida de la termocupla es muy pequeña y de baja frecuencia, se hace muy susceptible a interferencias por ruido. Al igual que está presente una no linealidad y debe tener una compensación de cero. Todos estos problemas se solucionan con la utilización del circuito integrado AD594, el cual es un dispositivo especialmente diseñado para el acondicionamiento de la termocupla tipo J.

- Escalamiento de la señal de salida del integrado AD594 A partir de los datos consignados en la tabla III y utilizando la herramienta de cálculo SPSS se desarrollaron por regresión lineal dos ecuaciones para obtener la temperatura presente en el sensor termopar tipo J.

TABLA III
CARACTERÍSTICA DE SALIDA DEL TERMO PAR TIPO J Y EL INTEGRADO ACONDICIONADOR AD594 EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

Temperatura	Tensión Termopar J	Sensibilidad termopar	Salida AD594	Ganancia
°C	mV	uV/°C	mV	AD594
10	0.507	50.7	101	193.11
20	1.019	50.95	200	193.23
25	1.277	51.7	250	193.34
30	1.536	51.2	300	193.29
40	2.058	51.45	401	193.34
50	2.585	51.7	503	193.38
60	3.115	51.91	606	193.54
80	4.186	52.32	813	193.48
100	5.268	52.68	1022	193.41
120	6.359	52.99	1233	193.41
140	7.457	53.26	1445	193.36
160	8.560	53.5	1659	193.44
180	9.667	53.7	1873	193.43
200	10.777	53.88	2087	193.36
220	11.887	54.02	2302	193.39

De la regresión lineal se obtuvo la siguiente ecuación para el rango comprendido entre $10 \leq ^\circ C \leq 220$:

$$T_{oC} = (95.414 \cdot AD594_{salida}) + 1.711 \quad (2)$$

La figura 10 muestra la relación obtenida de temperatura vs. voltaje en la salida del integrado.

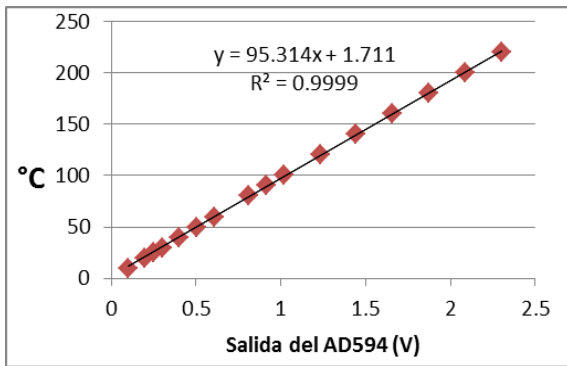


Fig. 10 Regresión lineal para el cálculo de la temperatura.

D. Circuito de aislamiento y protección

Las salidas de voltaje y corriente de los sensores ya acondicionados cumplen con las especificaciones y requerimientos de la tarjeta NI-USB600. Los circuitos de protección son usados para garantizar que en caso de una falla en la alimentación, en la salida de la sensórica o algún cortocircuito interno en la tarjeta, no existan voltajes y corrientes que superen los valores límites admisibles por la tarjeta DAQ, los circuitos integrados y demás componentes del hardware. Como medida principal de protección se diseñó el circuito de aislamiento eléctrico. Este circuito nos permite mantener circuitos independientes en la sensórica y la tarjeta DAQ.

Diseño del circuito de aislamiento:

Para de aislamiento se utilizó el optoacoplador GN137, el cual es un integrado de doble canal, formado por un LED de AlGaAs de 850 nm (led infrarrojo), acoplado ópticamente a un fotodetector integrado de puertas lógicas de muy alta velocidad con salida *strobable*, de puerta lógica y línea de colector abierto. Además contiene un protector de ruido, internamente, que proporciona un alto rechazo de modo común típicamente de 10 kV/us. Alta velocidad de trabajo de 10 Mbit/s [30]. Los valores de los elementos usados en el circuito de aislamiento corresponden a los recomendados por el fabricante, excepto al valor de la resistencia de salida RL y el capacitor CL. La corriente máxima de este circuito será de 0.5 mA corresponde al 50% de la corriente máxima de tolerancia de entrada a la tarjeta NI-USB 6009, con lo que garantizamos una corriente de operación que nos permite tener un rango de seguridad óptimo.

Implementación del Hardware del sistema:

En la figura 11 se muestra la sensórica utilizada y la caja negra que alberga la tarjeta de adquisición en donde se encuentra también los circuitos de acondicionamiento de las señales provenientes de los sensores.



Fig. 11 Fotos del Hardware y la sensórica del sistema de adquisición.

III. INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica del sistema de adquisición de datos se desarrolló en Labview. Las señales adquiridas con la tarjeta DAQ NI-USB6009 se agruparon en dos bloques básicos: Parámetros eléctricos y Parámetros mecánicos. La estructura de esta interfaz se muestra en la figura 12.

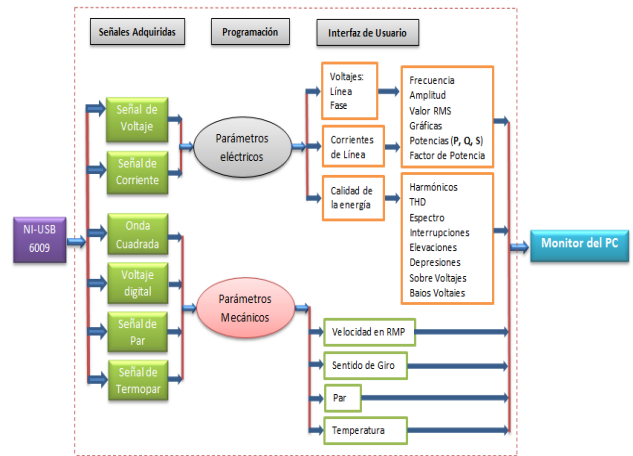


Fig. 12 Diagrama de Flujo del diseño de la interfaz.

A. Parámetros eléctricos

Las señales de los parámetros eléctricos permiten calcular las magnitudes de los valores de los variables voltajes y corrientes, así como también otros factores de importancia como son la frecuencia, THD, armónicos, y todo lo referente a calidad de la energía de estas ondas [14], [15].

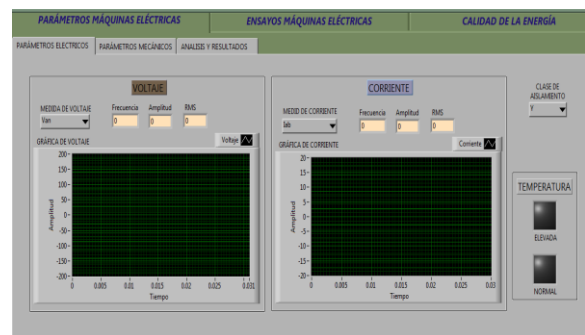


Fig. 13 Visualización de los parámetros eléctricos.

El usuario puede visualizar la forma de onda de la señal de voltaje y corriente, así como sus valores RMS, amplitud y frecuencia, también contará con una alarma luminosa en caso de que la temperatura suba por encima de los valores límites de la clase de aislamiento de la máquina eléctrica.

