



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**Diseño e Implementación de un Sistema de Medición de
Potencia Eléctrica Trifásica**

TESIS

Para obtener el grado de
Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA

Cristian Anzures Mendoza

DIRECTOR DE TESIS

M.C. Emmanuel Torres Montalvo

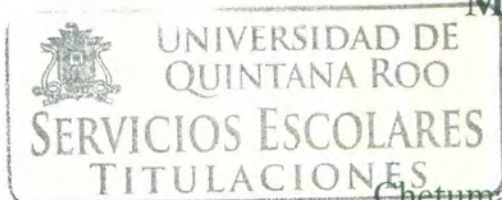
ASESORES

Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta

Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

Dr. Inocente Bojórquez Báez

M.E.S. Roberto Acosta Olea



Chetumal Quintana Roo, México, Julio 2015.





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Trabajo de Tesis elaborado bajo supervisión del Comité de asesoría y aprobada como requisito parcial para obtener el grado de:

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

Comité de Trabajo de Tesis

Director:

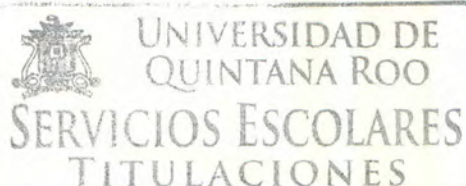

M.C. Emmanuel Torres Montalvo

Asesor:


Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta

Asesor:


Dr. Freddy Ignacio Chan Puc



Chetumal, Quintana Roo, México, Julio 2015



Dedicatoria

A mi madre: Silvia Mendoza Estrada

A esa mujer que ha luchado toda su vida para verme progresar y que con sus palabras, su apoyo y su amor me han ayudado a concluir mis estudios y sé que sentirá un gran orgullo al verme concluir esta etapa de mi vida.

Agradecimientos

A mi madre y padre que siempre han estado para mí cuando más los he necesitado, sé que han pasado por mucho para poder darme lo que me han dado. Gracias por todo, siempre estaré agradecido. Los quiero mucho.

A mi novia Isabel Molina Barradas a la mujer que amo mucho, que siempre me ha apoyado en todas mis decisiones y siempre me ha ayudado en todos los viajes que he tenido fuera de la universidad. Omito su primer nombre porque sé que no le gusta. Muchas gracias Isita.

Al Dr. Inocente Bojórquez Báez que con su apoyo, sus consejos, charlas, etc. me han ayudado a dirigirme por el mejor camino durante mi desarrollo en la universidad. Sé que he encontrado un padre en esta universidad, con el cual contaré siempre. Gracias Viejo.

A todos los profesores que tuve durante mi preparación en la universidad, de los cuales aprendí mucho, no solamente dentro del aula, si no también fuera.

A los compañeros y amigos que sé que extrañare mucho, junto con todos esos recuerdos que dejamos juntos en las convivencias que tuvimos.

Al M.C Emmanuel Torres Montalvo, al Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta y al Dr. Freddy Ignacio Chan Puc por apoyarme en la realizar este proyecto de tesis. Muchas gracias.

Y a todos aquellos que de alguna u otra forma me han ayudado en su momento.

El éxito en la vida consiste en seguir siempre adelante.

Samuel Johnson

Contenido

| | |
|-------------------------------------|-------------------|
| <i>Dedicatoria</i> | <i>i</i> |
| <i>Agradecimientos</i> | <i>ii</i> |
| <i>Contenido</i> | <i>iii</i> |
| <i>Resumen</i> | <i>v</i> |

CAPITULO I..... ***1***

Sistema de medición de potencia eléctrica..... ***1***

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 1 |
| 1.1 Medición de variables eléctricas | 1 |
| 1.1.1 Tensión..... | 4 |
| 1.1.2 Corriente..... | 4 |
| 1.2 Potencia Eléctrica | 8 |
| 1.2.1 Potencia instantánea | 9 |
| 1.2.2 Potencia activa o promedio | 11 |
| 1.2.3 Potencia reactiva | 14 |
| 1.2.4 Potencia Aparente | 15 |
| 1.3 Valores RMS..... | 16 |
| 1.3.1 Teórico | 16 |
| 1.3.2 Práctico (Analógico – Digital)..... | 20 |

CAPITULO II..... ***21***

Plataforma SINGLE-BOARD RIO y LABVIEW..... ***21***

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 21 |
| 2.1 Descripción del Single-Board RIO | 21 |
| 2.2 Programación | 25 |
| 2.3 LabVIEW | 26 |
| 2.4 Toolbox FPGA..... | 33 |

| | |
|---|------------------|
| 2.5 Interconexión Single-Board RIO – LABVIEW | 34 |
| <i>CAPITULO III.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Desarrollo del sistema de medición.....</i> | <i>35</i> |
| Introducción..... | 35 |
| 3.1 Sensores | 35 |
| 3.1.1 Voltaje de CA..... | 35 |
| 3.1.2 Corriente de CA..... | 38 |
| 3.2 Etapa de adquisición de datos..... | 42 |
| 3.3 Integración de sensores y tarjetas..... | 44 |
| 3.4 Programación LABVIEW | 46 |
| <i>CAPITULO IV.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Resultados experimentales.....</i> | <i>53</i> |
| 4.1 Mediciones obtenidas..... | 53 |
| 4.1.1 Tensión..... | 53 |
| 4.1.2 Corriente..... | 56 |
| 4.1.3 Medición de potencias | 60 |
| <i>Conclusión y Trabajos Futuros</i> | <i>64</i> |
| <i>Referencias</i> | <i>66</i> |

Resumen

La importancia de llevar a cabo el control en un sistema de potencia eléctrico trifásico es obteniendo las variables que lo caracterizan como son la tensión, corriente y las potencias eléctricas, para poder realizar una manipulación del sistema y adecuarlo a las condiciones que lo requiera.

El objetivo de este trabajo es diseñar e implementar de un sistema de medición de potencia eléctrica trifásica en el programa de National Instruments LabVIEW trabajando en conjunto con la tarjeta Single-Board RIO de adquisición de datos y control, acoplada a la tarjeta de interface General Purpose Inverter Controller (GPIC) RIO Mezzanine con los sensores de tensión y corriente esto con el objetivo de poder medir las variables eléctricas de un generador de inducción trifásico o cualquier otro dispositivo.

Este trabajo de tesis se presenta como parte inicial un análisis del estado del arte de los algoritmos para la medición de potencia eléctrica trifásica así como el método teórico para el cálculo de los valores efectivos de tensión y corriente eléctrica. Se hace mención de los tipos de sensores más utilizados en la medición de tensión y corriente. Como segunda parte se describen las características de dispositivos y software utilizados en la implementación del sistema de medición de la interconexión del SINGLE-BOARD RIO y LABVIEW que permitirán crear una interface gráfica para el monitoreo de las variables medidas. También se describe el tipo de programación que se utiliza en LABVIEW y sus principales ventanas en donde se lleva a cabo la programación gráfica. En el capítulo III se presenta y describe el hardware usado en el desarrollo del sistema de medición, esto incluye el tipo de sensor utilizado para la medición de tensión y corriente, tarjetas de adquisición sbRIO y tarjeta GPIC Mezzanine con sus principales características como es la FPGA, el procesador en tiempo real y demás componentes así como el algoritmo implementado para la medición. Finalmente se muestran y se analizan los resultados experimentales obtenidos en la implementación del sistema de medición de potencia trifásica y se hace una comparación con las mediciones obtenidas con el analizador de la energía el FLUKE 434. En conclusión se menciona el comportamiento del sistema con base a la precisión que arrojó con respecto a las mediciones obtenidas por el FLUKE 434.

CAPITULO I

Sistema de medición de potencia eléctrica

Introducción

Los instrumentos de medición son los que hacen posible la observación de cualquier fenómeno físico y su cuantificación en el proceso de medición. En este capítulo inicialmente se menciona las definiciones de voltaje y corriente, se describe el comportamiento y el análisis para una señal de forma senoidal y también en el caso de la corriente se dan a conocer los distintos tipos más utilizados de sensores de corriente. Posteriormente, se desarrollan las ecuaciones de potencias, en donde intervienen la potencia instantánea, potencia promedio, potencia reactiva y potencia aparente. El análisis de estas potencias se llevó a cabo utilizando una onda senoidal, y con las magnitudes picos de voltaje y corriente. De igual forma, se señala como se simplifican las ecuaciones al utilizar la definición del valor eficaz. Finalmente se indica las definiciones de los valores RMS y se hace una comparación con los valores analógicos y digitales.

1.1 Medición de variables eléctricas

Es muy importante conocer el comportamiento de las variables que se midan. En corriente alterna el voltaje y corriente tienen un comportamiento de una onda senoidal. Como se aprecia en la Figura 1.1 se tiene una onda senoidal, la cual podría ser considerada como una corriente alterna o voltaje alterno. El voltaje (o la corriente) se muestra en el eje vertical y el tiempo (t) en el eje horizontal. Se puede apreciar como es el comportamiento del voltaje (o la corriente) a través del tiempo. Iniciamos desde cero, la magnitud de la variable incrementa hasta un máximo positivo (pico), regresa a cero, y luego se incrementa hasta un máximo negativo (pico) para regresar posteriormente a cero y de esta manera completar un ciclo.

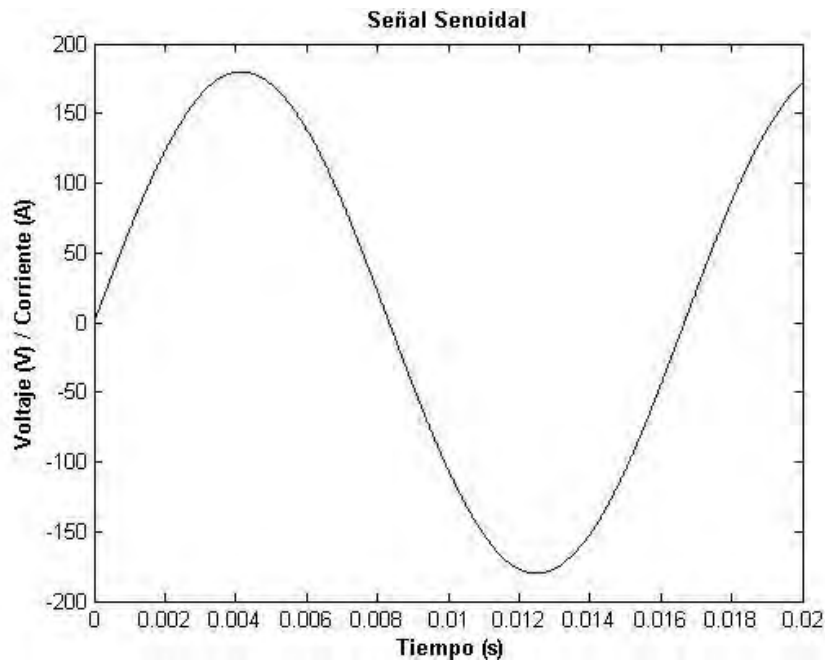


Figura 1.1. Señal senoidal

Cuando se tiene un circuito cerrado, una fuente de voltaje alterno y una resistencia, circula una corriente alterna con el mismo comportamiento que el voltaje. Cuando el voltaje cambia de polaridad en correspondencia la corriente también lo hace. Durante la alternación positiva del voltaje aplicado, V_s , la corriente fluye en la dirección positiva y durante la alternación negativa del voltaje la corriente fluye en la dirección opuesta. De esta forma esta alternación positiva y negativa forma un ciclo de una onda senoidal.

Una onda senoidal varía con el tiempo (t) de una manera que es definible. Al tiempo requerido para que una onda senoidal complete todo un ciclo se llama periodo (T).

Como es mostrado en la Figura 1.2 se cuenta con una onda senoidal. De modo característico, una onda senoidal continúa repitiéndose a sí misma en ciclos idénticos. Como todos los ciclos de la onda son iguales el periodo siempre es un valor fijo para una onda senoidal. El periodo puede ser medido desde un cruce por cero proveniente de un pico máximo hasta el siguiente cruce que haga por el cero nuevamente proveniente de un pico máximo. De igual manera se puede hacer desde cualquier pico hasta el correspondiente pico alcanzado en el siguiente pico.

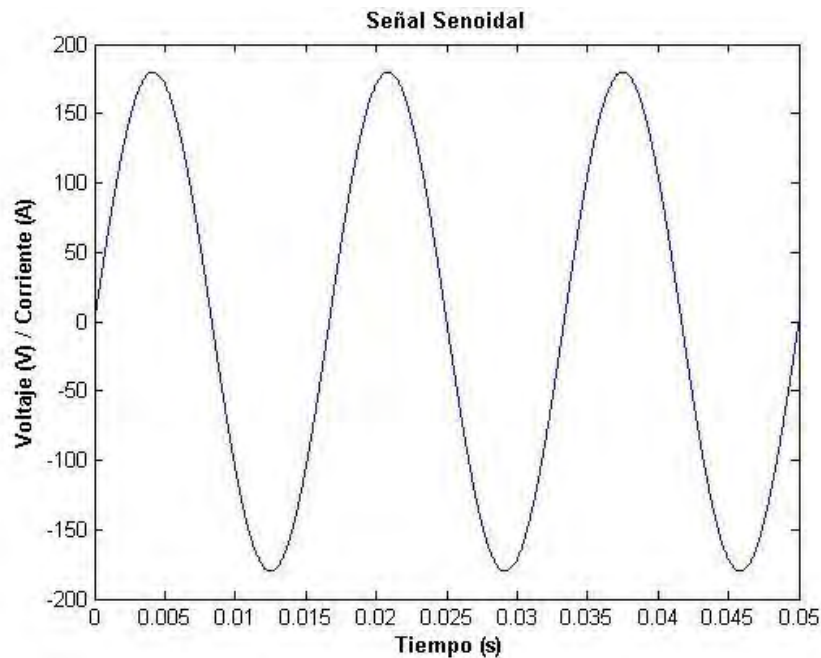


Figura 1.2. Señal senoidal periódica

Se tienen algunas definiciones relacionadas a las ondas senoidales:

Forma de onda: es la trayectoria trazada por una cantidad, como la fem en función de alguna variable.

Valor instantáneo: es la magnitud de una forma de onda en cualquier instante del tiempo.

Amplitud o valor pico: es el valor máximo de una forma de onda.

Forma de onda periódica: es una forma de que se repite continuamente, después del mismo intervalo.

Periodo (T): es el intervalo entre repeticiones sucesivas de una forma de onda periódica; $[f(t + T) = f(t)]$.

Ciclo: es la porción de una onda contenida en un periodo.

Frecuencia (f): es el número de ciclos que se producen en un segundo. Durante muchos años, las unidades para la frecuencia eran los ciclos por segundo; no obstante, en época reciente se ha hecho hincapié en el empleo de Hertz de modo que 1 Hertz (Hz) =1 ciclo por segundo (cps) [1].

1.1.1 Tensión

El voltaje es considerado como el diferencial de potencial eléctrico entre dos puntos, puede ser representado por la letra V. Su unidad de medida es el volt.

En los casos donde el voltaje y la corriente resultante tengan un comportamiento constante, serán referidos a corriente directa. De otra forma el voltaje puede tener varios comportamientos, el más importante de variación es la onda senoidal. Dado su comportamiento del voltaje en onda senoidal se obtiene una corriente con el mismo comportamiento, siendo una corriente alterna. El voltaje en corriente alterna se caracteriza por la frecuencia f y por la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ así como su amplitud V_0 :

$$V = V_0 \text{sen}(\omega t) \quad (1.1)$$

La amplitud puede ser especificada como voltaje pico-pico siendo $V_{p-p} = 2V_0$, o de igual forma como voltaje rms, $V_{rms} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$.

1.1.2 Corriente

La corriente es el resultado del paso de partículas cargadas por un conductor. La unidad de medida es A (ampere). En donde 1 A =1 C/s (coulomb por segundo). La determinación de la corriente directa cumple con la ley de ohm y está dada por la relación $I = \frac{V}{R}$. Cuando se trata de corriente alterna se considera la frecuencia y la frecuencia angular. De la misma manera como se hace para el voltaje; sí se supone una señal senoidal la corriente tendrá un comportamiento semejante.

Considerando que se aplica voltaje en corriente alterna el resultado será una señal senoidal de la corriente alterna con la misma frecuencia pero lo que podría variar es el ángulo de fase y/o la amplitud:

$$I = I_0 \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (1.2)$$

En las mediciones que se realizan siempre existen elementos de donde se obtienen las variables que se requiere. En el caso del sensor de corriente convierte la magnitud de corriente de una línea de distribución, a un nivel de voltaje o corriente directamente equivalente. El sensor de corriente necesita manejar un rango dinámico extenso de medición y también un rango de medición de frecuencia de acuerdo al sistema de medición desarrollado.

Los cuatro tipos de sensores de corriente más común utilizado hoy en día son:

- a) Resistivos: Shunt. Una resistencia provoca una caída de tensión proporcional a la corriente que circula por dicha resistencia Shunt.
- b) Inductivos: Transformadores de corriente. El cable a medir pasa por medio de un núcleo magnético que tiene bobinado un secundario que proporciona una tensión proporcional a la corriente que circula por el cable.
- c) Magnético (Efecto Hall): El sensor mide el campo magnético de un núcleo, generado por la corriente que circula por el cable a medir, que bobina al núcleo.
- d) Bobina Rogowski: Miden los cambios de efecto magnético alrededor de un hilo por el que circula la corriente para producir una señal de voltaje que es proporcional a la derivada de la corriente (di/dt) [5].

La corriente Shunt es el menos costoso hoy en día. Un simple modelo para dispositivo de medición de corriente se muestra en la Figura 1.1.

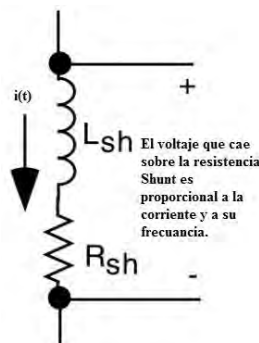


Figura 1.3 Un modelo simple de Shunt con inductancia parásita [6].

La baja resistencia para la corriente Shunt ofrece buena precisión a bajo costo y la corriente medida es simple. Al realizar la corriente de alta precisión, siempre se debe de tener en cuenta la inductancia parásita del Shunt. La inductancia está típicamente en el orden de unos pocos nH [6].

El sensor de corriente inductivo (transformador de corriente TC) es un transformador como se muestra en la Figura 1.4. Utiliza el principio de un transformador el cual convierte la corriente primaria a una corriente secundaria más pequeña. La función de una transformador de corriente es la de reducir la corriente de un sistema eléctrico a valores normales y no peligrosos, con el fin de poder utilizar aparatos normalizados, más económicos y que puedan utilizarse sin peligro.

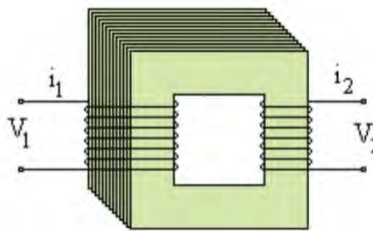


Figura 1.4. Principio de un transformador de corriente [7].

El TC es el sensor más común hoy en día entre los medidores de energía de estado sólido de alta corriente. El transformador de corriente puede medir con muy alta precisión y consume poca energía. Adicionalmente, el material ferrita puede saturarse a altas corrientes. Una vez magnetizado, el núcleo contendrá histéresis y la exactitud podrá decaer a menos que sea desmagnetizado de nuevo. La saturación puede ocurrir cuando la corriente aumenta más allá de la corriente que puede medir el transformador de corriente, o cuando hay una componente cautelosa de DC en la corriente. Hoy en día la solución para los problemas de saturación está en usar en el núcleo un material de ferrita con alta permeabilidad.

Hay dos tipos principales de sensores de Efecto Hall: implementación de lazo abierto y de lazo cerrado. La mayoría de los sensores de Efecto Hall encontrados en mediciones de energía utilizan diseños de lazo abierto para disminuir costos. El sensor de Efecto Hall tiene respuesta excepcional y es capaz de medir corrientes muy grandes. Sin embargo, los inconvenientes incluyen que la salida desde el sensor Efecto Hall tiene una gran temperatura

derivada y por lo general requiere de una fuente de corriente estable. Los sensores de Efecto Hall son menos comunes en comparación con los de TC.

