

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LOS
PRINCIPALES PARAMETROS ELECTRICOS EN REDES MONOFASICAS POR
MEDIO DE UNA APLICACIÓN EN LABVIEW UTILIZANDO LA TARJETA DE
ADQUISICION NI MYRIO DE NATIONAL INSTRUMENTS

DIEGO ANDRES BAUTISTA LOPEZ
CARLOS ANDRES SIABATO ORDUZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
TUNJA
2015

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LOS
PRINCIPALES PARAMETROS ELECTRICOS EN REDES MONOFASICAS POR
MEDIO DE UNA APLICACIÓN EN LABVIEW UTILIZANDO LA TARJETA DE
ADQUISICION NI MYRIO DE NATIONAL INSTRUMENTS

DIEGO ANDRES BAUTISTA LOPEZ
CARLOS ANDRES SIABATO ORDUZ

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director
CAMILO ERNESTO PARDO
Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
TUNJA
2015

Las ideas expresadas en esta tesis
son responsabilidad exclusiva de los autores,
no comprometen a la Universidad Santo Tomás o
a la Facultad de Ingeniería Electrónica

NOTA DE ACEPTACION

Observaciones

Firma Decano

Firma primer jurado

Firma segundo jurado

Firma Director

Tunja, abril 7 de 2015

A Dios, nuestros padres, amigos y docentes que han aportado en cada momento de nuestro desarrollo humano y educativo para poder alcanzar un logro tan importante.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos la oportunidad de existir. A nuestro director de tesis, el Ingeniero Camilo Ernesto Pardo por su confianza, conocimientos, asesoría y acompañamiento brindado para el desarrollo y terminación.

A los profesores que tuvieron que ver en nuestra formación académica, y por brindarnos sus conocimientos, amistad y calidad humana.

A nuestros compañeros de clase, que a pesar de cualquier adversidad estuvimos unidos.

A nuestros amigos y familiares que con sus palabras de aliento nos motivaron para continuar en este camino.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	12
GLOSARIO	17
RESUMEN.....	19
INTRODUCCIÓN.....	20
JUSTIFICACION.	21
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	22
OBJETIVOS	23
CAPITULO 1.....	24
MARCO TEÓRICO.....	24
1.1. La señal de corriente alterna (CA).....	24
1.2. Valor Eficaz de la Corriente y el Voltaje (RMS).....	25
1.3. Potencia.	26
1.3.1. Potencia Activa o Promedio.	28
1.3.1.1. Potencia Activa entre los Elementos Básicos R, L y C	28
1.3.1.1.1. Resistencia.....	28
1.3.1.1.2. El capacitor.....	29
1.3.1.1.3 El Inductor.....	30
1.3.2. Potencia Aparente.	31
1.3.3. Potencia Reactiva.....	31
1.4 Factor de Potencia (PF).	32
1.4.1 Relación Entre los tres tipos de Potencia, la Potencia Compleja.	32
1.5. Armónicos.....	35
1.5.1. Distorsión Armónica Total (THD).	36
1.5.2. Digitalización de señales analógicas.	38
1.5.3. Transformada Discreta de Fourier (DFT).	41
1.6. Sistemas de corriente alterna.....	44
1.6.1. Formas de onda y diagramas fasoriales de un circuito monofásico de 2 hilos.....	46

1.7. Instrumentación Virtual.....	47
1.7.1. Elementos de la Instrumentación Virtual.....	48
1.8. LabVIEW.....	48
1.9. Transformadores para instrumentos.	49
1.10. Transformadores de voltaje.	49
1.10.1. Transformadores de corriente.	50
Metodología.....	51
2.1. Tipo de investigación experimental.....	51
CAPITULO 3.....	52
Descripción del hardware.....	52
3.1. Descripción de la tarjeta NI myRIO-1900.....	53
3.1.1 requerimientos de la tarjeta NI myRIO-1900.	55
3.2. Requerimientos y diseño del hardware.	56
3.2.1 Adquisición de los datos 56	56
3.2.1.1. Frecuencia máxima de muestreo.....	56
3.2.1.2. Número de canales.	58
3.2.1.3. Modo de operación de los canales analógicos.	58
3.2.1.4. Nivel de voltaje máximo de entrada en los canales analógicos.	59
3.3. Acondicionamiento señales.....	60
3.3.1. Acondicionamiento de las señales de voltaje.	61
3.3.2. Acondicionamiento de las señales de corriente.	63
3.4. Diseño del circuito de disparo.	66
3.4.1. Circuito detector de cruce por cero.	67
3.4.2 circuito generador de la onda diente de sierra 69	69
3.4.3 circuito comparador.	73
3.5. Diseño circuito de potencia.....	76
3.5.1. Cálculos etapa de potencia TRIAC.....	77
3.5.2. Red Snubber.....	78
3.6. Potenciómetro digital.	79
CAPÍTULO 4.....	83
Diseño instrumento virtual.	83
4.1 Descripción general del medidor monofásico de potencia y calidad de la energía eléctrica..	83

