

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



Diseño e implementación de un sistema de monitorización remota de la calidad del servicio eléctrico del taller de Mecánica de Precisión del MET en Cebadilla de Alajuela

**Instituto Costarricense de Electricidad**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Pedro Ureña Sancho**

**Cartago, Mayo 2011**

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

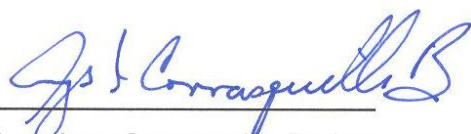
## ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

### PROYECTO DE GRADUACIÓN

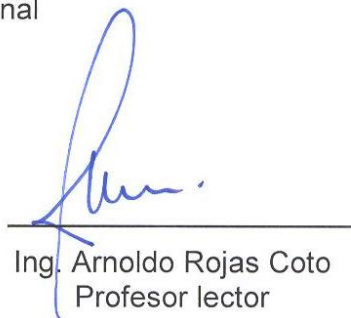
#### TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Arys Carrasquilla Batista  
Profesora lectora



Ing. Arnoldo Rojas Coto  
Profesor lector



Ing. Marvin Hernández Cisneros  
Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

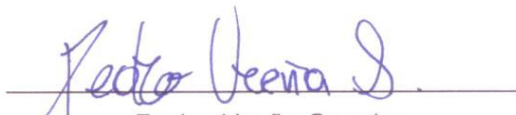
Cartago, 3 de Mayo de 2011

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 3 de Mayo de 2011

  
Pedro Ureña Sancho  
Ced. 1-1316-0148

## Resumen

El taller de mecánica de precisión del MET (Maquinaria, equipos y talleres) posee equipos que funcionan con controladores numéricos computarizados (CNC) los cuales, por sus características, son sensibles a una baja calidad de la energía, lo que puede afectar el funcionamiento de los mismos y hasta dañarlos.

El valor comercial de estas máquinas supera los doscientos mil dólares e inclusive se tienen equipos que alcanzan el millón de dólares, razón por la cual se han tomado medidas para proteger estos equipos, como supresores pasivos de picos y separar la alimentación del taller de la de los otros talleres. Sin embargo, se han presentado fallas en los equipos que aún se encuentran en garantía, y debido a que no se cuenta con información que permita descartar la calidad de la energía como causa de los desperfectos, no ha sido posible ejecutar dichas garantías.

El presente proyecto se desarrolló con el fin de dotar al MET de una herramienta que permita monitorizar de manera remota aspectos clave de la calidad de la energía del taller de mecánica de precisión, y de esta manera reducir los gastos en reparación de los equipos por medio del cobro de las garantías.

La calidad de energía abarca aspectos de la alimentación de los sistemas eléctricos como por ejemplo: forma, presencia, magnitud, potencia entregada por el suministro, entre otros, por lo que la herramienta desarrollada posee la capacidad de caracterizar la composición armónica de la señal de alimentación, la frecuencia fundamental y valores instantáneos de las ondas de tensión y corriente. A partir de estos datos se genera otra información como lo es potencia entregada por el suministro, distorsión armónica y valores efectivos de las ondas.

El equipo monitoriza un suministro trifásico de cinco líneas, por lo que se estudian ocho variables. Además, esto se hace de manera remota, y los eventos como picos que sobrepasen las condiciones normales de operación son almacenados en una base de datos.

Palabras clave: análisis de armónicas, calidad de energía, detección de picos, monitorización remota, LabVIEW.

## **Abstract**

The facility for precision mechanics of MET (Machinery, equipments and facilities) has some machines which operate using computer numerical control (CNC). These CNCs are sensitive to poor energy quality, which may affect their operation and even cause damages.

The commercial value of these machines is about two hundred thousand dollars and even some of them reach one million dollars. For this reason some actions were taken in order to protect such devices. Among these actions we can mention: surge suppressors and separate feeding circuits at the facility site. However, some problems are still present regarding some devices under warranty. The power quality issue cannot be eliminated as a factor not causing damages to the devices, and these avoid running such guarantees.

This project was developed to provide the MET with a tool to remotely monitor key aspects of power quality at the facility of precision mechanics, and thereby reducing repair expenses.

Power quality involves aspects of power electrical systems such as shape, presence, size, power delivered by the supply, among others, so that the developed tool has the ability to characterize the harmonic composition of the signal power, the fundamental frequency and instantaneous values of voltage and current waves. From these data, important information is generated such as power delivered by the supply, harmonic distortion and actual values of the waves.

The computer monitors a five-phase supply lines, so eight variables are studied. This is done remotely, and events as peaks in excess of normal operating conditions are stored into a database.

Keywords: harmonic analysis, power quality, peak detection, remote monitor, LabVIEW.

*"Adiós chito que Dios y la virgen lo acompañen"*

*A mi Madre y, mis hermanos.*

## Agradecimiento

*A mi familia, por su apoyo incondicional durante el transcurso de la carrera, en especial a mi madre y mis hermanos, quienes con su esfuerzo y ejemplo me enseñaron a sobreponerme a las situaciones adversas.*

*A mi novia, Gabriela Murillo, por su compañía y comprensión durante estos años de estudio.*

*A los ingenieros Edgar Varela y Romano Rodríguez por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto, así como por los consejos brindados.*

*A todas las personas que de alguna u otra manera colaboraron con el cumplimiento de esta meta.*

*Pedro Ureña Sancho.*

*Mayo, 2011.*

# ÍNDICE GENERAL

<b>Capítulo 1: Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Entorno del proyecto. ....	1
1.2 Solución seleccionada .....	2
<b>Capítulo 2: Meta y Objetivos</b> .....	<b>3</b>
2.1 Meta .....	3
2.2 Objetivo general .....	3
2.3 Objetivos Específicos .....	3
<b>Capítulo 3: Marco teórico</b> .....	<b>4</b>
3.1 Situación del Mercado .....	4
3.2 Antecedentes bibliográficos .....	5
3.3 Descripción de los principios relacionados con la solución .....	5
<b>Capítulo 4: Procedimiento Metodológico</b> .....	<b>9</b>
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	9
4.2 Obtención y análisis de la información.....	10
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución .....	11
4.4 Implementación de la solución.....	12
4.5 Reevaluación y rediseño .....	13
<b>Capítulo 5: Descripción detallada de la solución</b> .....	<b>14</b>
5.1 Análisis de soluciones y selección final .....	14
5.1.1 Soluciones planteadas para el diseño del hardware. ....	15
5.1.2 Soluciones planteadas para el diseño de software.....	16
5.2 Descripción del hardware .....	17
5.2.1 Módulo de acople y acondicionamiento de señales .....	17
5.2.2 Módulo de conversión analógica/digital y transmisión de datos .....	20
5.2.3 Módulo de análisis y presentación de la información .....	21
5.3 Descripción del software.....	22
5.3.1 Rutina del FPGA.....	22
5.3.2 Rutina del Controlador .....	23
5.3.3 Rutina de la computadora .....	25
<b>Capítulo 6: Análisis de resultados</b> .....	<b>30</b>
6.1 Resultados .....	30
6.2 Análisis.....	39



<b>Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>41</b>
7.1 Conclusiones.....	41
7.2 Recomendaciones.....	42
<b>Capítulo 8: Bibliografía.....</b>	<b>43</b>
<b>Capítulo 9: Apéndices .....</b>	<b>45</b>
9.1 Glosario.....	45
9.2 Fotografías de los circuitos impresos fabricados .....	46

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Señal sinusoidal distorsionada armónicamente por efecto de una carga no lineal, tomado de [5] .....	7
Figura 3.2 Representación de la potencia aparente en el plano complejo (tomado de [9]). .....	8
Figura 5.1 Diagrama de bloques que la solución implementada.....	14
Figura 5.2 Representación esquemática del circuito de la fuente.....	17
Figura 5.3 Relación teórica entre el voltaje de entrada y el de salida del divisor de tensión. ....	18
Figura 5.4 Diagrama de conexión del amplificador ISO124. (Tomado de [20]). ....	19
Figura 5.5 Relación entrada salida del sensor de Hall CSLA2EL. ....	19
Figura 5.6 Relación entrada salida del circuito acondicionador de señal. ....	20
Figura 5.7 Chasis cRIO-9073 con los módulos de expansión NI-9215. ....	21
Figura 5.8 Diagrama de flujo de la rutina del FPGA. ....	23
Figura 5.9 Diagrama de flujo de la rutina del controlador. ....	24
Figura 5.10 Diagrama de flujo de la rutina de la computadora. ....	25
Figura 5.11 Panel frontal del instrumento virtual desarrollado para la computadora, presentación de las formas de onda. ....	27
Figura 5.12 Panel frontal del instrumento virtual de la computadora, análisis de armónicas.....	28
Figura 5.13 Panel frontal del instrumento virtual de la computadora, análisis de potencia. ....	29
Figura 6.1 Señal sinusoidal utilizada para excitar el sistema .....	30
Figura 6.2 Señales observadas en la computadora cuando se tiene un tono sinusoidal conectado a las entradas $V_a$ , $V_b$ , $I_a$ e $I_b$ .....	31
Figura 6.3 Magnitud de los primeros 15 armónicos para la señal presentada en la figura 6.2 .....	31
Figura 6.4 Señal de prueba utilizada en Matlab .....	32
Figura 6.5 Magnitud de las primeras 15 armónicas de la señal presentada en la figura 6.4.....	32
Figura 6.6 Resultados de frecuencia fundamental y distorsión armónica total para las corrientes.....	33
Figura 6.7 Resultados de potencia obtenidos de la conexión de la señal presentada en Figura 6.1 a las entradas $V_a$ , $I_a$ , $V_b$ e $I_b$ .....	33
Figura 6.8 Gráfica del valor efectivo de tensión medido para la entrada de la figura 6.1. ....	34
Figura 6.9 Señal cuadrada a 60 Hz con amplitud de 3 V utilizada para estimular el sistema. ....	34
Figura 6.10 Magnitud de los primeros 15 armónicos para la onda presentada en la figura 6.9 .....	35
Figura 6.11 Señal cuadrada de 60 Hz y 3V de amplitud utilizada para el cálculo teórico de la magnitud de sus primeros 15 armónicos. ....	35
Figura 6.12 Magnitud de los primeros 15 armónicos de la señal presentada en la figura 6.11.....	36
Figura 6.13 Datos experimentales de distorsión armónica total y frecuencia fundamental obtenidos para la señal de la figura 6.9.....	36
Figura 6.14 Resultados del análisis experimental de potencia para señales de corriente y tensión iguales a la señal de la figura 6.9.....	37
Figura 6.15 Gráfica del valor efectivo de corriente medido para la señal mostrada en la figura 6.9. ....	37

<b>Figura 9.1 Circuito impreso fabricado para la fuente de poder de las puntas de adquisición. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 9.2 Circuito impreso fabricado para la adquisición y acondicionamiento de las señales. ....</b>	<b>46</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Características de los transformadores de medición y los sensores de efecto Hall valorados en el diseño de la solución. ....	15
Tabla 5.2 Características del módulo de entradas analógicas NI9215. ....	20
Tabla 5.3 Características del módulo del controlador industrial NI9073. ....	21
Tabla 6.1 Potencia aparente, activa, reactiva y factor de potencia para una entrada de corriente y voltaje igual a la figura 6.4. ....	33
Tabla 6.2 Potencia aparente, activa, reactiva y factor de potencia para una entrada de corriente y voltaje igual a la figura 6.11. ....	37
Tabla 6.3 Eventos registrados en la base de datos para un periodo de prueba controlado de 6 ciclos a 60 Hz. ...	38

# Capítulo 1: Introducción

El presente capítulo contextualiza el proyecto por medio de la descripción del entorno en que se desarrolló el mismo. Se detallan aspectos básicos de la empresa, así como algunas características relevantes del problema a tratar, de manera que se le facilite al lector la comprensión de este y de la importancia de solucionarlo. Además se muestran, sin profundizar en detalle, algunas características de la solución implementada.

## 1.1 Entorno del proyecto.

La sección de Mantenimiento, Equipos y Talleres (MET) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) se encuentra adscrita a la Unidad Estratégica de Negocios (UEN) de Proyectos y Servicios Adjuntos (PySA).

Dentro de sus principales obligaciones destacan: la reparación y mantenimiento de los equipos de carácter eléctrico y mecánico de la institución, especialmente los destinados a la construcción de proyectos, la fabricación de los tubos de acero encargados de llevar el agua desde el embalse hasta la casa de máquinas en los proyectos hidroeléctricos, diseño y construcción de máquinas y piezas de repuesto metalmeccánicas, construcción de estructuras de soporte para túneles y automatización de procesos.

Con el fin de cumplir con dichas funciones se cuenta con talleres de: mecánica automotriz, electromotriz, electricidad industrial, redes eléctricas, mecánica de precisión, estructuras, fundición y fábrica de tubos. Los mismos se encuentran equipados con máquinas de alta potencia como soldadoras de arco sumergido, hornos de fundición y compresores de hasta 300 hp, las cuales generan picos en la red eléctrica cuando entran y salen de funcionamiento. Además se cuenta con equipo manejado por circuitería electrónica, por ejemplo máquinas de control numérico computacional y computadoras, que son sensibles a variaciones en la alimentación eléctrica.

El taller donde se desarrolló el proyecto es el taller de mecánica de precisión, el cual se encuentra en Cebadilla de Turrúcares de Alajuela, en las cercanías del proyecto hidroeléctrico Ventanas. Este taller cuenta con equipos como: fresadoras y tornos manuales, además de equipo de control numérico computarizado (CNC) como tornos de hasta 5 grados de libertad y mandriladoras de 3 grados de libertad, los cuales tienen un costo superior a medio millón de dólares americanos.

La jornada laboral del taller de precisión incluye turnos nocturnos, fines de semana y feriados, pues el volumen de trabajo así lo requiere. Esta condición exige al máximo los equipos presentes en el taller.

A partir del aumento en las cargas de trabajo de las máquinas se ha incrementado la cantidad de desperfectos que estas sufren, sin embargo pese a que los equipos se encuentran en garantía, los reclamos de las mismas no han sido efectivos (ejecutados) pues los proveedores de equipos argumentan que la calidad del servicio eléctrico es menor al especificado para el correcto funcionamiento de las máquinas.

Debido a la proximidad de la subestación de distribución del proyecto Ventanas y al tipo de equipos con que se cuenta en el plantel, el servicio de alimentación eléctrica presenta distorsión armónica y picos de corriente, entre otros efectos indeseados. Sin embargo se tomaron medidas para la protección de los equipos sensibles a este tipo de problemas: se instaló un sistema pasivo para la supresión de picos de corriente y la regulación de la calidad del servicio eléctrico, además los talleres que cuentan con máquinas que pueden resultar dañadas por problemas con la alimentación eléctrica, como es el caso del taller de mecánica de precisión, se encuentran conectadas a un ramal diferente de la alimentación del resto del plantel.

Pese a esto, las empresas proveedoras de equipos para el taller de precisión no aceptan los reclamos de garantía, debido a la incapacidad del MET de aportar información técnica que permita justificar de manera efectiva, es decir que se acepten, los mismos. Lo anterior genera costos directos que alcanzan miles de dólares americanos en repuestos y reparación de los equipos, además de las consecuencias derivadas de parar la producción (costos indirectos).

El proyecto tiene como fin dotar al MET de un instrumento capaz de medir características como la amplitud y la forma de la señal de alimentación que reflejen la calidad del servicio eléctrico, lo anterior con el propósito de generar información técnica que permita descartar el suministro eléctrico como raíz de los desperfectos y así alcanzar un mayor número de garantías cobradas y en un menor tiempo, lo cual repercutiría en la reducción de costos en que incurrir el taller.

## **1.2 Solución seleccionada**

De acuerdo a las características de la acometida del taller de mecánica de precisión y a los requerimientos específicos solicitados por parte de la empresa, el instrumento encargado de monitorizar la corriente y el voltaje en cada una de las fases de dicho suministro deberá cumplir, al menos, con los siguientes requisitos:

- El equipo debe ser únicamente para la medición de la acometida del taller de precisión.
- Monitorización de 8 variables de manera simultánea, las cuales se deben muestrear en el mismo instante de tiempo.
- Adquisición de señales de voltaje de un trifásico conectado en estrella, el cual presenta una tensión de línea de 440 voltios.
- Medición de señales de corriente las cuales puede tener un máximo de trabajo de 400 amperios (capacidad del centro de carga).
- Capacidad de muestrear a una frecuencia superior a 1.8 kHz.
- Comunicación vía Ethernet.
- Obtención de la magnitud de los primeros 15 armónicos, así como de la frecuencia fundamental de la alimentación.
- Cálculo del consumo de potencia del sistema (Aparente, real y reactiva).
- Presentación de la información por medio de una pantalla.
- Respaldo de información relevante (eventos) para los operarios del sistema.
- Almacenar junto con el evento, la variable que lo sufrió y el instante temporal en que este se dio.
- Supervisión remota de las variables medidas.

El diseño de la solución que se implementó se compone de 4 bloques principales, el primero se encarga del acondicionamiento de las señales, esto se hace considerando tiempos de retardo de los sensores y aislamiento de tierras.

En tanto que los bloques segundo y tercero adquieren los datos y los transmiten respectivamente, a una frecuencia que cumple con las especificaciones dadas por la empresa.

Por último el cuarto módulo se encarga de realizar el cálculo de las magnitudes de interés, presentarlas y de ser necesario respaldar la información en una base de datos remota.

## **Capítulo 2: Meta y Objetivos**

### **2.1 Meta**

Disminuir los costos de mantenimiento y reparación de los equipos del taller de mecánica de precisión del MET, como consecuencia de un mayor porcentaje de garantías ejecutadas por los proveedores de los equipos.

### **2.2 Objetivo general**

Diseñar un sistema electrónico que grafique las señales de voltaje y corriente, así como los 15 primeros armónicos de la alimentación del taller de mecánica de precisión y almacene en memoria los picos de estas señales.

### **2.3 Objetivos Específicos**

- Diseñar un sistema de medición de parámetros eléctricos que permita la adquisición de los datos necesarios para que se conozcan las variaciones instantáneas en la calidad del servicio eléctrico en un lapso determinado.
- Establecer una estrategia de fusión de datos adquiridos por parte del sistema de medición, para su procesamiento y almacenamiento.
- Diseñar una herramienta, basada en algoritmos de procesamiento digital de señales que permitan el cálculo de la magnitud de los armónicos de la señal de alimentación.

## Capítulo 3: Marco teórico

A continuación se presentan algunos conceptos relevantes para la comprensión del problema y la formulación de la solución. Se parte con un estudio de los productos que se ofrecen en el mercado para remediar el problema, de manera que se tenga un panorama claro en aspectos como: funciones, características y costos.

Luego se abordan términos y definiciones relacionados con la calidad de la energía eléctrica. Por otro lado se detallan algunos de los principios matemáticos que sustentan la teoría del análisis en frecuencia y por último, se tiene un apartado dedicado a los principios físicos que se consideraron a la hora de diseñar la solución.