La bobina de Rogowski, llamada así en honor a su inventor Walter Rogowski, es un dispositivo electrónico, usado como transductor para medir corriente alterna (AC) o pulsos rápidos de corriente.

Consiste en una bobina de cable en forma de hélice, alrededor de una circunferencia, como un toroide, pero con núcleo de aire, y las dos terminales están cercanas entre sí. Una vez que se tiene esta, la bobina se cierra alrededor del cable conductor que transporta la corriente que se quiere medir. Dado que el voltaje inducido en la bobina es proporcional a la velocidad con la que varía la corriente que se mide en el cable, o a su derivada temporal, la salida obtenida en la bobina de Rogowski es usualmente conectada a un dispositivo integrador para obtener la señal proporcional a la corriente.

Como se muestra en la Figura 1.5 un ejemplo del sensor de la bobina de Rogowski. Consiste en N-vueltas de bobina de núcleo de aire rectangular dispuesto alrededor de un alambre largo y de forma perpendicular al campo magnético generado por la corriente en el conductor.

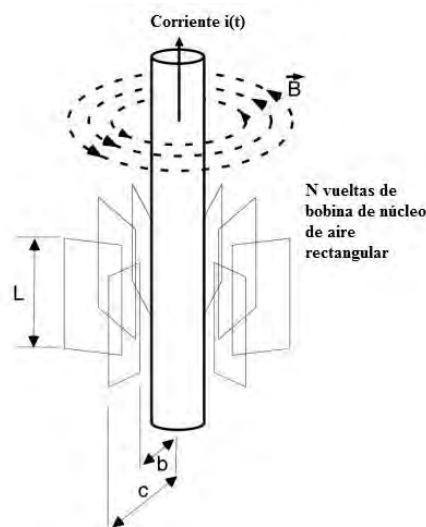


Figura 1.5. Modelo de bobina de Rogowski [6].

Para proveer una salida del sensor que reproduzca la forma de onda de la corriente, la combinación de bobina e integrador en la Figura 1.6 se aprecia un sistema donde a salida es independiente de la frecuencia, el cual permite tener exactitud de respuesta de fase, y el cual

permite la medición de forma de corrientes complejas. La salida de integrador puede ser usado con cualquier forma de dispositivo de indicación electrónica como un voltímetro, osciloscopio, sistemas de protección o equipo de medición.

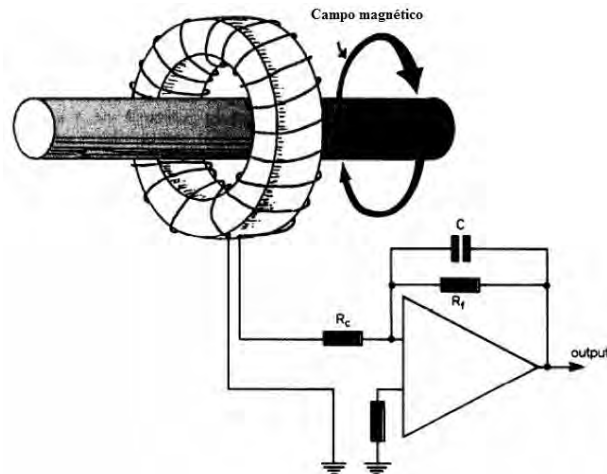


Figura 1.6. Medición de corriente utilizando una bobina Rogowski conectada a un integrador [6].

1.2 Potencia Eléctrica

En esta sección que considera la relación de voltaje y corriente alterna para generar la potencia. La potencia instantánea es la cantidad de energía que un elemento ha absorbido, y varía con una función en el tiempo, es considerada como el producto de la tensión y la corriente, ambas en el dominio del tiempo que se asocia con el elemento o la red de interés. La potencia instantánea es una cantidad importante en aplicaciones de ingeniería porque su máximo valor debe estar limitado por todos los dispositivos físicos. Por esa razón, la potencia máxima instantánea, o potencia pico, es usada para la caracterización específica de dispositivos eléctricos. Sin embargo, el interés principal se concentra en la obtención de la potencia instantánea por la simple razón que proporciona medios para calcular la cantidad más importante, la potencia promedio (activa).

Otra importante medición de potencia, particularmente para periodos de corrientes y voltajes, es la potencia promedio. La potencia promedio es igual al porcentaje de la energía absorbida por un elemento, y es independiente del tiempo. Esta potencia, por ejemplo, que es monitoreada por la compañía eléctrica mes con mes en la facturación eléctrica. La potencia

promedio se encuentra desde los rangos de picowatts, en aplicaciones como comunicación satelital, hasta los megawatts, en aplicaciones como suministro eléctrico a grandes ciudades.

Existe la potencia reactiva para aquellas cargas inductivas o capacitivas, es una potencia que realmente no es consumida, ya que no produce trabajo útil debido a que su valor promedio es nulo.

Existe cierta simplicidad si la potencia es considerada de forma compleja. Se encuentra que la magnitud de la potencia compleja es la potencia aparente, y la parte real es la potencia promedio o real. También existe la otra componente, la parte imaginaria, que es conocida como potencia reactiva. La representación gráfica que se utiliza para la potencia compleja se conoce como triángulo de potencia. En tal representación se puede deducir que solo es necesario obtener dos cantidades de las tres potencias, la tercera puede ser obtenida por identidades trigonométricas. La medición de la potencia real puede obtenerse de un wattímetro ósea activa consumida por un equipo, mientras que con un vármetro puede obtener la potencia reactiva. Aunque, es muy común ahora que con un dispositivo se obtengan, no solo estas dos potencias, si no, la aparente también.

1.2.1 Potencia instantánea

La potencia instantánea que se suministra a cualquier dispositivo está dada por el producto de la tensión instantánea a través del dispositivo y la corriente instantánea que circula por él.

Se considera una potencia instantánea $p = vi$ donde v y i son periódicas del periodo T . Esto es, $v(t + T) = v(t)$, y $i(t + T) = i(t)$.

En este caso

$$p(t + T) = v(t + T)i(t + T) \tag{1.3}$$

$$= v(t)i(t) \tag{1.3a}$$

$$= p(t) \tag{1.3b}$$

Por lo tanto, la potencia instantánea es también periódica y p se repite cada T segundos.

El periodo T_p de p (el tiempo mínimo en que p se repite) es no necesariamente igual a T , sin embargo, T debe contener un número de integración de periodos T_p . En otras palabras,

$$T = nT_p \quad (1.4)$$

Donde n es un integrador positivo.

Si el dispositivo en cuestión consiste en una resistencia R , entonces la potencia quizá se exprese sólo en términos de su corriente o nada más mediante la corriente o tensión:

$$p(t) = v(t)i(t) = i^2(t)R = \frac{v^2(t)}{R} \quad (1.5)$$

Si la tensión y la corriente se asocian con un dispositivo que es completamente inductivo, entonces:

$$p(t) = v(t)i(t) = Li(t) \frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} v(t) \int_{-\infty}^t v(t') dt' \quad (1.6)$$

Donde se supone de manera arbitraria que la tensión es cero en $t = -\infty$. En el caso de un capacitor,

$$p(t) = v(t)i(t) = Cv(t) \frac{dv(t)}{dt} = \frac{1}{C} i(t) \int_{-\infty}^t i(t') dt' \quad (1.7)$$

Donde se hace un supuesto similar en relación con la corriente. Sin embargo, la lista de ecuaciones de la potencia en términos de solo una corriente o una tensión muy pronto se convierte en algo pesado y complicado, a medida que se comienzan a considerar redes más generales.

Si se tiene una fuente de tensión senoidal $V_m \cos \omega t$ para un circuito RL, la respuesta común en el dominio del tiempo está dada por

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta) \quad (1.8)$$

Donde

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad \text{y} \quad \theta = -\tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

Por lo tanto, la instantánea que se suministra a todo el circuito en el estado senoidal permanente es:

$$p(t) = v(t)i(t) = V_m i_m \cos(\omega t + \theta) \cos \omega t \quad (1.9)$$

Que es conveniente reescribir de la forma obtenida empleando la identidad trigonométrica el producto de dos funciones coseno. Por consiguiente,

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{2} [\cos(2\omega t + \theta) + \cos \theta] \quad (1.10)$$

$$= \frac{V_m I_m}{2} \cos \theta + \frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t + \theta) \quad (1.10a)$$

La última ecuación posee varias características válidas en general para circuitos en estado senoidal permanente. Un término, el primero, no es una función del tiempo, en tanto que el segundo término tiene una variación cíclica en el doble de la frecuencia aplicada. Debido a que el término es un onda coseno y en vista de que las ondas seno y las coseno tienen valores promedio de cero (cuando se promedia un número entero de periodos), este ejemplo sugiere que la potencia promedio (activa) corresponde a $\frac{1}{2} V_m I_m \cos \theta$; como se verá más adelante [2].

1.2.2 Potencia activa o promedio

Matemáticamente, el valor promedio de una función periódica está definida como el tiempo de integración de una función dentro de un periodo completo, dividido por periodos. Cuando se habla de un valor promedio de la potencia instantánea, se debe de definir con toda claridad el intervalo durante el que se lleva a cabo el proceso de promedio.

Por lo tanto, la potencia promedio P por un periodo de potencia instantánea p esta dado por

$$P = \frac{1}{T_p} \int_{t_1}^{t_1 + T_p} p \, dt \quad (1.11)$$

Donde t_1 es arbitrario, el valor promedio se denota con la letra mayúscula P , esto dado que no es una función del tiempo y suele aparecer sin ningún subíndice específico que la identifique como un valor promedio. Aunque P no es una función del tiempo, si depende del tiempo de integración, como en este caso es t_1 y T_p .

Si integramos todo un número de integración de periodos, sea mT_p (donde m un número positivo de integración), el área total es simplemente m tiempos de la integración anterior. Así que se escribe

$$P = \frac{1}{mT_p} \int_{t_1}^{t_1+mT_p} p \, dt \quad (1.12)$$

Si se selecciona a m como $T = mT_p$ (el periodo de v o i), entonces

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} p \, dt \quad (1.12a)$$

Por lo tanto, se puede obtener la potencia promedio integrando el periodo de p , o sobre el periodo de v o i .

Considerando un dispositivo general con dos entradas, considerándolo un tensión senoidal de

$$v = V_m \cos(\omega t - \theta_v) \quad (1.13)$$

Se tiene igualmente la corriente de

$$i = I_m \cos(\omega t - \theta_i) \quad (1.14)$$

Para algunas I_m y θ_i , desde en estado estable AC todas las corrientes y voltajes tienen la misma frecuencia.

La potencia promedio entregado al dispositivo, toma $t_1 = 0$ por conveniencia en (1.12a), es

$$P = \frac{\omega V_m I_m}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \cos(\omega t + \theta_v) \cos(\omega t + \theta_i) \, dt \quad (1.15)$$

Usando la identidad trigonométrica

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) \quad (1.16)$$

Reescribiendo la ecuación anterior

$$P = \frac{\omega V_m I_m}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \left[\frac{1}{2} \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) + \frac{1}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) \right] dt \quad (1.17)$$

Desde la integración para los dos periodos el primer término y el valor promedio de cada senoidal (con $\omega \neq 0$) es cero, la integración del primer término es cero. El segundo término es constante, y se tiene

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (1.18)$$

Así que la potencia promedio absorbida por dos terminales de un dispositivo es determinada por las amplitudes V_m y I_m y el ángulo θ que el voltaje adelanta a la corriente [3].

Ahora si se considera la potencia absorbida por una carga resistiva, por lo tanto, se tiene una diferencia de ángulo de fase igual a cero para la tensión y corriente. De modo que

$$P_R = \frac{1}{2} V_m I_m \cos \theta = \frac{1}{2} V_m I_m \quad (1.19)$$

O

$$P_R = \frac{1}{2} I_m^2 R \quad (1.20)$$

O

$$P_R = \frac{V_m^2}{2R} \quad (1.21)$$

Estas últimas dos fórmulas, que permiten determinar la potencia promedio entregada a una resistencia pura a partir del conocimiento de la corriente o de la tensión senoidal, son simples e importantes.

La potencia promedio entregada a cualquier dispositivo que es puramente reactivo (es decir, que no contiene resistencias) debe ser cero. Éste es un resultado directo de la diferencia de fase de 90° , que debe de existir entre la tensión y corriente; en consecuencia, $\cos(\theta - \varphi) = \cos \pm 90^\circ = 0$ y

$$P_x = 0$$

Por lo tanto se dice que la potencia promedio que se entrega en una red compuesta totalmente por inductores o capacitores ideales es cero.

1.2.3 Potencia reactiva

Esta potencia no tiene un carácter de ser consumida, si no, que aparece cuando se tiene en la red inductores o capacitores, en los circuitos donde se generan campos magnéticos o campos eléctricos. La origina la componente de la corriente que está a 90° con respecto a la tensión, ya sea en adelanto o en retraso. La potencia activa tiene un valor nulo en los casos donde existen cargas puramente inductiva o capacitiva, por lo que no se produce trabajo útil y es aquí donde aparece la potencia reactiva designada con la letra mayúscula Q.

La potencia instantánea desarrollada está dada por:

$$p = \frac{V_m I_m}{2} \cos \theta (1 + \cos 2\omega t) + \frac{V_m I_m}{2} \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} 2\omega t \quad (1.22)$$

En donde el segundo término que contiene a $\operatorname{sen} \theta$ es altamente positivo o negativo t tiene un valor promedio de cero. Esta componente de la potencia instantánea p se denomina potencia instantánea reactiva y expresa el flujo de energía desde la carga y hacia la carga alternamente.

El valor máximo de esta potencia pulsante, designada por Q, se llama la potencia reactiva o voltiamperios reactivos y es muy útil en la descripción de la operación de un sistema de potencia. La potencia reactiva es

$$Q = \frac{V_m I_m}{2} \operatorname{sen} \theta \quad (1.23)$$

O

$$Q = |V| \cdot |I| \text{sen } \theta \quad (1.24)$$

La raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de P y Q es igual al producto de $|V|$ y $|I|$, para

$$\sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(|V| \cdot |I| \cos \theta)^2 + (|V| \cdot |I| \text{sen } \theta)^2} = |V| \cdot |I| \quad (1.25)$$

Es claro que P y Q son de las mismas unidades, pero es usual designar las unidades de Q como vars (de voltioamperios reactivos). Las unidades de Q son más prácticas en kilovars o megavars [4].

1.2.4 Potencia Aparente

Se supone que la tensión:

$$v = V_m \cos(\omega t + \theta) \quad (1.26)$$

Se aplica a una red, y la corriente senoidal resultante es

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.27)$$

De esta forma, el ángulo de fase mediante el cual la tensión adelanta a la corriente es $(\theta - \varphi)$.

La potencia promedio que se entrega a la red, suponiendo una convención pasiva de signos en sus terminales de entrada, se expresa en términos de valores máximos:

$$P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta - \varphi) \quad (1.28)$$

Si las respuestas en términos aplicadas fueron cantidades cd, la potencia promedio entregada a la red habría sido simplemente igual al producto de la tensión por la corriente. Al aplicar este método de cd al problema senoidal, se debe obtener el valor de la potencia absorbida, que está dada aparentemente por el producto $\frac{1}{2} V_m * I_m$ o $V_{efe} I_{efe}$ este último hablando de valores efectivos que se explicaran más adelante. Sin embargo, este producto de los valores eficaces de la tensión y corriente no es la potencia promedio; aquí es a lo que se le conoce

como potencia aparente. En términos dimensionales, la potencia aparente debe de medir en las mismas unidades que la potencia activa, pues $\cos(\theta - \varphi)$ es adimensional, pero para evitar confusiones, se aplica el término volt-amperes o VA a la potencia aparente. Puesto que $\cos(\theta - \varphi)$ no puede tener una magnitud mayor que la unidad, resulta evidente que la magnitud de la potencia real no es mayor que la potencia aparente.

La proporción entre la potencia real o promedio (activa) y la potencia aparente recibe el nombre de factor de potencia y se simboliza como FP. En consecuencia,

$$FP = \frac{\text{Potencia promedio}}{\text{Potencia aparente}} = \frac{P}{V_{efe}I_{efe}} \quad (1.29)$$

En caso senoidal el factor de potencia no es más que $\cos(\theta - \varphi)$, donde $(\theta - \varphi)$ es el ángulo mediante el cual la tensión adelanta a la corriente. Esta relación es la razón por la cual el ángulo $(\theta - \varphi)$ se conoce a menudo como ángulo de FP.

En el caso de una carga puramente resistiva, la tensión y la corriente están en fase, $(\theta - \varphi)$ es igual a cero y el FP es igual a la unidad. En otras palabras la potencia aparente y la real son iguales. Sin embargo, el FP unitario también se obtendrá en el caso de cargas que contengan inductancia y capacitancia, si los valores de los elementos y la frecuencia de operación se eligen con cuidado, a fin de proporcionar una impedancia de entrada que tenga un ángulo de fase cero. Una carga puramente reactiva, esto es, que no contenga resistencia, ocasionará una diferencia de fase entre la tensión y la corriente de más o menos 90° , por lo cual el FP es cero [2].

1.3 Valores RMS

En esta sección se define el cálculo del valor RMS, partiendo de la explicación de las diferencias del valor eficaz con los valores instantáneos y valores pico. También se menciona la diferencia entre los valores analógicos y digitales.

1.3.1 Teórico

Es de saber que las personas son conscientes que la tensión disponible en los receptáculos en sus hogares es de 127 volts y con una frecuencia de 60 Hz, en cualquier otro lado es

típicamente de 220 volts a 50 Hz. Lo que se entiende por 127 volts no es en realidad el valor instantáneo de la tensión que se suministra, dado que esta no es constante. De igual manera tampoco puede ser la amplitud simbolizada por V_m , si se presenta la forma de onda de la tensión en un osciloscopio calibrado, se descubrirá que la amplitud de la onda es $127\sqrt{2}$ o 179.60 volts. Tampoco se podría considerar como un valor promedio de la onda senoidal dado que para este tipo de señal el valor promedio es cero. Los 127 volts es una medida del valor eficaz de la onda senoidal. Este valor es una medida de la eficiencia que es obtenida cuando es suministrada una tensión con onda senoidal a una carga resistiva.

El valor eficaz puede ser considerado tanto para una tensión como para una corriente periódica. Si se toma una corriente periódica el valor eficaz de esta sería igual al valor de una corriente continua, que al fluir por una resistencia entrega la misma potencia promedio que la corriente periódica.

En otras palabras, se deja que una corriente periódica dada fluya por la resistencia, se determina la potencia instantánea i^2R , y luego se obtiene el valor promedio de i^2R sobre un periodo; esto es la potencia promedio (activa). Se provoca después que una corriente directa fluya por esta misma resistencia y se ajuste el valor de la corriente directa hasta que se obtenga el mismo valor de potencia promedio. La magnitud resultante de la corriente directa es igual al valor eficaz de la corriente periódica dada [2]. Esto se ilustra en la Figura 1.7.

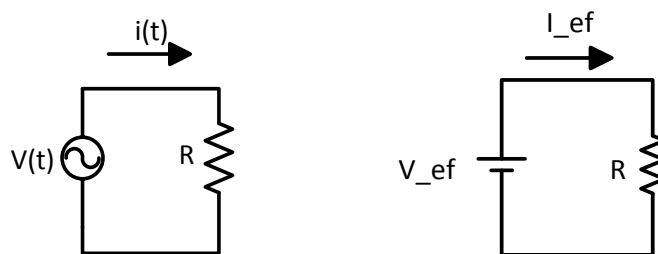


Figura 1.7. Si la resistencia recibe la misma potencia promedio en ambos circuitos, entonces el valor eficaz de $i(t)$ es igual I_{ef} y el valor de $v(t)$ es igual a V_{ef} .