B. Parámetros mecánicos

Las señales de este grupo nos permitirán calcular las características mecánicas como son la velocidad, sentido de giro, el par, y la temperatura de la máquina eléctrica. La figura 14 muestra esta interfaz.

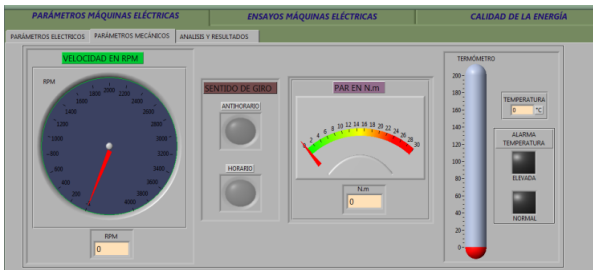


Fig. 14 Visualización de los parámetros mecánicos.

C. Análisis y resultado

En este submenú se muestra el resumen las magnitudes más importantes de los parámetros de las máquinas eléctricas, para luego ser exportadas a un archivo tipo Excel (.xls). La figura 15 muestra este submenú.



Fig. 15 Visualización del submenú Análisis y resultados.

Adicionalmente, se agregó a la interfaz del sistema un menú con los problemas de calidad de la energía más relevante, como se muestra en la figura 16.

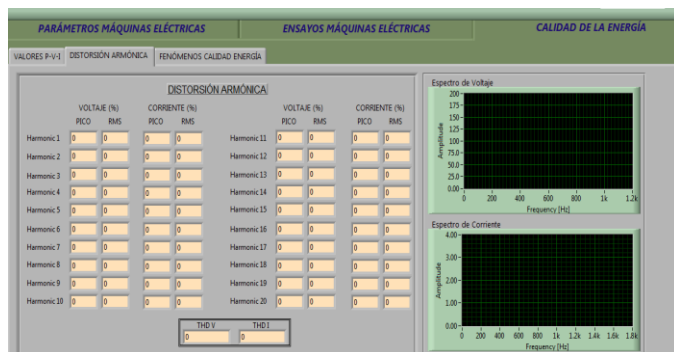


Fig. 16 Visualización del sub menú Calidad de la energía.

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

La validación de los valores presentados por el sistema de adquisición de datos se realizó utilizando los dispositivos disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas. Dentro de los dispositivos utilizados tenemos: *Power Clamp Meter* EPH-1000 ERASMUS, *Digital Tachometer* ER-20 ERASMUS, multímetro + termocupla tipo K y Osciloscopio Digital GW INSTEK GDS-820C.

La pinza se utiliza para validar las magnitudes RMS de voltaje, corriente y distorsión armónica (porcentaje THD de voltaje y corriente), también los valores de potencia activa, reactiva y factor de potencia. La termocupla se utiliza en conjunto con el multímetro para validar las magnitudes de temperatura.

El tacómetro se utiliza para validar la magnitud de la velocidad en rpm. Con el osciloscopio se comparan las formas de ondas de voltaje y corriente.

A. Resultados

Después de realizar una prueba piloto a un motor de inducción de 110 V de 400 VA y de adquirir los datos con el sistema, se compararon los datos obtenidos con los resultados por los dispositivos de evaluación comerciales con el ánimo de validar el sistema. Se tabularon las magnitudes tomadas y se calcularon los porcentajes de error de las medidas además de graficar los resultados.

Voltaje, corriente y potencias (valores RMS):

En la figura 15 se muestra los resultados de la interfaz de variables eléctricas

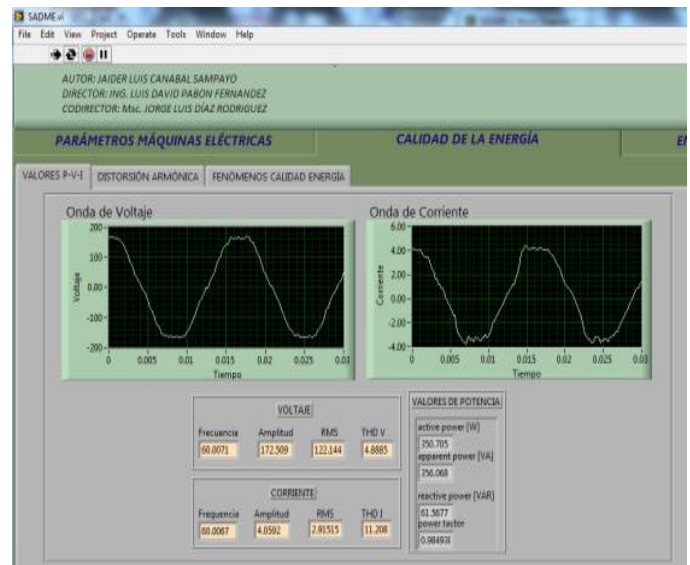


Fig. 17 Fotografía de la evaluación de voltaje, corriente, potencias y factor de potencia.

La tabla IV resume los resultados obtenidos y la validación con los dispositivos comerciales.

TABLA IV
COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS ELÉCTRICAS TOMADAS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN.

Variable medida	Sistema de adquisición	Harmonic Power Clamp Meter EPH-1000	% Error
Voltaje	124.144 V	124.2 V	0.0451
Corriente	2.91515 A	2.96 A	1.5152
Potencia Activa	350.972 W	358 W	1.9631
Potencia Reactiva	92.7993 VAR	93 VAR	0.2158
Potencia Aparente	363.033 VA	367.6 VA	1.2423
Factor de Potencia	0.9668	0.997	3.029

Velocidad:

La figura 18 muestra la imagen de la validación de la velocidad



Fig. 18. Fotografía de la validación de velocidad.

En la tabla V se resumen los datos de la validación, en ella se observa que el error es extremadamente bajo.

TABLA V
COMPARACIÓN DE LA MEDIDA DE VELOCIDAD TOMADA CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN.

Variable medida	Sistema de adquisición	Digital Tachometer ER-20	% Error
Velocidad	1081.78 RPM	1082 RPM	0.0203

Temperatura:

La tabla VI resume los datos obtenidos y el respectivo error, aunque no es tan bajo como los de las pruebas anteriores, este sigue estando en un valor aceptable.

TABLA VI
COMPARACIÓN DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA TOMADAS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN.

Variable medida	Sistema de adquisición	Multímetro y Termocupla J	% Error
Temperatura	22.3 °C	23 °C	3.0434

Distorsión Armónica:

Los problemas de distorsión armónica se evaluaron tanto para la onda de voltaje como para la onda de corriente, continuación se muestran los resultados

Distorsión Armónica de Voltaje:

La tabla VII resume los valores hallados para cada uno de los armónicos presentes en la onda de tensión, desde la fundamental hasta el armónico 19, siendo esta banda la más importante para las máquinas eléctricas.

TABLA VII
COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS RMS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOMADAS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN HARMONIC POWER CLAMP METER EPH-1000.