### 3.1 Situación del Mercado

En el mercado es posible encontrar diferentes instrumentos para monitorizar la calidad del servicio eléctrico como por ejemplo:

- **Localizadores de fallas:** Estos dispositivos poseen un tamaño y peso que los identifica como portables, se caracterizan por graficar en tiempo real las señales de entrada; los modelos básicos no poseen la capacidad de almacenar eventos ni de realizar cálculos, sin embargo los modelos más avanzados sí cuentan con estas funciones, generalmente son utilizados por técnicos electricistas. Se recomienda su utilización cuando existen problemas recurrentes en motores o interruptores.
- **Registradores:** Los modelos básicos cuenta únicamente con una memoria de registro, la cual debe ser leída a través de una computadora. Por otro lado los modelos más recientes incluyen interfaces de usuario como pantallas o indicadores tipo LED; también cuentan con la capacidad de comunicarse por Ethernet y realizar cálculos de cargas, consumo de potencia, factor de potencia y armónicas entre otros. Son utilizados cuando se necesita conocer la calidad del servicio eléctrico de manera general y se recomienda su uso por parte de técnicos especializados o ingenieros.
- **Analizadores:** generalmente son equipos empotrados en los gabinetes de distribución primaria de la alimentación, no poseen pantalla, por lo que presentan los datos por medio de una computadora a la cual se conectan en red. Poseen la capacidad de almacenar datos localmente y de exportarlos a una computadora. Dentro de sus funciones están: graficar, realizar cálculos de la magnitud de las armónicas (hasta 50 armónicas), detectar el parpadeo o flicker, entre otras. Son utilizados generalmente por ingenieros de investigación y desarrollo, así como por directores de planta.

Los equipos antes mencionados son ofrecidos al mercado por varios fabricantes dentro de los cuales se pueden mencionar Fluke o Chauvin Arnoux.

Las líneas 433 y 434 de Fluke son localizadores de fallas en suministros trifásicos, estos son capaces de tomar muestras de 4 corrientes y 4 voltajes de manera simultánea, además de esto cumplen con la norma estadounidense (IEEE 1159 y G5/4) y europea (EN 50169) de la medición de calidad de servicio eléctrico. Sin embargo no son capaces de comunicarse con un computador a través de una red.

El modelo CA 8335 QualiSTAR de Chauvin Arnoux presenta capacidades similares a las de los Fluke 434, sin embargo este agrega la capacidad de comunicarse con una computadora en tiempo real.

Los instrumentos antes mencionados se cotizan a partir de los \$4500 y en ocasiones es necesario agregarle los sensores de medición y otros periféricos por lo que el costo puede sobrepasar los \$5000.



En cuanto a registradores de la calidad del servicio eléctrico para suministros trifásicos la empresa Fluke maneja dos líneas la 1735 y la 1740, en ambas se cuenta con equipo de gama básica, media y alta, sin embargo todas presentan similitudes como el hecho de que son certificados contra agua y vibraciones. Estos equipos tienen la capacidad de comunicarse con una computadora, algunos por medio de una interfaz RS232 y otros vía Ethernet. Los más simples únicamente registran eventos como picos de voltaje o flicker, mientras que algunos modelos pueden calcular armónicas y potencia interarmónicas. Los precios de este tipo de equipos van desde los \$3900 hasta los \$6900.

En cuanto a los Analizadores de calidad eléctrica se tiene que estos equipos pertenecen a la línea de mayor desempeño, razón por la cual incluyen la capacidad de calcular el espectro de potencia de la señal de entrada, la distorsión armónica total entre otros datos. Son capaces de almacenar localmente hasta 2 Gb de información. Su precio parte de los \$15000.

### **3.2 Antecedentes bibliográficos**

De acuerdo con [7] la calidad del servicio eléctrico se puede considerar bajo dos ópticas, la primera referente a aspectos técnicos (calidad del producto electricidad) y la segunda relacionada con la calidad administrativa de la misma (calidad comercial). Dentro de las características técnicas de la calidad del suministro eléctrico se consideran la continuidad (existencia de tensión) y calidad del voltaje (forma de la onda y perturbaciones asociadas a la misma).

En cuanto a la medición de la calidad de energía no existe un índice absoluto como tal, sino más bien se cuenta con varios indicadores que valoran cada una de las propiedades de interés. Estos parámetros se pueden calcular de modo histórico, utilizado para la detección de fallas porque se basa en mediciones previas y estadística, y el modo predictivo, basado en modelos de fiabilidad los cuales se utilizan para cálculos de rediseño de la red.

La calidad de servicio eléctrico se ha asociado con la presencia de una señal de tensión sinusoidal de amplitud y frecuencia constante. Sin embargo las cargas como compresores de alta potencia (313 hp) y hornos de arco eléctrico, generan deformaciones en la onda como picos o valles.

El concepto servicio eléctrico de calidad se ha ampliado a partir de la aparición de equipos con etapas electrónicas sensibles a variaciones en la frecuencia de la señal de alimentación y en la forma de onda de la misma. Esto se ve afirmado por [1] en donde se sostiene que la calidad de la energía tiene que ver además con transientes de corta duración y distorsiones en estado continuo.

La aparición de frecuencias armónicas de potencia comparable con la frecuencia fundamental de la alimentación, en el caso de Costa Rica 60 Hz, puede causar serios problemas, según [1] los armónicos pueden causar el disparo accidental de interruptores o el sobrecalentamiento de transformadores y conductores neutros. Dichos efectos se pueden presentar en circuitos conectados directamente a la carga que deforma la onda, así como en circuitos que se encuentran separados por un acople capacitivo o magnético.

Este tipo de deformación de la onda es producida por cargas no lineales como por ejemplo: balastos electrónicos, hornos de arco eléctrico, computadoras, equipo de soldadura eléctrica, rectificadores de estado sólido, entre otros.

### **3.3 Descripción de los principios relacionados con la solución**

A continuación se describen algunos de los conceptos y algoritmos tomados en cuenta en el proceso de diseño de la solución. A través de los mismos fue posible asegurar el correcto funcionamiento del diseño implementado.

### Teorema de Muestreo: [17]

Si la frecuencia más alta contenida en una señal analógica  $x_a(t)$  es  $F_{Max} = B$  y la señal es muestreada a una frecuencia mayor a  $F_s = 2F_{Max} \equiv B$ , entonces  $x_a(t)$  puede ser reconstruida de manera exacta a partir de sus muestras utilizando la función de interpolación  $g(t)$  donde:

$$g(t) = \frac{\sin 2\pi Bt}{2\pi Bt} \quad 3.1$$

### Transformada discreta de Fourier: [2] [17]

La transformada discreta de Fourier (DFT) representa un mecanismo para el estudio frecuencial por medios digitales de señales en tiempo discreto.

Dicha herramienta se fundamenta en el hecho de que, siempre y cuando no exista aliasing temporal, es posible reconstruir una señal discreta  $x(n)$  de longitud finita  $N$  a partir de su espectro muestreado (el cual es continuo y periódico).

La ecuación 3.2, conocida como transformada discreta de Fourier, presenta la manera en que se relaciona la señal  $x(n)$  con su espectro discreto  $X(k)$ :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\left(\frac{2\pi k}{N}\right)n} \quad 3.2$$

### Transformada rápida de Fourier: [17]

La transformada rápida de Fourier o Fast Fourier Transform (FFT) es el nombre que recibe un algoritmo computacional optimizado para el cálculo de la transformada discreta de Fourier. La aplicación directa de la ecuación 3.2 para una señal de  $N$  muestras implica  $N^2$  multiplicaciones complejas y  $N^2 - N$  sumas complejas, lo cual lo convierte en un algoritmo computacionalmente ineficiente, pues no aprovecha las cualidades de simetría y periodicidad de la transformada.

El enfoque utilizado para el desarrollo de este algoritmo es utilizar la transformada como un filtrado lineal de la señal, ya que es posible precalcular los factores de la matriz de transformación, además se utiliza en enfoque "divide y vencerás", en el cual el problema se trata como un conjunto de subproblemas de menor tamaño. Las características del algoritmo obliga a la indexación de la entrada en un orden particular, además de la utilización de matrices cuadradas con dimensiones del tipo  $2^k$  para  $k$  entero y mayor que cero.

El algoritmo de la FFT es del orden de operaciones de  $N/2 \log_2 N$ , donde  $N$  es el número de puntos a calcular, por ejemplo, si la entrada es de 128 puntos, la ecuación 3.2 supone 16 384 multiplicaciones complejas, mientras que la FFT realiza 448.

### Función de Hann: [4]

La función de Hann presentada en la ecuación 3.3 es comúnmente utilizada como ventana en los procesos de filtrado, ya que esta posee la cualidad de reducir el fenómeno de goteo del espectro, además permite atenuar las frecuencias que no son de interés. Según [4] esta función es frecuentemente utilizada en los analizadores de espectro.

$$W_H(t) = \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi t}{T} \right) \right) \quad 3.3$$

### Valor Cuadrático medio:

También conocido como valor eficaz, o en inglés root mean square (rms), indica el aporte continuo de una señal alterna. Se calcula por medio de la ecuación 3.4

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{T+t_0} x^2(t) dt} \quad 3.4$$

**Distorsión armónica total:**

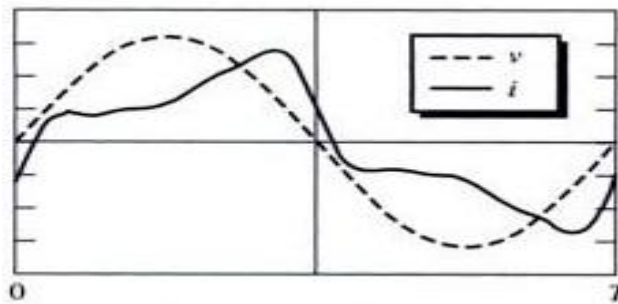
Conocida en inglés como Total Harmonic Distortion (THD), es una cuantificación del efecto de las frecuencias armónicas de orden superior a 1, sobre la frecuencia fundamental. Su valor se expresa de 0 a 1, sin embargo generalmente se reporta como un porcentaje.

La ecuación 3.5, tomada de [8], presenta la manera en la que se calcula la distorsión armónica total de una variable, en este caso una corriente.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad 3.5$$

Mientras mayor sea el valor (más cerca de 1) menos similar será la onda estudiada a un tono sinusoidal.

La figura 3.1 presenta la distorsión sufrida por una alimentación sinusoidal como efecto de una carga no lineal la cual genera armónicas, esta figura se tomó de [5].



**Figura 3.1** Señal sinusoidal distorsionada armónicamente por efecto de una carga no lineal, tomado de [5]

**Efecto Hall:** [16]

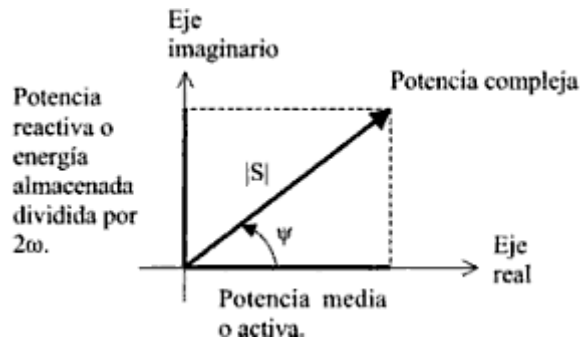
El efecto Hall se manifiesta como la variación de la resistencia de un conductor en presencia de un campo magnético debido a que algunos electrones se desvían de su trayectoria, esto por a la acción de una fuerza Lorentz que actúa sobre los mismos. Dicha variación es función de la dirección del campo y de la tensión de Hall inducida en el material.

**Potencia Eléctrica:**

De acuerdo con [9] la potencia entregada por un suministro de corriente alterna es compleja, y está dada por medio de la ecuación 3.6.

$$S = VI^* \quad 3.6$$

Además al tratarse de una cantidad compleja admite representación en magnitud y fase, de acuerdo con el mismo autor es posible graficar la potencia aparente S en el plano complejo, como lo muestra la figura 3.2.



**Figura 3.2** Representación de la potencia aparente en el plano complejo (tomado de [9]).

Luego se tiene que  $|S|$  es igual a la multiplicación de los valores cuadráticos medios de la tensión y la corriente, tal como se muestra en la ecuación 3.7 a continuación.

$$|S| = V_{rms} I_{rms} \quad 3.7$$

La potencia real ( $P$ ) consumida corresponde a la potencia media, es decir el promedio de las potencias instantáneas, tal como lo muestra la ecuación 3.8.

$$P = \frac{\int_0^T V(t)I(t) dt}{T} \quad 3.8$$

Luego conociendo la magnitud de la potencia aparente y la potencia activa es posible calcular la magnitud de la potencia reactiva mediante la ecuación 3.9, la cual es una aplicación del teorema de Pitágoras.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad 3.9$$

El factor de potencia se define, para ondas de alimentación sinusoidales, como el coseno del ángulo existente entre los fasores de corriente y voltaje, y representa el porcentaje de la potencia aparente que se convierte en potencia activa. Entonces es posible calcular su valor a través de la ecuación 3.10.

$$f.d.p = \frac{|P|}{|S|} \quad 3.10$$

## Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

En el presente capítulo se aborda la evolución seguida por la solución a la luz del método de diseño en ingeniería. Se explica brevemente la manera en que se delimitó el problema, así como la forma en que se accedió a la información y las técnicas de análisis aplicadas a esta con el fin de generar una solución cabal al problema.

Además se exponen, de manera general, los diseños intermedios de la solución y los motivos por los cuales estos no se implementaron. También se describe el proceso de implementación de la solución final, y se comentan algunas de las posibilidades y limitaciones que presenta el diseño para desarrollos futuros.

### 4.1 Reconocimiento y definición del problema

Por medio de entrevistas con el ingeniero Edgar Varela, se conoció el hecho de que algunos de los equipos del taller de mecánica de precisión presentaban fallas de manera reiterada. Las máquinas que sufrían desperfectos con mayor frecuencia compartían varias características particulares, por ejemplo: poseen circuitería de control electrónica así como una etapa de potencia (principalmente motores) y trabajan más de 10 horas diarias.

Algunos de los equipos dañados están en período de garantía, sin embargo los proveedores desestiman los reclamos de las mismas argumentando que la calidad del servicio eléctrico es pobre, razón por la cual el equipo falla. La imposibilidad de cobrar estas garantías genera costos directos derivados de la reparación de los equipos así como costos indirectos por el retraso de los proyectos que necesitan los equipos dañados.

Con el fin de tomar medidas para reducir estos costos se realizaron pruebas con un equipo de medición de calidad eléctrica portátil, donde se comprobó que la cercanía de la subestación influye de manera negativa en la calidad del servicio eléctrico, sin embargo durante el periodo de prueba, que debido a la disponibilidad del equipo no fue mayor a una hora, no se tuvo ningún desperfecto en los equipos del taller por lo que no se pudo confirmar o descartar la tesis de los proveedores.

El ingeniero Varela señaló que el plantel posee un equipo pasivo para la supresión de picos de voltaje y corriente, además la alimentación eléctrica del taller donde se encuentran los equipos de interés es exclusiva del mismo, lo cual reduce la posibilidad de que las máquinas de otros talleres afecten al taller de precisión. Además Varela indicó que se observó que máquinas iguales no sufrían desperfectos similares al mismo tiempo, pese a que las mismas estaban conectadas a la misma fase del suministro trifásico.

El proyecto nace como consecuencia directa de la necesidad de reducir costos, lo anterior por medio de un aumento en el número de garantías cobradas. Para lograr esto se plantea diseñar un dispositivo de uso exclusivo para la acometida del taller de precisión el cual debe tener la capacidad de monitorear 8 variables (cuatro voltajes y cuatro corrientes), obtener datos como la distorsión armónica total (THD), consumo de potencia por fase y la posibilidad de registrar los picos de corriente y voltaje en una base de datos remota. Este equipo además debe de tener un valor menor al de los equipos que se encuentran en el mercado para este fin.

## 4.2 Obtención y análisis de la información

La información referente al problema se recabó por medio de entrevistas realizadas al Ing. Edgar Varela, los encargados de redes eléctricas en el plantel y a algunos de los técnicos eléctricos que se encargan de ver las averías de los equipos, a partir de las respuestas proporcionadas por estos fue posible caracterizar el problema y las especificaciones de la solución que se busca. La información recolectada de esta manera fue calificada de acuerdo al criterio de utilidad, es decir se despreciaron todos aquellos datos que no fuesen relevantes para la comprensión del problema o el diseño de la solución.

El estudio de los equipos de análisis de calidad de energía que se encuentran en el mercado se realizó por medio de internet, se conocieron las principales características que ofrecen dichos instrumentos, y se evaluaron según precio y conveniencia, por ejemplo el equipo Fluke 1760 Basic posee cualidades sobre dimensionadas para los propósitos que se tienen, además su precio supera los 15 mil dólares.

En cuanto a los aspectos teóricos del problema se realizó una revisión bibliográfica de temas relacionados con el concepto de calidad de servicio eléctrico, procesamiento digital de señales, sensores magnéticos, teorema de muestreo y la transformada discreta de Fourier entre otros.

La selección de un equipo para el desarrollo del proyecto se contó con el apoyo del ingeniero Esteban Blanco el cual evacuó varias dudas con respecto a equipos existentes en el mercado y sugirió algunas opciones, las cuales junto con propuestas propias fueron investigadas a través de fuentes en línea, luego la información brindada en sus hojas de datos se evaluó con base en los siguientes parámetros:

- Retardo de los sensores:

Los componentes utilizados para tomar una muestra proporcional de la señal no deben retardar la misma, debido a esto es necesario utilizar sensores con un tiempo de respuesta menor a la frecuencia de muestreo utilizada.

- Muestreo simultaneo:

Las señales deben ser muestreadas en el mismo instante de tiempo, ya que esto permite observar el efecto de la carga en suministro, es decir, el desfase entre las ondas de voltaje y corriente.

- Frecuencia de muestreo mínima:

De acuerdo con los requerimientos mínimos de la solución se deben obtener al menos 15 armónicas, es decir teóricamente la frecuencia mínima de muestreo del equipo debe ser 1,8 kHz. (Ver teorema del muestreo en la sección Marco teórico).

- Cantidad de canales de entrada:

Se deben adquirir como mínimo 8 señales de entrada.

- Capacidad de comunicación Ethernet:

El equipo debe tener la capacidad de comunicarse a través de una red Ethernet.

- Velocidad de procesamiento de datos:

La cantidad de muestras a recolectar obliga a que la conversión analógica digital, la escritura en registros, y los cálculos deben realizarse a una velocidad mayor a 17 milisegundos.

- Costo:

La compra total de insumos debe ser menor a \$7500 (%50 del valor del equipo industrial que realiza estas mediciones).

### 4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

A partir de los requerimientos expresados por el Ing. Varela se decide que el equipo no posea la cualidad de ser móvil, lo cual permite considerar soluciones empotradas en el gabinete donde se encuentran los centros de carga del taller, sin embargo esto limita el espacio del cual se dispone para la instalación.