La expresión matemática general del valor eficaz se obtiene de la siguiente manera. Contando con la potencia promedio (activa) que entra la corriente periódica $i(t)$ a la resistencia se obtiene mediante

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt = \frac{R}{T} \int_0^T i^2 dt \quad (1.30)$$

Donde el periodo de $i(t)$ es T .

La potencia que entrega la corriente continua corresponde a

$$P = I_{ef}^2 R \quad (1.31)$$

Igualando las expresiones de potencia y despejando I_{ef} , se obtiene

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (1.32)$$

El resultado como se puede apreciar es independiente de la resistencia R , como debe de ser para que cuente con un desarrollo ventajoso. De igual manera se puede obtener una ecuación para el voltaje eficaz V_{ef} , simplemente sustituyendo i e I_{ef}^2 por v y V_{ef} , respectivamente. Analizando con cuidado la ecuación 1.32 se puede definir que la determinación del valor eficaz es la raíz (cuadrada) de la media del cuadrado, por esa razón, a menudo el valor eficaz se denomina como el valor de la *raíz cuadrada media* o simplemente el valor *RMS*.

Analizando el caso más importante para una onda senoidal, se tiene una corriente de

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta) \quad (1.33)$$

La cual cuenta con un periodo

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Y sustituyéndola en la ecuación (1.32), se obtiene el valor eficaz como

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cos^2(\omega t + \theta) dt} \quad (1.34)$$

$$= I_m \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega t + 2\theta) \right] dt} \quad (1.34a)$$

$$= I_m \sqrt{\frac{\omega}{4\pi} \left[t \right]_0^{2\pi/\omega}} \quad (1.34b)$$

$$= \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (1.34c)$$

De esta forma el valor eficaz de una corriente senoidal es la cantidad real independiente del ángulo de fase y numéricamente igual a $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ veces la amplitud de la corriente.

Es muy importante considerar que esta expresión para obtener el valor eficaz de la corriente o ya sea la tensión es estrictamente para ondas senoidales. En el caso, por ejemplo, de una onda diente de sierra el factor por el cual se divide la magnitud máxima es $\sqrt{3}$.

Para el cálculo de la potencia se simplifica utilizando valores eficaces, esto por ejemplo, calculando la potencia promedio, se calcula mediante

$$P = \frac{1}{2} I_m^2 R \quad (1.35)$$

Ahora utilizando valores eficaces, ósea sustituyendo $I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$

$$P = I_{ef}^2 R \quad (1.36)$$

Ha sido de gran ayuda eliminar el término $\frac{1}{2}$ de las expresiones, sin embargo, se debe tener cuidado cuando se den las ecuaciones, para identificar si se trata de valores máximos o rms. En la práctica, usualmente se suele utilizar valores rms para la áreas de transmisión o distribución de potencia y con maquinaria rotatoria; en la parte de electrónica y comunicaciones, se usa más a menudo la amplitud.

En el estado senoidal permanente, las tensiones y las corrientes fasorial se indican con valores eficaces o como amplitudes; las dos expresiones difieren solo de una factor de $\sqrt{2}$.

1.3.2 Práctico (Analógico - Digital)

A veces cuando se realiza alguna medición de corriente alterna es necesario convertir tal señal en una de corriente directa, con valor equivalente conocido como raíz media cuadrada o RMS.

Los circuitos electrónicos analógicos pueden usar un multiplicador analógico en una configuración específica que multiplica la señal de entrada por sí misma, promediando el resultado con un capacitor, y después calcula la raíz cuadrada del valor, o también pueden usar un circuito rectificador de onda completa para crear el valor absoluto de la señal de entrada, que es alimentado dentro de un amplificador operación arreglado para dar una función de transferencia exponencial, entonces duplica el voltaje y alimenta a un registro del amplificador como una forma de derivación de la ley cuadrada de la función de transferencia.

Si una forma de onda se ha digitalizado, entonces el valor RMS correcto se puede calcular directamente. La mayoría de los osciloscopios digitales y basados en PC incluyen una función para dar el valor RMS de una forma de onda. Obviamente, la precisión y el ancho de banda de la conversión son totalmente dependiente de la conversión de analógico a digital. En la mayoría de los casos, las mediciones de RMS se hacen en las formas de onda repetitivas, y en tales condiciones los osciloscopios digitales (y algunos multímetros de muestreo sofisticados) son capaces de lograr muy altos anchos de banda, ya que muestra a una fracción de la frecuencia de la señal para obtener un efecto estroboscópico.

CAPITULO II

Plataforma SINGLE-BOARD RIO y LABVIEW

Introducción

En este capítulo se da una descripción del dispositivo NI Single-Board RIO, desde su funcionamiento, las características con que cuenta, las distintas versiones que existen hasta las aplicaciones que se les da. Se menciona la forma de programación que se utiliza en el sbRIO con el programa de LabVIEW. Es descrito la interface que muestra LabVIEW, la definición de sus dos partes importantes, como es el panel frontal y el diagrama de bloques. Se describen las distintas herramientas que ofrecen en ambas ventadas del LabVIEW y las formas de visualizarlas. De igual manera se menciona lo importante y sus principales características de módulo FPGA que hacen una gran operación en conjunto con el sbRIO y el LabVIEW. Por último se hace notar los requerimientos tanto de software como de hardware para poder conectar el dispositivo NI sbRIO al programa de LabVIEW.

2.1 Descripción del Single-Board RIO

La plataforma NI Single-Board RIO combina dispositivos embebidos de despliegue que tienen un procesador en tiempo real, arreglo de compuertas programable en campo (FPGA) y I/O analógica y digital en una sola tarjeta programada con el software NI LabVIEW. Los dispositivos NI Single-Board RIO están diseñados para aplicaciones OEM embebidas de control y adquisición y de alto volumen que requieren alto rendimiento y fiabilidad.

NI Single-Board RIO es un sistema embebido y reconfigurable de control y adquisición que consiste en un procesador en tiempo real, FPGA programable por el usuario y I/O integrada y periféricos como USB, RS232, CAN y Ethernet, todo en una sola tarjeta [11].

Los sistemas de NI sbRIO están diferenciados por la velocidad del procesador, el tamaño del Field-Programmable Gate Array (FPGA), la cantidad de memoria, la expansión de conectividad, y combinaciones de I/O. Para mayor información de las características de distintos modelos se puede ver la Tabla 2.1. Todos los productores de NI sbRIO comparten la

arquitectura NI RIO, que incluye un procesador de tiempo real, una FPGA reconfigurable, y I/O.

Tabla 2.1. Sistemas NI Single-Board RIO [11].

| Model | Processor Speed (MHz) | Memory(DRAM) | FPGA Size | 3.3 V DIO | AI | AO | 24 V DI/DO Lines |
|------------|-----------------------|--------------|-----------|-----------|----|----|------------------|
| sbRIO-9601 | 266 | 64 MB | 1M | 110 | 0 | 0 | 0 |
| sbRIO-9602 | 400 | 128 MB | 2M | 110 | 0 | 0 | 0 |
| sbRIO-9605 | 400 | 128 MB | LX25 | 96 | 0 | 0 | 0 |
| sbRIO-9606 | 400 | 256 MB | LX45 | 96 | 0 | 0 | 0 |
| sbRIO-9611 | 266 | 64 MB | 1M | 110 | 32 | 0 | 0 |
| sbRIO-9612 | 400 | 128 MB | 2M | 110 | 32 | 0 | 0 |
| sbRIO-9623 | 400 | 128 MB | LX25 | 100 | 16 | 4 | 0 |
| sbRIO-9626 | 400 | 256 MB | LX45 | 100 | 16 | 4 | 0 |
| sbRIO-9631 | 266 | 64 MB | 1M | 110 | 32 | 4 | 0 |
| sbRIO-9632 | 400 | 128 MB | 2M | 110 | 32 | 4 | 0 |
| sbRIO-9633 | 400 | 128 MB | LX25 | 28 | 16 | 4 | 0 |
| sbRIO-9636 | 400 | 256 MB | LX45 | 28 | 16 | 4 | 0 |
| sbRIO-9641 | 266 | 64 MB | 1M | 110 | 32 | 4 | 32/32 |
| sbRIO-9642 | 400 | 128 MB | 2M | 110 | 32 | 4 | 32/32 |

Existen varios displays que son compatible con sbRIO, uno de ellos es el NI human machine interfaces (HMIs). Este incluye pantallas táctiles el NI TPC-2006 y el TPC-2012. Si se requiere un display para el sistema embebido, más simple, de costo menor existe el several serial-based (RS232) que ha sido probado con el sbRIO. Este incluye simple tipo de LCDs y mayor complejo LCDs con alta calidad de color e interfaces del panel táctil.

Adicionalmente para crear I/O, NI sbRIO ofrece dos métodos primarios para expandir el número y tipos disponibles de I/O. Los sbRIO-9605, sbRIO-9606, sbRIO-9623, y sbRIO-9626 ofrece una tarjeta de conexión RIO Mezzanine, la cual cuenta con un gran ancho de banda, conector de alta densidad proporcionando acceso directo a líneas de FPGA DIO y funciones específicas del procesador. La tarjeta de conexión RIO Mezzanine es el principal método para la interface de las tarjetas RIO Mezzanine, o tarjetas secundarias, con el NI sbRIO.

NI sbRIO ofrece acceso directo de hardware a los circuitos de I/O de cada módulo usando funciones elementales de I/O de NI LabVIEW FPGA. Cada módulo de I/O contiene acondicionamiento de señales integrado y conectores de terminal de tornillo, BNC o D-Sub.

Los dispositivos NI sbRIO que tienen conectores directos de la Serie C soportan hasta tres módulos de tarjeta únicamente de la Serie C o dos módulos de la Serie C.

Los dispositivos NI Single-Board RIO que no cuenta con una tarjeta de conexión RIO Mezzanine cuentan con tres ranuras de expansión disponibles solo para las versiones de los módulos de C Series I/O. Adicionalmente todos los módulos C Series para prototipos con CompacRIO son compatibles con el NI sbRIO. Los módulos C Series para el cRIO son ligeramente más grandes que las versiones de sólo tablero, entonces ellos se superponen con las ranuras vecinas de los dispositivos NI sbRIO. Por lo tanto, si se utiliza algún módulo de C Series para el cRIO con NI sbRIO, solo se puede utilizar solamente dos de las ranuras de expansión. Los dispositivos NI sbRIO que tienen un conector de Tarjeta RIO Mezzanine, como la NI sbRIO-9605 y sbRIO-9606, no tienen soporte para conexión directa a los módulos de la Serie C. En las figuras 2.1 y 2.2 se pueden apreciar al sbRIO con tres módulos de expansión de I/O tipo tarjeta de la salida C y el sbRIO con dos módulos de expansión de I/O de la salida C.

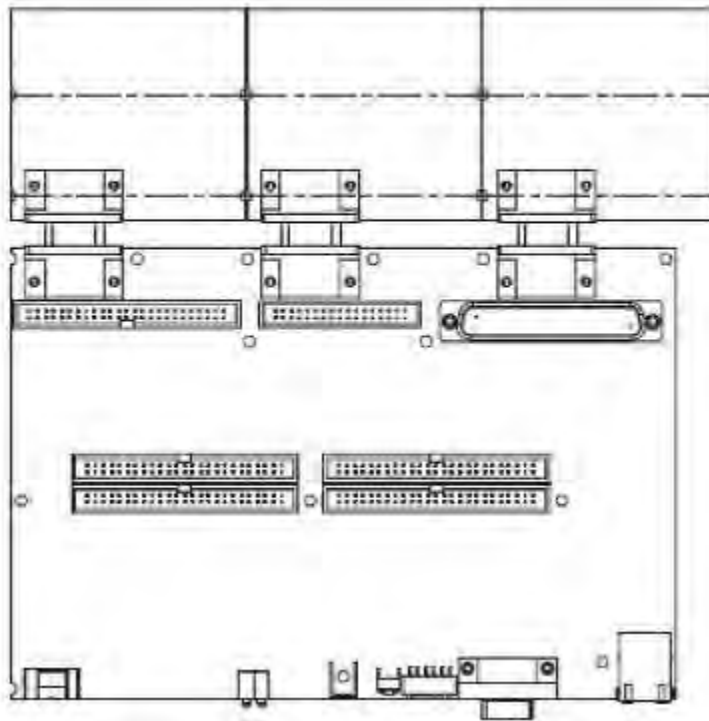


Figura 2.1. SbRIO con dos módulos de expansión de I/O de la salida C [11].

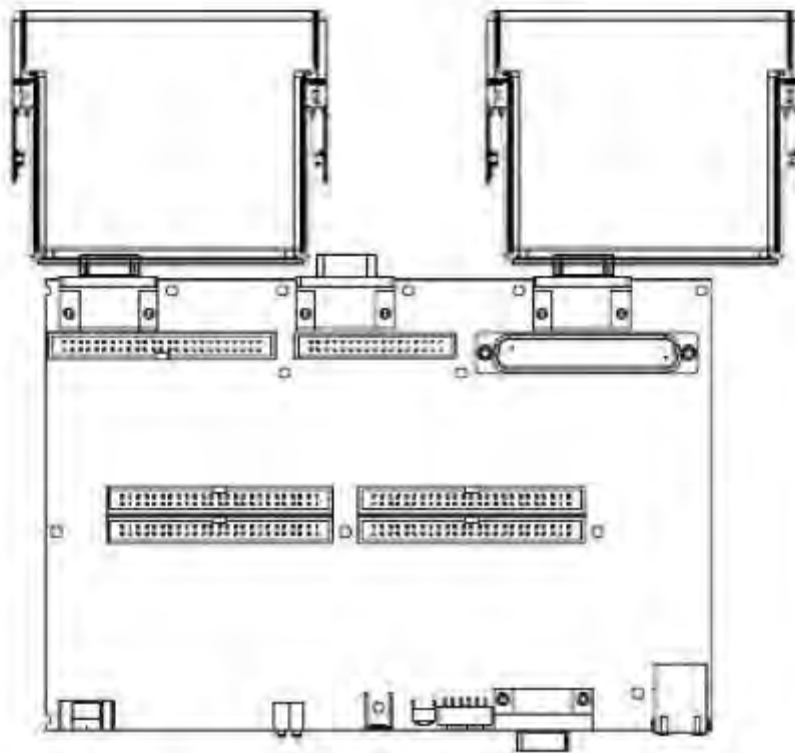


Figura 2.2 SbrRIO con C Series I/O módulos de expansión adjuntos de dos niveles de junta [11].

Los productos NI Single-Board RIO tienen las siguientes especificaciones y certificaciones:

- Temperatura de almacenamiento de -20 a 70 °C
- Temperatura de operación de -20 a 55 °C
- Entrada de fuente de poder de 19-30 Vcd
- Cumple con RoHS
- Reconocido por la UL (por sus siglas en inglés, Underwriters Laboratories) para seguridad.

CompactRIO y NI Single-Board RIO comparten la misma arquitectura de hardware incluyendo un procesador en tiempo real, un FPGA reconfigurable, y I/O análogas y digitales. Debido a esta arquitectura común, el migrar código entre cRIO y NI sbRIO es fácil.

En la mayoría de los casos, el único cambio necesario para portar una aplicación cRIO a NI sbRIO es mapear las I/O existentes utilizadas en el VI del FPGA en el cRIO a las I/O disponibles en NI sbRIO. El resto del código en LabVIEW Real-Time y FPGA se migra automáticamente y se reutiliza cuando se descarga la aplicación existente sobre NI sbRIO en el proyecto de LabVIEW. Después de asegurar que las I/O fueron migradas correctamente al proyecto, el paso final es simplemente recompilar el VI de FPGA. LabVIEW maneja automáticamente todos los cambios potenciales entre cRIO y NI sbRIO [11].

El Single-Board RIO que se utilizará en la programación de proyecto es el sbRIO-9606. Este dispositivo embebido de control y adquisición integra un procesador en tiempo real, un a FPGA reconfigurable por el usuario y I/S en una sola tarjeta de circuito impreso (PCB). Tiene un procesador industrial de 400 MHz, un FPGA Xilinx Spartan-6 LX45 y un conector de tarjeta RIO Mezzanine, el cual es un conector de alta densidad y alto ancho de banda que permite acceso directo al procesador y las 96 líneas FPGA de I/O digital de 3.3 V. El sbRIO-9606 ofrece rango de temperatura de operación ambiente y local de -40 a 85 °C junto con un rango de entrada de suministro de potencia de 9 a 30 VDC. Brinda 256 MB de DRAM para operación embebida y 512 MB de memoria no volátil para almacenamiento de programas y registro de datos [12].

Este dispositivo cuenta con un puerto de Ethernet de 10/100 Mbits/s que puede ser usado para llevar a cabo comunicación programática en la red y Web integrada (HTTP) y servidores de archivos (FTP). El sbRIO-9606 también tiene puertos CAN, serial RS232 y USB integrados para controlar dispositivos periféricos.

El sbRIO-9606 está diseñado para ser fácilmente embebido en aplicaciones de alto volumen que requieren flexibilidad, fiabilidad y alto rendimiento. NI Single-Board RIO se vende únicamente en cantidades OEM. Los sistemas NI CompactRIO son ideales para aplicaciones de volumen bajo y medio y rápida generación de prototipos.

2.2 Programación

La programación de desarrollar desde el programa NI LabVIEW, el cual es la herramienta de desarrollo para programar todos los aspectos de su aplicación embebida NI Single-Board

RIO. LabVIEW es un lenguaje de programación gráfica donde las funciones se representan como iconos y los datos “fluyen” entre funciones sobre cables.

La programación de NI Single-Board RIO requiere el Módulo de LabVIEW Real-Time para crear aplicaciones que corran en el procesador embebido. El Módulo NI LabVIEW Real-Time es una solución completa para crear sistemas embebidos autónomos y confiables con un enfoque de programación gráfica. Como un complemento del entorno desarrollo de LabVIEW, el módulo ayuda a desarrollar y depurar aplicaciones gráficas, las cuales se pueden descargar y ejecutar en dispositivos de hardware embebido como NI CompactRIO, NI CompactDAQ, PXI, sistemas de visión o el mismo Single-Board RIO.

También en la programación de sBRIO es requerido el módulo de LabVIEW FPGA para personalizar el hardware del FPGA. NI Developer Suite con la opción de despliegue de Real-Time y FPGA incluyen todas las herramientas mínimas de desarrollo de software necesarias para NI Single-Board RIO. LabVIEW y el Módulo LabVIEW FPGA proporcionan un ambiente de desarrollo gráfico para chips FPGA en objetivos de hardware de I/O (RIO) reconfigurables.

Con el Módulo LabVIEW FPGA, se puede desarrollar VIs FPGA en un servidor ejecutando Windows y LabVIEW compila e implementa el código de hardware. De igual manera se puede crear VIs de FPGA embebidos que combinan acceso directo a I/O con la lógica de LabVIEW definida por el usuario para definir hardware personalizado para aplicaciones como protocolos de comunicación digital, simulación de control en hardware y rápida generación de prototipos de control.

2.3 LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Es una plataforma entorno de desarrollo para un lenguaje de programación visual, llamado lenguaje G, de National Instruments. LabVIEW permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactivo basado en software. Se puede diseñar especificando un sistema funcional, el diagrama de bloques o una notación de diseño de ingeniería.

LabVIEW es a la vez compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otra área de aplicación, como por ejemplo Matlab y Multisim. Tiene la ventaja que permite una fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos (incluyendo adquisición de imágenes).

Una de las principales características de LabVIEW es que es relativamente fácil de usar, no es necesario ser un experto en el área de programación para poder realizar un programa que posiblemente pudiera ser algo difícil de realizar en otro lenguaje de programación.

Sin embargo al momento de trabajar en algún programa relacionado con temas específicos si es necesario conocer los conceptos de las aplicaciones para lo que se requiere el programa.

Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman *instrumentos virtuales*, o *VI*, (por sus siglas en inglés) esto porque se parece o su operación es similar a un instrumento físico, como osciloscopio o multímetros.

El instrumento virtual es definido como una capa de software y hardware que se le agrega a un PC en tal forma que permite a los usuarios interactuar con la computadora como si estuviesen utilizando su propio instrumento electrónico “hecho a la medida”.