Orden del Armónico	Sistema de adquisición	Harmonic Power Clamp Meter EPH-1000	% Error
Armónico 1	122.107	122.2	0.0761
Armónico 2	0.02441	0	-----
Armónico 3	0.61807	0.6	3.0116
Armónico 4	0.06200	0	-----
Armónico 5	5.46523	5.5	0.6321
Armónico 6	0.05318	0	-----
Armónico 7	0.17591	0.2	2.4090
Armónico 8	0.06262	0	-----
Armónico 9	0.06510	0	-----
Armónico 10	0.05618	0	-----
Armónico 11	0.26201	0.26	0.7730
Armónico 12	0.06543	0	-----
Armónico 13	0.11541	0	-----
Armónico 14	0.03047	0	-----
Armónico 15	0.05906	0	-----
Armónico 16	0.04664	0	-----
Armónico 17	0.06335	0	-----
Armónico 18	0.03838	0	-----
Armónico 19	0.08678	0	-----
Armónico 20	0.07187	0	-----

Distorsión Armónica de Corriente

La tabla VIII resume los valores hallados para cada uno de los armónicos desde la fundamental hasta el armónico 19 de la onda de corriente, siendo esta banda la más importante para las máquinas eléctricas.

TABLA VIII
COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS RMS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOMADAS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN HARMONIC POWER CLAMP METER EPH-1000.

Orden del Armónico	Sistema de adquisición	Harmonic Power Clamp Meter EPH-1000	% Error
Armónico 1	2.85369	2.9	1.5968
Armónico 2	0.00160	0	-----
Armónico 3	0.16720	0.15	6.6666
Armónico 4	0.00200	0	-----
Armónico 5	0.22636	0.22	2.8909
Armónico 6	0.00565	0	-----
Armónico 7	0.09929	0.1	0.7100
Armónico 8	0.00382	0	-----
Armónico 9	0.06211	0.06	3.5166
Armónico 10	0.00300	0	-----
Armónico 11	0.03179	0	-----
Armónico 12	0.00440	0	-----
Armónico 13	0.02872	0	-----
Armónico 14	0.00437	0	-----
Armónico 15	0.02944	0	-----
Armónico 16	0.00324	0	-----
Armónico 17	0.02973	0	-----
Armónico 18	0.00502	0	-----
Armónico 19	0.02284	0	-----
Armónico 20	0.00219	0	-----

Total de Distorsión Armónica

La tabla IX resume los valores del total de distorsión armónica encontrados para la onda de corriente y de tensión, de igual forma se muestran los porcentajes de errores con el ánimo de validar los resultados.

COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS DE % THD TOTAL TOMADAS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN *HARMONIC POWER CLAMP METER EPH-1000*.

Variable medida	Sistema de adquisición	Harmonic Power Clamp Meter EPH-1000	% Error
%THD de voltaje	4.52518	4.70	3.7195
%THD de Corriente	11.0032	10.9	0.9467

V. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado en este trabajo permite obtener las variables en tiempo real, tanto eléctricas como mecánicas, de las máquinas de CA de una manera económica y permitiendo visualizar las formas de onda al usuario. Esto es muy ventajoso desde el punto de vista académico ya que de una manera muy clara y demostrativa permite resolver inquietudes con respecto al funcionamiento de las máquinas de corriente alterna.

Adquirir en tiempo real las variables de las máquinas eléctricas brinda la posibilidad de calcular los parámetros de las máquinas y observar sus afectaciones en diferentes puntos de operación. De igual forma el poder determinar la calidad de la energía permite realizar estudios acerca de la correlación que existe entre la máquina eléctrica y la calidad del suministro eléctrico con que se alimenta.

El módulo implementado de calidad de la energía abre un entorno de posibilidades en la investigación de las máquinas eléctricas, ya que permite observar en tiempo real la relación entre las variables y parámetros de las máquinas eléctricas y la calidad del suministro. Por ejemplo, la relación que existe entre los armónicos y el par desarrollado por la máquina.

Dentro de la sensórica utilizada se puede establecer que el elemento más crítico es la termocupla pues al unir sus bornes de conexión con la placa del circuito impreso se pueden generar termocuplas parásitas que afectan la medición. Además se debe considerar la adquisición de un integrado amplificador industrial de excelentes condiciones pues la medición de la señal que llegara al sistema de adquisición se verá afectada por los errores de este dispositivo. De igual forma para estimar de una mejor manera la temperatura se hace necesario adquirir una cámara térmica con el fin de determinar los puntos calientes de los devanados de las máquinas, pues la temperatura que mide la termocupla no es la misma en toda la máquina.

Los porcentajes de error en la validación de las pruebas estuvieron por debajo del 5% lo cual ratifica el buen funcionamiento del sistema, pero es de aclarar que los dispositivos tradicionales usados para realizar la comparación tienen unos rangos limitados de operación, por lo que sus capacidades de medidas frente a magnitudes muy pequeñas (menores a 500 mV) no son buenas e incrementan el porcentaje de error final.

El uso del sistema de adquisición de datos en conjunto con las capacidades que ofrece el computador, mejora notablemente la eficiencia, la precisión y exactitud de las medidas de las variables de las máquinas de AC y constituye un paso muy importante a la modernización de los ensayos de laboratorio de las máquinas de corriente alterna.

REFERENCES

- [1] T. Wildi, *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*, 6^a edición, Pearson, Prentice Hall, 2007.
- [2] E. Franco Mejía, J. Posada, J. M. Ramírez, “Banco de pruebas para motores de inducción”. *Revista Energía y Computación* Vol. 16, No. 1, pp. 43–49, junio de 2008.
- [3] M. Seera, Ch. Lim-Peng, S. Nahavandi, Ch. Loo-Kiong, “Condition monitoring of induction motors: A review and an application of an ensemble of hybrid intelligent models”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, no. 10, pp. 4891–4903, 2014.
- [4] J. Roger Folch, M. J. Picazo Ródenas, R. Royo, J. A. Daviu, “Use of the infrared data for heating curve computation in induction motors: Application to fault diagnosis”, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 35, no. 15, pp. 178–192, Dec., 2013.
- [5] O. Carrillo Lema, G. Díaz Iza, P. Henry, *Diseño y construcción de un sistema para el monitoreo de condición de generadores sincrónicos y motores trifásicos de inducción*, Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero en Electrónica y Control, Escuela Politécnica Nacional, Quito, mar., 2011.
- [6] J. E. Osorio, J. D. Pérez Ramírez, M. A. Rodríguez Barrera, “Implementación de un sistema de adquisición de datos para monitorear una máquina de corriente directa”. *Tecnura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, Vol. 14, no. 27, jul/dic, 2010.
- [7] J. Lozano Rogado, F. Rodríguez Vicente, A. López Piñero, *Sistema automático de medidas eléctricas y de par en banco de motores de laboratorio*. Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Navales, Dpto. S.O.N., 2008.
- [8] I. A. Muñoz Quiñónez; J. Zárate García, *Sistema de adquisición de datos para la visualización de señales eléctricas de motores AC y DC*, Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, sep., 2009.
- [9] Fluke Brands, “80i-110s sonda de corriente AC/DC (100 A)”, 2014. (<http://www.fluke.com/fluke/coes/Accessorios/Sondas-Amperimetricas/80i-110s.htm?PID=55352>).
- [10] Fluke Brands, “DP120 sonda de tensión diferencial”, 2014. <http://www.fluke-cz.cz/comx/showproduct.aspx?locale=eses &pid=8297>.
- [11] IEC 584-1. 1995. (EN 60584-1: 1996). Temperature- Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90. NIST National Institute of Standards and Technology.
- [12] Encoder Products Company, “Datasheet Incremental Encoders 716”, 2014. (http://www.encoder.com/literatu_re/datasheet-716.pdf). <http://www.encoder.com/literature/datasheet-716.pdf>.
- [13] National Instrument, “Manual NI USB-6009 DAQ Multifunción”, 2014 (<http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>).
- [14] IEEE Standard 1159. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality A Status Update, IEEE, 1995.
- [15] IEEE Std. 519-1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE, 1992.
- [16] Sensor Data Company, “Rotating Transformer Coupled Torque Sensors Electrical, Mechanical, & Performance Considerations”, 2014. (http://sensordatatech.com/wp-content/uploads/2014/02/TN9905_N051-Rotating-Transformer-Sensors.pdf)