Luego, en una visita al lugar donde se encuentra la acometida del taller, se observa que en dicho lugar se cuenta con alimentación de 120 V en corriente alterna y además que dicha alimentación es independiente del suministro del taller. Por otro lado la ubicación de la acometida permite instalar un cableado de STP de siete líneas necesario para la comunicación vía Ethernet.

Se valoraron tres diseños diferentes para la construcción del dispositivo, los mismos difieren principalmente en los componentes que se encargan del procesamiento y adquisición de los datos, pues el módulo de acondicionamiento de las señales medidas se mantiene prácticamente igual en todos los casos.

La etapa de acondicionamiento de las señales se dividió en dos partes, una por cada tipo de variable a medir, en la parte de voltaje se utiliza un divisor de tensión de alta impedancia en paralelo con la fase, y la parte encargada de la medición de corriente se realiza a través de una medición indirecta, es decir no se abre en circuito con el fin de conocer la corriente, esto porque la magnitud de la corriente puede alcanzar los 400 amperios.

Como se indicó anteriormente, en la etapa de procesamiento de la información se manejaron tres diseños, los cuales obedecieron primero a la disponibilidad del equipo necesario para la solución, luego la facilidad para dar mantenimiento al sistema y realizar mejoras en éste, al costo total de la solución y la posibilidad de agregar otras funciones en el futuro.

El primer diseño consistía en la utilización de un PLC Siemens S7-200, módulos EM231 y otro de comunicación Ethernet CP 243-1 [18], esto porque en la empresa ya se contaba con estos, lo que significaría un ahorro de tiempo; ya que se evitaría la ejecución de un proceso de compra. Se realizaron pruebas con el fin de corroborar la frecuencia de muestreo del módulo de entradas analógicas, la cual según su hoja de datos, puede llegar hasta los 4 kHz, además de verificar la capacidad de este de adquirir de manera simultánea 8 variables (esta información no se detalla en la hoja de datos).

La prueba realizada consistió en cablear un tono sinusoidal de 60 Hz a dos de las entradas del módulo EM231, y programar en el PLC una rutina en la que se leía el dato capturado y convertido por el ADC y se escribía en una fila en memoria. Los datos obtenidos mostraron que para un semiciclo de la señal ( $180^\circ$ ) se obtuvieron 4 muestras, lo cual significa que la frecuencia de muestreo no sobrepasó los 480 Hz, es decir que teóricamente no podría recuperar más allá de la 4 armónica, lo anterior se explica debido a que el procesador del controlador es el encargado de realizar las transferencias en memoria, por lo que el proceso es alrededor de 10 veces más lento de lo esperado.

Luego que se obtuvieron los resultados de dicho equipo se decidió descartarlo pues no cumplía con algunos de los criterios de selección definidos. Seguidamente se procedió con el diseño de una nueva propuesta, lo cual obligó al estudio de las características de otros dispositivos. Una vez que se formuló una nueva propuesta, esta se discutió con el Ing. Marvin Hernández quien estuvo de acuerdo en implementar una solución basada en microcontroladores de la familia dsPic33f de Microchip.

Seguidamente se inició el proceso de diseño de los algoritmos para esta nueva propuesta de solución, así como con el trámite de compra de los insumos necesarios. Esta pro-

puesta se basó en la utilización de dos dispositivos dsPIC33FJ128GP802-I/SP [11] uno se encargaría de la toma de datos de corriente y el otro de tensión, sin embargo, esta propuesta no prosperó debido a la capacidad de procesamiento de los microcontroladores, pues pese a contar con un módulo de acceso directo a memoria (direct memory access DMA) el cual se encargaría del paso de la información del convertidor analógico digital (analogic digital converter ADC) a la memoria donde se realiza el procesamiento no es lo suficientemente rápido.

Por otro lado el Ing. Varela observó que pese a que la opción basada en Microcontroladores tenía un costo menor a los \$300, presentaba el inconveniente de que el sistema no contaba con componentes certificados para aplicaciones industriales, además la reparación de la misma, así como el implementar mejoras es una labor compleja y el desarrollo de la misma tomaría un tiempo mayor al disponible para el desarrollo del proyecto.

Por último el tercer diseño está compuesto por un equipo Compact RIO-9073 de National Instruments y dos módulos de entradas analógicas NI-9215, este paquete cumple con todos los principios de selección de componentes expuestos anteriormente. El muestreo de los datos es simultáneo y el tiempo de conversión de los mismos es menor a 10 microsegundos. Además se trata de un equipo industrial que cumple con las especificaciones de la empresa y permite agregar otras funciones a la solución en el futuro.

#### **4.4 Implementación de la solución**

La primera etapa del desarrollo de solución consistió en la consulta de fuentes de información que permitieran conocer la teoría necesaria para la formulación de una solución congruente con el problema expuesto. Una vez que se tuvo el acervo de conocimiento necesario se procedió a definir las características mínimas del equipo por adquirir.

Una vez clarificadas las especificaciones claves del equipo se consulto al Ing. Esteban Blanco sobre algunos equipos que se encontrarán en el mercado y que cumplieran con los requisitos especificados. El Ing. Blanco sugirió al menos una par de equipos, por lo que fue necesario evaluar las características técnicas de los mismos.

Finalmente se seleccionó un controlador de automatización programable de última generación producido por National Instruments llamado NI Compact RIO 9073, el cual además de cumplir con los requerimientos mínimos dispuestos para el desarrollo de la solución diseñada, permite expandir en un futuro las funcionalidades de la solución propuesta de manera que se agregue la capacidad de corregir ciertos problemas en la alimentación eléctrica del taller.

Durante el tiempo que tardó en la compra de los componentes de la solución, se diseñaron y confeccionaron los circuitos impresos necesarios para el montaje de las sondas de adquisición de datos. En forma paralela se estudió de la forma de programación en NI LabVIEW.

Una vez que se contó con el equipo se desarrolló un primer código, que fue desechado porque no alcanzaba la velocidad de procesamiento deseada, además, subutilizaba los recursos de hardware ofrecidos por el equipo adquirido. El segundo código desarrollado alcanzó la velocidad de procesamiento de datos deseada, sin embargo a la hora de incluir las funciones de comunicación la velocidad caía, por lo que se buscó una tercera la solución la cual fue implementada con éxito.

La solución implementada se probó con un generador de señales, se utilizó un tono sinusoidal cableado a tres de las entradas del cRIO9073, dos a un módulo de captura de señales analógica y la otra al otro módulo NI 9215. Se observó que no existía desfase entre las formas de onda capturadas. Luego los resultados obtenidos se compararon con datos generados por medio de Matlab y se comprobó la validez de la solución implementada.



## **4.5 Reevaluación y rediseño**

El diseño de la solución se planteó considerando la posibilidad de realizar mejoras en el mismo, o bien ampliar las funcionalidades del dispositivo de manera que ejecute otras funciones. Dentro de las posibles mejoras que se encuentran la instalación de un módulo de expansión de memoria el cual permita almacenar la información de manera local en caso de un desperfecto en la red de comunicación. Además en caso de adquirir otro equipo similar, pero con un procesador que supere los 266 MHz del NI-9073, se puede considerar la posibilidad de que el analizador de calidad de energía eléctrica se encargue de manejar motores sincrónicos trifásicos de se encarguen de la corrección del factor de potencia del taller.

## Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

A continuación se presenta la evolución seguida por la solución implementada, se presentan y justifican las variaciones que esta sufrió durante el desarrollo de la misma. Además se describe el hardware del sistema de acuerdo al diseño modular seguido para la síntesis de la herramienta, también se explican las rutinas de software desarrolladas para el funcionamiento del sistema.

### 5.1 Análisis de soluciones y selección final

El sistema diseñado está compuesto de cuatro etapas, las cuales se pueden clasificar según la función que realizan como: Etapa de acople y acondicionamiento de señales, conversión analógica/digital y transmisión de la información, sección de análisis y presentación de los datos y por último la de respaldo de la información de interés. Dichas etapas se pueden apreciar en el siguiente diagrama presentado en la figura 5.1.

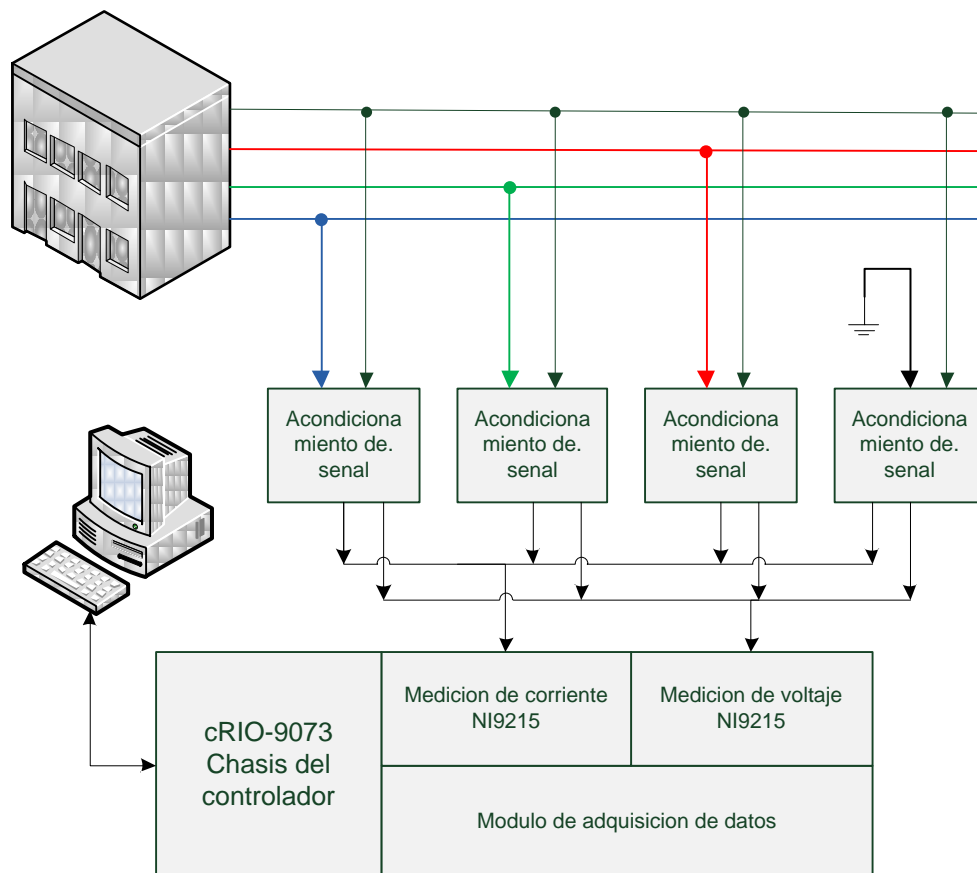


Figura 5.1 Diagrama de bloques que la solución implementada.

La etapa de acople y acondicionamiento de las señales está compuesto por cuatro circuitos impresos iguales, uno para cada línea (las tres fases y la línea de neutro), los cuales se diseñaron para aislar el suministro eléctrico del taller del dispositivo de análisis, de esta manera se evita que un pico de corriente o voltaje dañe las entradas analógicas del mismo o bien que se produzca un corto circuito a través de las tierras. Dichos circuitos impresos requieren de diferentes valores de alimentación CD, los cuales son proveídos por un quinto circuito impreso, diseñado considerando las características de aislamiento de tierras requeridas.

Luego en cuanto a la sección de conversión analógica/digital y transmisión de la información se utilizó un Compact RIO NI-9073 [13] con dos módulos de entradas analógicas NI 9215 [12] los cuales tienen la cualidad de muestrear cuatro canales de manera simultánea a una frecuencia máxima de 100 kHz, esto cumple con el criterio de muestreo mínimo y muestreo simultáneo requeridos.

El NI-9073 cuenta con un FPGA empotrado de 2M compuertas el cual se utilizó como registro volátil de los datos convertidos por el módulo NI 9215 y además como DMA, hacia la parte de la memoria del controlador industrial que se encarga de la construcción de las variables de tipo “waveform” (forma de onda), las cuales luego de ser incluidas en una fila son transmitidas por medio de la red hacia un servidor tipo NI Publish and Subscribe Protocol (NI-PSP) el cual se ejecuta en una computadora de la red.

Dicha computadora se encarga del procesamiento de la información adquirida, es en este paso donde se calculan los armónicos de las variables de entradas, la frecuencia de dichas señales, la distorsión armónica total y la potencia real, reactiva y aparente consumida por el sistema. También se detectan los picos de corriente y voltaje los cuales se respaldan en una base de datos, junto con la información temporal del momento en que ocurrieron y la variable donde se presentó el evento.

A continuación se describen algunas variaciones del diseño implementado que se consideraron, mas no se utilizaron pues ofrecieron un rendimiento menor al esperado, porque no cumplían con la totalidad de las especificaciones o bien por conveniencia a la hora de la implementación.

### 5.1.1 Soluciones planteadas para el diseño del hardware.

En cuanto a la monitorización de la señal de corriente se consideraron dos opciones, ambas realizan una medición indirecta de la corriente que pasa por el cable por medio de un acople galvánico, dichas posibilidades son transformadores de medición de corriente y sensores de efecto Hall. Las propiedades de los mismos se presentan en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1** Características de los transformadores de medición y los sensores de efecto Hall valorados en el diseño de la solución.

Característica	Transformador de corriente	Sensor Efecto Hall CSLA2EL
Corriente máxima (A)	600	550
Alimentación $V_{cc}$ (V)	-	5.4 a 13.2
Salida	5 (A)	$V_{cc}/2 \pm V_{cc}/4$
Tiempo de respuesta ( $\mu$ s)	>100	3
Tamaño del Hoyo (mm)	39.6	26.9
Precio unitario (\$)	37.28	46.47

Se utilizaron los sensores de efecto Hall CSLA2EL de Honeywell [10], ya que como se indica en la tabla 5.1, su rango de medición así como el tamaño del hoyo por el que se pasa el conductor se ajusta a las necesidades del proyecto, por otro lado su salida es una tensión que varía de manera lineal y únicamente introduce un retardo máximo de 3 microsegundos.

Por otro lado, para monitorizar la señal de tensión se consideró utilizar un transformador de potencial sin embargo esta opción se descartó pues de acuerdo con [3] estos pueden introducir dos tipos de errores: Error en la relación de transformación y un error de ángulo, dichos problemas afectan de manera directa la información de magnitud y fase de la señal de entrada.

Debido a lo anterior se utilizó un divisor de tensión de alta impedancia (bajo consumo de potencia) por lo que resultó necesario utilizar un método de separación de tierras, de manera

que no se forme un circuito entre el neutro del suministro del taller y la tierra del sistema diseñado.

En cuanto al equipo de adquisición propiamente, se consideró emplear una tarjeta de adquisición de datos NI PCI-6122 la cual posee 4 entradas analógicas por lo que sería necesario adquirir dos de estos equipos, además los mismos requieren de un bloque conector y un cable especial, por lo que sería necesario invertir \$5210, aunado a esto dichas tarjetas deben de conectarse a un computador industrial con mínimo dos entradas PCI lo cual elevaría el costo de esta solución sobre los \$7000.

Por otro lado, utilizar un controlador industrial programable deja abierta la opción de implementar nuevas funcionalidades al sistema que con la tarjeta de adquisición no serían viables.

### **5.1.2 Soluciones planteadas para el diseño de software.**

Como se mencionó anteriormente, el software empleado pasó por dos estados previos antes de obtener los resultados, dichas fases fueron modificadas hasta alcanzar el rendimiento esperado. A continuación se detalla las características de cada una de las etapas que atravesó el software implementado en la solución final.

El primer código generado ejecutaba las funciones de trasladar la salida de los ADC a la memoria de cálculo, análisis y presentación de los datos utilizando únicamente el procesador del controlador, sin embargo los resultados obtenidos no fueron satisfactorios pues la tasa de muestreo y la presentación de los datos era inferior a las 600 muestras por segundo.

El segundo código busco utilizar todos los recursos de hardware que ofrece el NI-9073, por lo que emplea el FPGA empotrado en dicho controlador industrial. Éste recurso se utilizó como buffer y DMA de manera que el procesador del controlador se pudo dedicar únicamente al cálculo y presentación de los datos, en esta ocasión se obtuvieron resultados superiores a los primeros en cuanto a velocidad ya que la frecuencia de muestreo alcanzó 2.04 kHz, sin embargo a la hora de agregar la escritura en la base de datos, la velocidad con que se presentaban los datos caía, por lo que fue necesario evaluar cual es la información que realmente tiene sentido ser respaldada. Luego de discutir este punto con el Ing. Varela se decidió que únicamente resultaba de interés los valores de las formas de onda cuando estos sobrepasaban la condición nominal de trabajo, por lo que se descartó generar una base de datos con toda la información generada.

Pese a esto el agregar la base de datos supuso un aumento en el tiempo de procesamiento, lo que generó una pérdida de información.

El tercer código incluye en el nivel del procesador del controlador un cliente de red el cual le permite comunicarse vía Ethernet con una computadora dispuesta para el procesamiento, presentación y -de ser necesario- almacenamiento de datos.

El sistema se probó con nivel de tensión constante y además con un generador de señales, con formas de onda cuadrada y sinusoidal a 60 Hz, luego se cotejaron los resultados presentados en la pantalla de la computadora con los obtenidos en mediante el software de cálculo numérico Matlab.

## 5.2 Descripción del hardware

La descripción del hardware se realiza siguiendo el diagrama presentado en la figura 5.1 de manera que se muestren los componentes relevantes que se encuentran en cada uno de los bloques de la solución.

### 5.2.1 Módulo de acople y acondicionamiento de señales

Como se mencionó anteriormente, este módulo se compone de dos secciones, la fuente y las puntas de medición. La fuente se encarga de generar las tensiones necesarias para alimentar los integrados presentes en las puntas de adquisición. A continuación se describe cada uno de los componentes utilizados en la confección de estos dispositivos.

La figura 5.2 presenta el esquemático del circuito fuente, en este se puede observar que se utilizó un transformador reductor de relación 10:1 con derivación central en el secundario el cual alimentó un circuito integrado NTE5332 [15] que es un cuadro de diodos capaz de entregar hasta un amperio.