La aplicación que le dan los ingenieros a LabVIEW es principalmente para la manipulación de datos, por lo cual, la conectividad del software con la PC y dispositivos o circuitos externos es muy importante, los tipos de interface con los que se puede conectar LabVIEW son:

- Puerto serial
- Puerto paralelo
- GPIB
- PXI
- VXI
- TCP/IP
- Irda
- Bluetooth
- USB

- OPC

Entre otros.

Se puede usar también LabVIEW para comunicarse con hardware como adquisición de datos, visión, y movimiento de dispositivos de control, y dispositivos tal GPIB, PXI, VXI, RS-232, y RS-484. LabVIEW también ha sido construido con las características de Web usando LabVIEW Web Server y programas estándares como TCP/IP y ActiveX [8].

Mediante el uso de LabVIEW se pueden crear pruebas y mediciones, adquisición de datos, control de instrumentos, registro de datos, mediciones de análisis, y aplicaciones de generación de reporte.

Cada VI en LabVIEW está compuesto por dos partes importantes, el panel frontal o interface con el usuario y el diagrama de bloques o código fuente y una tercera parte el icono y conector como se aprecia en la Figura 2.3.

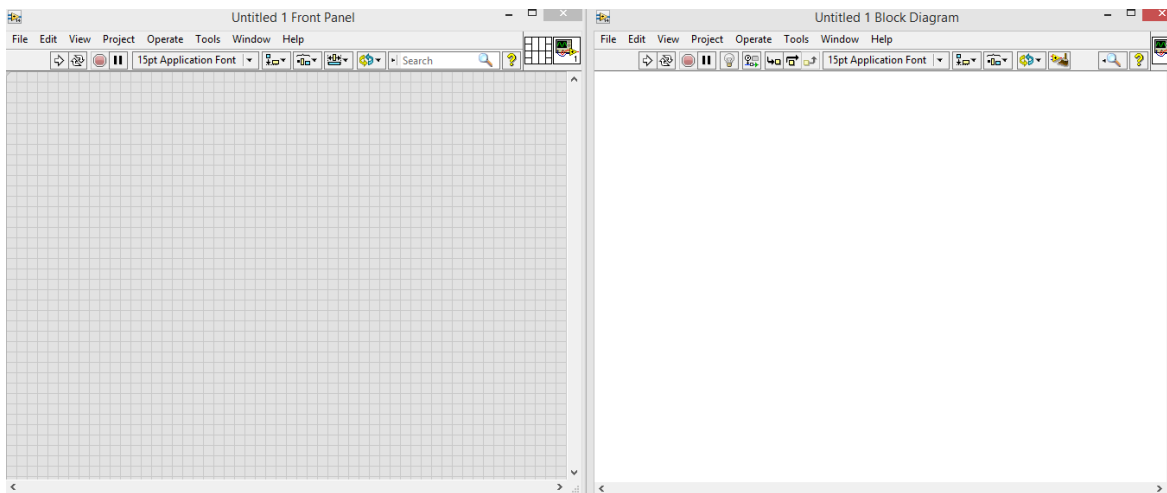


Figura 2.3. Panel Frontal y Diagrama de Bloques LabVIEW

Se construye una interface de usuario o panel frontal, con controladores e indicadores. Los controles pueden ser perrillas, pulsadores, selectores, y otros tipos de dispositivos de entrada. Los controles son objetos que sirven para para entrar datos al programa y pueden ser manipulados por el usuario. Los controles son variables de entrada. Los indicadores pueden ser gráficas, LEDs, entre otros tipos de displays. Los indicadores sirven para representar los

resultados dados por el programa y no se pueden manipular por el usuario. Los indicadores son variables de salida. Cuando construyes en la interface de usuario en donde has agregado algunas estructuras en el control de objetos, de igual manera se ha añadido código, este código se encuentra en el diagrama de bloques. En algunos casos el diagrama de bloque se asemeja a un diagrama de flujo. En la Figura 2.4 se ilustra un VI en donde se aprecia el diagrama de bloques y el panel frontal.

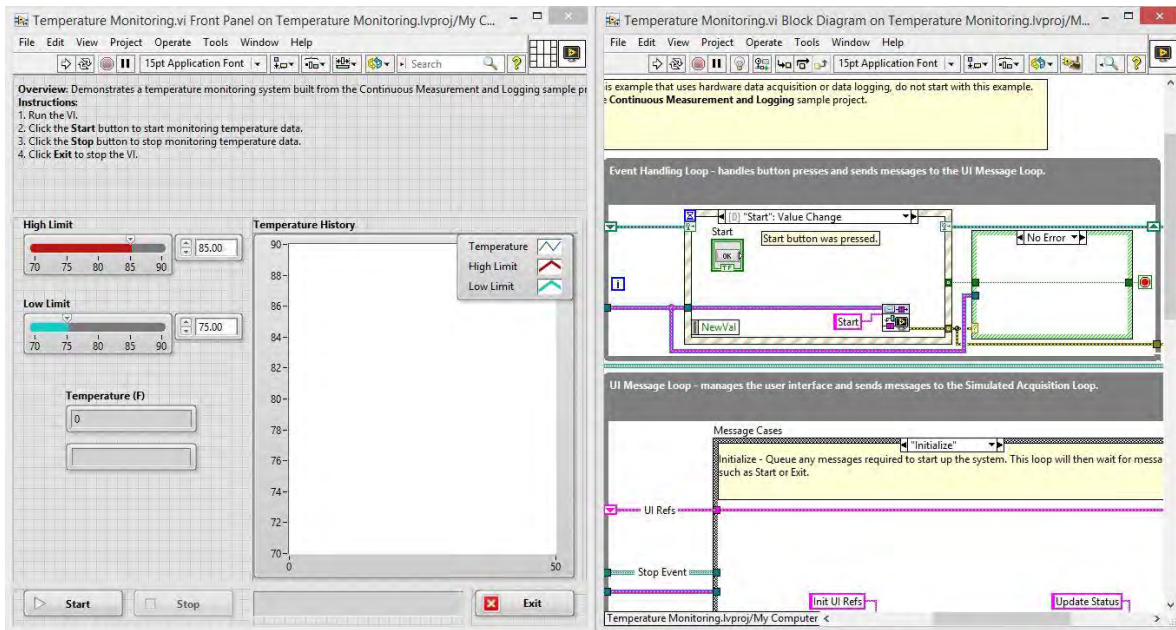


Figura 2.4. Ejemplo VI Controles e Indicadores

El diagrama de bloques contiene el código fuente gráfico del VI, posee funciones y estructuras que relacionan las entradas con las salidas creadas en el panel frontal.

El diagrama de bloques contiene de manera gráfica la fuente de código, conocido como código G o código de diagrama, donde se muestra como el VI es corrido.

El código del diagrama de bloques usa representación gráfica de funciones de control procedentes del panel frontal. Los objetos del panel frontal aparecen como iconos en el panel frontal. Se conectan los controles e indicadores a Express Vis, VIs, y funciones. Los datos a través del cable pueden ir en diferentes caminos; desde controles a VIs y funciones, desde VIs y funciones a indicadores, y desde VIs y funciones a otro VIs y funciones. El movimiento

de los datos a través de los nodos en el diagrama de bloques determina el orden de ejecución de los VIs y funciones. Este movimiento de datos es conocido como programación de flujo de datos [9].

Existe una paleta de herramientas disponible tanto en el panel frontal como en el diagrama de bloques para modificar sus contenidos. Se llama herramienta a un modo especial de operar del puntero del ratón, Figura 2.5. El cursor toma el aspecto del icono de la herramienta seleccionada en la paleta. Se utilizan las herramientas para operar y modificar los contenidos del panel de control y del diagrama de bloques.

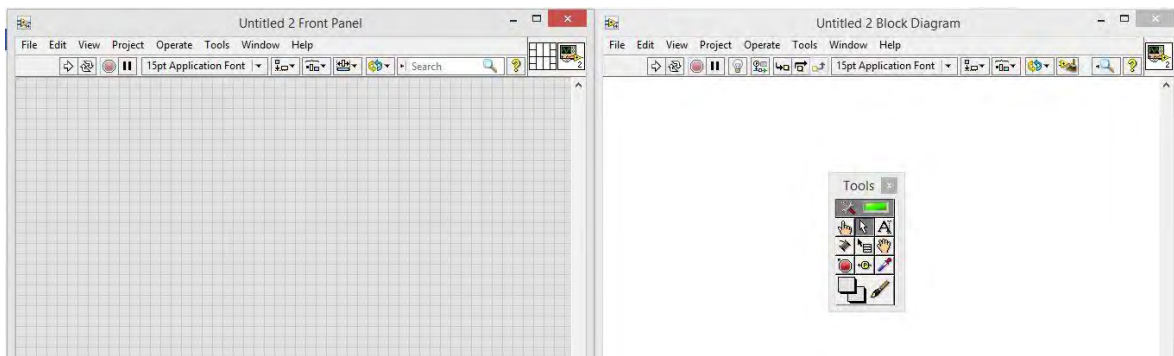


Figura 2.5. Paleta de Herramientas

Para generar el panel frontal se colocan controles e indicadores de la paleta de controles, Figura 2.6. Cada icono contiene controles para colocar en el panel frontal. Es aquí donde se encuentran los controles e indicadores que se utilicen en el desarrollo del programa. En donde al agregarlos en panel frontal como ya se menciona anteriormente van apareciendo en al diagrama de bloques.

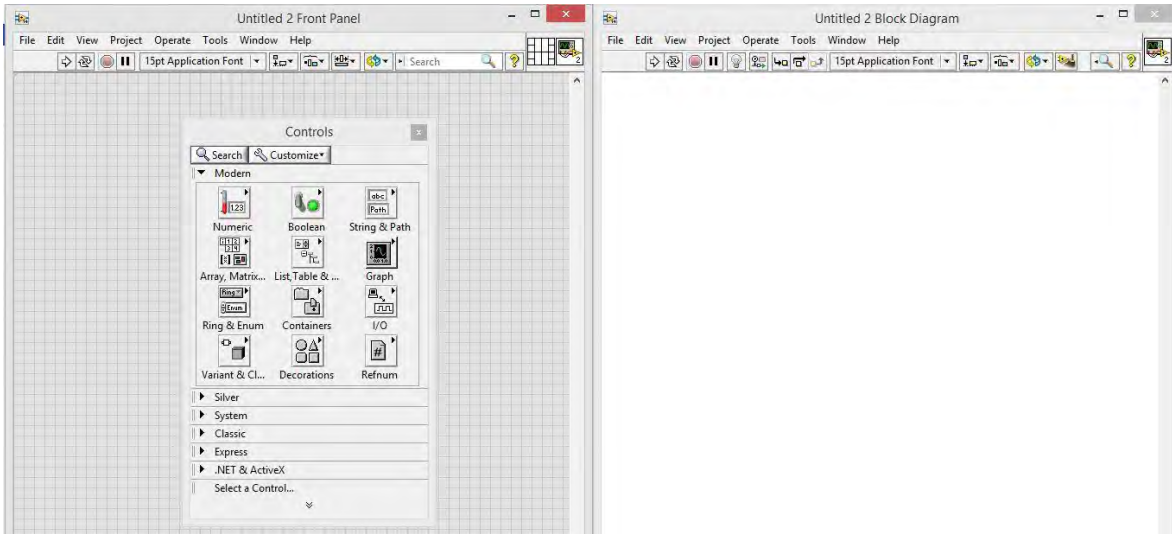


Figura 2.6. Paleta de Controles

Para construir el diagrama de bloques se usan las terminales generadas en el panel de control por los controles e indicadores, y los VIs, funciones y estructuras de la paleta de funciones ilustrado en la Figura 2.7. Cada icono de la paleta representa una subpaleta, la cual contiene VIs y funciones para colocar en el diagrama de bloques. Las estructuras, VIs y funciones (llamados en conjunto nodos) de la paleta de funciones proporcionan la funcionalidad al VI. Cuando se añaden nodos a un diagrama de bloques, se pueden conectar entre si y a los terminales generados por los controles e indicadores del panel de control mediante la herramienta de conexión de la paleta de herramientas.

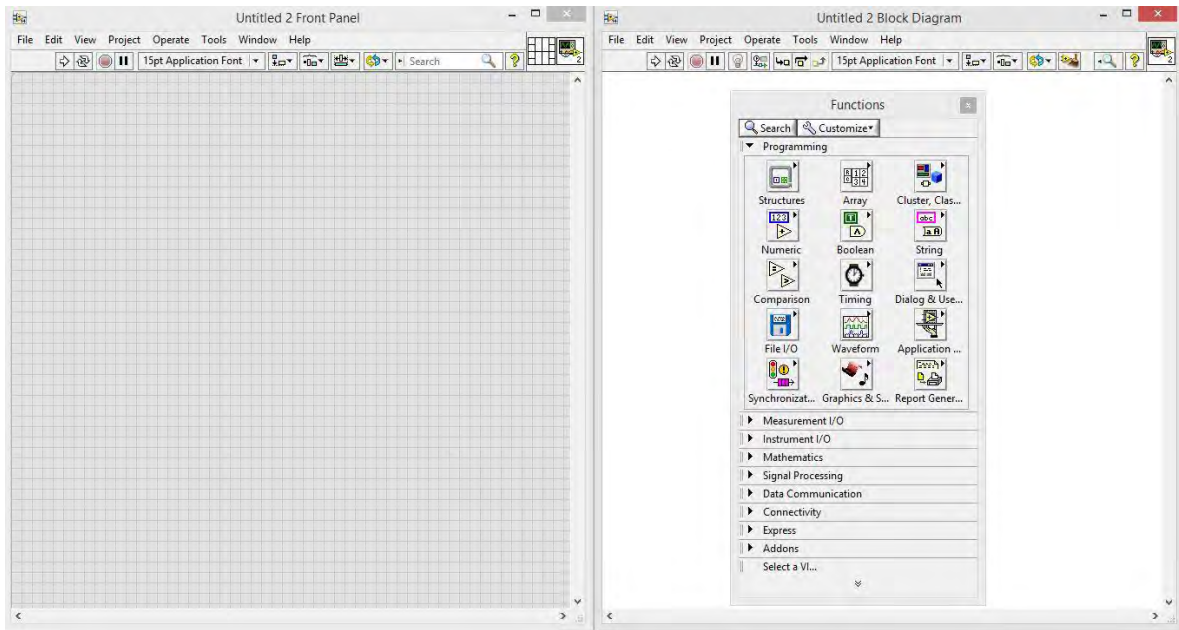


Figura 2.7. Paleta de Funciones

Los objetos en la ventana del panel frontal aparecen como terminales en el diagrama de bloques. Las terminales son puertos de entrada y salida que intercambian información entre el panel frontal y diagrama de bloques. Son análogos a parámetros y constantes en lenguajes de programación basados en texto. Los tipos de terminales incluyen terminales de control o indicador y terminales de nodo. Las terminales de control e indicador pertenecen a los controles e indicadores del panel frontal. Los puntos de datos que usted proporciona en los controles del panel frontal pasan al diagrama de bloques a través de las terminales de control [10].

La programación tradicional basada en texto, la ejecución o flujo de programa se realiza de arriba abajo, es decir se ejecuta de línea a línea.

LabVIEW se basa en programación gráfica, donde la ejecución en lugar de realizarse de arriba abajo, opera bajo el concepto de flujo de datos. Al ser una programación gráfica, el aspecto de diagrama de bloques es como el de un diagrama de flujo. Cada nodo del programa que ejecuta un subVI o una función determinada, no se ejecuta hasta que en sus entradas estén presentes los datos necesarios, de esta manera, a la salida no aparecerá el resultado

hasta que se haya ejecutado el nodo. Los nodos están conectados entre sí mediante “cables”, así que el flujo de ejecución sigue el flujo de los datos de un nodo a otro.

2.4 Toolbox FPGA

El Módulo NI LabVIEW FPGA extiende la plataforma de desarrollo gráfico de LabVIEW para programar FPGAs en hardware de I/O reconfigurables (RIO) de NI. LabVIEW FPGA brinda a los desarrolladores la habilidad de diseñar de manera más eficiente y efectiva sistemas complejos al proporcionar un entorno de desarrollo altamente integrado, un gran ecosistema de bibliotecas de IP, un simulador de alta fidelidad y características de depuración [13].

Con el módulo FPGA se puede configurar el comportamiento reconfigurable del FPGA para igualar los requerimientos de un sistema específico de medición y control. Cuando se tiene un hardware estándar en donde no cumple con los requerimientos para una aplicación específica ante el módulo FPGA, se tiene que crear un diseño personalizado del hardware usando una descripción del lenguaje del hardware de bajo nivel. Con el módulo FPGA, no se tiene que conocer la descripción del lenguaje del hardware para diseñar la solución de un específico hardware, solo es necesario LabVIEW. Con el módulo FPGA, se puede diseñar rápidamente el desarrollo de los componentes del hardware con el poder de la programación gráfica de LabVIEW.

El módulo FPGA es ideal para la programación de aplicaciones que exige el funcionamiento de los siguientes:

- Personalizar I/O: Modificado de línea digitales y analógicas con contadores personalizados, codificadores y moduladores de ancho de pulso (PWMs, por su siglas en inglés, Pulse Width Modulators).
- Toma de decisiones a bordo: control, filtro digital y decisiones booleanas.
- Fuente de sincronización: tiempo de precisión en las fuentes del dispositivo FPGA, como entradas analógicas (AI), salidas analógicas (AO), entradas y salidas digitales (DIO), contadores, y PWMs, así como sincronización entre varios dispositivos.

Con el módulo FPGA se incrementan la funcionalidad de las soluciones en LabVIEW. La operación de módulo FPGA es independiente del LabVIEW, esto es, por ejemplo si se crea un FPGA VIs y el LabVIEW del *host computer*-la computadora la cual es quien monitorea y controla el dispositivo es dañado el FPGA continuará corriendo sin ningún problema.

Otra ventaja destacada del FPGA es que ejecuta operaciones de bloques en paralelo, esto cuando cierta parte del programa no depende de otra porción, fácilmente puede operar ambas partes paralelamente en el dispositivo FPGA. Como ejemplo esto se da cuando se tienen múltiples ciclos while en un diagrama de bloques cada uno tiene partes independientes del hardware. Por lo tanto, la multiplicidad de los ciclos while corre en el dispositivo FPGA [14].

2.5 Interconexión Single-Board RIO – LABVIEW

La interconexión del dispositivo NI sbRIO 9606 se lleva a cabo mediante el puerto Ethernet de 10/100Mbps/s en donde se da la comunicación programática en la red y Web integrada (HTTP) y servidor de archivos (FTP). También se tiene disponible los puertos CAM, serial RS232 y USB para los controles periféricos.

Para la interconexión del NI sbRIO se necesitan una serie de programas, son mostrados en la siguiente lista:

- LabVIEW 2011 SPI o posterior
- LabVIEW Real-Time Module 2011 o posterior
- LabVIEW FPGA Module 2011 SPI o posterior
- NI-RIO 4.1 o posterior

De igual forma es necesario tener el siguiente hardware para poder hacer uso del dispositivo sbRIO:

- Obviamente el dispositivo NI sbRIO
- Una fuente de poder de 9-30 VDC
- Conjunto de enchufe de energía
- Y el cable del Ethernet

Una vez que es conectado el dispositivo NI sbRIO a la fuente de poder y a la PC mediante el cable Ethernet se debe de verificar que la conexión es correcta y además es necesario entrar en Measurement & Automation Explorer (MAX) para asignarle una dirección IP al dispositivo. De esta forma se puede crear el programa y compilarlo en el sbRIO y darle la finalidad que se le requiera.

CAPITULO III

Desarrollo del sistema de medición

Introducción

En esta sección se describe el desarrollo del sistema de medición, definiendo cada uno de los elementos que se utilizaron. Se describen primeramente el sensor de voltaje utilizado y el sensor de corriente de igual manera. Posteriormente se hace mención de la etapa de adquisición de datos por parte de la tarjeta sbRIO y la tarjeta GPIC Mezzanine junto con la integración de los sensores a estas tarjetas. Finalmente se presenta toda la programación gráfica que se desarrolló en el programa de LabVIEW para la obtención de los parámetros de medición.