Sistema de adquisición de datos para la evaluación de variables en máquinas eléctricas de CA

Luis David Pabón Fernández, Eng.¹, Jorge Luis Díaz Rodríguez, Ms.¹, Jaider Luis Canabal Sampayo, Eng.²

¹ Universidad de Pamplona, Colombia, davidpabon@hotmail.es, jdiazcu@gmail.com

² ELECTRICARIBE, Colombia, jaidercanabal@gmail.com

Resumen– Este artículo presenta el desarrollo de una plataforma para determinar las variables en tiempo real de las máquinas eléctricas de corriente alterna (AC), también incluye el desarrollo de un módulo de evaluación de calidad de la energía según Estándar IEEE 1159-1995. El sistema utiliza la tarjeta de adquisición NI-USB6009 de la National Instrument para la adquisición de los datos, la interfaz gráfica se realiza en Labview y el hardware integra todos los sensores necesarios para determinar corrientes, voltajes, velocidad y temperatura de las máquinas eléctricas. Este sistema da una solución económica al problema de obtener variables en tiempo real para establecer los parámetros de estado estacionario de una manera experimental, incluyendo la evaluación de calidad de la energía. De esta manera se puede realizar un monitoreo continuo de la relación, variables en las máquinas y calidad de la energía, al igual que evaluar potencias y rendimiento. Lo cual conviene a este sistema en una herramienta muy útil en los temas relacionados a las máquinas eléctricas de AC.

Palabras clave– Adquisición de datos, máquinas eléctricas de CA, calidad de la energía, Labview, distorsión armónica.

I. INTRODUCCIÓN

Las máquinas eléctricas son la columna vertebral del sistema eléctrico a nivel general en todo el mundo, su importancia en la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica es fundamental para que los sistemas actuales puedan funcionar [1]. El desarrollo productivo y funcionamiento de las industrias no sería posible en la actualidad sin energía eléctrica, y sus procesos complejos no se pudieran desarrollar sin la utilización de máquinas eléctricas. En la actualidad es de tal importancia estas máquinas que muchos trabajos de investigación se centran en metodologías para determinar los parámetros de los modelos de estas máquinas, para su análisis en estado estacionario o en estado transitorio. Los sistemas de cómputo brindan la posibilidad de crear sistemas de adquisición de datos para estos fines, permitiendo adquirir, almacenar, procesar y tratar señales, con una mayor precisión y exactitud. Lo que da lugar a modelos de máquinas eléctricas con parámetros más precisos [2] y llegando hasta obtener modelos con parámetros autoajustables.

La adquisición de datos se está convirtiendo en la herramienta más completa para evaluar tanto los parámetros de la máquina, como también monitorear las condiciones de trabajo de estas [3]. Son variadas las técnicas usadas para el desarrollo de los sistemas de adquisición, algunos usan técnicas termográfica para evaluar parámetros de manera específica y precisa con gran exactitud, con la inclusión de software especializados [4]. Otros utilizan sistemas flexibles

que les permiten tanto evaluar parámetros como realizar control sobre las mediciones para determinar puntos de operación específicos [5], [6].

Referente al hardware de estos sistemas de adquisición, son muchos los factores que condicionan la utilización de uno u otro, por ejemplo, las condiciones económicas, la precisión y exactitud deseada, la velocidad de respuesta, la complejidad del sistema, si es de uso académico o industrial etc. En algunos trabajos realizados con este fin, utilizan analizadores de red y módulos comerciales para determinar los parámetros de las máquinas [7], otros prefieren utilizar sensores de efecto de Hall, con módulos UART y Guide de Matlab para desarrollar la interfaz [8].

El sistema presentado en este trabajo permite evaluar los variables reales de las máquinas eléctricas, de manera más precisa, exacta y personalizada, además de contar con recursos gráficos como las curvas de las variables posibilitando la observación de los estados de funcionamiento de la máquina evaluada.

II. HARDWARE DEL SISTEMA

El hardware está formado por la sensórica, el sistema de acondicionamiento, el circuito de protección y la tarjeta de adquisición. El sistema completo se muestra en la figura 1.

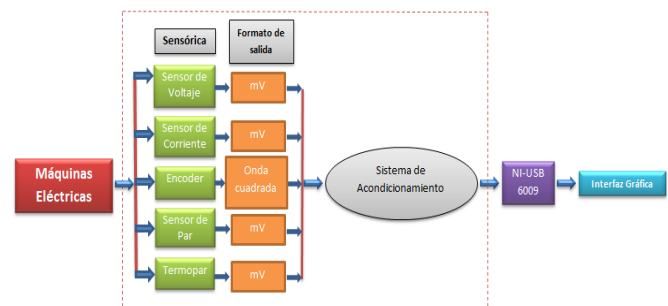


Fig. 1 Diagrama esquemático del Hardware del sistema.

A. Sensórica del sistema

A continuación se describe el equipo sensor que se requiere en el sistema diseñado:

Sonda de corriente Fluke 80i-110s:

Es una sonda de corriente de CA/CC, diseñada para reproducir formas de onda de corriente encontradas en sistemas comerciales e industriales modernos de distribución de energía eléctrica. El funcionamiento de la sonda se ha optimizado para la reproducción precisa de corrientes a la frecuencia de red y hasta el armónico 50 [9].

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.077>

ISBN: 978-0-9822896-9-3

ISSN: 2414-6390

14th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering Innovations for Global Sustainability”, 20-22 July 2016, San José, Costa Rica.



Fig. 21 Sonda de corriente de CA/CC 80i-110s [9].

Sonda de tensión diferencial Fluke DP120:

Es una sonda de tensión diferencial de diseño seguro para realizar mediciones de alta tensión flotante. La sonda puede utilizarse en convertidores electrónicos de alta potencia, controles de velocidad de motores, fuentes de alimentación y otros circuitos de alto voltaje [10].



Fig. 3 Sonda de tensión diferencial Fluke DP120 [10].

Termocupla tipo J:

Está hecha con un alambre de hierro y otro de Constantán (aleación de cobre y níquel). Su rango de utilización es de -270/+750°C. Necesitan compensación de cero, la dependencia entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura es no lineal, pero eso no es un problema ya que las termocuplas comerciales están estandarizadas y sus diferentes valores de voltajes de salida vs. temperatura ya están tabulados según criterios de normas y estándares, como por ejemplo la IEC 584-1:1995 [11].



Fig. 4 Termocupla tipo J [14].