4.1.1. Diseño del instrumento virtual.	85
4.2. Opción de trabajo.	85
4.2.1. Opción de trabajo real.....	85
4.2.1.1. Configuración de la tarjeta NI myRIO-1900.	86
4.3. Modo medidor.....	87
4.3.1. Medición de Voltios/Amperios/Hertz.	87
4.3.2. Adquisición de Señales.	88
4.3.3. Deducción del valor RMS.	88
4.3.4. Deducción de la frecuencia fundamental.	90
4.3.5. Potencia.....	90
4.3.5.1. Cálculo de la potencia y factor de potencia (PF).	91
4.3.5.2. Cálculo del ángulo de desfase ($\theta-\phi$).	91
4.3.5.2. Cálculo de la Potencia Activa, Reactiva, Aparente y PF.	92
4.3.6. Armónicos.	92
4.3.6.1. Cálculo de los Armónicos y de THD.....	93
4.3.7. Modo de visualización.....	93
4.3.7. Control de potencia.	95
CAPÍTULO 5.	96
Pruebas y resultados.....	96
5.1 Descripción del montaje.	96
5.2 Pruebas del IMQE.	97
5.2.1 Interfaz de usuario (HMI).	98
5.2.2 Volts/Amperes/ Potencia/Hertz/Armónicos.	100
5.2.3 Angulo Disparo Carga.	101
CAPÍTULO 6	105
Conclusiones.....	105
Expectativas a futuro.....	107
Bibliografía.	108
URL´s	109
ANEXOS	110
A. Descripción del hardware tarjeta myRIO-1900.....	110
Pines de conexión	111

Líneas de entradas y salidas digitales.....	112
Botón de Reset.	112
Especificaciones eléctricas.....	113
B. Manual de usuario.	114

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.2.Valor de los coeficientes de Fourier para la señal de voltaje de la figura 1.22 (b).-
-----39

Tabla 1.3.Valores de los armónicos de la señal de corriente de la figura 1.13 (b).41

Tabla 1.4.Valores para $k = 0$.-----46

Tabla 1.5.Relación de numero de muestras, frecuencia de muestreo, θ y ϕ .-----62

Tabla 3.1.Características principales MOC3021.-----81

Tabla 3.2.Características principales TRIAC BTA137.-----82

Tabla 5.1.Comparación entre el IMQE y multímetro digital UNIT en la opción de Voltios/Amperios.-----81

LISTA DE FIGURAS

Figura.1. Señal de voltaje sinusoidal.-----	27
Figura.2. Circuitos equivalentes en potencia. (a) Fuente de excitación de CD. (b) Fuente de excitación de CA.-----	28
Figura.3. Potencia en CD. (a) Circuito resistivo alimentado con una fuente de CD. (b) Respuesta del Circuito-----	30
Figura.4. Circuitos básicos alimentados por una fuente de CA. (a) Resistor. (b) Capacitor. (c) Inductor.-----	31
Figura .5. Potencia Promedio o Activa en un elemento resistivo.-----	32
Figura.6. Potencia Promedio o Activa en un elemento capacitivo. -----	33
Figura.7. Potencia Promedio o Activa en un elemento inductivo-----	34
Figura.8. Triángulo de potencia.-----	36
Figura.10. Relación de potencia.-----	38
Figura.11. Representación de la ecuación 2 (a) Dominio del tiempo. (b) Dominio de la frecuencia.-----	38
Figura.12. Señal senoidal no pura de voltaje. (a) Forma de onda. (b) Coeficientes de la Serie de Fourier.-----	39
Figura.13. Señal de corriente con distorsión armónica. (a) Forma de onda. (b) Descomposición Armónica.-----	40
Figura.14. Elementos básicos de la conversión analógico-digital.-----	42
Figura.15. Muestreo periódico de la señal de corriente $i(t)$.-----	43
Figura.16. Cuantificación de la señal discreta $i(n)$.-----	44
Figura .17. Representación de la señal $i(t)$ en el dominio de la frecuencia, aplicando la DFT a $i[n]$.-----	47
Figura.18. circuito monofásico de 2 hilos.-----	48
Figura.19. sistema monofásico de 2 hilos.-----	49
Figura.20. sistema monofásico Trifilar.-----	50