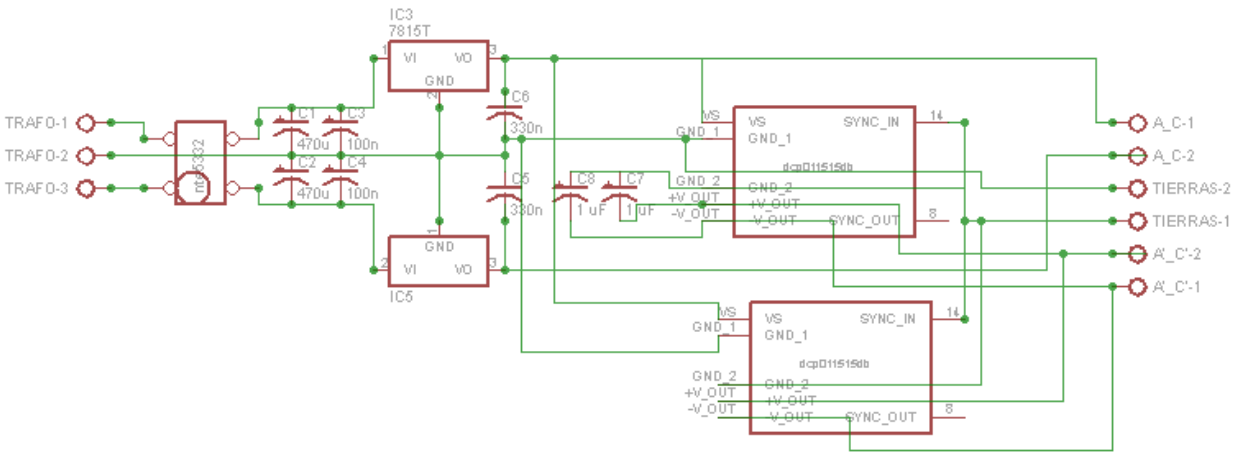


Figura 5.2 Representación esquemática del circuito de la fuente.

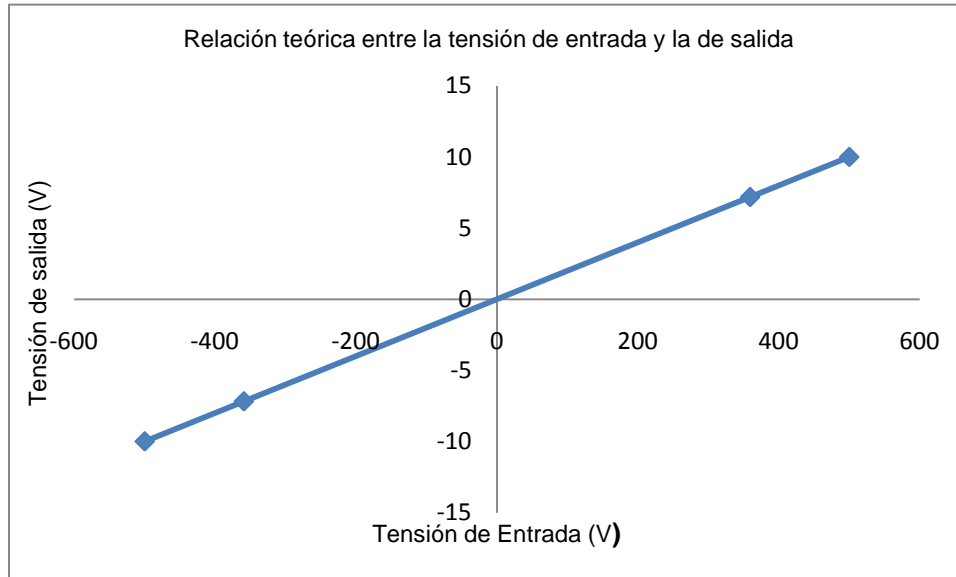
El circuito fuente posee capacitores electrolíticos de 470  $\mu\text{F}$  los cuales reducen el rizado de la señal de salida elevando el nivel de corriente continua que alimenta los reguladores, además los capacitores cerámicos de 100 nF y 330nF se encargan de filtrar el ruido presente en la misma.

Luego, para generar tensiones CD de 15V y -15V se utilizaron reguladores de tensión integrados, el regulador LM7815 [14] proporcionó los 15V y el L7915AC [19] -15 voltios.

Con el fin de aislar la referencia utilizada para la adquisición de las señales de la tierra del sistema se emplearon dos convertidores CD/CD DCP011515DB [6], los cuales a partir de una alimentación positiva de 15V y generan a su salida voltajes bipolares de la misma magnitud que la entrada y una tierra totalmente aislada. Dichos dispositivos se conectaron en paralelo por una cuestión de consumo de potencia, pues a partir de esta fuente se deben alimentar 4 puntas de adquisición. La configuración empleada tiene la capacidad de ofrecer hasta 2 Watts. El montaje de dicho circuito se realizó en un circuito impreso.

La punta de adquisición está conformada por dos secciones, una se encarga de tomar la muestra de tensión y la otra de corriente. La parte que se encarga de la toma de muestras de tensión está compuesta por un divisor de voltaje de 5 M $\Omega$  eso asegura una corriente pico –en condiciones normales de trabajo- de 71.85  $\mu\text{A}$ . De lo anterior se tiene que el consumo del divisor de tensión sería de 25.81 mW.

El divisor de voltaje se diseñó de manera que tuviera una pendiente de 0.02, la curva teórica de comportamiento del mismo se presenta en la figura 5.3, en la misma se observa que los puntos máximos de operación normal son mapeados de  $\pm 359.26\text{V}$  a  $\pm 7.185\text{V}$ , y que el valor máximo que sería tolerado por el sistema (limitación impuesta por el módulo NI9215) es de  $500\text{V}$ , aproximadamente 30% más del valor nominal de trabajo de la red.

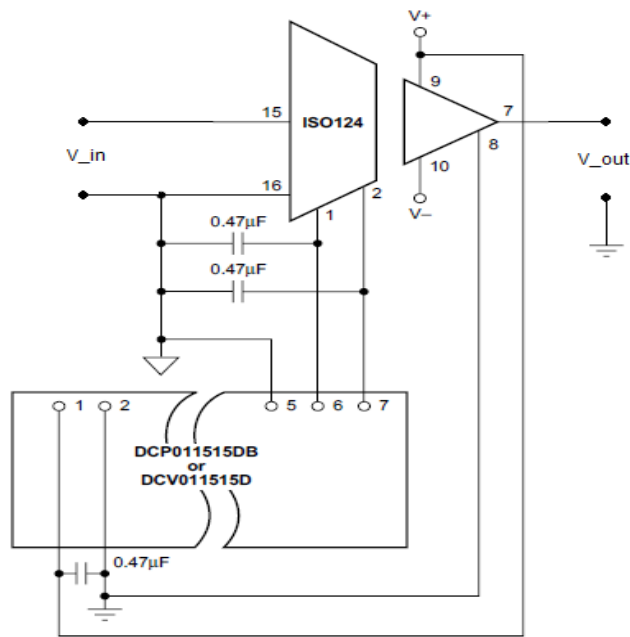


**Figura 5.3** Relación teórica entre el voltaje de entrada y el de salida del divisor de tensión.

En la confección de dicho divisor se emplearon 3 resistencias de precisión las cuales presentaron valores de  $4.87\text{M}\Omega$ ,  $30\text{k}\Omega$  y  $100\text{k}\Omega$ , la salida del mismo corresponde al voltaje que cae en la resistencia de  $100\text{k}\Omega$ .

Luego la salida de este módulo es conecta a la entrada del amplificador de aislamiento ISO124 de Texas Instruments, el cual presenta cualidades deseadas como un rechazo en modo común de  $140\text{dB}$  a  $60\text{Hz}$ , así como una salida de  $\pm 10$  y una distorsión mínima para señales sinusoidales a  $60\text{Hz}$ . Dicho integrado fue conectado según el diagrama presentado en la figura 5.4.

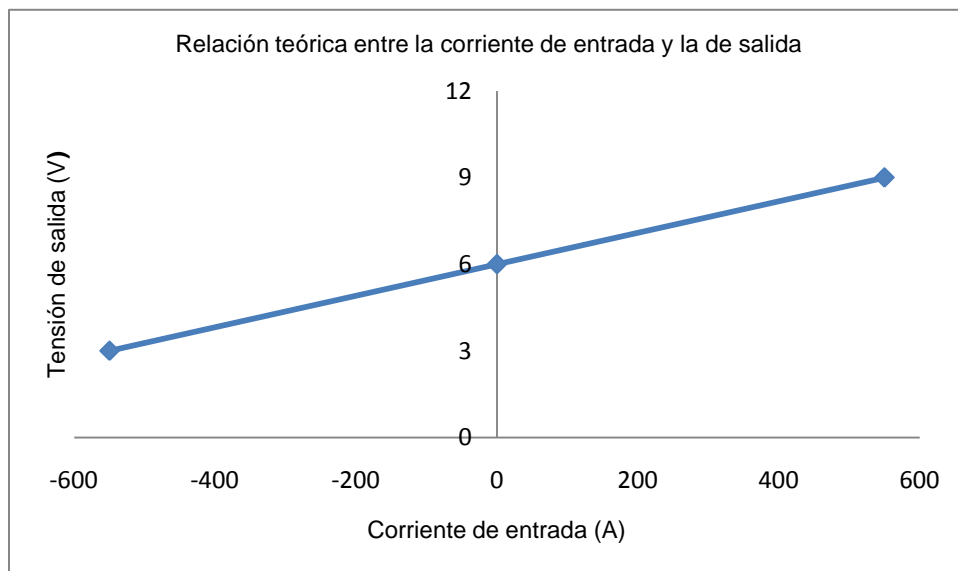
Además en dicha figura también se observa que el amplificador utiliza dos alimentaciones diferentes, del primario es provista por el convertidor CD/CD, mientras que la alimentación del secundario proviene directamente de los reguladores de tensión de la fuente.



**Figura 5.4** Diagrama de conexión del amplificador ISO124. (Tomado de [20]).

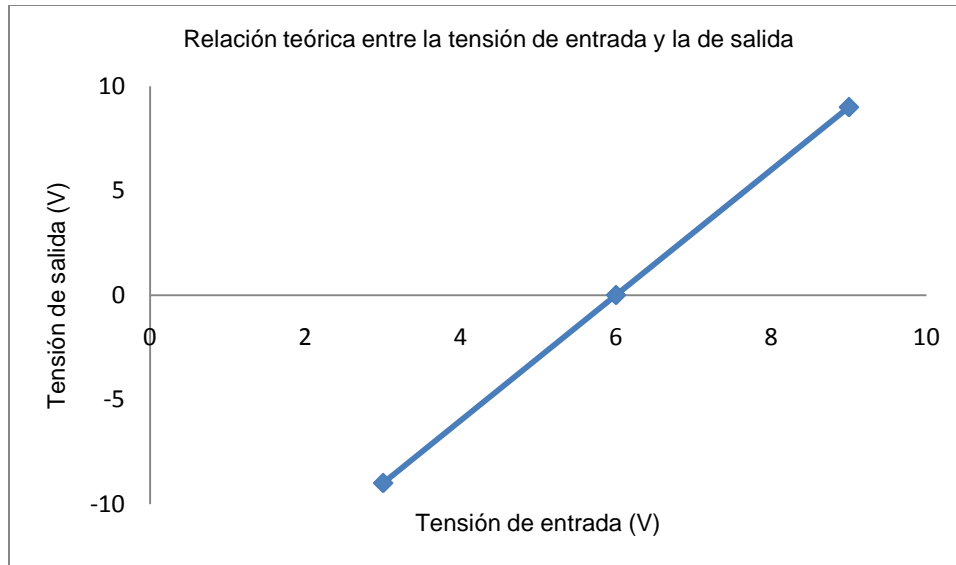
En cuanto a la adquisición de la señal de corriente, se tiene que esta es sensado por un sensor de Hall CLSA2EL de Honeywell [10], el cual por la naturaleza aísla galvánicamente el circuito de medición de la alimentación a medir.

La salida de este sensor cuando es alimentado con 12V es presentada en figura 5.5.



**Figura 5.5** Relación entrada salida del sensor de Hall CSLA2EL.

La salida del sensor tiene un rango de 6 voltios los cuales tienen nivel de 6 voltios, esta situación subutiliza la capacidad del módulo de adquisición de datos NI9215, el cual posee un rango de entradas de  $\pm 10V$ , razón por la cual se implementó un circuito acondicionador de señal que recibe como entrada la salida del sensor de Hall. La figura 5.6 presenta el mapeo realizado por el circuito acondicionador de señal.



**Figura 5.6** Relación entrada salida del circuito acondicionador de señal.

Luego las salidas del módulo de acople y acondicionamiento de señales, ajustadas y aisladas del suministro medido son conectadas con la siguiente etapa del sistema, el módulo de conversión analógica/digital y transmisión de la información.

### 5.2.2 Módulo de conversión analógica/digital y transmisión de datos

Esta sección está compuesta por el chasis del Compact RIO NI9073[13] el cual además del controlador industrial programable incluye, un FPGA de 2 millones de compuertas y una interfaz Ethernet, a dicho controlador se le instaló de manera adicional dos módulos de entradas analógicas NI9215.

Las principales características del módulo de expansión NI9215, se presentan en la tabla 5.2:

**Tabla 5.2** Características del módulo de entradas analógicas NI9215.

Número de Canales	4
Tipo de entrada	Diferencial
Frecuencia máxima de muestreo (kHz)	100
Resolución del ADC (bits)	16
Tipo de señal de entrada	Voltaje
Rango de entrada (Voltios)	-10 a 10
Rango de temperatura (Grados Celsius)	-40 a 70

Además el módulo NI9215, posee aislamiento de canal a tierra el cual protege el sistema contra transitorios voltaje, voltajes en modo común y lazos a tierra. Además, las entradas soportan picos de  $\pm 30V$  sin dañarse.

En cuanto al NI9073 se tiene que está conformado por un controlador integrado en tiempo real de 266 MHz, y un FPGA de 2 millones de compuertas. Además de las características antes mencionadas, en la tabla 5.3 se detallan otros datos acerca de dicho equipo.



**Tabla 5.3** Características del módulo del controlador industrial NI9073.

Cantidad de ranuras de expansión	8
Interfaces de comunicación	Ethernet 10/100 Serial RS232
Suministro de potencia (V)	19 a 30
Rango de temperatura (Grados Celsius)	-20 a 55
Memoria DRAM (MB)	64
Memoria no volátil (MB)	128

La figura 5.7 muestra la configuración del sistema utilizado, en la misma se aprecia el espacio disponible para colocar, como máximo, 6 módulos de expansión más.



**Figura 5.7** Chasis cRIO-9073 con los módulos de expansión NI-9215.

### 5.2.3 Módulo de análisis y presentación de la información

Es módulo está compuesto por una computadora la cual es capaz de ejecutar el software desarrollado en LabVIEW, además debe tener un puerto Ethernet, al menos 500 MB de espacio libre en el disco duro (después de la instalación del software necesario).

En el caso particular de la solución se utilizó una computadora portátil Toshiba a200 AH7, la cual cuenta con un procesador de doble núcleo, 2 GB de memoria RAM y 160 GB de disco duro, de los cuales 20 GB se encuentran libres.

## 5.3 Descripción del software

Debido a que el equipo NI-9073 debe ser programado con el software de National Instruments LabVIEW, y a que es posible programar rutinas en este lenguaje para la computadora, la totalidad de las mismas se implementó en dicho paquete.

LabVIEW es un entorno de programación gráfica, en el cual el código se describe a través de iconos y cables formando diagramas de flujo. Bajo este enfoque los programas son llamados “instrumentos virtuales” los cuales son programados en dos secciones, una que es llamada panel frontal (en el cual se presentan las variables que se muestran al usuario o que se comunican con otro instrumento virtual) y otra que es el diagrama de bloques propiamente (en este se detallan las funciones a realizar, y el flujo de los datos a través del instrumento virtual).

A continuación se detalla el software desarrollado para cada uno de los elementos del sistema que admiten programación, esto se hace siguiendo el flujo que siguen los datos en el sistema.

### 5.3.1 Rutina del FPGA

Esta rutina recibe dos parámetros como entradas, los cuales son: número de muestras por bloque de datos y tiempo que tarda cada una de las iteraciones del ciclo de captura de la información. El primero de estos, se define a partir de la cantidad de armónicas que se desean analizar, mientras que el segundo se deriva de manera directa del primero pues es el periodo, en microsegundos, que debe tardar el sistema en tomar una muestra y procesarla.

Además como salidas se tienen dos estructuras de datos tipo fila (el primer dato que ingresa a la fila, es el primero en ser extraído) una para cada tipo de variable, así como un valor que indica el tiempo empleado en capturar un bloque completo de datos (necesario en caso de que se presenten problemas en la adquisición por lo que el tiempo que se tarda en completar un bloque de datos no sea igual a la multiplicación de la cantidad de muestras por el periodo).

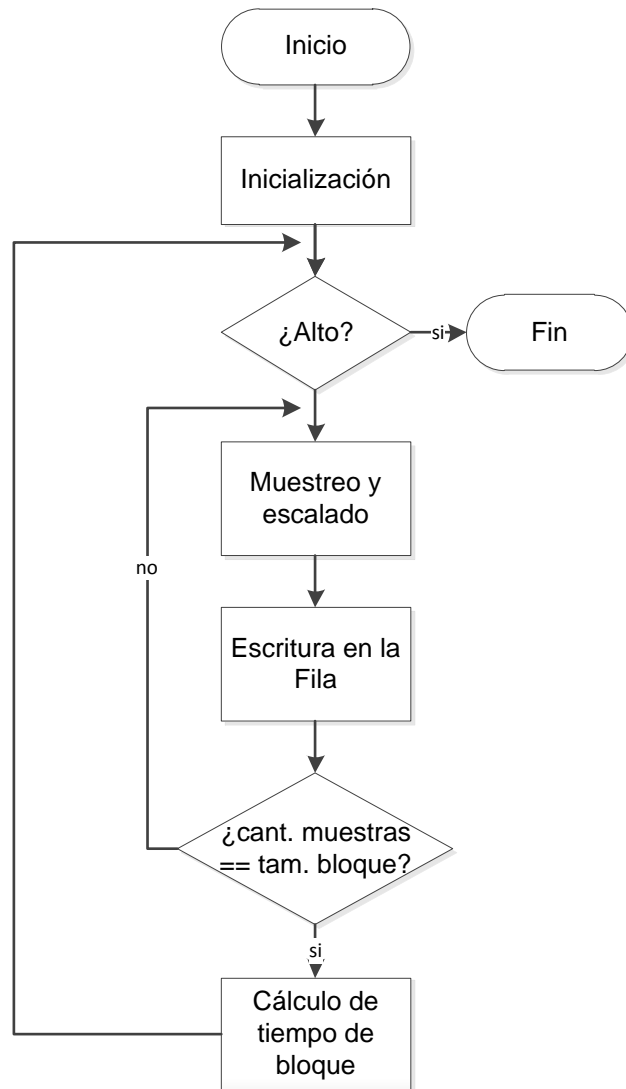
El programa desarrollado se compone de tres partes principales las cuales se dividen según la función específica que realizan. Dichas secciones son: muestreo y escalado, escritura en la fila y medición del tiempo que tarda en capturarse un bloque de datos.

Las secciones que realizan estas funciones, así como la manera en la que se articulan para la obtención del resultado deseado se presentan en la figura 5.8 la cual muestra el diagrama de flujo de la rutina desarrollada para el FPGA.

La inicialización se encarga de asegurar que el contador que mide el tiempo transcurrido desde que se inicia la ejecución de la rutina hasta el momento en que se alcanza a completar un bloque de datos comience en cero, además se asegura que la escritura de las filas inicie desde la primera posición de memoria de las mismas, de manera que se evite el procesamiento de datos erróneos.

Luego, la adquisición de los valores convertidos por los módulos de entradas analógicas se realiza de manera simultánea, la misma se realiza por medio de la lectura del registro de salida de estos.