Encoder en cuadratura 716-0500-O-S-6-S-S-N:

El dispositivo se muestra en la figura 5, mientras que en la figura 6 se muestra el diagrama de la forma de onda de la salida de los dos canales presentes en el encoder [12].



Fig. 5 Encoder de cuadratura modelo 716 [23].

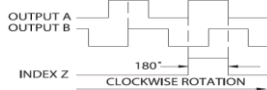


Fig. 6 Diagrama de la forma de onda de salida del encoder 716 [12].

SensorData Rotary Transformer Torque Sensor:

Los sensores de torque de rotación de eje, de uso común, utilizan como tecnología en base láminas de bandas extensiométricas para la medición del par. En aplicaciones de rotación del eje, varios métodos se utilizan para proporcionar

la entrada de energía de excitación para el puente de Wheatstone y recoger la señal de salida resultante. La figura 7



Fig. 7 Fotos del SensorData Rotary Transformer Torque Sensor usado.

Hay dos técnicas empleadas en la fabricación de transformadores rotativos a diferentes niveles de éxito. El método básico, se muestra en la Figura 8, consiste de una bobina concéntrica dividida en dos partes (una fija y una de rotación), rodeada por un núcleo de alta permeabilidad (generalmente un material de ferrita) para concentrar el flujo en un camino magnético y mejorar el acoplamiento entre las bobinas [16].

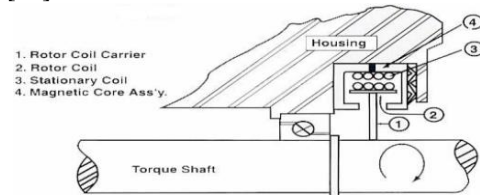


Fig. 8 Diseño de transformadores rotativos en sensores de par [16].

Una apertura mecánica permite a la bobina giratoria tener acceso al miembro estacionario (véase la figura 8, los elementos 2 y 3). El control de esta “brecha” incide muy fuertemente en la eficiencia y el rendimiento del transformador.

B. DAQ Ni-Usb6009

La tarjeta NI USB-6009 es una tarjeta de adquisición de datos multifuncional para Linux, Mac OS, Pocket PC, Windows; brinda funcionalidad DAQ básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Es accesible para uso de estudiantes y lo suficientemente poderoso para aplicaciones de medida más sofisticadas. Conector a PC tipo USB [13]. La figura 9 muestra la tarjeta.



Fig. 9 Tarjeta NI-USB 6009 [13].

Esta tarjeta se utiliza para captar las señales de los sensores y enviarlas al computador para su procesamiento y visualización en la interfaz gráfica.

C. Acondicionamiento de señales

Para lograr enlace seguro y eficiente entre la tarjeta de adquisición y los elementos de medida utilizados, es necesario realizar un acondicionamiento a las señales provenientes de los sensores, con el fin de adecuar tanto el tipo de salida como su magnitud a los rangos aceptados por la tarjeta NI-USB 6009.

Acondicionamiento de las señales de salida del encoder 716:

Con la señal de salida del encoder se obtendrá los parámetros de velocidad y posición de las máquinas eléctricas rotativas. El voltaje de salida del encoder es una onda cuadrada con magnitud pico de 5V, equivalente al 50% del voltaje de entrada analógico de la tarjeta DAQ, La corriente de salida del encoder es de 250 mA mientras que la corriente máxima que soporta la tarjeta NI-USB 6009 es de 1mA. Como medida de diseño, para adecuar la corriente del encoder que excede 249 veces la aceptada por la tarjeta, se uso opto acopladores para mantener aislado los dos circuitos eléctricos. La frecuencia de la señal del encoder es de 125 kHz. Basándonos en el teorema de Nyquist, según el cual, para poder replicar con exactitud la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear. La tarjeta NI-USB 6009 tiene una tasa de muestreo máximo (todos los canales) de 48 kS/s; Para solucionar este inconveniente se utilizó un divisor de frecuencia (HEF4040B). Con el fin de poder determinar la velocidad con la tasa de muestreo de la tarjeta.

- Escalamiento de la frecuencia de la señal del encoder. La frecuencia de la señal de salida acondicionada del encoder queda determinada mediante la ecuación (1):

$$f_{encoder} = \frac{125000Hz}{128} \quad (1)$$

- Diseño del circuito de sentido de giro:

La salida del encoder posee dos señales en cuadratura A y B. La señal B es la guía para la rotación y se adelanta 90 grados a la señal A cuando el eje del encoder gira en sentido horario, esta señal se atrasa 90 cuando gira en sentido antihorario. Cada vez que el encoder gire en sentido horario y ocurra un flanco de subida en la entrada de reloj, la señal B entregará un nivel lógico Bajo (L) a la entrada D; por lo cual en la salida Q se tendrá un nivel lógico Bajo (L). Cuando el sentido del giro sea en sentido antihorario se tendrá en la salida Q un nivel lógico Alto (H). En las tablas I y II se resumen los estados.

TABLA I
SENTIDO DE GIRO HORARIO

Entradas		Salidas	Entradas		Salidas
D	CLK		D	CLK	
(Señal B)	(Señal A)	Q	(Señal B)	(Señal A)	Q
0	↑	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0
1	1	0	0	↑	0

TABLA II
SENTIDO DE GIRO ANTI-HORARIO

Entradas		Salidas	Entradas		Salidas
D	CLK		D	CLK	
(Señal B)	(Señal A)	Q	(Señal B)	(Señal A)	Q
1	↑	1	0	0	1
1	1	1	1	0	1
0	1	1	1	↑	1

Acondicionamiento de la salida de la termocupla tipo J:

El rango de temperatura a censar en las máquinas eléctricas de AC usadas en este sistema va desde los 10 °C hasta 220 °C. Los problemas presentes en el uso de este tipo de sensor en esta aplicación es que debido a que la magnitud de salida de la termocupla es muy pequeña y de baja frecuencia, se hace muy susceptible a interferencias por ruido. Al igual que está presente una no linealidad y debe tener una compensación de cero. Todos estos problemas se solucionan con la utilización del circuito integrado AD594, el cual es un dispositivo especialmente diseñado para el acondicionamiento de la termocupla tipo J.

- Escalamiento de la señal de salida del integrado AD594
A partir de los datos consignados en la tabla III y utilizando la herramienta de cálculo SPSS se desarrollaron por regresión lineal dos ecuaciones para obtener la temperatura presente en el sensor termopar tipo J.

TABLA III
CARACTERÍSTICA DE SALIDA DEL TERMO PAR TIPO J Y EL INTEGRADO ACONDICIONADOR AD594 EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

Temperatura	Tensión Termopar J	Sensibilidad termopar	Salida AD594	Ganancia
°C	mV	uV/°C	mV	AD594
10	0.507	50.7	101	193.11
20	1.019	50.95	200	193.23
25	1.277	51.7	250	193.34
30	1.536	51.2	300	193.29
40	2.058	51.45	401	193.34
50	2.585	51.7	503	193.38
60	3.115	51.91	606	193.54
80	4.186	52.32	813	193.48
100	5.268	52.68	1022	193.41
120	6.359	52.99	1233	193.41
140	7.457	53.26	1445	193.36
160	8.560	53.5	1659	193.44
180	9.667	53.7	1873	193.43
200	10.777	53.88	2087	193.36
220	11.887	54.02	2302	193.39

De la regresión lineal se obtuvo la siguiente ecuación para el rango comprendido entre $10 \leq ^\circ C \leq 220$:

$$T_{oC} = (95.414 \cdot AD594_{salida}) + 1.711 \quad (2)$$

La figura 10 muestra la relación obtenida de temperatura vs. voltaje en la salida del integrado.