3.1 Sensores

Los sensores que se utilizaron para medir voltaje fueron tres transformadores de voltaje y para la medición de corriente tres transformadores de corriente tipo inductivo.

3.1.1 Voltaje de CA

El sensor de voltaje que se utilizó para medir voltaje de corriente alterna en la experimentación del proyecto es un transformador de voltaje, de la marca TRIAD Magnetics con código de identificación VPP10-250 de la clase 2.

El sensor de voltaje tiene una máxima potencia de 2.5 VA, con capacidad de entrada de 230 Vac a 50 o 60 Hz si la conexión se da en serie y con capacidad de entrada 115 Vac a 50 o 60 Hz para una conexión en paralelo. En el caso de la salida si se encuentra conectada en serie se tiene un valor de 10 V a 0.25 A y para una conexión en paralelo una salida de 5 V a 0.2 A.

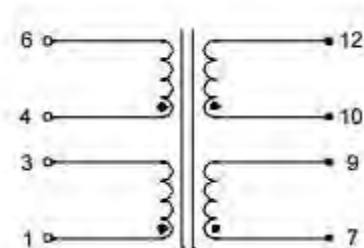


Figura 3.1. Esquema del transformador de voltaje.

En la Figura 3.1 se muestra el esquema del transformador de voltaje con 4 pines de entrada y 4 pines de salida. Para la entrada se puede hacer una conexión serie la cual consiste en unir el pin 4 con el pin 3, quedando como terminales de entrada principal el pin 6 y pin 1, para 230 V. Ahora si en la entrada se realiza la conexión en paralelo, entonces, se une el pin 4 con el 1 y el pin 6 con el 3, obteniendo una entrada de 115 V para las terminales principales del par de uniones que se hizo. En el caso de la salida para una conexión en serie se une en pin 9 con el 10 quedando el pin 12 y 7 como terminales de salida a un voltaje de 10 V a 0.25 A. Si la conexión de salida es en paralelo, las terminales de salida son la unión del pin 10 con el 7 y la unión del pin 12 con el 9, obteniendo una salida de 5 V a 0.5 A.

En las Figura 3.2 lado superior, Figura 3.3 lado lateral y Figura 3.4 lado inferior se muestra el esquema gráfico del transformador de voltaje. Las dimensiones del sensor están dadas en la Tabla 3.1, las unidades son mostradas en pulgadas.

Tabla 3.1. Dimensiones del transformador de voltaje

| A | B | C | D | E | F | G | H |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.062 | 1.125 | 0.187 | 0.200 | 0.250 | 1.312 | 1.625 | 1.000 |



Figura 3.2. Esquema gráfico del transformador de voltaje, lado superior.

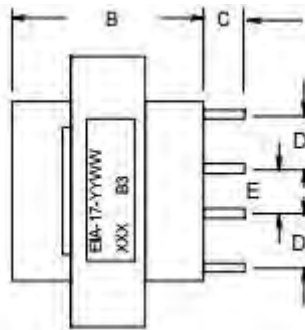


Figura 3.3. Esquema gráfico del transformador de voltaje, lado lateral.

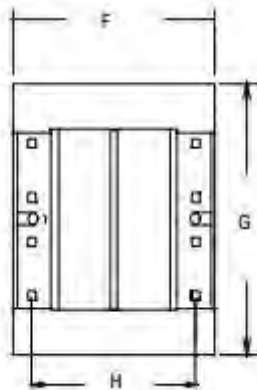


Figura 3.4. Esquema gráfico del transformador de voltaje, lado inferior.

Los tres transformadores que se utilizaron en la medición fueron conectados para la entrada en serie y para la salida en paralelo. Ya de manera física en la Figura 3.5 se muestra el transformador con las terminales de entrada y salida.



Figura 3.5. Sensor de medición de voltaje

El costo de cada sensor es de \$122.29 MXN, por lo tanto el costo de los tres sensores utilizados es de \$366.87 MXN.

3.1.2 Corriente de CA

Se utiliza un sensor transformador de corriente en las mediciones, del fabricante ACME ELECTRIC con código de fabricante AC-1010 y entrada de corriente en el primario de 10 amperes (A).

De las aplicaciones que se le puede dar al sensor son las siguientes:

- Detención de corriente de sobrecarga
- Detención de falla a tierra
- Medición
- De analógico a circuitos digitales

En la siguiente tabla se muestran las características eléctricas y mecánicas del sensor a una temperatura media de 20 °C.

Tabla 3.2. Especificaciones eléctricas y mecánicas del sensor TC.

| Especificaciones eléctricas | |
|--|-----------------------------|
| Corriente primaria | 10 a nominales, 30 A máxima |
| Relación de vueltas | 1000:1 nominal |
| Relación de voltaje por ampere a 10 A para una carga de 100 ohm. | 0.100 V/A |
| Relación de voltaje por ampere a 1 A para una carga de 100 ohm. | 0.097 V/A |
| Resistencia en DC a 20°C. | 41.8 ohm. |
| Voltaje de rigidez eléctrica (Hi-pot) | 4 KVrms |
| Especificaciones mecánicas | |
| Envoltura | Policarbonato |
| Encapsulado | Epoxi |
| Inflamabilidad | Ajusta al UL94-VO |
| Terminales | Pins de diámetro de 0.80 mm |
| Peso aproximado | 16.3 gramos |
| Tolerancia | +/- 0.2 mm |

Como es mostrado en las especificaciones eléctricas, en el sensor existe la transformación de una señal de corriente primaria a una salida de voltaje en valores pequeños comparados con lo que ingresa de corriente. Esto va depender de la carga en la cual se encuentre instalado el sensor. En la figura 3.5 se muestra las curvas de comportamiento del sensor para distintas cargas resistivas conectadas. Se muestra la relación existente entre la salida de voltaje contra la entrada de corriente.

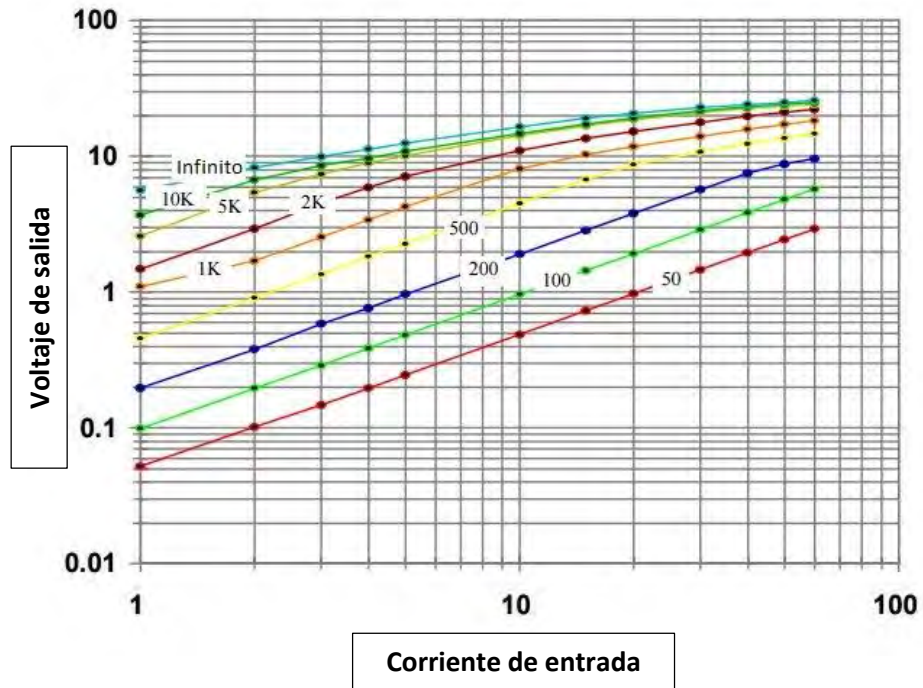


Figura 3.5. Curvas voltaje de salida vs corriente de entrada para distintas cargas resistivas

En la Figura 3.6 se muestran los distintos perfiles del sensor de corriente con sus respectivas dimensiones.

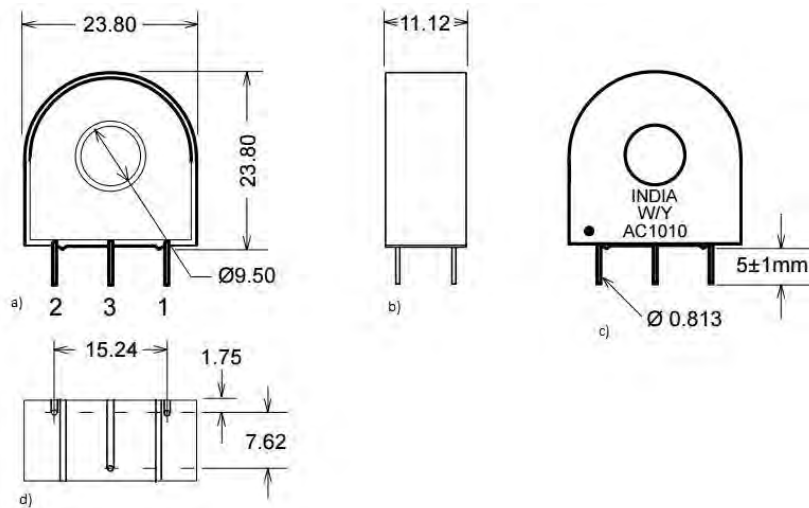


Figura 3.6. Perfiles y dimensiones del sensor de corriente, a) lado trasero, b) lado lateral, c) lado frontal y d) lado inferior.

El sensor de transformador de corriente lleva una resistencia de 100 ohm de 1/8 watts en el lado secundario. Como se puede apreciar en la Figura 3.6 el sensor cuenta con tres terminales, las terminales 1 y 2 son las salidas del transformador de corriente, mientras que la terminal tres solamente tiene la función de ayudar en el soporte del sensor. En la Figura 3.7 se ilustra el diagrama del transformador de corriente, donde se muestra la corriente en el lado primario y la corriente con la resistencia en paralelo del lado secundario.

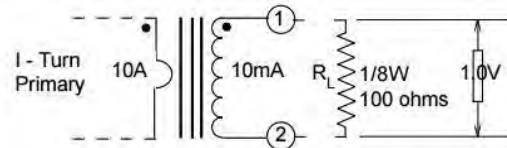


Figura 3.7. Diagrama de transformador de corriente

Para las mediciones realizadas de corriente trifásica se utilizaron tres sensores de corriente como lo es para el caso del voltaje. Los sensores ya soldados en una placa fenólica con sus terminales de salida son mostrados en la Figura 3.8.



Figura 3.8. Sensor de medición de corriente.

El costo de cada sensor de corriente es de \$197.58 MXN, por lo tanto el costo total de los tres sensores utilizados es de \$592.74 MXN.

3.2 Etapa de adquisición de datos

La conexión de los sensores de medición de tensión y corriente con el Single-Board RIO está determinado mediante una tarjeta de interface llamada General Purpose Inverter Controller (GPIC) RIO Mezzanine Card (RMC) el cual es un conector de alta velocidad y de ancho de banda que permite acceso directo a las líneas FPGA de I/O digital, así como en ciertas funciones específicas del procesador. Ésta tarjeta contiene entradas y salidas analógicas y digitales para la sbRIO, mostrada en la Figura 3.8 a) y b).

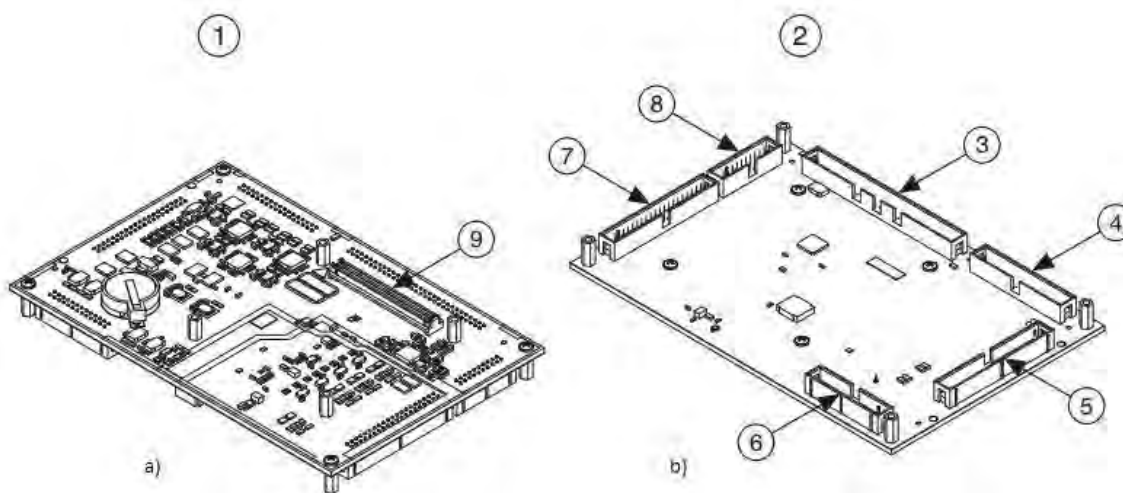


Figura 3.8. Tarjeta Mezzanine, a) lado primario y b) lado secundario.

| | | |
|-------------------|--|--------------------------------|
| 1 Lado primario | 4 Sourcing DI | 7 Simultaneas AI |
| 2 Lado secundario | 5 Sinking DO y Control de relevador DO | 8 Escaneada AI y AO |
| 3 LVTTTL DIO | 6 Medio puente DO | 9 Conector del sbRIO Mezzanine |

La tarjeta Mezzanine contiene varias ranuras de distintos tipos de valores. Ofrece conexiones para 16 canales de entrada analógica simultáneos con referencia a tierra aislada; ocho canales de entrada analógica escaneada; ocho canales de salida analógica, todos con protección para sobre-voltaje de ± 30 V; 28 canales de entrada digital tipo sourcing muestreados

simultáneamente; 14 canales push-pull de salida digital de medio puente; 24 canales de salida digital tipo sinking; cuatro canales de salida digital para control de relés y 32 canales de I/O digital LVTTL [15].

La tarjeta Mezzanine trabaja en conjunto con la tarjeta sbRIO 9606, la forma de acoplamiento entre ambas tarjetas es mostrada en la siguiente figura.

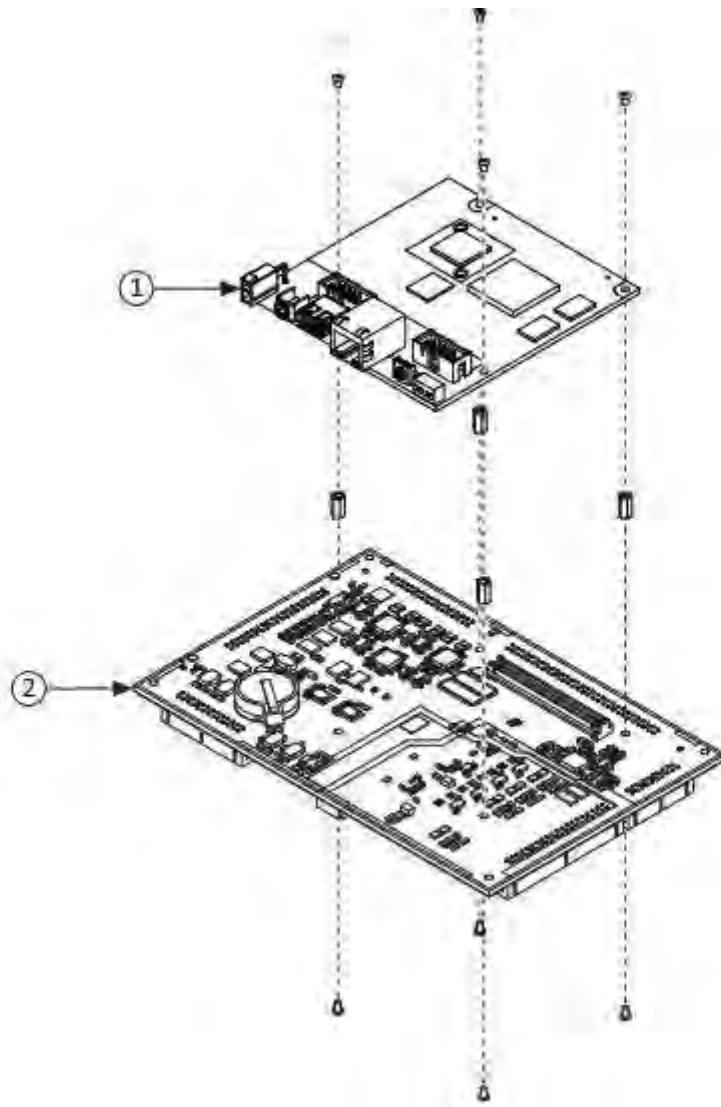


Figura 3.9. Acoplamiento entre la tarjeta sbRIO 9606 (1) y la tarjeta Mezzanine (2).

La ranura que se utilizó en el proyecto de las mediciones de tensión y corriente es la de entradas analógicas simultáneas. Aquí se conectan las terminales de los tres sensores de

tensión y los tres de corriente. En cada entrada AI+ y AI- se puede conectar una señal de voltaje. Internamente la entrada AI- es conectada a la referencia de tierra aislada a través de una resistencia de alto valor. La señal de entrada analógica es amortiguada y condicionada por amplificador diferencial y después muestreadas por un convertidor analógico-digital de 12 bits. Los rangos de entrada normalmente son de $\pm 5 V$ y $\pm 10 V$ con valores mínimos de $\pm 4.95 V$ y $\pm 9.90 V$. En las muestras por canal se obtiene una frecuencia de muestreo de 100 kS/s como máximo.

3.3 Integración de sensores y tarjetas

Los sensores tanto de corriente como de voltaje fueron conectados en la ranura de entradas analógicas simultáneas. El sensor de corriente para la fase A se conectó en la terminal AI8+, la fase B en la AI9+ y en el caso de la fase C en el pin AI10+. Para el caso de las tensiones la fase A fue conectada en el pin AI12+, la fase B en AI13+ y para conectar el la fase C se tuvo de conectar en la terminal AI7+ esto debido a mediciones erróneas que se estaban dando en el pin AI14, posiblemente debidas algún problema internamente de la tarjeta. En la Figura 3.10 se muestra la tarjeta sbRIO con la tarjeta Mezzanine que se utilizó.



Figura 3.10. Tarjeta sbRIO acoplada con la Mezzanine.

Los sensores de tensión fueron soldados en una pequeña placa en donde se colocaron cables en las terminales primarias y secundarias. Para el caso del lado secundario se soldaron dos resistencias de 10 ohm cada una de ellas y a la vez ambas conectadas en paralelo a las terminales del lado secundario. En la siguiente figura son mostrados los tres sensores de voltaje utilizados.



Figura 3.11. Sensores de voltaje

En el caso de los sensores de corriente de igual forma fueron soldados en una placa, para este caso sólo se tiene cableado en el lado secundario debido a la forma de sensor de corriente, como se verá en la Figura 3.12. En lado secundario se agregó en paralelo una resistencia de 100 ohm a sensor, obteniendo los sensores de medición como se muestran en la figura.

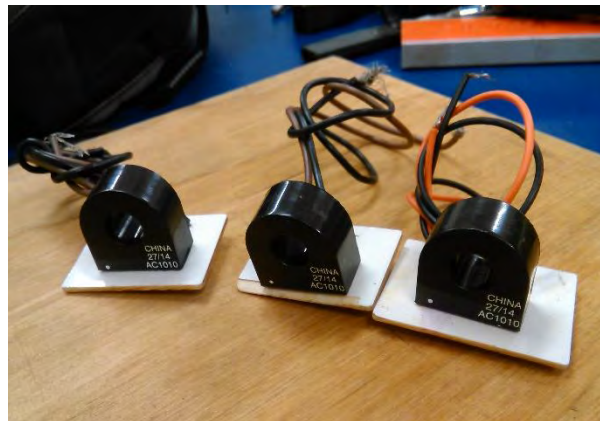


Figura 3.12. Sensores de corriente

A continuación se muestra en la Figura 3.12a el sistema de medición integrado en una sola placa. De esta forma se asegura un mejor manejo al momento de realizar las mediciones que se tengan que hacer, evitándose el desorden del cableado y que se pueda llegar a medir de manera incorrecta.