Los módulos NI-9215 se configuraron para que su salida sea en formato de punto decimal fijo, ya que estos poseen una resolución de 16 bits, se reservaron 10 bits para la parte entera, 5 para la parte decimal y un bit de signo. Entonces los valores medidos van de -1024.0000 hasta 1023.9687.



**Figura 5.8** Diagrama de flujo de la rutina del FPGA.

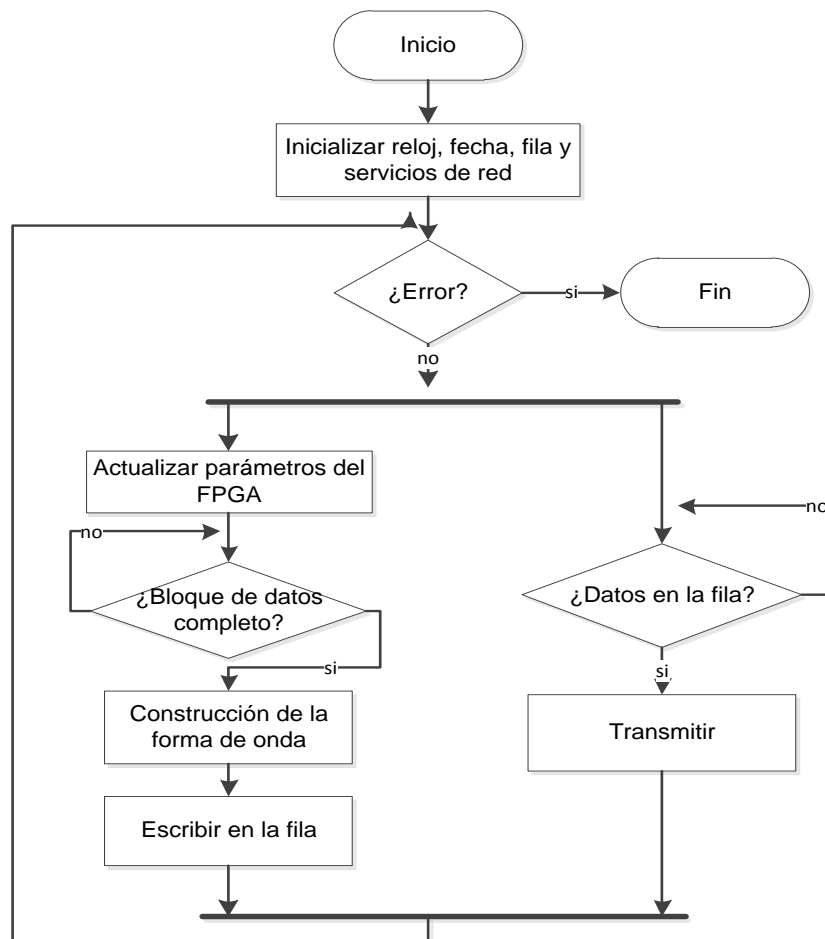
Pese al ajuste realizado por medio de la configuración de los módulos de entradas analógicas, se cuenta con una etapa en la cual es posible escalar los valores registrados, de manera que sea posible corregir un error de magnitud presente en las mediciones realizadas. Al tratarse de una multiplicación es evidente que el ajuste es de carácter lineal, por lo que no altera la información de fase.

Después los datos son agrupados según la variable que representan, y almacenados en filas, dichas filas poseen un tamaño máximo de 1024 Bytes, es decir, un máximo de 128 muestras por variable. Utilizar filas permite leer y escribir en la misma al mismo tiempo, ya que estas acciones se realizan en porciones diferentes de memoria, por lo que el tiempo de lectura no restringe las operaciones de medición.

### 5.3.2 Rutina del Controlador

Como funciones principales la rutina empujada en el controlador tiene las de recuperar la información captada de cada uno de las 8 variables a una frecuencia de 2.04 kHz, construir la forma de onda y enviarla a través de la red Ethernet al ordenador que se encarga de procesar los datos.

La figura 5.9 muestra el diagrama de flujo de la rutina desarrollada para el controlador NI-9073. En la misma se tiene como primer paso la inicialización del calendario y el reloj de tiempo real el cual es utilizado en la construcción de las formas de onda, además se declara una estructura de datos de tipo fila y se ejecutan los servicios de red. También se crea la instancia necesaria para utilizar desde esta rutina el FPGA. Luego se consulta por errores en cualquiera de los pasos anteriores, de existir al menos uno el sistema no arranca.



**Figura 5.9** Diagrama de flujo de la rutina del controlador.

Se actualizan los parámetros necesarios para el funcionamiento de la rutina del FPGA y se da inicio a la misma.

Una vez que las filas de datos destinadas para almacenar las variables de corriente y tensión llega a la cantidad de muestras especificada para un bloque completo de datos, se inicia con la construcción de las variables tipo “forma de onda”, estas incluyen un arreglo de magnitud de la señal así como un tiempo inicial de la onda y un valor que indica la separación temporal entre muestras.

El valor del tiempo inicial “ $t_0$ ” se obtiene por medio de la suma del valor de tiempo que tarda el FPGA en capturar un bloque completo de datos y el valor del reloj de tiempo real.

Ahora se agrupan las 8 variables “forma de onda” en un único arreglo de memoria, el cual es escrito en la fila, para luego ser enviado por la red. Lo anterior debido a la necesidad de formar un único paquete de datos, lo cual permite reducir el tráfico en la red.

El proceso de comunicación se realiza utilizando el motor de distribución de variables de LabVIEW, el cual emplea el protocolo de suscripción y publicación de variables (NI-PSP), el mismo fue desarrollado por National Instruments y permite que dos dispositivos que ejecuten este protocolo se comuniquen en tiempo real.

La construcción de las variables tipo “forma de onda” y la comunicación de las mismas fueron programadas de manera que se ejecuten de manera simultánea (en paralelo), con lo que se logra una mayor eficiencia del sistema.

### 5.3.3 Rutina de la computadora

Esta rutina es la encargada del análisis y presentación de la información, y en caso de ser necesario el respaldo de la misma. Los procesos de análisis y detección de picos fueron programados de manera que se aproveche la capacidad de LabVIEW de ejecutar rutinas en paralelo.

La figura 5.10 presenta el diagrama de flujo de la rutina, en la misma se muestran las dos ramas que se ejecutan de manera paralela.

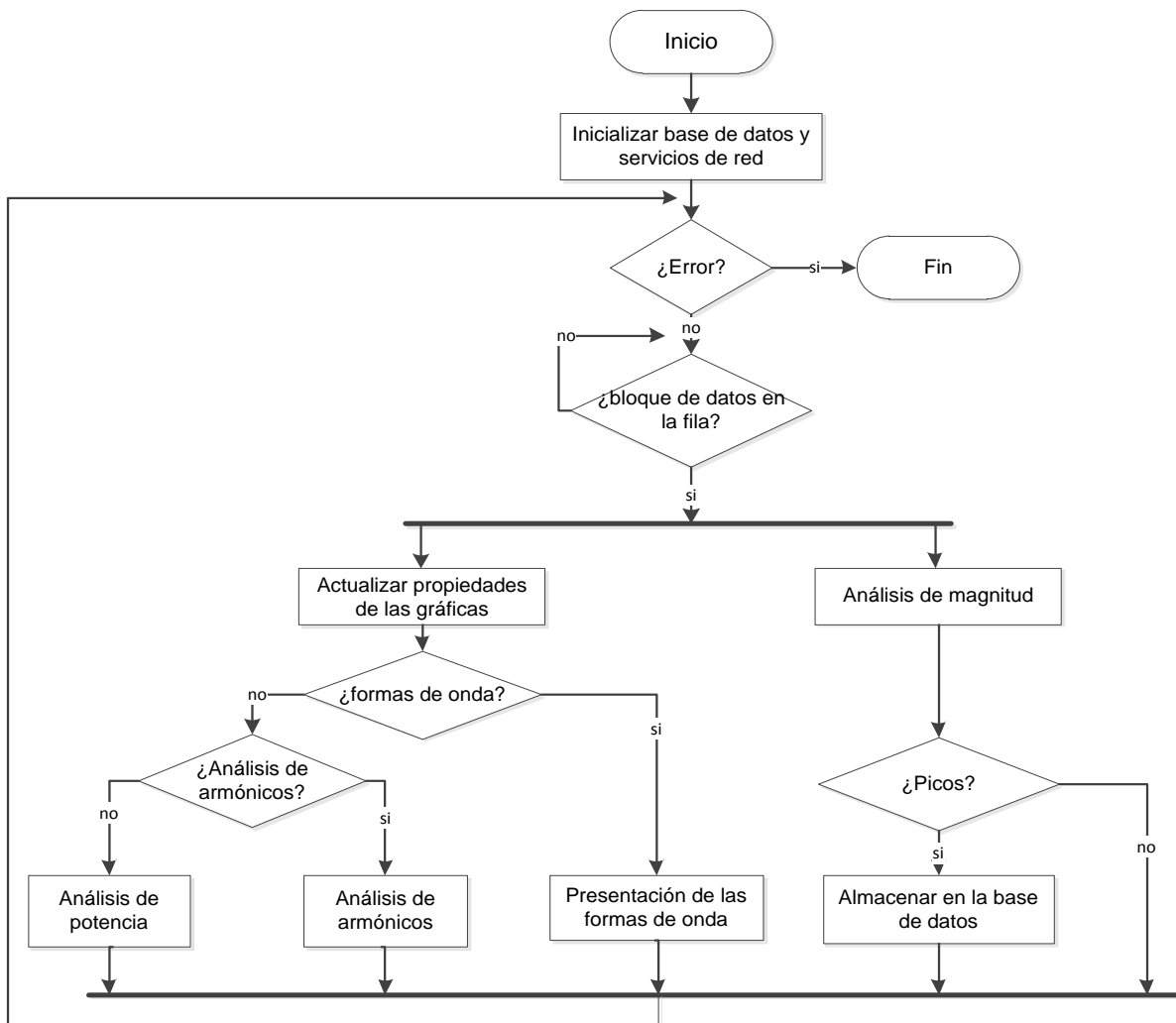


Figura 5.10 Diagrama de flujo de la rutina de la computadora.

El proceso de inicialización de la base de datos y de los servicios de red se realiza como una fase previa a la etapa de análisis, lo anterior pues es necesario contar con las funciones de red para la adquisición de los datos a través de la misma, y además porque a la hora de escribir en la base de datos se requiere acceder a esta en el menor tiempo posible.

Los instrumentos virtuales encargados de la fase de inicialización poseen la capacidad de comunicar si se presentó algún error mientras funcionaban, razón por la cual como primer paso del programa se consulta por estos, de manera que se impida el inicio de las funciones de análisis en caso de presentarse algún problema.

En caso de que no se presente ningún error, se espera a que se transmita desde el equipo remoto un paquete de datos, el cual se procesará de manera simultánea para la detección de picos y de acuerdo con la selección del usuario según esta sea: forma de onda, análisis de armónico o de potencia.

A continuación se describen las dos ramas de ejecución que posee la rutina: análisis y detección de picos.

#### **a. Detección de picos**

La detección de picos se realiza por medio del instrumento virtual “Detector de picos” (peak detection) el cual utiliza interpoladores para calcular la presencia de picos entre muestras, el instrumento devuelve el instante temporal preciso (calculado con base en la interpolación) en que se presentó el pico detectado, así como la magnitud del mismo.

Se utilizan dos detectores, uno se encarga de los picos positivos y el otro de los picos negativos, este proceso se realiza en paralelo. Por otro lado el estudio de las señales se realiza un canal a la vez, esto permite distinguir que señal presenta el pico detectado.

Con base en la experiencia se ajusta un umbral en el cual los picos no son importantes, el mismo corresponde a un 10% en el caso de la corriente y un 5% para la tensión de fase del valor nominal de trabajo de la red.

En caso de registrar un suceso (pico), la magnitud de éste se almacena en la base de datos de manera inmediata junto con información que permita caracterizar el evento como lo son: el nombre de la variable en que se observó la irregularidad, la magnitud y hora de la misma.

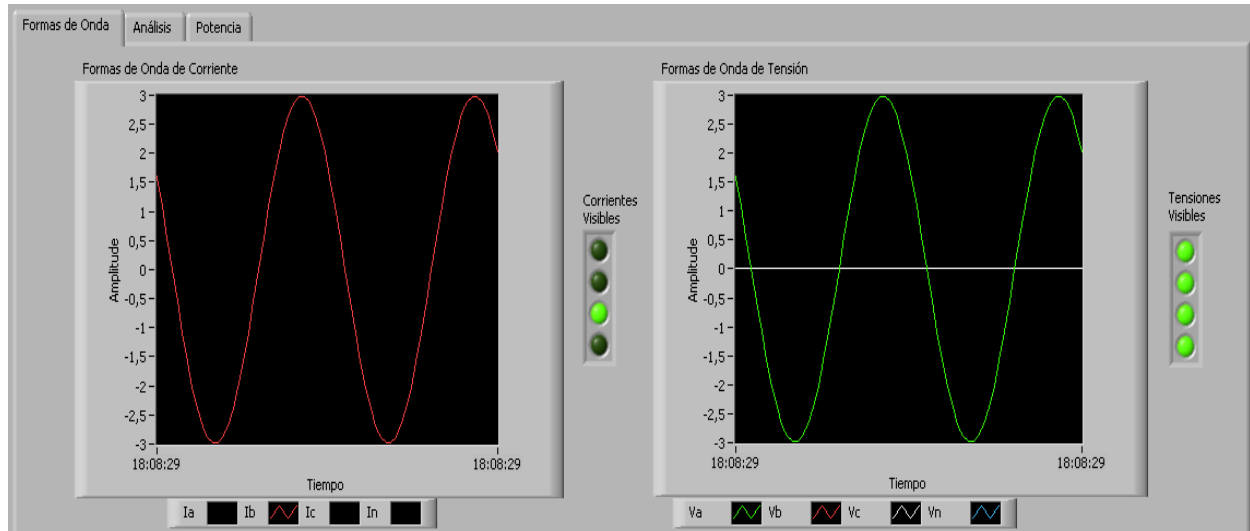
La búsqueda de picos es un proceso que se ejecuta de manera ininterrumpida, además es transparente al usuario, por lo que este no puede activar o desactivar la función. Por otro lado esta función no posee interfaz gráfica, por lo que si se quiere revisar el comportamiento de la red es necesario consultar la base de datos directamente.

En cuanto a la base de datos, esta es accedida mediante el estándar ODBC (Open data base connectivity) el cual opera bajo la metodología de cliente-servidor, por lo que se debe crear un archivo tipo enlace universal de datos (universal data link) el cual posee una extensión “.udl”, este archivo almacena la información utilizada por la base de datos en que se respaldará la información, como por ejemplo: proveedor de datos, origen de datos, catálogo inicial (dirección de la base de datos, incluida esta), usuario y password (en caso de que la base de datos lo requiera), privilegios que posee la conexión (lectura, escritura, ambos), entre otros.

El sistema de gestión de bases de datos utilizado es Microsoft Access, este permite revisar los eventos detectados, además de contar con herramientas las cuales facilitan la presentación de la información, como lo son buscadores, o bien funciones para ordenar los datos de acuerdo a la hora, la magnitud o la variable.

## b. Análisis

El usuario selecciona el análisis a realizar desde el panel frontal del instrumento virtual desarrollado para la computadora. La figura 5.11 muestra la pantalla desarrollada para la presentación de las formas de onda, en la parte superior izquierda se aprecian las pestañas que permiten seleccionar el análisis a realizar.



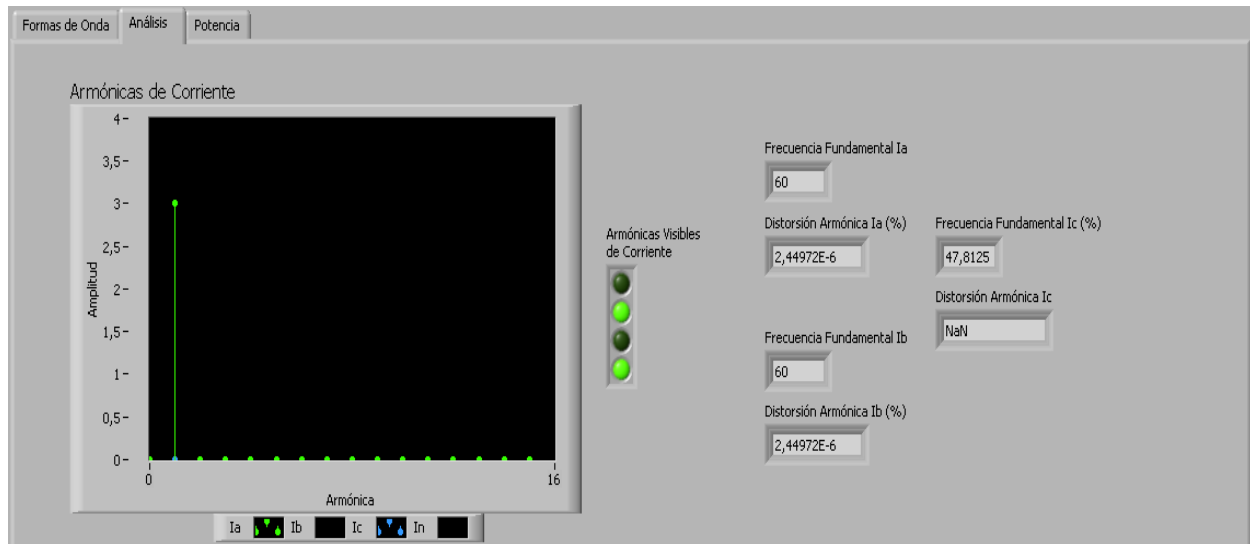
**Figura 5.11** Panel frontal del instrumento virtual desarrollado para la computadora, presentación de las formas de onda.

En la figura anterior se tienen dos indicadores tipo “gráfica de forma de onda” estos son una herramienta con que cuenta LabVIEW por lo que no fue necesario su desarrollo. Este tipo de indicador recibe un arreglo de formas de onda y presentan en el panel frontal una gráfica correspondiente al valor de cada forma de onda en un instante de tiempo determinado, por otro lado este tipo de indicador posee la cualidad de actualizarse en tiempos no periódicos.

El control de cuales variables son visibles se realiza por medio de un nodo de propiedades asociado a cada uno de los indicadores, esto permite variar por medio de interruptores ubicados en el panel frontal los atributos de los mismos, seleccionando de este modo únicamente las formas de onda que se desean ver.

Por otro lado, la pantalla destinada al análisis de la forma de la onda, presenta mediante gráficas la magnitud instantánea de los primeros 15 armónicos para cada variable. Estas gráficas, al igual que en los indicadores de la pestaña donde se presentan las formas de onda, permiten seleccionar cuales variables se presentan. También se muestra la frecuencia fundamental de la señal de entrada y la distorsión armónica total de la corriente y el voltaje de las fases.