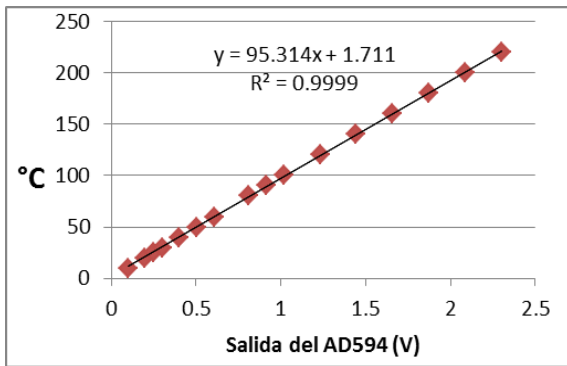


Fig. 10 Regresión lineal para el cálculo de la temperatura.

D. Circuito de aislamiento y protección

Las salidas de voltaje y corriente de los sensores ya acondicionados cumplen con las especificaciones y requerimientos de la tarjeta NI-USB600. Los circuitos de protección son usados para garantizar que en caso de una falla en la alimentación, en la salida de la sensorica o algún cortocircuito interno en la tarjeta, no existan voltajes y corrientes que superen los valores límites admisibles por la tarjeta DAQ, los circuitos integrados y demás componentes del hardware. Como medida principal de protección se diseñó el circuito de aislamiento eléctrico. Este circuito nos permite mantener circuitos independientes en la sensorica y la tarjeta DAQ.

Diseño del circuito de aislamiento:

Para de aislamiento se utilizó el optoacoplador GN137, el cual es un integrado de doble canal, formado por un LED de AlGaAs de 850 nm (led infrarrojo), acoplado ópticamente a un fotodetector integrado de puertas lógicas de muy alta velocidad con salida *strobable*, de puerta lógica y línea de colector abierto. Además contiene un protector de ruido, internamente, que proporciona un alto rechazo de modo común típicamente de 10 kV/us. Alta velocidad de trabajo de 10 Mbit/s [30]. Los valores de los elementos usados en el circuito de aislamiento corresponden a los recomendados por el fabricante, excepto al valor de la resistencia de salida RL y el capacitor CL. La corriente máxima de este circuito será de 0.5 mA corresponde al 50% de la corriente máxima de tolerancia de entrada a la tarjeta NI-USB 6009, con lo que garantizamos una corriente de operación que nos permite tener un rango de seguridad óptimo.

Implementación del Hardware del sistema:

En la figura 11 se muestra la sensorica utilizada y la caja negra que alberga la tarjeta de adquisición en donde se encuentra también los circuitos de acondicionamiento de las señales provenientes de los sensores.



Fig. 11 Fotos del Hardware y la sensorica del sistema de adquisición.

III. INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica del sistema de adquisición de datos se desarrolló en Labview. Las señales adquiridas con la tarjeta DAQ NI-USB6009 se agruparon en dos bloques básicos: Parámetros eléctricos y Parámetros mecánicos. La estructura de esta interfaz se muestra en la figura 12.

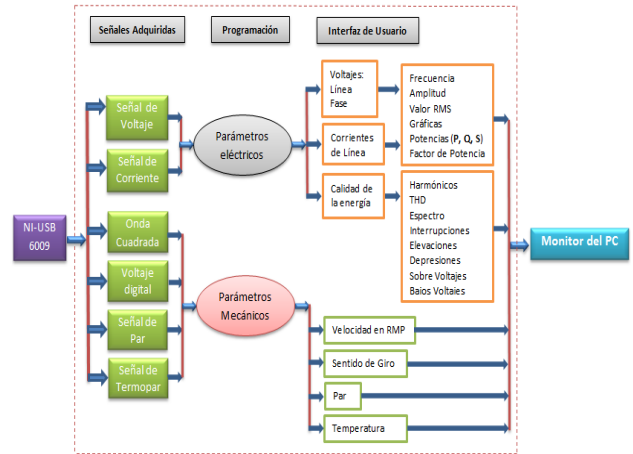


Fig. 12 Diagrama de Flujo del diseño de la interfaz.

A. Parámetros eléctricos

Las señales de los parámetros eléctricos permiten calcular las magnitudes de los valores de los variables voltajes y corrientes, así como también otros factores de importancia como son la frecuencia, THD, armónicos, y todo lo referente a calidad de la energía de estas ondas [14], [15].

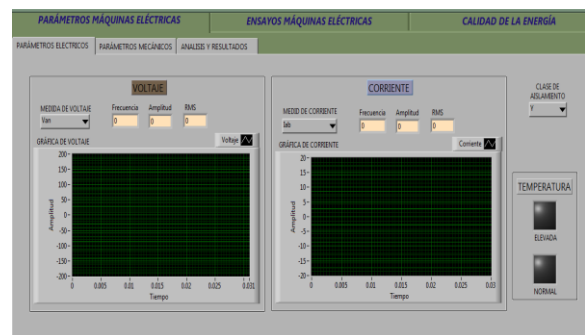


Fig. 13 Visualización de los parámetros eléctricos.

El usuario puede visualizar la forma de onda de la señal de voltaje y corriente, así como sus valores RMS, amplitud y frecuencia, también contará con una alarma luminosa en caso de que la temperatura suba por encima de los valores límites de la clase de aislamiento de la máquina eléctrica.

B. Parámetros mecánicos

Las señales de este grupo nos permitirán calcular las características mecánicas como son la velocidad, sentido de giro, el par, y la temperatura de la máquina eléctrica. La figura 14 muestra esta interfaz.

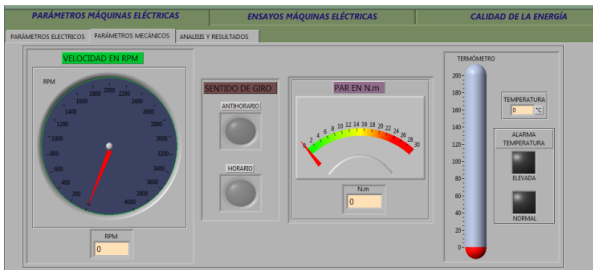


Fig. 14 Visualización de los parámetros mecánicos.

C. Análisis y resultado

En este submenú se muestra el resumen las magnitudes más importantes de los parámetros de las máquinas eléctricas, para luego ser exportadas a un archivo tipo *Excel (.xls)*. La figura 15 muestra este submenú.

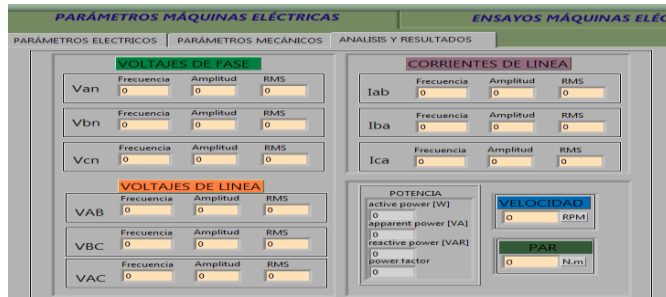


Fig. 15 Visualización del submenú Análisis y resultados.