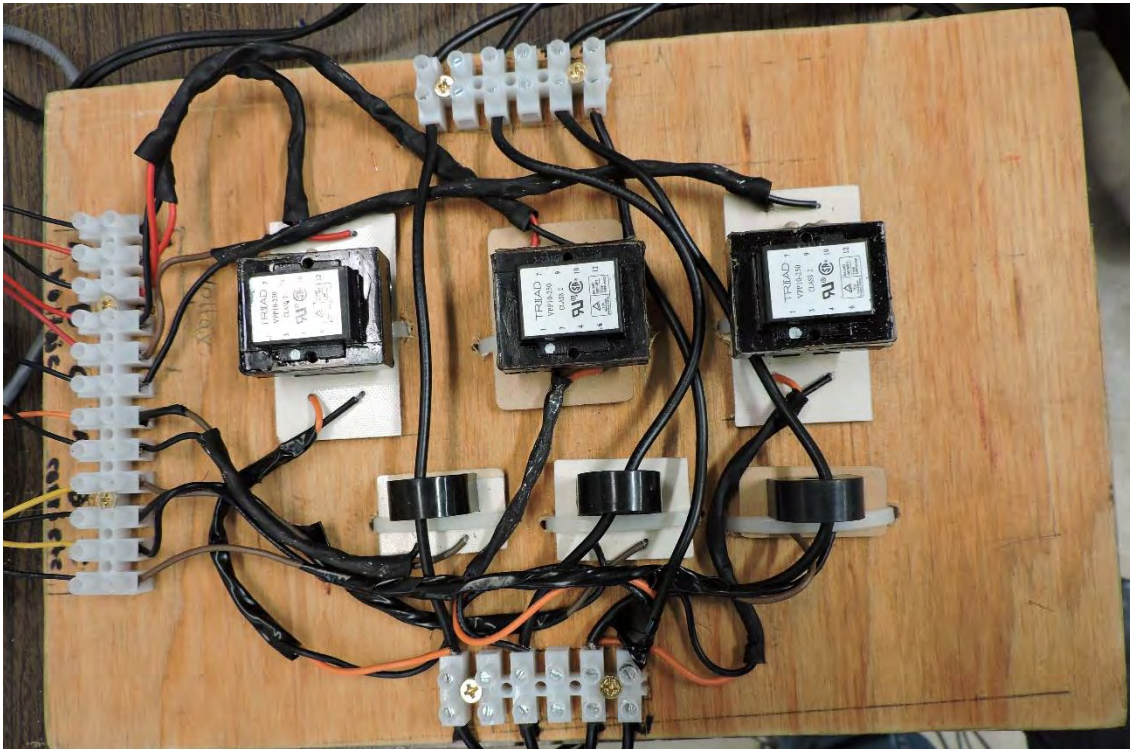


Figura 3.12a. Placa integrada con los sensores de medición.

El kit de un GPIC NI Single –Board RIO junto con la tarjeta Mezzanine tiene un costo de \$25,065.00 MXN, y en conjunto con los sensores de voltaje y corriente resulta un costo del sistema de medición de \$26,024.61 MXN.

3.4 Programación LABVIEW

La programación de en LabVIEW empieza a partir de la adquisición de los datos por parte la tarjeta sbRIO y la tarjeta Mezzanine. En la Figura 3.13 se muestra la primera parte de la programación que se realizó en LabVIEW.

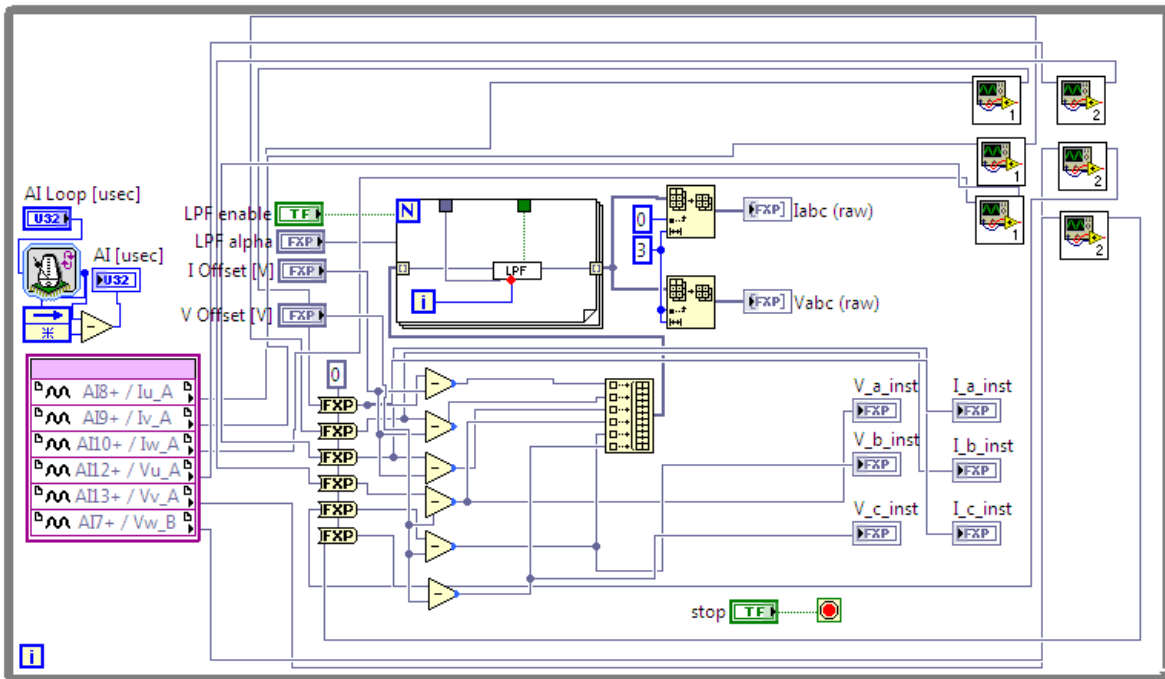


Figura 3.13. Primera parte de la programación en LabVIEW.

En esta primera parte se obtienen las señales procedentes de los sensores, estas señales son multiplicadas por un polinomio dividido por un factor de 100 en el caso del voltaje y por un factor de 10 para la corriente con el motivo de facilitar las operaciones en FPGA de la tarjeta. Posteriormente se multiplica el voltaje y la corriente por 100 y por 10 respectivamente en el HOST, el procesador de tiempo real del sbRIO, en donde hay disponibilidad de realizar las operaciones con mayor facilidad. En el caso de las señales de voltaje son multiplicadas por un polinomio lineal y para el caso de las señales de corrientes por uno de segundo orden. El tipo de polinomio fue escogido en base al comportamiento que presentaron al someter los sensores a unas pruebas de mediciones. Es muy importante mencionar también que se podría incrementar el tipo de polinomio utilizado como es el caso para el voltaje uno de segundo orden y para el de corriente uno de tercer orden, pero debido a ciertas limitaciones que se presentaron en el FPGA con la utilización de operaciones permitidas no fue posible hacerlo.

Como segunda parte se realizan las operaciones para obtener los valores RMS de las señales de voltaje y corriente. Se muestra la programación de esta parte en la Figura 3.14.

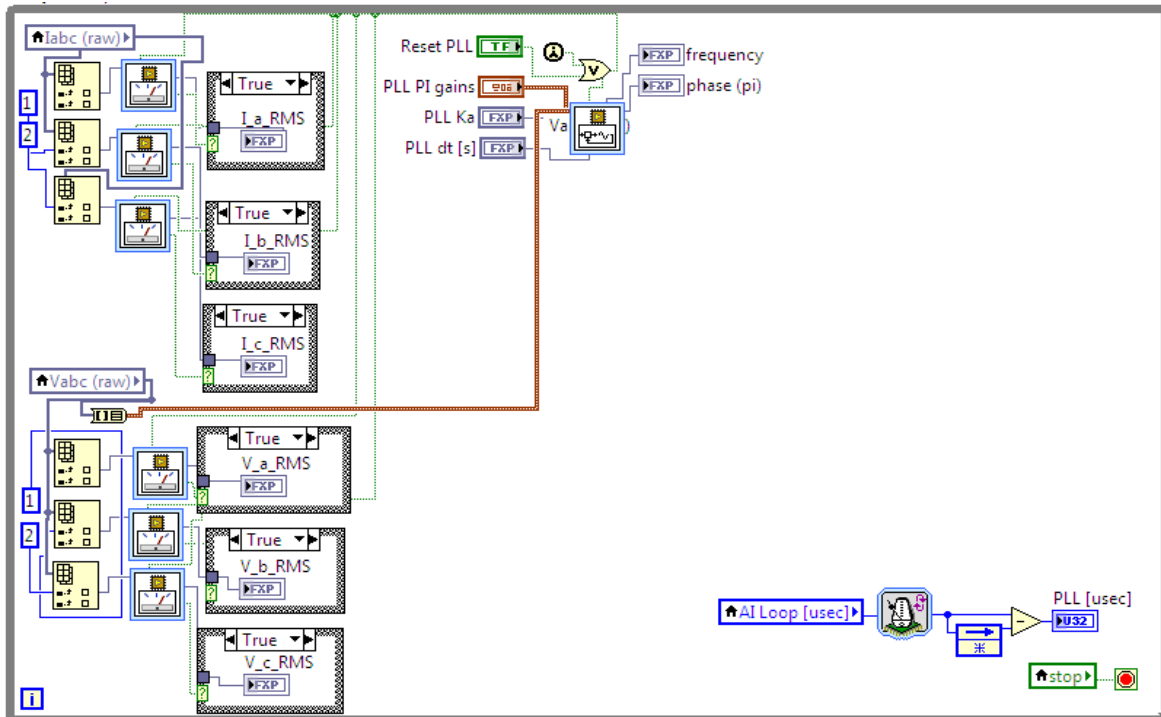


Figura 3.14. Segunda parte de la programación en LabVIEW.

En esta parte se obtienen los datos de las señales obtenidas en la primera parte y se hacen pasar por el bloque que obtiene el valor RMS.

Una vez contando con los valores RMS se procedió al cálculo de las potencias por fase, como son las potencias aparentes, potencias reales y potencias reactivas. En el caso de la potencia real se obtiene multiplicando la señal de corriente y voltaje, posteriormente obteniendo el promedio del resultado. Para la obtención de la potencia aparente es en base al producto de los valores RMS del voltaje y de la corriente. Por ultimo para determinar la potencia reactiva simplemente se resta el cuadrado de la potencia real al cuadrado de la potencia aparente y a este resultado se le saca la raíz cuadrada. Todo este proceso se puede apreciar en la tercera parte de la programación de LabVIEW, mostrada en la Figura 3.15.

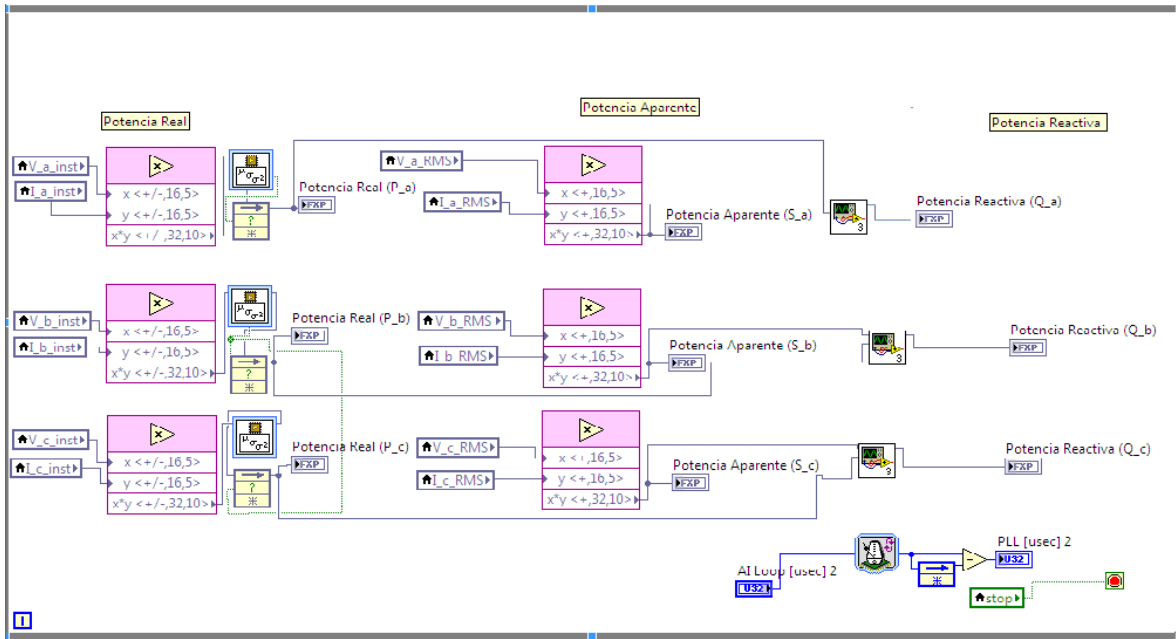


Figura 3.15. Tercera parte de la programación en LabVIEW.

Tota la parte anterior de la programación se realizó en la FPGA donde se compiló. Por otro lado, la última parte de la programación se hizo en el procesador de tiempo real donde no se requiere que compile. Aquí se obtienen todos los valores obtenidos en las operaciones hechas en el FPGA. Como se aparecía en la Figura 3.16 del lado izquierdo se tiene un block de lectura en el cual se muestran los parámetros obtenidos.

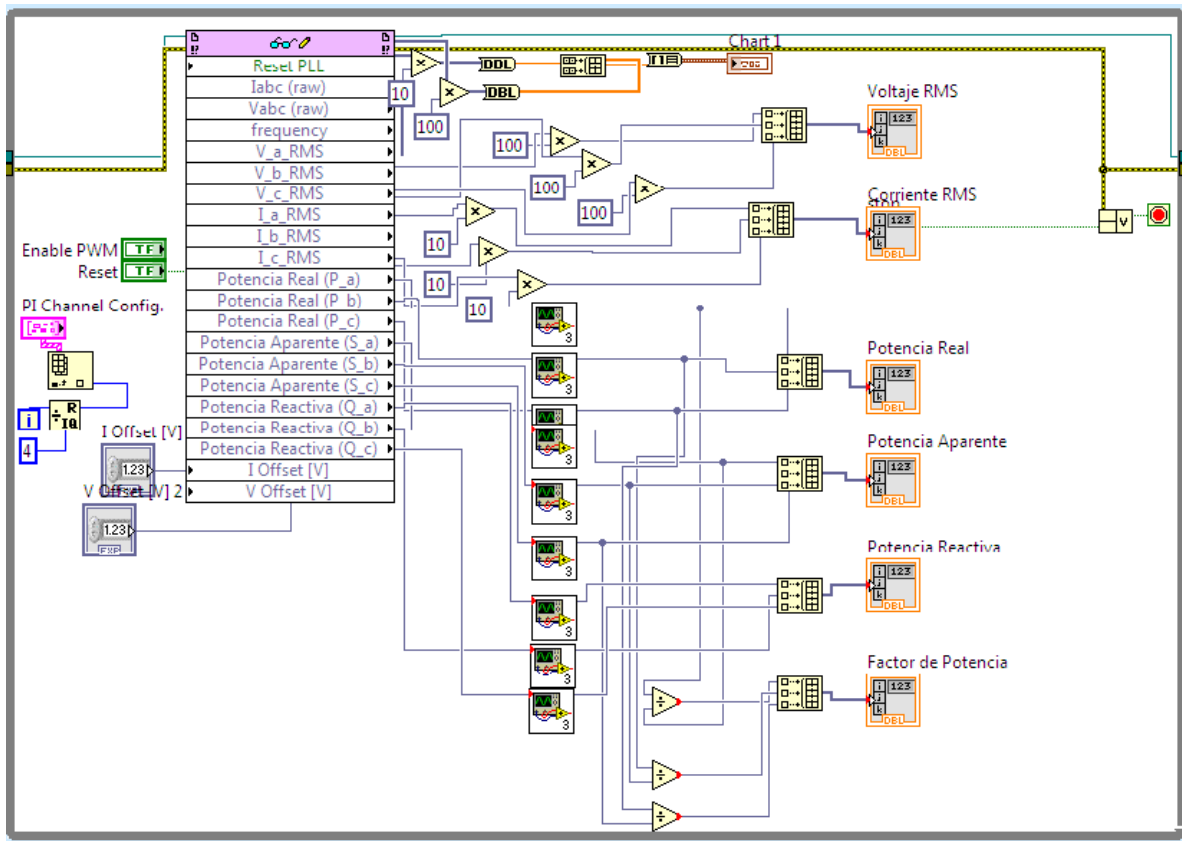


Figura 3.16. Programación en procesador de tiempo real, Host.

A todos los valores de voltaje y corriente se multiplican por los factores de 100 y 10 respectivamente, como ya se había hecho mención de esto. De esta forma se obtienen los valores reales de la medición. En esta última parte se aprovecha también para realizar el cálculo del factor de potencia por fase, como se puede ver en la figura anterior. Ésta sería la última fase de la programación y estos parámetros son mostrados en el panel frontal, en donde se ajustan los parámetros para ser visualizados. Se puede apreciar detalladamente cada uno de los parámetros medidos en la Figura 3.17.

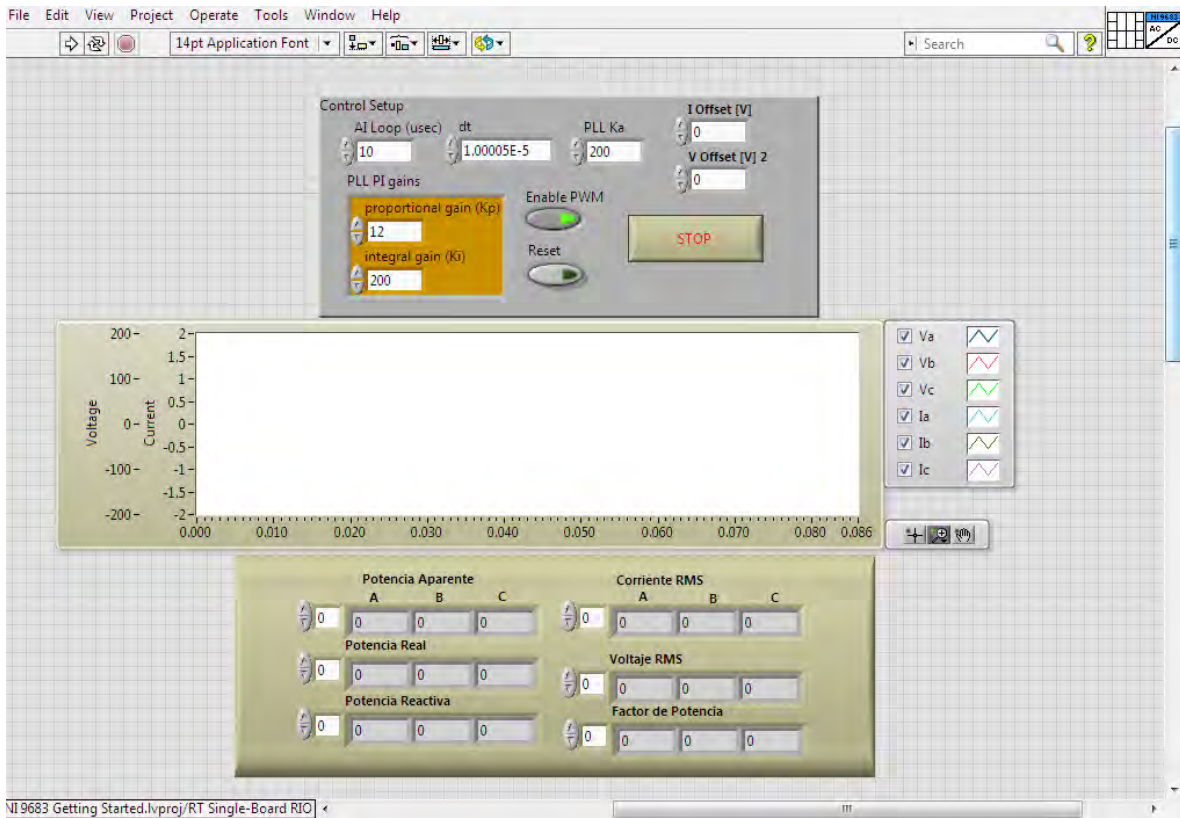


Figura 3.17. Panel frontal de la programación en LabVIEW.