La figura 5.12 muestra el panel frontal del análisis de la forma de onda, a la izquierda se tienen las gráficas de magnitud de los armónicos y a la derecha los indicadores numéricos de frecuencia fundamental y distorsión armónica total.



**Figura 5.12** Panel frontal del instrumento virtual de la computadora, análisis de harmónicas.

La información presentada en la pantalla de análisis de la forma de onda es calculada por medio de un instrumento desarrollado por National Instruments llamado “Analizador de distorsión armónica”. Este recibe como entrada un arreglo de funciones de onda el cual es previo a ser transformado al dominio de la frecuencia es multiplicado por una función de Hann en el dominio del tiempo, lo cual permite reducir el fenómeno de goteo del espectro (spectrum licking) [17], una vez concluido este paso se realiza la transformada de Fourier por medio del algoritmo FFT. Una vez transformado se busca la frecuencia que presenta una amplitud mayor, es decir la frecuencia fundamental, por medio del instrumento virtual “Extractor de información de un tono desde un espectro”, luego a partir de esta se obtienen las frecuencias armónicas por medio de la multiplicación de esta por los números enteros de 2 a 15.

El analizador de distorsión armónica recibe además una serie de parámetros los cuales permiten agilizar la ejecución del mismo, por ejemplo se ajustó que el rango de búsqueda de la frecuencia fundamental debe centrarse en 60 Hz y que el rango de búsqueda no debe exceder 2 Hz. También se configura que no deben calcular armónicas más allá del límite teórico señalado por el teorema de Nyquist.

El cálculo de la distorsión armónica total se realiza con la ecuación 3.5, la misma se realiza a lo interno del analizador de distorsión armónica, luego este entrega un arreglo con los datos de todas las variables analizadas.

En cuanto a la visualización, el instrumento virtual que realiza los cálculos entrega arreglos con la información generada, por lo que a la hora de ser presentada, esta debe ser recuperada en canales independientes. Esto se logra a través de un ciclo el cual toma una fila del arreglo y extrae la información de cada columna para ser agrupada en un arreglo independiente.

El análisis de potencia se realiza por medio de un instrumento virtual, el cual admite entradas monofásicas, es decir un arreglo de corriente y otro de voltaje, o bien entradas trifásicas (fases y el neutro), el tipo de variable de entrada debe ser “forma de onda” pues se requiere conocer la información temporal para el cálculo de la potencia instantánea.

La implementación realizada utiliza ambas formas del instrumento virtual que analiza la potencia, pues la información de cada una de las líneas se genera de manera independiente,

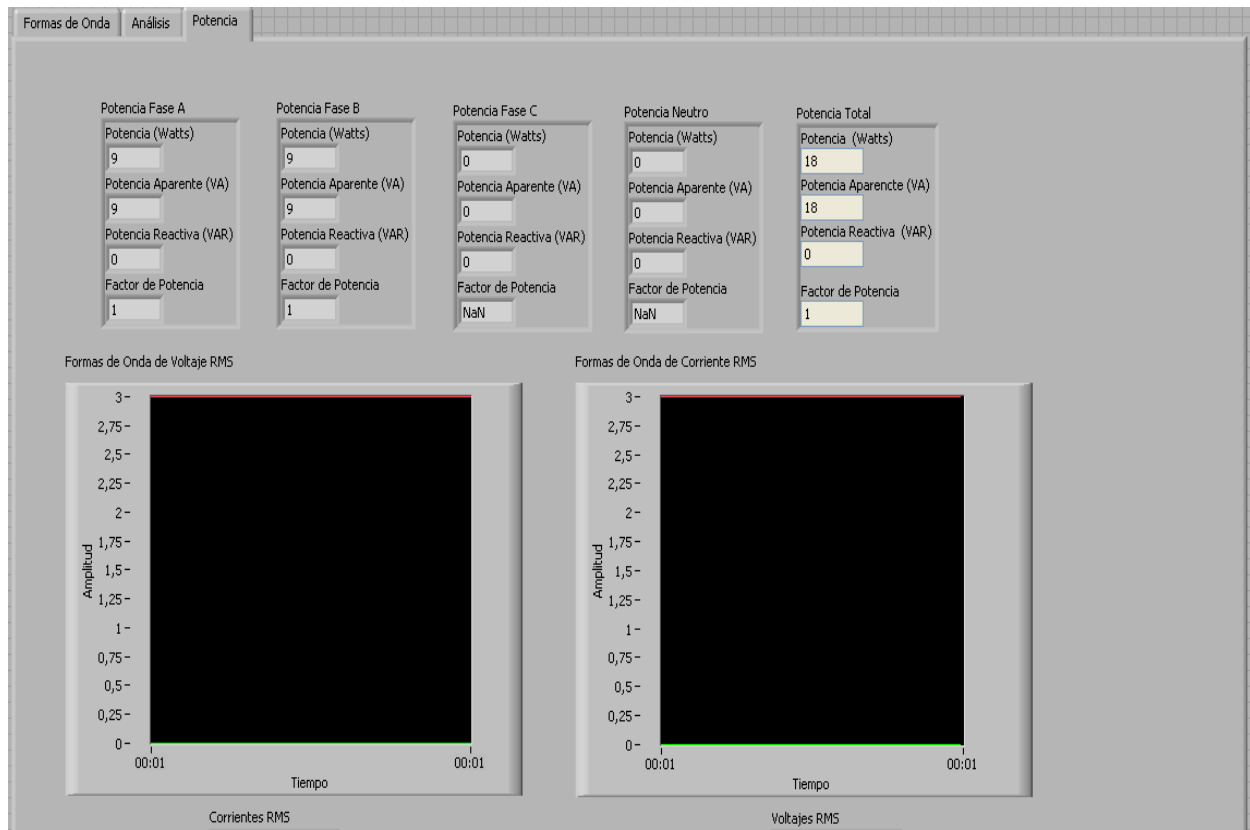


mas la obtención de los datos de todo el sistema se utiliza el polimorfismo que admite múltiples entradas.

El valor efectivo de las señales se obtiene mediante el mismo instrumento virtual, este realiza el cálculo de dicha magnitud mediante la ecuación 3.4, dichas magnitudes se muestra por medio de una gráfica.

En el panel frontal se presentan las magnitudes de potencia activa (ecuación 3.8), potencia reactiva (ecuación 3.9), potencia aparente (ecuación 3.7) y factor de potencia (ecuación 3.10) para cada una de las líneas monitoreadas, así como para el suministro completo.

La figura 5.13 muestra el panel frontal desarrollado para la visualización de la información referente al análisis de potencia.



**Figura 5.13** Panel frontal del instrumento virtual de la computadora, análisis de potencia.

## Capítulo 6: Análisis de resultados

El sistema no pudo ser instalado en la acometida del taller de precisión debido a que el calendario laboral del mismo (actualmente se trabajan los 7 días de la semana) no permite desconectar la alimentación para realizar la dicha labor. Debido a lo anterior fue imposible probar los módulos de acople y acondicionamiento de señales, ya que estos fueron diseñados para monitorizar tensiones superiores a 360 V y corrientes del orden de los cientos de amperios, condiciones que no se podían recrear con el equipo del laboratorio, pese a esto el módulo de la fuente fue probado y su funcionamiento se ajustó al diseño realizado.

Los otros módulos del sistema fueron probados con éxito, esto a partir de una serie de pruebas diseñadas para estimular cada una de las funciones del sistema. Algunas de estas ejercitan únicamente la sección de cálculo (armónicas, potencia), otras la parte de adquisición y por último se tienen pruebas al sistema de manera integral. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

### 6.1 Resultados

Un retardo en la adquisición de las señales provocaría errores en el cálculo de la potencia así como en el registro del momento en que se dio un valor fuera del rango tolerado. Debido a esto se realizó una prueba la cual permitió confirmar que el sistema no induce retardo alguno en la adquisición de las variables.

Se ajustó un generador arbitrario de señales AFG3021B de Tektronic para producir una señal sinusoidal de una amplitud de 3V y una frecuencia de 60 Hz, luego este se conectó de manera directa a las entradas Va, Vb, Ia e Ib. La figura 6.1 muestra la señal con que se excitó el sistema.

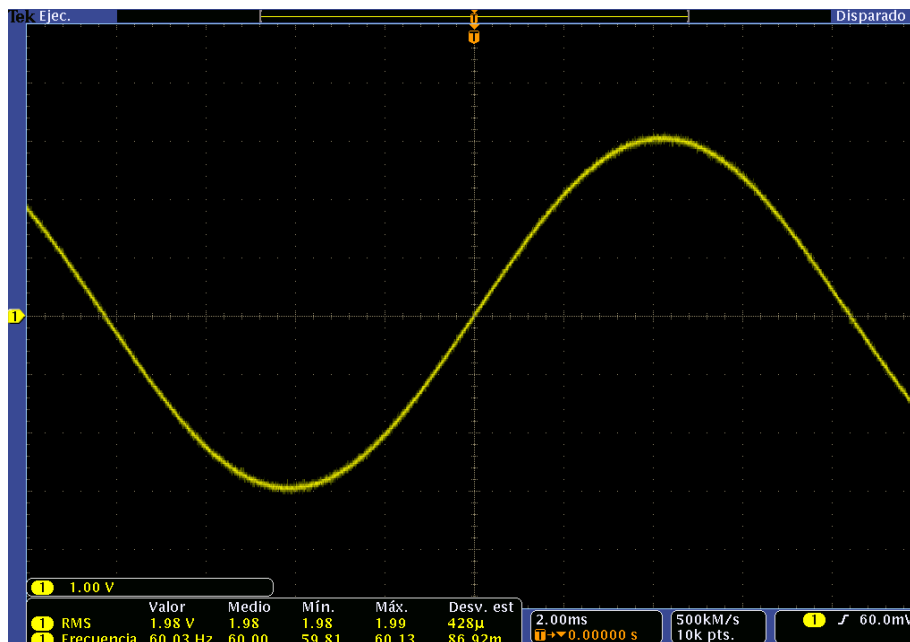
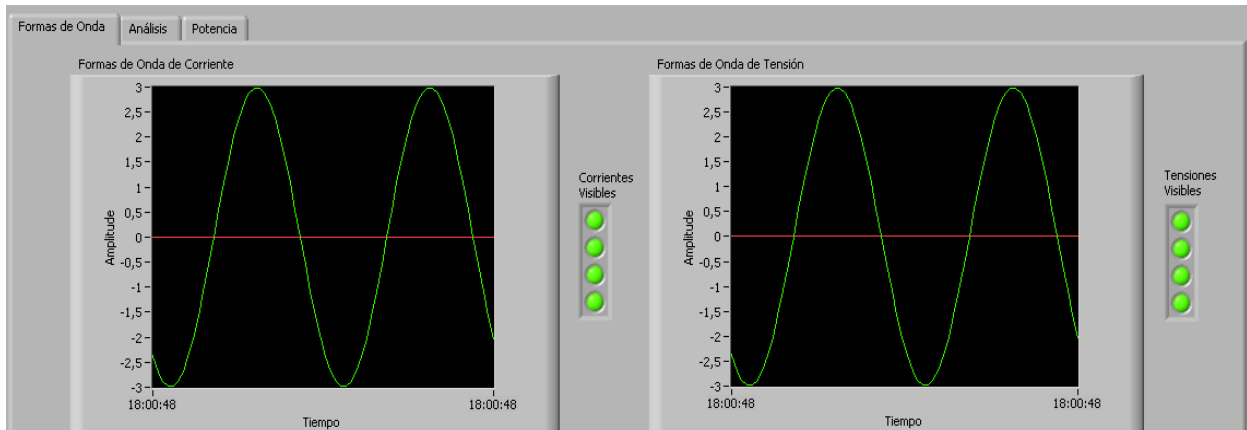


Figura 6.1 Señal sinusoidal utilizada para excitar el sistema

La señal antes mostrada se ajustó mediante la etapa de amplificación presente en el FPGA de manera que el valor máximo de la misma tuviese una amplitud de 3 V, además se activaron todos los canales de medición del sistema de manera que se lograra presenciar todas las variables que estaba adquiriendo el sistema, lo anterior con el fin de poder observar desfa-

ses entre variables del mismo tipo (tensión o corriente) o entre magnitudes de la misma variable ( $V_a$  e  $I_a$  y  $V_b$  e  $I_b$ ). Los resultados obtenidos se presentan en la figura 6.2.



**Figura 6.2** Señales observadas en la computadora cuando se tiene un tono sinusoidal conectado a las entradas  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $I_a$  e  $I_b$ .

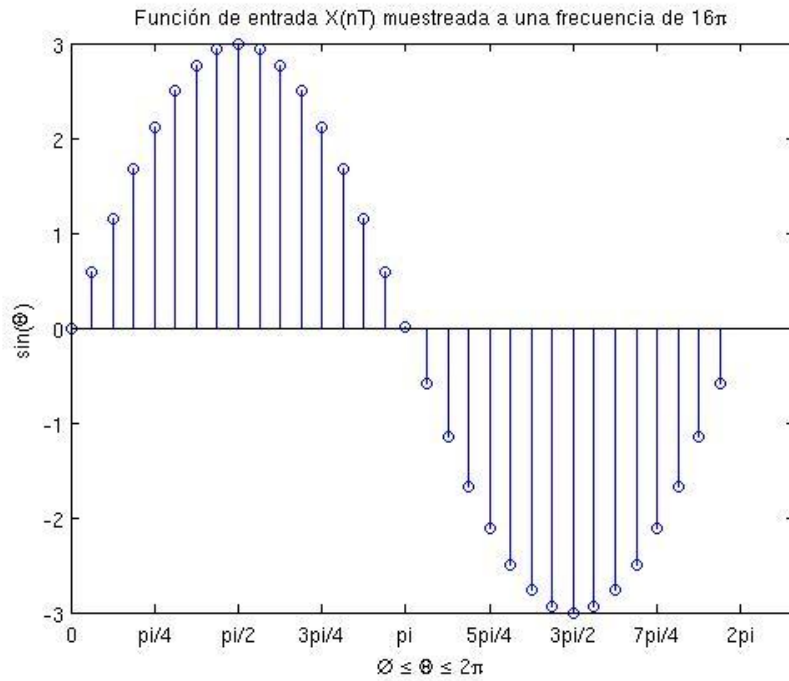
En la figura anterior se observan únicamente dos curvas por indicador gráfico, esto se debe a que las formas de onda de las otras variables se encuentran cubiertas, es decir no existe desfase entre variables del mismo tipo. En tanto que la comparación de desfase entre variables de tipos diferentes pero de la misma variables se realizó por medio del tiempo en que se dan los cruces por 0, en este caso tampoco se tuvo un desfase apreciable, tal y como se aprecia en la figura 6.2.

Luego, mediante el sistema desarrollado, se realizó el análisis de la forma de onda para la señal presentada en la figura 6.2, los resultados para la magnitud de los primeros 15 armónicos se presentan en la figura, en este caso se mantuvieron visibles las gráficas correspondientes a  $I_a$  e  $I_c$ .



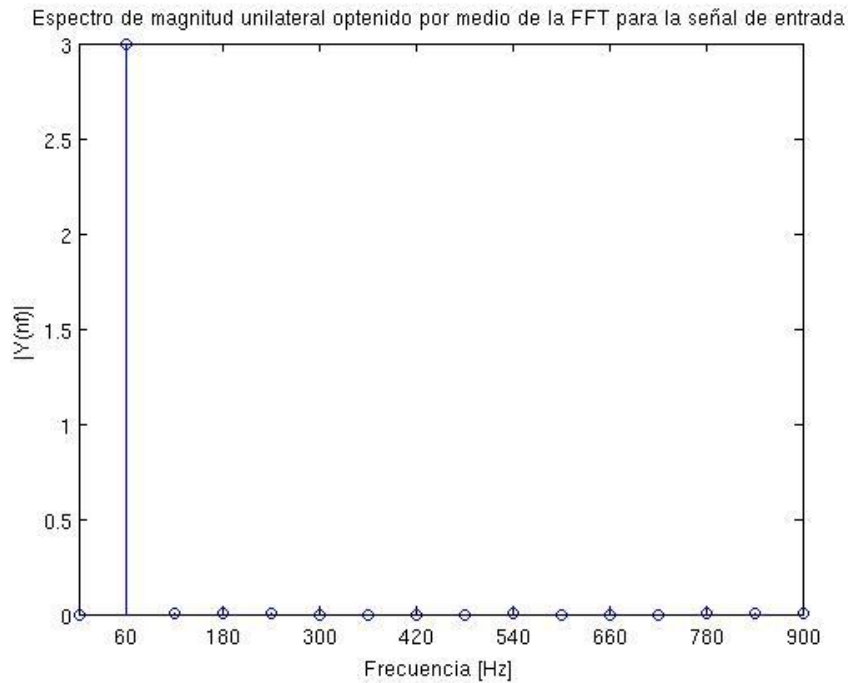
**Figura 6.3** Magnitud de los primeros 15 armónicos para la señal presentada en la figura 6.2

Con el fin de corroborar la validez de los resultados generados se realizó una rutina en el software Matlab, se utilizó la señal presentada en la figura 6.4 como entrada.



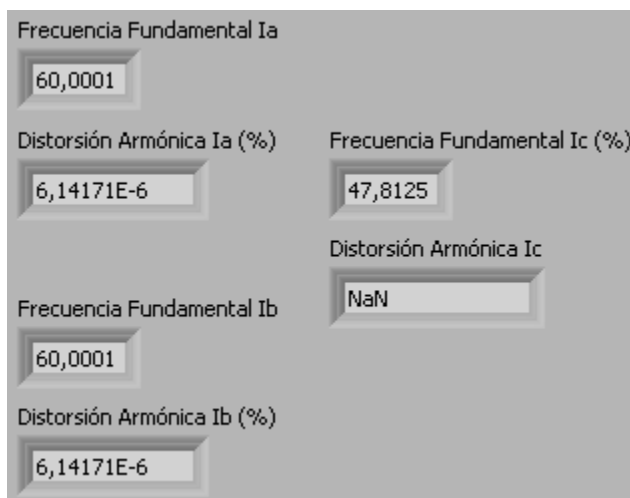
**Figura 6.4** Señal de prueba utilizada en Matlab

Luego, mediante dicho programa se calculó el espectro de la señal presentada en la figura anterior, el resultado se muestra en la figura 6.5.



**Figura 6.5** Magnitud de las primeras 15 armónicas de la señal presentada en la figura 6.4.

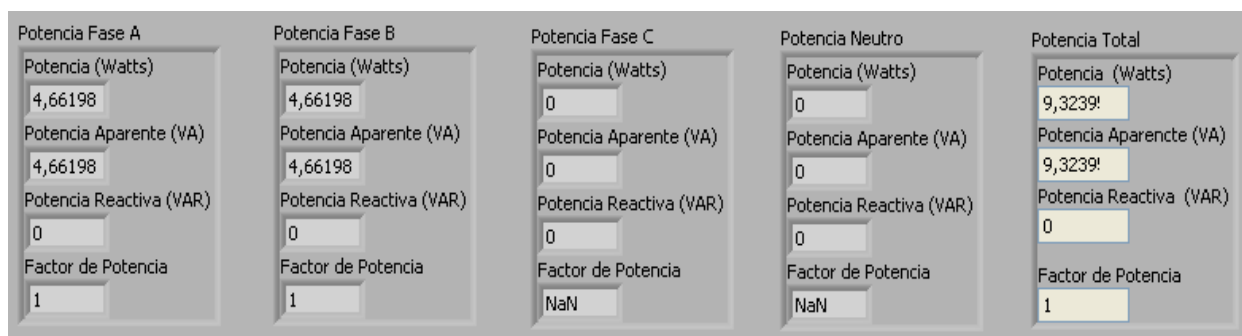
Además se calcularon los valores de la frecuencia fundamental y distorsión armónica para cada una de las corrientes, los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.6.