Adicionalmente, se agregó a la interfaz del sistema un menú con los problemas de calidad de la energía más relevante, como se muestra en la figura 16.

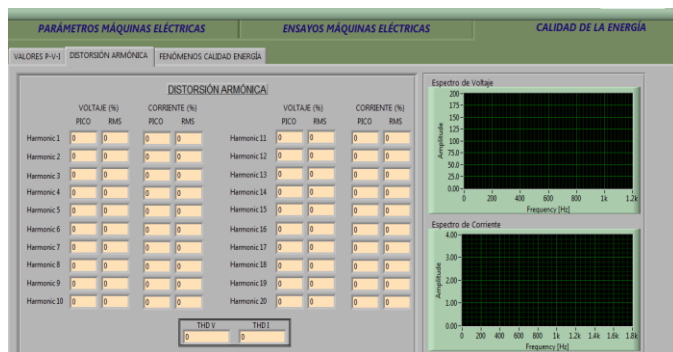


Fig. 16 Visualización del sub menú Calidad de la energía.

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

La validación de los valores presentados por el sistema de adquisición de datos se realizó utilizando los dispositivos disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas. Dentro de los dispositivos utilizados tenemos: *Power Clamp Meter* EPH-1000 ERASMUS, *Digital Tachometer* ER-20 ERASMUS, multímetro + termocupla tipo K y Osciloscopio Digital GW INSTEK GDS-820C.

La pinza se utiliza para validar las magnitudes RMS de voltaje, corriente y distorsión armónica (porcentaje THD de voltaje y corriente), también los valores de potencia activa, reactiva y factor de potencia. La termocupla se utiliza en conjunto con el multímetro para validar las magnitudes de temperatura.

El tacómetro se utiliza para validar la magnitud de la velocidad en rpm. Con el osciloscopio se comparan las formas de ondas de voltaje y corriente.

A. Resultados

Después de realizar una prueba piloto a un motor de inducción de 110 V de 400 VA y de adquirir los datos con el sistema, se compararon los datos obtenidos con los resultados por los dispositivos de evaluación comerciales con el ánimo de validar el sistema. Se tabularon las magnitudes tomadas y se calcularon los porcentajes de error de las medidas además de graficar los resultados.

Voltaje, corriente y potencias (valores RMS):

En la figura 15 se muestra los resultados de la interfaz de variables eléctricas

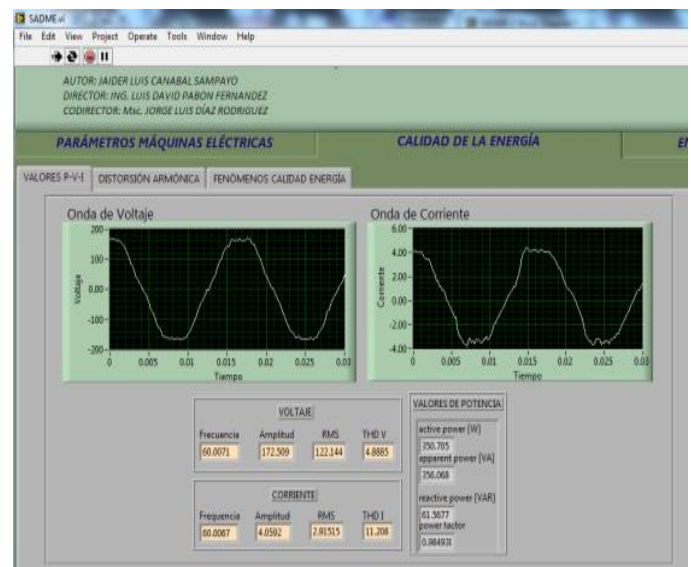


Fig. 17 Fotografía de la evaluación de voltaje, corriente, potencias y factor de potencia.

La tabla IV resume los resultados obtenidos y la validación con los dispositivos comerciales.

TABLA IV
COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS ELÉCTRICAS TOMADAS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN.

Variable medida	Sistema de adquisición	Harmonic Power Clamp Meter EPH-1000	% Error
Voltaje	124.144 V	124.2 V	0.0451
Corriente	2.91515 A	2.96 A	1.5152
Potencia Activa	350.972 W	358 W	1.9631
Potencia Reactiva	92.7993 VAR	93 VAR	0.2158
Potencia Aparente	363.033 VA	367.6 VA	1.2423
Factor de Potencia	0.9668	0.997	3.029

Velocidad:

La figura 18 muestra la imagen de la validación de la velocidad



Fig. 18. Fotografía de la validación de velocidad.

En la tabla V se resumen los datos de la validación, en ella se observa que el error es extremadamente bajo.

TABLA V
COMPARACIÓN DE LA MEDIDA DE VELOCIDAD TOMADA CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN.

Variable medida	Sistema de adquisición	Digital Tachometer ER-20	% Error
Velocidad	1081.78 RPM	1082 RPM	0.0203

Temperatura:

La tabla VI resume los datos obtenidos y el respectivo error, aunque no es tan bajo como los de las pruebas anteriores, este sigue estando en un valor aceptable.

TABLA VI
COMPARACIÓN DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA TOMADAS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN.

Variable medida	Sistema de adquisición	Multímetro y Termocupla J	% Error
Temperatura	22.3 °C	23 °C	3.0434

Distorsión Armónica:

Los problemas de distorsión armónica se evaluaron tanto para la onda de voltaje como para la onda de corriente, continuación se muestran los resultados

Distorsión Armónica de Voltaje:

La tabla VII resume los valores hallados para cada uno de los armónicos presentes en la onda de tensión, desde la fundamental hasta el armónico 19, siendo esta banda la más importante para las máquinas eléctricas.

TABLA VII
COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS RMS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOMADAS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN HARMONIC POWER CLAMP METER EPH-1000.

Orden del Armónico	Sistema de adquisición	Harmonic Power Clamp Meter EPH-1000	% Error
Armónico 1	122.107	122.2	0.0761
Armónico 2	0.02441	0	-----
Armónico 3	0.61807	0.6	3.0116
Armónico 4	0.06200	0	-----
Armónico 5	5.46523	5.5	0.6321
Armónico 6	0.05318	0	-----
Armónico 7	0.17591	0.2	2.4090
Armónico 8	0.06262	0	-----
Armónico 9	0.06510	0	-----
Armónico 10	0.05618	0	-----
Armónico 11	0.26201	0.26	0.7730
Armónico 12	0.06543	0	-----
Armónico 13	0.11541	0	-----
Armónico 14	0.03047	0	-----
Armónico 15	0.05906	0	-----
Armónico 16	0.04664	0	-----
Armónico 17	0.06335	0	-----
Armónico 18	0.03838	0	-----
Armónico 19	0.08678	0	-----
Armónico 20	0.07187	0	-----

Distorsión Armónica de Corriente

La tabla VIII resume los valores hallados para cada uno de los armónicos desde la fundamental hasta el armónico 19 de la onda de corriente, siendo esta banda la más importante para las máquinas eléctricas.