En la parte superior de la figura anterior se muestra la programación del control de algunas operaciones que tiene el programa. En la gráfica se muestran las señales de voltaje y corriente trifásicas medidas y en la parte inferior es mostrado los valores de las distintas potencias junto con los valores de voltaje y corriente RMS, y de igual forma el factor de potencia por fase.

En las Figura 3.18 y Figura 3.19 se muestra la implementación de sistema de medición diseñado en un generador de inducción para tres tipos de cargas, carga resistiva, carga inductiva y carga capacitiva y de igual manera la comparación que se realizó con el analizador de la energía el FLUKE 434.

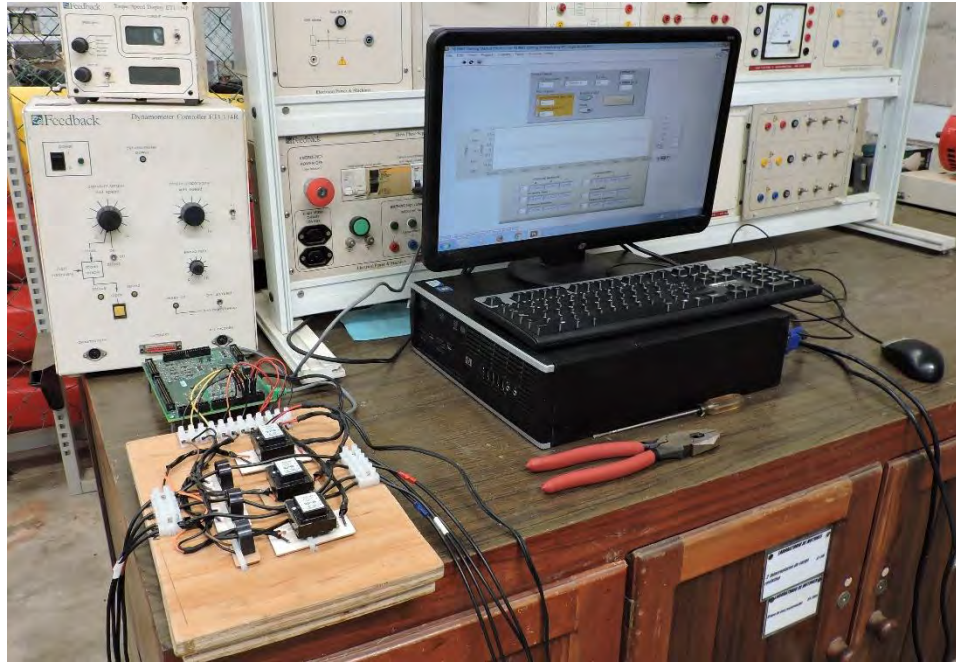


Figura 3.18. Implementación del sistema de medición



Figura 3.19. Implementación del sistema de medición con el generador de inducción

CAPITULO IV

Resultados experimentales

4.1 Mediciones obtenidas

Las mediciones fueron realizadas para tres tipos de cargas trifásicas, una resistiva, una capacitiva y otra inductiva. En el caso de la carga resistiva se hizo un arreglo de focos incandescentes en estrella con un promedio de 400 W por fase, como se apreciará más adelante no es una carga balanceada, y se podrá visualizar la carga exacta por fase. Para el caso de las cargas inductiva y capacitiva se utilizó una carga por fase de 200 mH y 27 μF respectivamente. Estas mediciones a la vez fueron comparadas con un Analizador de la energía eléctrica FLUKE 434.

4.1.1 Tensión

En las siguientes figuras 4.1 y 4.2 se muestran las mediciones obtenidas de la tensión para la carga resistiva, capacitiva e inductiva y a la vez también se agregan las figuras de las mediciones hechas por el analizador de la energía eléctrica FLUKE 434.



Figura 4.1. Mediciones de tensión en carga resistiva, sbRIO.

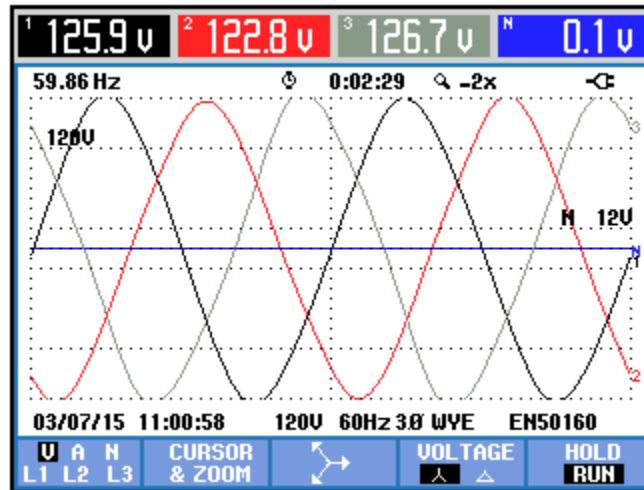


Figura 4.2. Mediciones de voltaje por el FLUKE 434.

Con base a las mediciones obtenidas se hace el cálculo de las diferencias para cada fase entre las mediciones por parte del sbRIO y el FLUKE 434 tomando como referencia este último, de lo cual se obtiene que el margen de error del sbRIO en la medición se encuentra por debajo del 3%.

En las siguientes figuras 4.3 y 4.4 es mostrada la comparación de la medición de voltaje ahora para una carga inductiva.

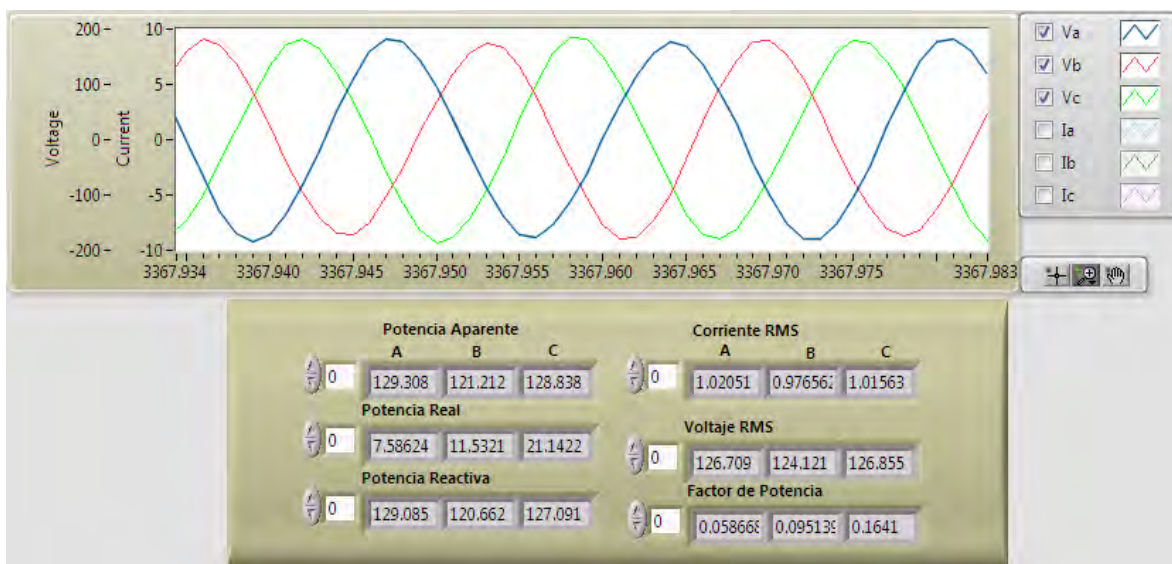


Figura 4.3. Medición de voltaje con carga inductiva, sbRIO.

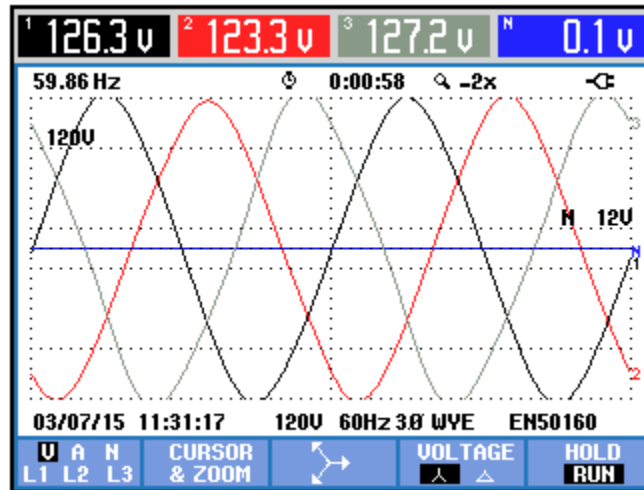


Figura 4.4. Medición de voltaje con carga inductiva, FLUKE 434.

Para esta medición de igual manera se obtiene la diferencia entre las mediciones de cada sistema, y como resultado se obtuvo que la mayor diferencia de incertidumbre es menor del 1% para este caso.

Por último se mide el voltaje con una carga capacitiva, mostrado en la Figura 4.5 y Figura 4.6, como se verá las mediciones se siguen comportando de la misma forma que para las dos distintas cargas anteriores.

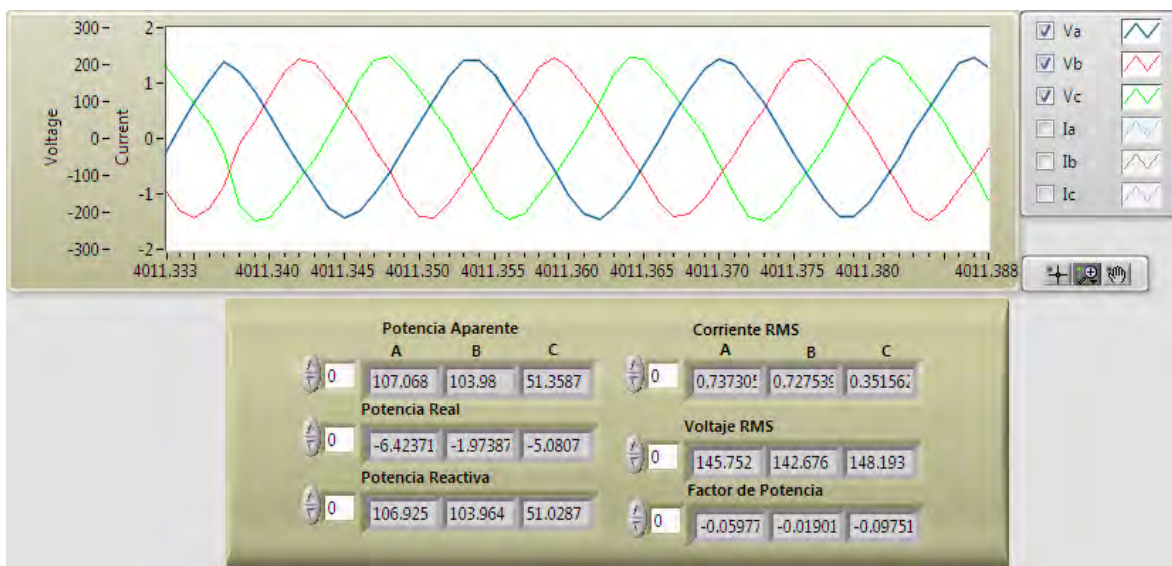


Figura 4.5. Medición de voltaje con carga capacitiva, sbRIO.

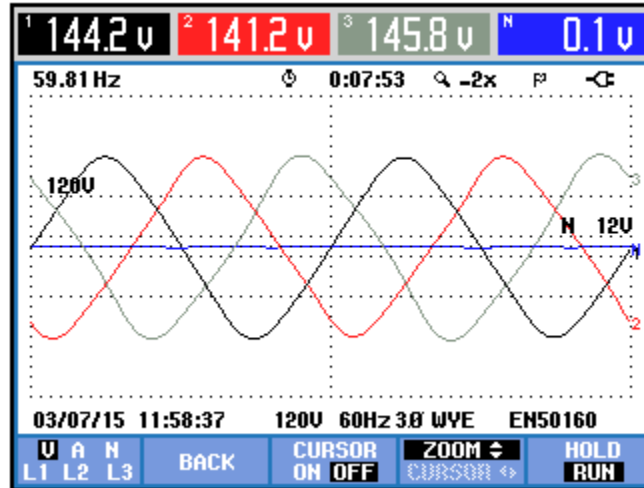


Figura 4.6. Medición de voltaje con carga capacitiva, FLUKE 434.

En este caso la mayor diferencia de incertidumbre entre las mediciones por parte del sbRIO y el FLUKE 434 dan como resultado menor a 2%.

4.1.2 Corriente

Las mediciones de corriente se realizaron de la misma manera que para las tensiones, una carga resistiva, una inductiva y carga capacitiva. El comportamiento de las comparaciones en las mediciones por parte del sbRIO y el FLUKE son muy aproximadas, de la misma manera que para los voltajes. A continuación se muestran las siguientes figuras 4.7 y 4.8 en donde se pueden ver las comparaciones para los dos tipos de medidores de potencia.

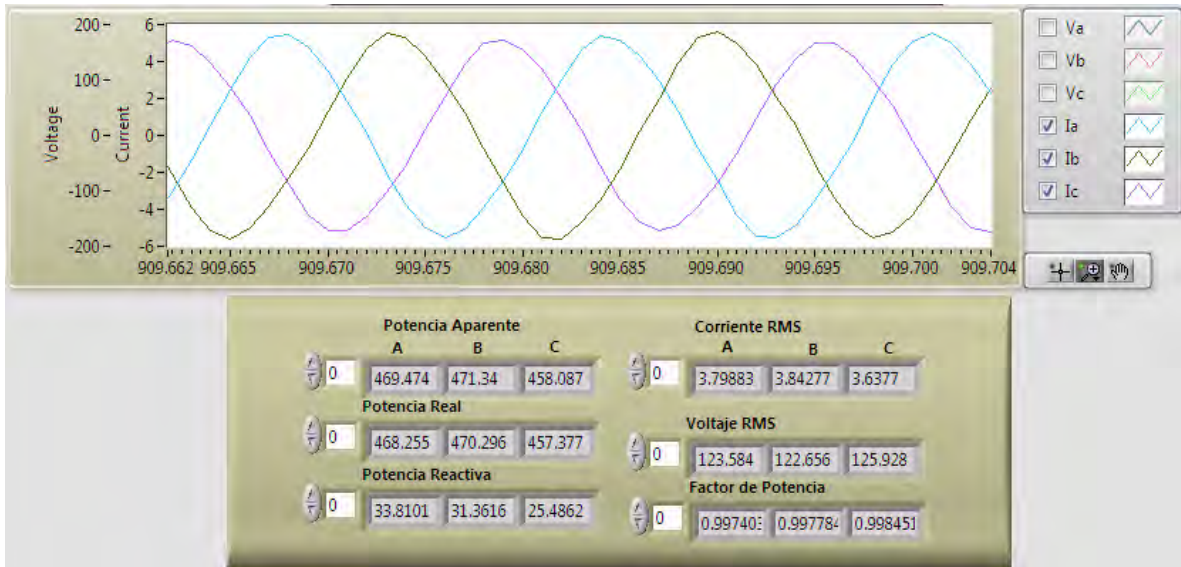


Figura 4.7. Medición de corriente con carga resistiva, sbRIO.

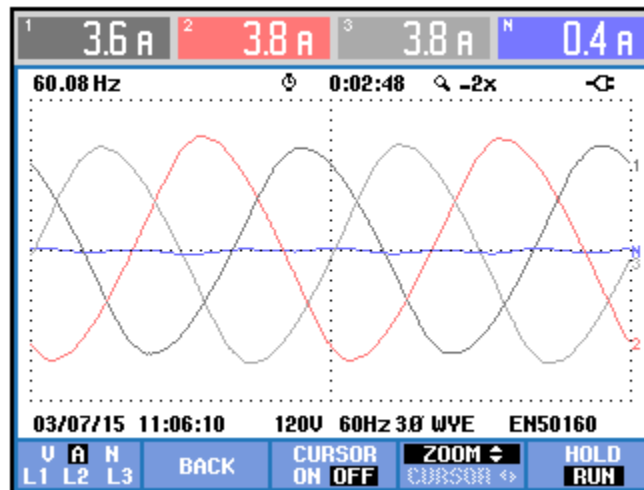


Figura 4.8. Medición de corriente con carga resistiva, FLUKE 434.

Aquí posiblemente debido a que las magnitudes medidas de la corriente son pequeñas en las tres fases, el error de medición entre nuestro sistema de medición y el FLUKE 434 es un 5% de diferencia.

En el caso de la carga inductiva la corriente todavía es menor que en la carga resistiva, los resultados arrojados son mostrados en las figuras 4.9 y 4.10.

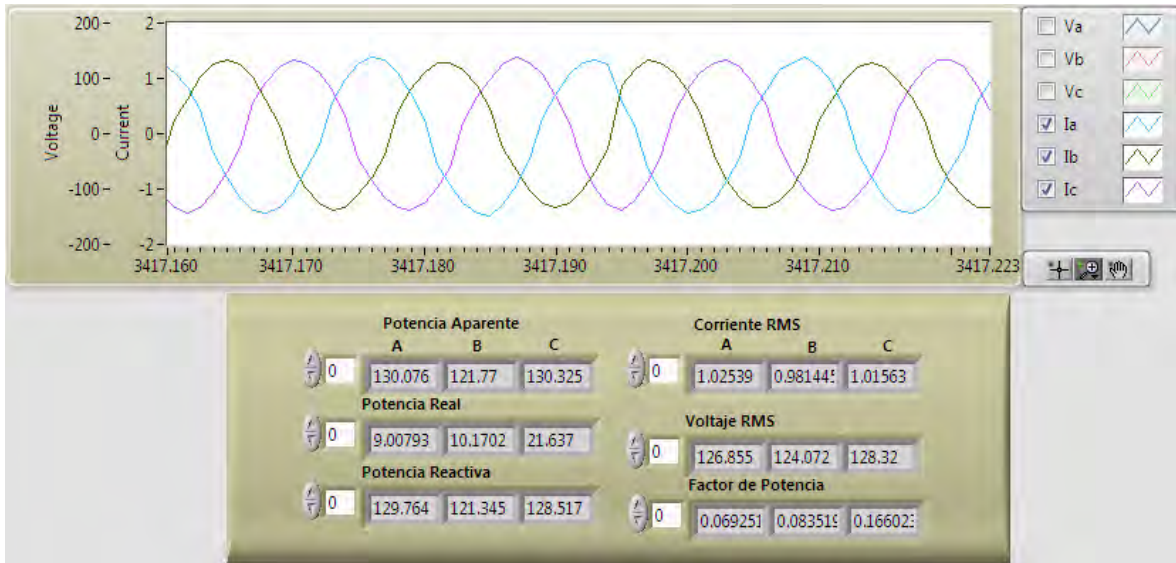


Figura 4.9. Medición de corriente con carga inductiva, sbRIO.

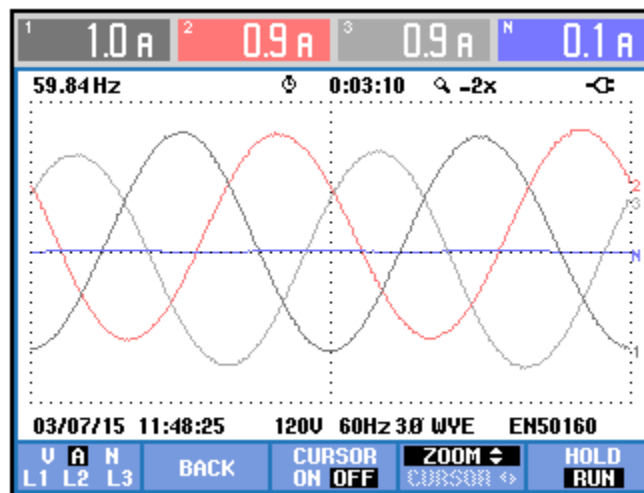


Figura 4.10. Medición de corriente con carga inductiva, FLUKE 434.