**Figura 6.6** Resultados de frecuencia fundamental y distorsión armónica total para las corrientes

De la lectura directa de la figura 6.1 se tiene que la frecuencia promedio de la señal de entrada corresponde a 60 Hz, y mediante la ecuación 3.5 se tiene que la distorsión armónica total de la señal es prácticamente 0.

En cuanto al análisis de potencia, los resultados generados se presentan en la figura 6.7



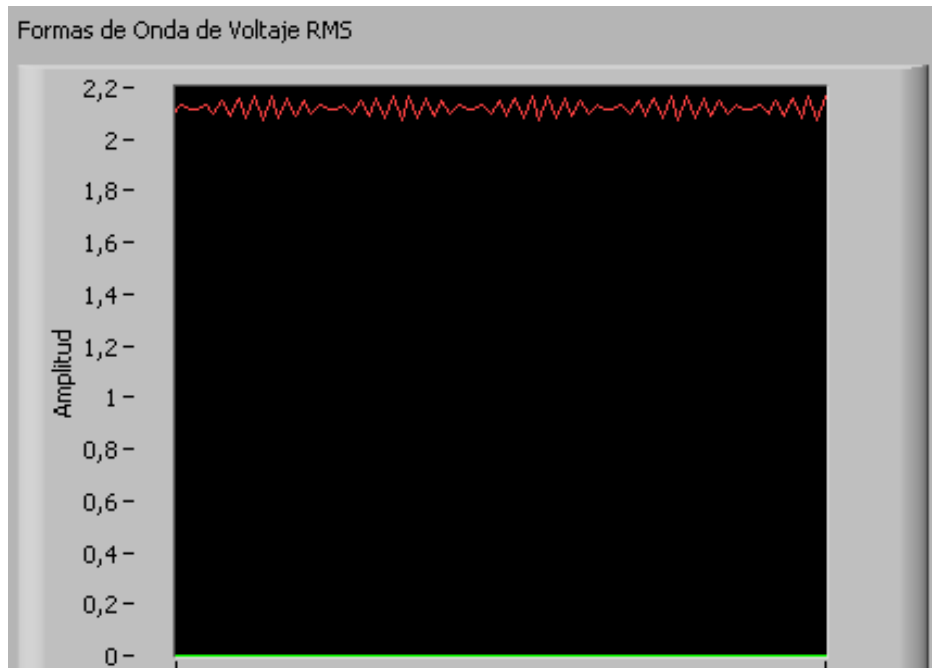
**Figura 6.7** Resultados de potencia obtenidos de la conexión de la señal presentada en Figura 6.1 a las entradas Va, Ia, Vb e Ib.

Mediante el cálculo numérico y la utilización de las ecuaciones 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 se obtuvieron los valores teóricos de la potencia aparente, activa, reactiva y el factor de potencia, dichos valores se presentan en la tabla 6.1.

**Tabla 6.1** Potencia aparente, activa, reactiva y factor de potencia para una entrada de corriente y voltaje igual a la figura 6.4.

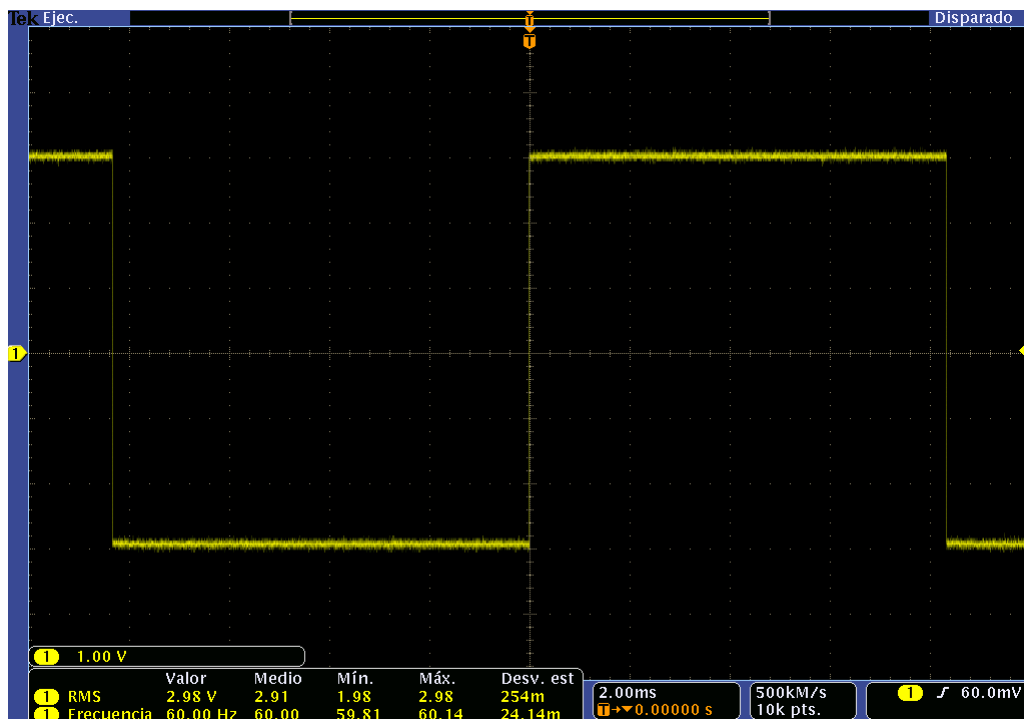
Magnitud	Fase	Total
Potencia aparente (VA)	4.5	9
Potencia Activa (W)	4.5	9
Potencia reactiva (VAR)	0	0
Factor de potencia	1	1

Por último se realizó la medición del valor efectivo de las señales, esta valor teóricamente corresponde a 2.120 V, mas el valor experimental promedio medido fue de 2.115, la gráfica obtenida se presenta en la figura 6.8.



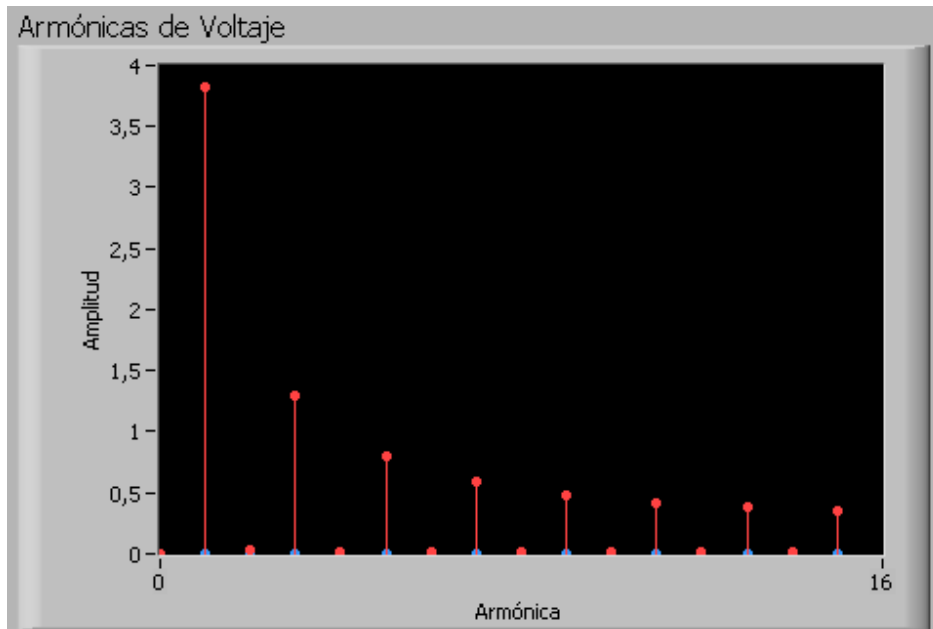
**Figura 6.8** Gráfica del valor efectivo de tensión medido para la entrada de la figura 6.1.

El sistema también se probó con la señal cuadrada que se muestra en la figura 6.9, la misma permite probar el equipo en el que sería el peor escenario de alimentación posible.



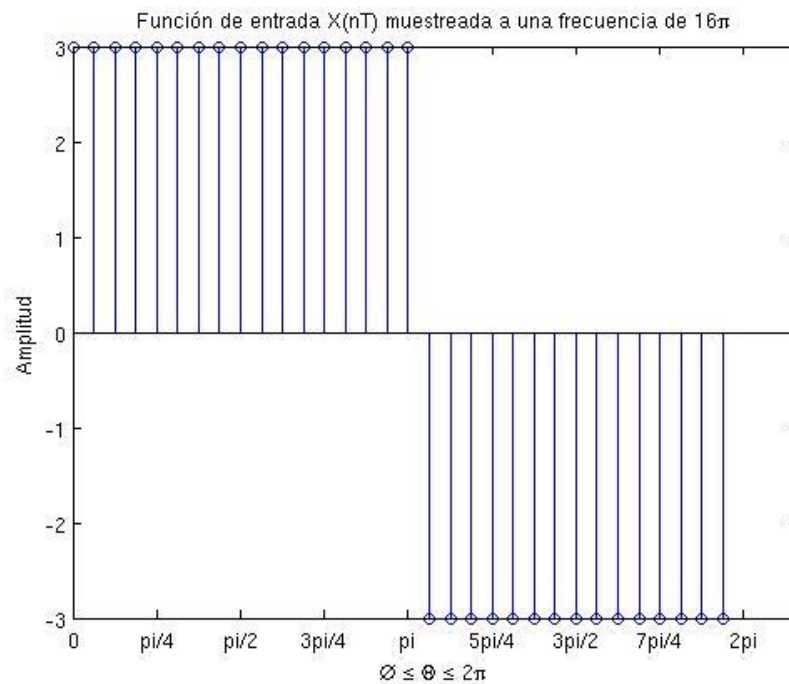
**Figura 6.9** Señal cuadrada a 60 Hz con amplitud de 3 V utilizada para estimular el sistema.

El análisis de forma de onda de la señal presentada en la figura 6.9, se presenta en la siguiente gráfica, en la misma se observa un aumento en la magnitud de las armónicas impares.



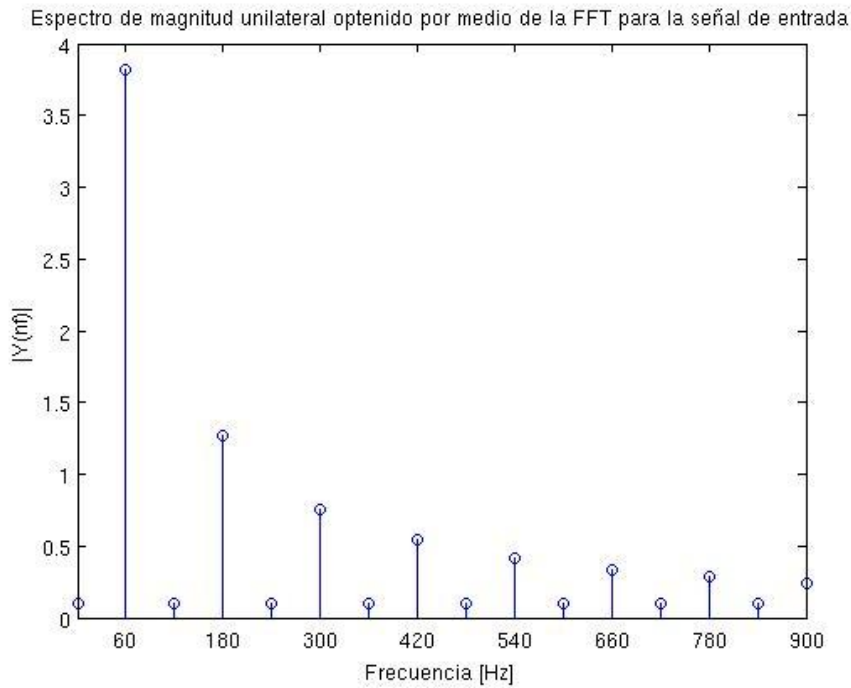
**Figura 6.10** Magnitud de los primeros 15 armónicos para la onda presentada en la figura 6.9

De la misma manera que en el caso de la onda sinusoidal se realizó el cálculo de los armónicos mediante Matlab, la figura 6.11.



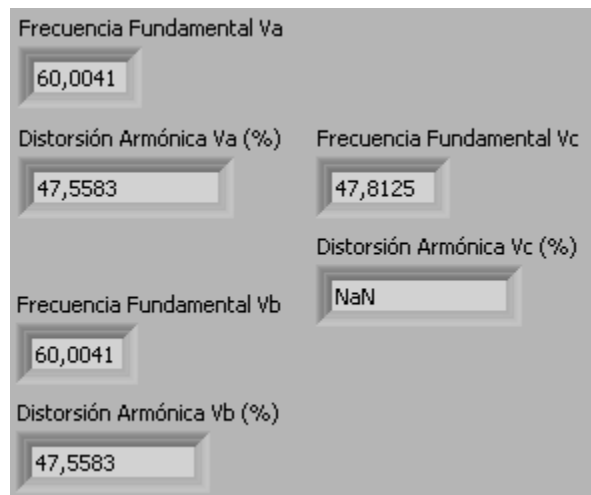
**Figura 6.11** Señal cuadrada de 60 Hz y 3V de amplitud utilizada para el cálculo teórico de la magnitud de sus primeros 15 armónicos.

Los resultados teóricos obtenidos se presentan en la figura 6.12.



**Figura 6.12** Magnitud de los primeros 15 armónicos de la señal presentada en la figura 6.11

Los datos experimentales de distorsión armónica total y frecuencia fundamental se presentan en la figura 6.13.

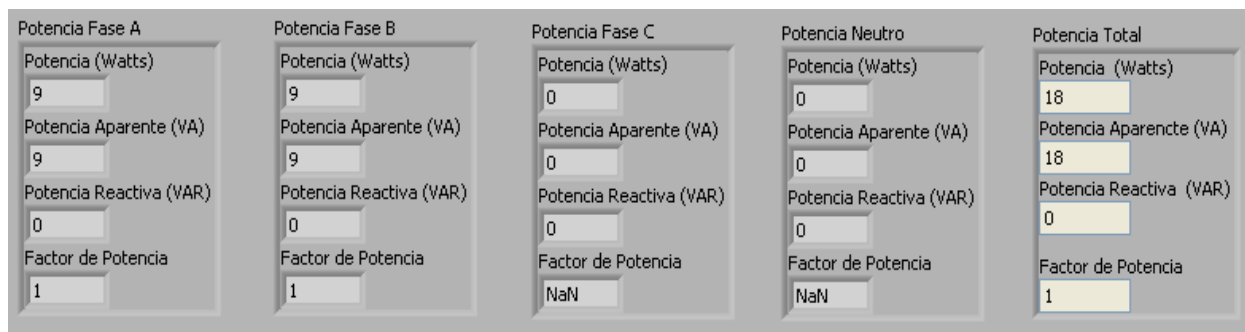


**Figura 6.13** Datos experimentales de distorsión armónica total y frecuencia fundamental obtenidos para la señal de la figura 6.9.

Por medio de la ecuación 3.5y de los valores representados en la figura 6.12 se calculó un valor teórico para la distorsión armónica de 42.97%, y de la lectura de la figura 6.9 se tiene que la frecuencia fundamental es 60 Hz.

Los cálculos experimentales de potencia se presentan mediante la figura 6.14.





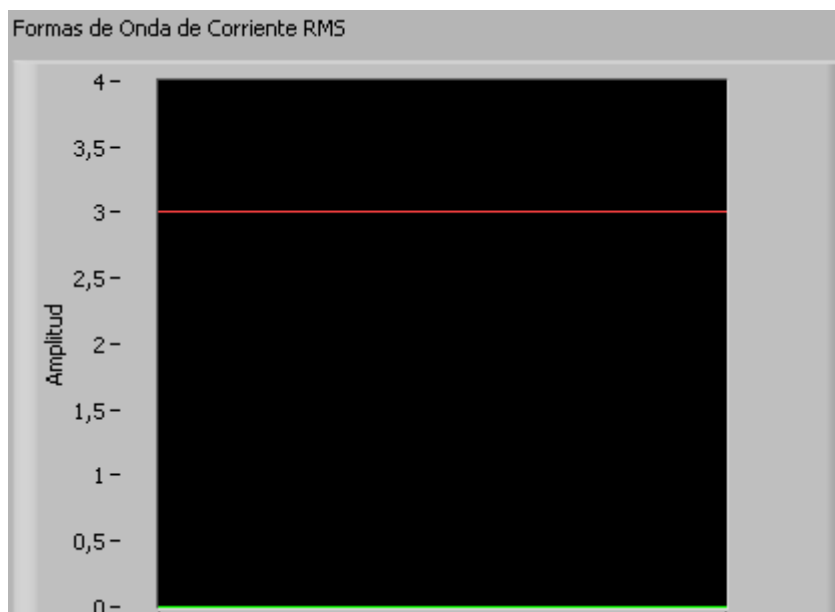
**Figura 6.14** Resultados del análisis experimental de potencia para señales de corriente y tensión iguales a la señal de la figura 6.9.

Los valores teóricos de potencia activa, aparente, reactiva y factor de potencia generados a partir de la señal mostrada en la figura 6.11, se presentan en la

**Tabla 6.2** Potencia aparente, activa, reactiva y factor de potencia para una entrada de corriente y voltaje igual a la figura 6.11.

Magnitud	Fase	Total
Potencia aparente (VA)	9	18
Potencia Activa (W)	9	18
Potencia reactiva (VAR)	0	0
Factor de potencia	1	1

El valor efectivo de corriente medido para la señal cuadrada a 60 Hz correspondió a 3 A, al igual que el valor obtenido de manera teórica mediante la ecuación 3.3. La figura 6.15 muestra la gráfica obtenida de la medición del valor efectivo de tensión.



**Figura 6.15** Gráfica del valor efectivo de corriente medido para la señal mostrada en la figura 6.9.

Por último se realizaron pruebas para la sección de detección de picos, esto se hizo manipulando el umbral de la señal de los mismos de manera que se detectaran eventos con magnitudes mayores a 2 y menores a -2. El sistema software del equipo de ejecución se ejecutó en modo de depuración de manera que se controlara la cantidad de valores grabados en la base de datos.

La tabla 6.3 presenta los eventos escritos en la tabla de datos, en ella se tiene que la primera columna corresponde a la variable que registra el evento, la segunda columna es la hora del evento al igual que la cuarta, y la tercera y quinta representan la magnitud del evento.