TABLA VIII
COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS RMS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOMADAS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN HARMONIC POWER CLAMP METER EPH-1000.

Orden del Armónico	Sistema de adquisición	Harmonic Power Clamp Meter EPH-1000	% Error
Armónico 1	2.85369	2.9	1.5968
Armónico 2	0.00160	0	-----
Armónico 3	0.16720	0.15	6.6666
Armónico 4	0.00200	0	-----
Armónico 5	0.22636	0.22	2.8909
Armónico 6	0.00565	0	-----
Armónico 7	0.09929	0.1	0.7100
Armónico 8	0.00382	0	-----
Armónico 9	0.06211	0.06	3.5166
Armónico 10	0.00300	0	-----
Armónico 11	0.03179	0	-----
Armónico 12	0.00440	0	-----
Armónico 13	0.02872	0	-----
Armónico 14	0.00437	0	-----
Armónico 15	0.02944	0	-----
Armónico 16	0.00324	0	-----
Armónico 17	0.02973	0	-----
Armónico 18	0.00502	0	-----
Armónico 19	0.02284	0	-----
Armónico 20	0.00219	0	-----

Total de Distorsión Armónica

La tabla IX resume los valores del total de distorsión armónica encontrados para la onda de corriente y de tensión, de igual forma se muestran los porcentajes de errores con el ánimo de validar los resultados.

COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS DE % THD TOTAL TOMADAS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y EL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN *HARMONIC POWER CLAMP METER EPH-1000*.

Variable medida	Sistema de adquisición	Harmonic Power Clamp Meter EPH-1000	% Error
%THD de voltaje	4.52518	4.70	3.7195
%THD de Corriente	11.0032	10.9	0.9467

V. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado en este trabajo permite obtener las variables en tiempo real, tanto eléctricas como mecánicas, de las máquinas de CA de una manera económica y permitiendo visualizar las formas de onda al usuario. Esto es muy ventajoso desde el punto de vista académico ya que de una manera muy clara y demostrativa permite resolver inquietudes con respecto al funcionamiento de las máquinas de corriente alterna.

Adquirir en tiempo real las variables de las máquinas eléctricas brinda la posibilidad de calcular los parámetros de las máquinas y observar sus afectaciones en diferentes puntos de operación. De igual forma el poder determinar la calidad de la energía permite realizar estudios acerca de la correlación que existe entre la máquina eléctrica y la calidad del suministro eléctrico con que se alimenta.

El módulo implementado de calidad de la energía abre un entorno de posibilidades en la investigación de las máquinas eléctricas, ya que permite observar en tiempo real la relación entre las variables y parámetros de las máquinas eléctricas y la calidad del suministro. Por ejemplo, la relación que existe entre los armónicos y el par desarrollado por la máquina.

Dentro de la sensórica utilizada se puede establecer que el elemento más crítico es la termocupla pues al unir sus bornes de conexión con la placa del circuito impreso se pueden generar termocuplas parásitas que afectan la medición. Además se debe considerar la adquisición de un integrado amplificador industrial de excelentes condiciones pues la medición de la señal que llegara al sistema de adquisición se verá afectada por los errores de este dispositivo. De igual forma para estimar de una mejor manera la temperatura se hace necesario adquirir una cámara térmica con el fin de determinar los puntos calientes de los devanados de las máquinas, pues la temperatura que mide la termocupla no es la misma en toda la máquina.

Los porcentajes de error en la validación de las pruebas estuvieron por debajo del 5% lo cual ratifica el buen funcionamiento del sistema, pero es de aclarar que los dispositivos tradicionales usados para realizar la comparación tienen unos rangos limitados de operación, por lo que sus capacidades de medidas frente a magnitudes muy pequeñas (menores a 500 mV) no son buenas e incrementan el porcentaje de error final.

El uso del sistema de adquisición de datos en conjunto con las capacidades que ofrece el computador, mejora notablemente la eficiencia, la precisión y exactitud de las medidas de las variables de las máquinas de AC y constituye un paso muy importante a la modernización de los ensayos de laboratorio de las máquinas de corriente alterna.

REFERENCES

- [1] T. Wildi, *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*, 6^a edición, Pearson, Prentice Hall, 2007.
- [2] E. Franco Mejía, J. Posada, J. M. Ramírez, “Banco de pruebas para motores de inducción”. *Revista Energía y Computación* Vol. 16, No. 1, pp. 43–49, junio de 2008.
- [3] M. Seera, Ch. Lim-Peng, S. Nahavandi, Ch. Loo-Kiong, “Condition monitoring of induction motors: A review and an application of an ensemble of hybrid intelligent models”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, no. 10, pp. 4891–4903, 2014.
- [4] J. Roger Folch, M. J. Picazo Ródenas, R. Royo, J. A. Daviu, “Use of the infrared data for heating curve computation in induction motors: Application to fault diagnosis”, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 35, no. 15, pp. 178–192, Dec., 2013.
- [5] O. Carrillo Lema, G. Díaz Iza, P. Henry, *Diseño y construcción de un sistema para el monitoreo de condición de generadores sincrónicos y motores trifásicos de inducción*, Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero en Electrónica y Control, Escuela Politécnica Nacional, Quito, mar., 2011.
- [6] J. E. Osorio, J. D. Pérez Ramírez, M. A. Rodríguez Barrera, “Implementación de un sistema de adquisición de datos para monitorear una máquina de corriente directa”. *Tecnura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, Vol. 14, no. 27, jul/dic, 2010.
- [7] J. Lozano Rogado, F. Rodríguez Vicente, A. López Piñero, *Sistema automático de medidas eléctricas y de par en banco de motores de laboratorio*. Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Navales, Dpto. S.O.N., 2008.
- [8] I. A. Muñoz Quiñónez; J. Zárate García, *Sistema de adquisición de datos para la visualización de señales eléctricas de motores AC y DC*, Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, sep., 2009.
- [9] Fluke Brands, “80i-110s sonda de corriente AC/DC (100 A)”, 2014. (<http://www.fluke.com/fluke/coes/Accessorios/Sondas-Amperimetricas/80i-110s.htm?PID=55352>).
- [10] Fluke Brands, “DP120 sonda de tensión diferencial”, 2014. (<http://www.fluke-cz.cz/comx/showproduct.aspx?locale=eses &pid=8297>).
- [11] IEC 584-1. 1995. (EN 60584-1: 1996). Temperature- Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90. NIST National Institute of Standards and Technology.
- [12] Encoder Products Company, “Datasheet Incremental Encoders 716”, 2014. (http://www.encoder.com/literatu_re/datasheet-716.pdf). (<http://www.encoder.com/literature/datasheet-716.pdf>).
- [13] National Instrument, “Manual NI USB-6009 DAQ Multifunción”, 2014 (<http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>).
- [14] IEEE Standard 1159. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality A Status Update, IEEE, 1995.
- [15] IEEE Std. 519-1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE, 1992.
- [16] Sensor Data Company, “Rotating Transformer Coupled Torque Sensors Electrical, Mechanical, & Performance Considerations”, 2014. (http://sensordatatech.com/wp-content/uploads/2014/02/TN9905_N051-Rotating-Transformer-Sensors.pdf)