Para este caso la diferencia mayor entre los sistemas de medición aumento al 11%, de esta manera se considera que al decrecer la magnitud de la variable medida incrementa la el porcentaje de la diferencia.

Siguiendo de la misma manera se hace la medición con la carga capacitiva, los resultados son mostrados en la figuras 4.11 y 4.12 de abajo.

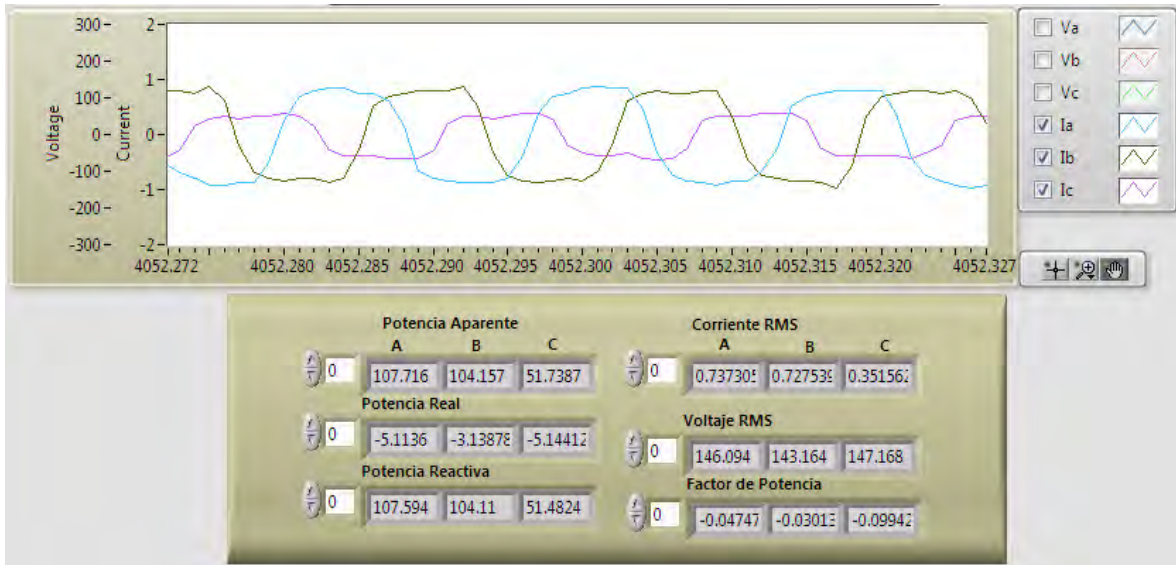


Figura 4.11. Medición de corriente con carga capacitiva, sbRIO.

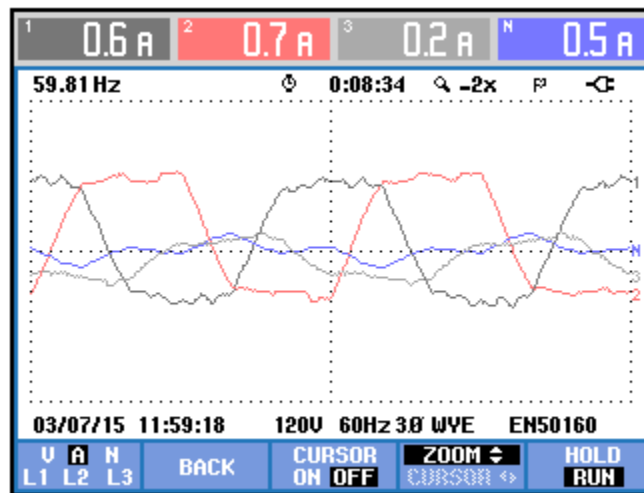


Figura 4.12. Medición de corriente con carga capacitiva, FLUKE 434.

Paca el caso de la carga capacitiva como era de esperarse al ser una magnitud menor, las diferencias en porcentaje del programa en el sbRIO tienen mayor diferencia con respecto al FLUKE 434.

4.1.3 Medición de potencias

Las mediciones de los distintos tipos de potencia son mostradas en las siguientes figuras y de igual modo se agregan las mediciones del factor de potencia. Como en los casos anteriores para las mediciones de voltaje y corriente, se muestran las comparaciones de las mediciones por parte de nuestro sistema el sbRIO y el FLUKE 434.

A continuación se muestran las figuras 4.13 y 4.14 con las mediciones de las potencias obtenidas para la carga resistiva. Aquí se muestran las señales de onda de las tres corrientes y de los tres voltajes.

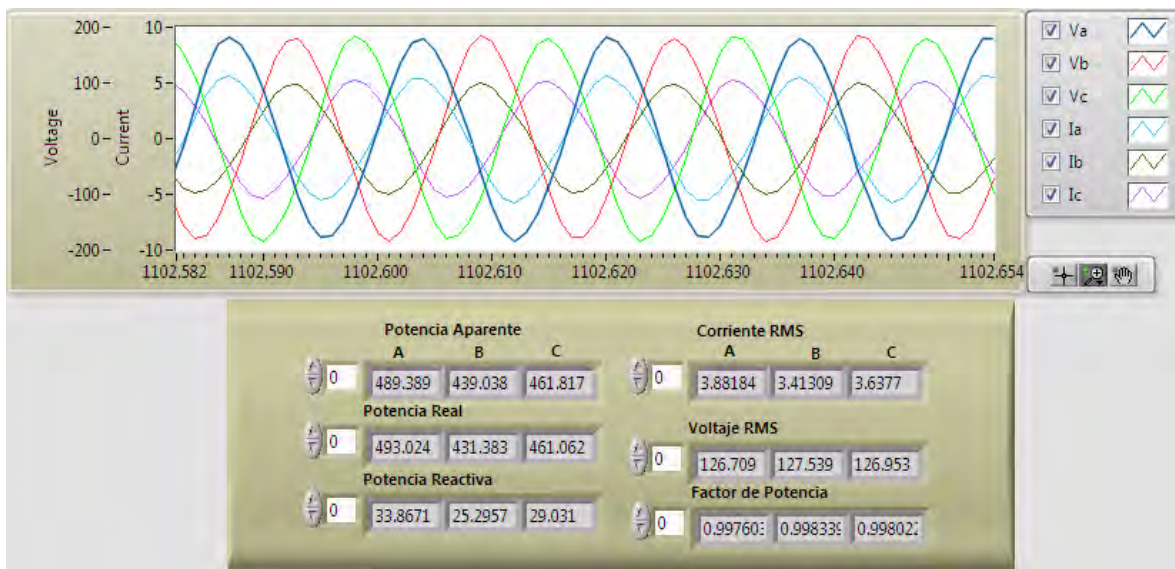


Figura 4.13. Mediciones de potencias con carga resistiva, sbRIO.

| Potencia y energía | | | | |
|--|---------|-------|-------|-------|
| FUND | 0:03:12 | | | |
| | L1 | L2 | L3 | Total |
| kW | 0.47 | 0.42 | 0.46 | 1.35 |
| kVA | 0.47 | 0.42 | 0.46 | 1.35 |
| kVAR | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 |
| PF | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Cos ϕ | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| A rms | 3.8 | 3.4 | 3.6 | |
| | L1 | L2 | L3 | |
| V rms | 125.2 | 124.2 | 125.6 | |
| 03/07/15 11:09:35 120V 60Hz 3Ø WYE EN50160 | | | | |
| PREV | BACK | NEXT | PRINT | USE |

Figura 4.14. Medición de potencia con carga resistiva, FLUKE 434.

Para esta situación el mayor porcentaje de diferencia entre los sistemas de medición es menor al 5%.

En el caso de los resultados para la carga inductiva son mostrados en las figuras 4.15 y 4.16. Como es notable existe mucha semejanza entre las mediciones por parte de los dos sistemas de medición.

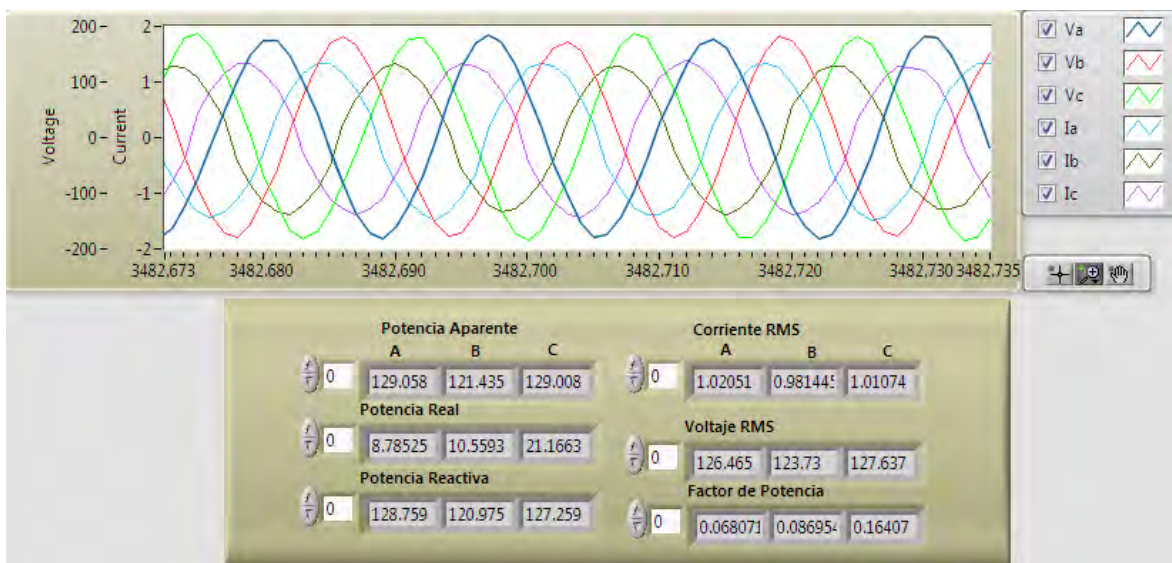


Figura 4.15. Medición de potencia con carga inductiva, sbRIO.

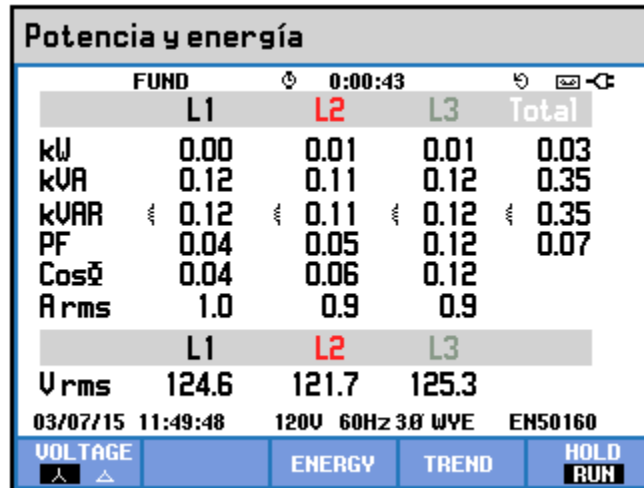


Figura 4.16. Medición de potencia con carga inductiva, FLUKE 434.

Para las mediciones de la carga inductiva se determinó la diferencia mayor con un valor de 7.5%.

Como parte final se muestran las mediciones de las potencias para la carga capacitiva en la Figura 4.17 y 4.18.

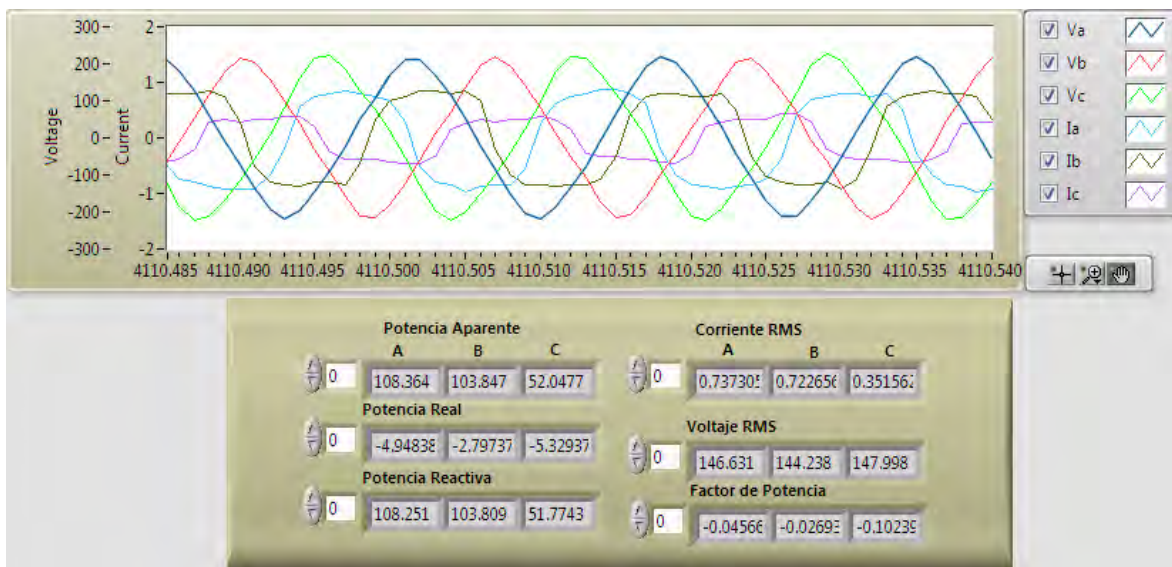


Figura 4.17. Medición de potencias para carga capacitiva, sbRIO.

| Potencia y energía | | | | |
|--------------------|--------|------------------|--------|----------|
| FUND | | 0:00:49 | | |
| | L1 | L2 | L3 | Total |
| kW | - 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| kVA | 0.09 | 0.09 | 0.03 | 0.21 |
| kVAR | ÷ 0.09 | ÷ 0.09 | ÷ 0.03 | ÷ 0.21 |
| PF | -0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.01 |
| Cos ϕ | -0.01 | 0.03 | 0.06 | |
| A rms | 0.6 | 0.7 | 0.2 | |
| | L1 | L2 | L3 | |
| V rms | 145.0 | 141.8 | 146.6 | |
| 03/07/15 12:00:17 | | 120V 60Hz 3Ø WYE | | EN50160 |
| VOLTAGE | | ENERGY | TREND | HOLD RUN |

Figura 4.18. Medición de potencias con carga capacitiva, FLUKE 434.

En esta última comparación del sistema de medición se aprecia mayor diferencia entre las magnitudes obtenidas y de esta manera se puede tener una idea de que tan preciso es el sistema de medición en la tarjeta del sbRIO.

Conclusión y Trabajos Futuros

Se presenta un estudio de los métodos de medición de voltaje y corriente alterna. Así mismo se analizan los algoritmos de medición de la potencia aparente, potencia real y potencia reactiva. También, se agrega la determinación del cálculo del factor de potencia.

Se describe la plataforma del Single-Board RIO y la tarjeta GPIC (General Purpose Inverter Controller), Tarjeta Mezzanine que se utilizó junto con los sensores de voltaje y corriente en la obtención de las potencias. También se describe LabVIEW, la plataforma donde se desarrolló la programación gráfica junto con sus características básicas de funcionamiento.

Se mencionan las características de los sensores de voltaje y corriente y la forma en que se integraron con la tarjeta de adquisición de los datos, la sbRIO GPIC Mezzanine. Se da una perspectiva de la programación gráfica que se realizó en el LabVIEW para el sistema de medición de potencia eléctrica trifásica.

Finalmente se mostraron los resultados de las mediciones de las cargas resistivas, inductivas y capacitivas obtenidos por parte del sistema de medición desarrollado y también se describió la comparación con los resultados obtenidos por parte del FLUKE 434. En esta parte se puede deducir que entre mayor sean las magnitudes de las variables eléctricas que se midan menor en la diferencia entre las mediciones obtenidas por el sistema de medición diseñado y el FLUKE. Es muy importante mencionarlo que las mediciones que se obtuvieron por parte del sbRIO tienen un margen de error con respecto al FLUKE, pero se debe de tomar en cuenta que este dispositivo puede tener una incertidumbre debido a la falta de calibración que no se le ha dado. Por lo tanto, para poder afirmar que nuestro sistema en el sbRIO tiene un error en la medición se debe de comparar con diferentes dispositivos de medición.

Se debe mencionar que se presentaron algunas dificultades al programar los polinomios de comportamiento por parte de los sensores. La precisión de los sensores depende del polinomio que se utilice en la programación en el LabVIEW. En este caso se optó por utilizar un polinomio de primer orden para el sensor de tensión y un de segundo orden para el sensor de corriente. Esto pudo afectar en la precisión por parte del sistema de medición desarrollado. Se eligieron ese tipo de polinomio para cada uno de los parámetros debido a que el programa

en LabVIEW presentó un límite de la utilización de operaciones, y al aumentar el orden de los polinomios sobrepasaba ese límite.

Para los trabajos futuros se recomiendan:

- 1- Realizar una prueba más rigurosa a los sensores de tensión y corriente para determinar el polinomio de cada uno con mayor exactitud.
- 2- Se propone mejorar la programación gráfica en el LabVIEW al utilizar modelos de bloques más eficientes y disminuir la utilización de operaciones en exceso.
- 3- Se recomienda incrementar el polinomio de los sensores de tensión y corriente a segundo y tercer orden para mejorar su exactitud en el cálculo de los parámetros.
- 4- Implementar la programación para el cálculo de las variables en el conductor neutro para las situaciones que se lo requiera.
- 5- Proponer la mejora del programa para diseñar un sistema de medición en la facturación eléctrica doméstica.

Referencias

- [1] Boylestad, R., (2010) *Análisis introductorio de circuitos*. Cuarta edición, Traducción a cargo de Agustín Contin y Juan Carlos Vega Fagoaga, México, Editorial Trillas.
- [2] Hayt, W.; Kemmerly, J. y S. Durbin (2007) *Análisis de circuitos en ingeniería*. Séptima I Interamericana.
- [3] Johnson, D. et al., (1997) *Electricic circuit analysis*. Tercera edición, U.S.A, Prentice-Hall, Inc.
- [4] Stevenson, W., (1975) *Elements of power systems analysis*. Tercera edición, U.S.A, McGraw-Hill Book Co.
- [5] <http://www.jcee.upc.es/JCEE2002/MAYNEPONENCIA.pdf>. Pág. 50
- [6] Koon, W., (2015) *Current sensing for energy metering*. USA: Analog Devices, Inc, Pag. 1.
- [7] <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/inducccion/acoplados/acoplados2.gif>
- [8] National Instruments (2015) *LabVIEW Graphical Programming Course*, U.S.A, National Instruments.
- [9] National Instruments (2013) *Getting Started with LabVIEW*. U.S.A, National Instruments.
- [10] National Instruments (2015) “Getting Started LabVIEW”. *National Instruments*. [En Línea], U.S.A, disponible en: <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/environment#Terminals> [Accesado en día 29 de abril de 2015].
- [11] National Instruments (2015) “NI Single-Board RIO”. *National Instruments*. [En línea], México, disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/7490/es/> [Accesado el día 04 de mayo de 2015].

- [12] National Instruments (2015) “NI sbRIO-9606”. *National Instruments*. [En línea], México, disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/210003> [Accesado el día 05 de mayo de 2015]
- [13] National Instruments (2015) “Módulo LabVIEW FPGA”. *National Instruments*. [En línea], México, disponible en: <http://www.ni.com/labview/fpga/esa/> [Accesado el día 06 de mayo de 2015].
- [14] National Instruments (2004) “FPGA Module User Manual”. *National Instruments*. [En línea], México, disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/370690b.pdf> [Accesado el día 07 de mayo de 2015].
- [15] National Instruments (2015) “NI 9683”. *National Instruments*. [En línea], México, disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/210893> [Accesado el día 04 de junio de 2015].