**Tabla 6.3** Eventos registrados en la base de datos para un periodo de prueba controlado de 6 ciclos a 60 Hz.

col0	Col1	col2	col1	col4
Va	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
Va	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
Va	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
Vb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
Vb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
Vb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
la	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
la	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
la	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
lb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
lb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
lb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
Va	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
Va	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
Va	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
Vb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
Vb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
Vb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
la	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
la	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
la	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
lb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
lb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341
lb	09:25:09 a.m.	2,99456341	09:25:09 a.m.	-2,99456341

## 6.2 Análisis

La figura 6.2 muestra que no existe desfase entre las señales adquiridas por los módulos NI-9215, esto pese a que se trate de dispositivos diferentes, es decir tensión y corriente de una misma fase. Además también se tiene que la adquisición se da en el mismo instante de tiempo para todas las variables, esta característica es necesaria para la correcta representación del consumo de potencia ya que de no ser así el valor de potencia instantánea medido no correspondería al real.

Por otro lado la comparación de la magnitud de las armónicas para tonos sinusoidales a 60 Hz, presentadas en la figura 6.3 (datos experimentales) y figura 6.5 (datos teóricos) refleja que el error en el cálculo de la magnitud del armónico a la frecuencia fundamental es cero, sin embargo en el caso de frecuencia superiores aparecen diferencias entre los valores de los armónicos, mas la magnitud de estos no es representativa para los objetivos con que se diseñó el equipo.

Luego, de los datos mostrados en la figura 6.6 y de que la señal de prueba se ajustó a 60 Hz, se tiene un error de 0.01% en la detección de la frecuencia fundamental. Es decir que en el cálculo de la magnitud del armónico mil se tendría un error de 1 Hz, dado que el sistema trabaja hasta los 900 Hz, el error inducido es despreciable (0.009 Hz).

Además el valor de la distorsión armónica total es congruente con el teórico, ya que ambos valores convergen a 0, esto refleja que la señal de prueba se trata de un tono sinusoidal que no ha sido deformado.

El valor de distorsión armónica total presentado para la variable  $I_c$  no corresponde a un número (NaN son las siglas de Not a Number) esto porque de acuerdo con la ecuación 3.5 se da una división por 0, en tanto que el valor de la frecuencia fundamental es un error del instrumento virtual de análisis de armónicos.

En cuanto a la parte de evaluación del consumo de potencia se tiene que existe un error del 3.59% por fase, dicho error se presenta como consecuencia de que el instrumento virtual que realiza el procesa los datos para obtener el consumo de potencia debe completar la matriz utilizada para el cálculo con valores erróneos (generalmente ceros o basura), afectando así el valor reportado. El error presenta en el valor de potencia total entregada por el suministro corresponde es el mismo que para las fases (3.59%).

En el caso de las pruebas realizadas se obtuvo un valor de potencia reactiva de 0, esto porque no se contaba con otro generador de señales, lo cual impide generar un desfase controla entre las señales y a su vez esto impide generar resultados teóricos con que compara las mediciones. Sin embargo, la prueba realizada muestra que el comportamiento del algoritmo para una carga resistiva pura se ajusta a lo esperado teóricamente.

El valor efectivo de las variables sinusoidales muestra el comportamiento errático que tiene el instrumento virtual encargado del cómputo de la potencia ante un muestreo inferior al requerido por este. En la señal presentado en la figura 6.8 se que observa una señal periódica similar a 7 periodos sinusoidales con una envolvente como una ventana de Hann, el comportamiento de esta envolvente induce variaciones en el valor instantáneo calculado, sin embargo, estas son menores al 2% del valor promedio.

Luego las pruebas con la señal cuadrada permitieron evaluar la exactitud del sistema a la hora de procesar los armónicos de una señal que presenta una distorsión armónica superior al 40%.

En la figura 6.10 se observa que la que la magnitud del primer armónico es 3.8250 V mientras que en la figura 6.12 este valor corresponde a 3.8074 V, el porcentaje de diferencia

entre estas es de 0.47%, por lo que se considera que la aproximación del cálculo es correcta. Sin embargo al aumentar el orden de los armónicos impares el porcentaje de diferencia aumenta de manera exponencial, hasta el punto en que para el armónico 15 la diferencia entre el valor dado por el LabVIEW difiere en un 873,07%. Por otro lado los armónicos pares presentan diferencias de entre 100% y 90% pero estas tienden a estabilizarse en 97%.

Estas diferencias se deben a que el algoritmo utilizado en la rutina de LabVIEW emplea funciones de filtrado de Hann en el tiempo (es decir se realiza un producto punto entre el vector de muestras y un vector de filtrado de Hann, este último generado mediante la evaluación de la ecuación 3.3 en tiempo discreto), lo cual comparado con una ventana de impulso rectangular suaviza los bordes del arreglo de datos y por ende reduce el fenómeno de goteo espectral. El programa de LabVIEW también utiliza interpoladores para encontrar el valor máximo en el dominio de la frecuencia y a partir de este calcular los armónicos, por lo que esta implementación es más robusta que el algoritmo implementado en Matlab, y por ende genera datos más precisos.

En cuanto a la distorsión armónica total calcula a partir de la figura generada experimentalmente y la obtenida de Matlab, es evidente que estas van a diferir pues los algoritmos utilizados para obtener los espectros no son iguales, sin embargo se tiene un margen de diferencia de 9.65%, pues el valor obtenido por LabVIEW es 47,5583 (ver figura 6.13) y el de Matlab 42.97%.

Por otro lado, entre los datos de potencia reportados en la figura 6.14 y la tabla 6.2 no se aprecia error alguno, esto debido a que el comportamiento de la onda cuadrada es más regular que el de la sinusoidal, y al presentar únicamente dos valores (distintos de cero) minimiza el efecto de los valores insertados por el algoritmo en el arreglo de cálculo.

Luego para una señal que se mantiene en el mismo valor por al menos 8 ms, el algoritmo aproxima de manera perfecta el valor efectivo de las señales tal y como se observa en la figura 6.15.

La detección de picos en las variables de entrada se realizó únicamente por 6 ciclos, ya que esto permite mostrar el comportamiento del sistema. Además permite reducir el tamaño de la base de datos generada.

A partir del periodo de observación de 6 ciclos se tiene que todas las variables registran 6 picos positivos y 6 picos negativos tal y como se esperaba del sistema.

## Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

- La adquisición simultánea de las variables es necesaria para el cálculo correcto de la potencia instantánea de las fases y el suministro completo, ya que un desfase en la monitorización de las señales induce a error.
- La utilización de la función Hann como ventana, permite la reducción del fenómeno de goteo espectral.
- El uso de interpoladores para localizar la frecuencia de magnitud máxima en el espectro permite eliminar el error inducido por variaciones en la frecuencia de alimentación.
- La frecuencia de muestreo debe sobrepasar a la frecuencia indicada por el teorema de Nyquist al menos en el 10%, ya que con el aumento de datos es posible generar información más certera.
- El equipo permite monitorizar el suministro de interés a través de la red de computadoras de la empresa, lo cual permite realizar un control desde cualquier computador que cuente con la aplicación desarrollada para este fin.
- Los cálculos de potencia entregada por el suministro presentan un error máximo de 3.59%, este error es inducido por la cantidad de muestras utilizadas en el cálculo de la misma, sin embargo aumentar la frecuencia de muestreo compromete el desempeño del equipo y aumenta el tráfico de información por la red.

## 7.2 Recomendaciones

- Se puede dedicar un cableado de red exclusivo para la aplicación, de manera que se puede transmitir un mayor número de muestras por variable, sin que el tráfico por la red sea una limitante.
- En caso de que se desea realizar un respaldo local en el chasis del NI-9073 se debe adquirir un módulo de expansión de memoria.
- Es posible expandir las funcionalidades del equipo con salidas que permitan accionar motores para la corrección del factor de potencia.

## Capítulo 8: Bibliografía

- [1] AEMC Instrumens. (s.f.). *Understanding power and power quality measurements*. Recuperado el 13 de Julio de 2010, de Transcat: [http://www.transcat.com/PDF/Power\\_meas.pdf](http://www.transcat.com/PDF/Power_meas.pdf)
- [2] Alvarado Moya, P. (22 de Noviembre de 2010). *Notas de clase: Procesamiento digital de señales*. Recuperado el 13 de Julio de 2010, de Sip-Lab Pablo Alvarado Procesamiento digital de señales: <http://www.ie.itcr.ac.cr/palvarado/PDS/pds.pdf>
- [3] Argañaraz, J. H. (2003). *Notas de curso de instrumentación: transformadores de medida*. Recuperado el 22 de Julio de 2010, de Ingeniería eléctrica Universidad del Sur: <http://www.ingelec.uns.edu.ar/lmei2773/docs/LME1-NC04-Instrumentacion - Transformadores de Medida.PDF>
- [4] Arrillaga Garmendia, J., & Eguíluz Morán, L. I. (1994). *Armónicos en sistemas de potencia*. Santander: Servicio de publicaciones de la universidad de Cantabria.
- [5] Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003). *Power system harmonics* (segunda ed.). Wiley.
- [6] Burr Brown. (Octubre de 2004). *DCP011515DB Datasheet*. Recuperado el 29 de Julio de 2010, de alldatasheet.com: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/101673/BURR-BROWN/DCP011515DB.html>
- [7] Cubero Castro, E. A. (s.f.). *Regulación y calidad del servicio eléctrico. Marco legal y normativo técnico costarricense*. Recuperado el 14 de Julio de 2010, de Aresep: <http://www.aresep.go.cr/docs/ARESEP.pdf>
- [8] Dixon, J. W. (2001). Three-Phase Controlled Rectifiers. En P. Krein, A. I. Maswood, & M. H. Rashid (Ed.), *Power Electronics Handbook*. Canada: Academic Press.
- [9] Espi Lopez, J., & Muñoz Mari, J. (2007). *Análisis de circuitos* (primera ed.). Valencia, España: Universitat de Valencia. Servei de publicacions.
- [10] Honeywell. (s.f.). *CSLA2EL*. Recuperado el 27 de Julio de 2010, de Honeywell Sensing and Control : [http://sensing.honeywell.com/index.cfm?ci\\_id=140301&la\\_id=1&pr\\_id=80437](http://sensing.honeywell.com/index.cfm?ci_id=140301&la_id=1&pr_id=80437)
- [11] Microchip Technology Inc. (Octubre de 2009). Recuperado el 16 de Agosto de 2010, de Microchip: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70292d.pdf>
- [12] National Instruments. (9 de Febrero de 2010). *4 Ch, 100 kS/s, 16-Bit, ±10 V Simultaneous Sampling C Series Analog Input Module*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2010, de National Instruments: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-192/lang/es>
- [13] National Instruments. (19 de Febrero de 2010). *CompactRIO Integrated Systems with Real-Time Controller and Reconfigurable Chassis*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2010, de National Instruments: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-204/lang/es>
- [14] National Semiconductor. (Mayo de 2000). *LM7815 Datasheet*. Recuperado el 28 de Julio de 2010, de alldatasheet.com: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/9045/NSC/LM7815.html>
- [15] NTE Electronics. (s.f.). *NTE5332 Datasheet*. Recuperado el 28 de Julio de 2010, de alldatasheet.com: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/10414/NTE/NTE5332.html>
- [16] Pallás Areny, R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal* (Cuarta edición ed.). Barcelona, España: Marcombo S.A.

- [17] Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2005). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications* (3 ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- [18] Siemens. (2008). *Support Automation Siemens*. Recuperado el 12 de Julio de 2010, de [http://support.automation.siemens.com/WW/llisapi.dll/csfetch/1109582/s7200\\_system\\_manual\\_es-ES.pdf?func=cslib.csFetch&nodeid=1248112](http://support.automation.siemens.com/WW/llisapi.dll/csfetch/1109582/s7200_system_manual_es-ES.pdf?func=cslib.csFetch&nodeid=1248112)
- [19] ST Microelectronics. (1999). *L7915AC Datasheet*. Recuperado el 28 de Julio de 2010, de [alldatasheet.com: http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22627/STMICROELECTRONICS/L7915AC.html](http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22627/STMICROELECTRONICS/L7915AC.html)
- [20] Texas Instruments. (20 de setiembre de 2005). *ISO124 Precision lowest cost isolation amplifier* .Recuperado el 2 de agosto de 2010, de Texas Instruments: <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/iso124.html#technicaldocuments>
- [21] Wikipedia. (1 de Febrero de 2011). *Control numérico por computadora*. Recuperado el 6 de Abril de 2011, de Enciclopedia Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Control\\_numérico\\_por\\_computadora](http://es.wikipedia.org/wiki/Control_numérico_por_computadora)



## Capítulo 9: Apéndices

### 9.1 Glosario

ADC: Siglas de Analógico Digital Converter (Conversor Analógico a Digital)

CNC: Siglas de Control numérico Computarizado (en inglés "Computer Numerical Control"), hace referencia a todo dispositivo capaz de dirigir el posicionamiento de un órgano mecánico móvil mediante órdenes elaboradas de forma totalmente automática a partir de informaciones numéricas en tiempo real. [21]

DFT: Discrete Fourier Transform (Transformada discreta de Fourier) Herramienta matemática que permite operar el espectro de una señal discreta aperiódica por medios digitales.

FFT: Fast Fourier Transform (Transformada rápida de Fourier) Es un algoritmo computacional que permite el cálculo de la transformada discreta de Fourier de una formas eficiente.

FPGA: (Field-programmable gates array) Son las siglas en inglés, utilizadas para referirse a unos dispositivos semiconductores que contiene lógica combinatorial programable en el lugar de trabajo.

Goteo del espectro: Fenómeno en el cual como consecuencia de realizar la transformación al dominio de la frecuencia de una señal truncada se reparte una porción de la energía de las frecuencias de menores a las de mayor magnitud.

MET: Siglas de Maquinaria, Equipos y Talleres. Subdivisión del Instituto Costarricense de Electricidad.

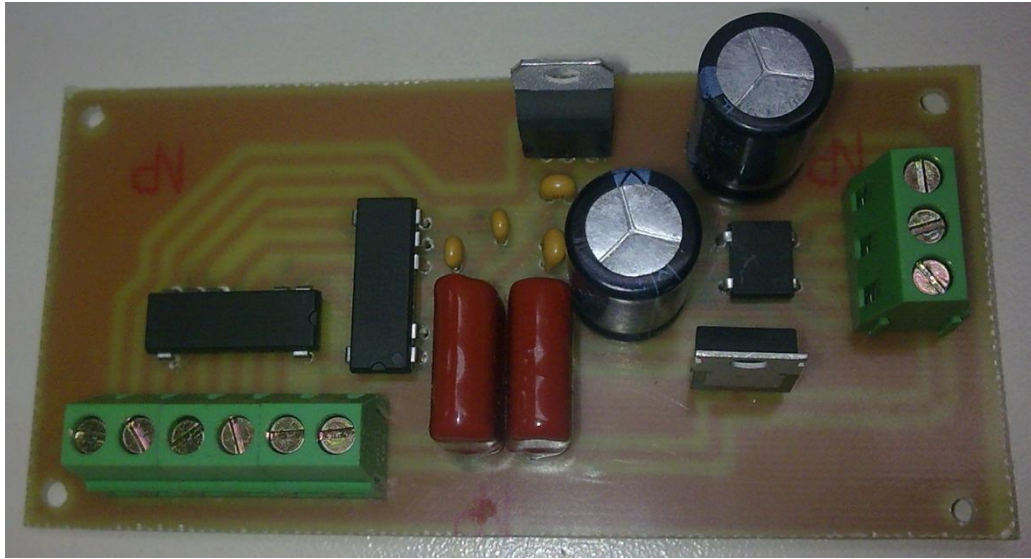
NI-PSP: Siglas de National Instruments Publish-Subscribe Protocol, el cual es un protocolo de suscripción y publicación de variables en tiempo real.

ODBC: (Open database connectivity) Siglas de un estándar desarrollado por SQL Access Group, el cual acceder a una base de datos sin que el importar que sistema de gestión de bases de datos la maneje.

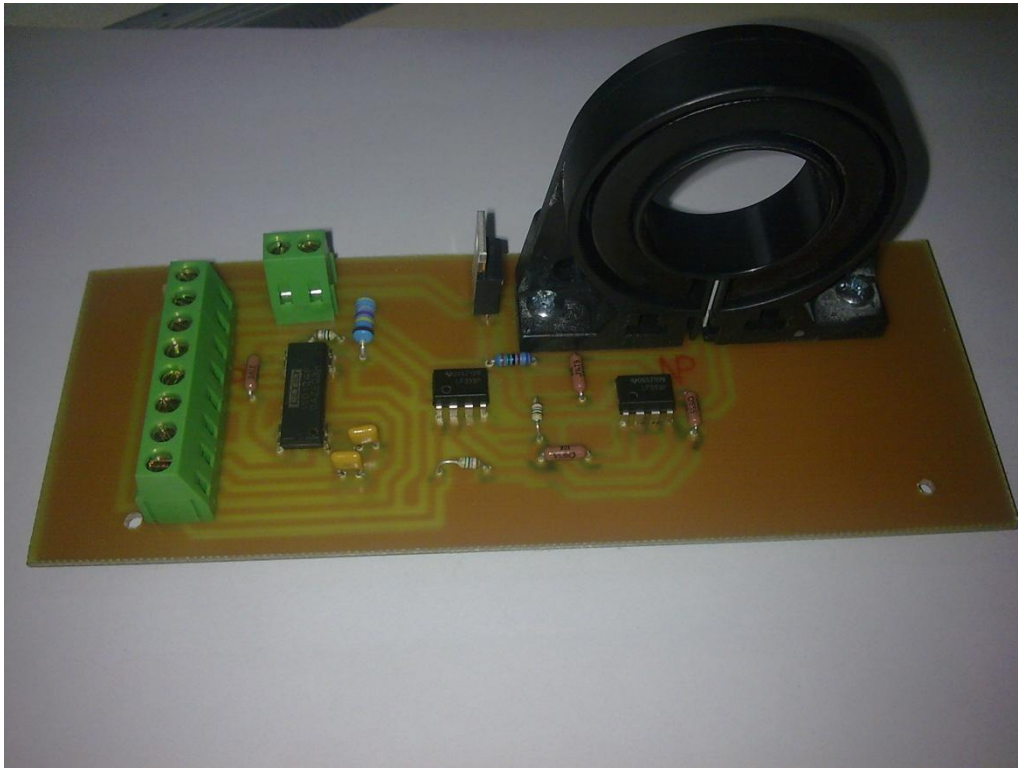
PLC: Siglas de Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable). Es un tipo de controlador industrial.

THD: Siglas de Total Harmonic Distorsion (Distorsión Armónica Total). Cuantificación matemática del efecto de las frecuencias armónicas en la deformación de la onda. Se calcula por medio de la ecuación.

## 9.2 Fotografías de los circuitos impresos fabricados



**Figura 9.1** Circuito impreso fabricado para la fuente de poder de las puntas de adquisición.



**Figura 9.2** Circuito impreso fabricado para la adquisición y acondicionamiento de las señales.