Figura.21. relaciones entre voltajes y corrientes.-----	50
Figura .22. Diagramas fasoriales relación entre voltaje y corrientes.-----	51
Figura.24. Elementos de un transformador de voltaje.-----	53
Figura.25. Transformador de corriente.-----	54
Figura.26. Forma conceptual del medidor de potencia y calidad de la energía eléctrica.---	56
Figura.27. Diagrama a bloques del medidor de potencia y calidad dela energía eléctrica. -	57
Figura.28. Tarjeta NI myRIO-1900 y disposición de pines en los puertos de expansión (MXP) A y B. -----	58
Figura.29. diagrama de bloques hardware Tarjeta NI myRIO-1900.-----	59
Figura.30. Analogía entre una señal de CA en el tiempo y en grados.-----	61
Figura.31. Topología entradas análogas tarjeta NI Myrio-1900.-----	63
Figura.32. Acondicionamiento señal de voltaje entradas análogas tarjeta NI Myrio-1900.---	66
Figura.33. Forma de onda obtenida circuito acondicionamiento de voltaje, señal en amarillo voltaje salida transformador, señal en verde voltaje de salida del circuito. -----	67
Figura.34. Tarjeta ACS714 -05B.-----	68
Figura.35. Diagrama de pines Tarjeta ACS714 -05B-----	69
Figura.36. a. grafica de entrada vs salida del circuito sensor de corriente. Valores de entra y salida del sensor de corriente ACS714 -05B.-----	69
Figura.37.Diagrama de conexiones con la tarjeta ACS714 -05B y la tarjeta de adquisición.--	70
Figura.38.etapas de diseño circuito de disparo.-----	71
Figura.39.etapas de diseño circuito de disparo.-----	71
Figura.40.señal en amarillo forma de onda del voltaje sobre la resistencia r2 y señal en azul detector de los cruces por cero.-----	73
Figura.41.amplificador operacional en configuración de integrador.-----	74
Figura.42.circuito generador de diente de sierra sincronizado con la red.-----	74
Figura.43.onda diente de sierra-----	77
Figura.44.Circuito comparador.-----	78

Figura.45. señales en amarillo onda diente de sierra, señal en morado voltaje de referencia y señal azul control para el circuito de potencia.-----	79
Figura.46. Etapa de potencia TRIAC.-----	81
Figura.47. Red Snubber.-----	82
Figura.48. Diseño Etapa de potencia y protección con red Snubber.-----	83
Figura.49. Circuito de disparo, identificación potenciómetro de 500K Ω .-----	84
Figura.50. Circuito de disparo, modificación potenciómetro de 500K Ω por potenciómetro digital de 10K Ω .-----	85
Figura.51. Esquemático circuito integrado X9C103P.-----	85
Figura 52. Conexión con los puertos digitales de salida de la tarjeta Myrio-1900.-----	86
Figura.53. Diagrama a bloques del software para el Medidor de Potencia monofásico y Calidad de la Energía.-----	88
Figura.54. SubVI Analog Input. Configuración pines análogos.-----	90
Figura.55. Submenú del SubVI Analog Input.-----	90
Figura.56. Diagrama de bloques SubVI Analog Input.-----	90
Figura.57. Diagrama de bloques SubVI Analog Input adquisición de señales.-----	92
Figura.58. Diagrama a bloques para el cálculo del valor RMS.-----	93
Figura.59. Diagrama a bloques Diagrama a bloques para el cálculo de la frecuencia fundamental.-----	94
Figura.60. Diagrama de bloques para el cálculo del ángulo de desfase.-----	95
Figura.61. Diagrama de bloques para el cálculo Potencia Activa, Reactiva, Aparente y PF --- -----	96
Figura.62. Diagrama de bloques para el cálculo Armónicos y de THD.-----	97
Figura.63. Diagrama a bloques del Modo de visualización.-----	98
Figura.64. Diagrama a bloques control de potencia. -----	99
Figura.65. esquema eléctrico monofásico para la maqueta de Universidad Santo Tomas.--- -----	100
Figura.66. Montaje del IMQE a las cargas monofásicas.-----	101
Figura.67. Elección de la carpeta deseada para guardar los diferentes archivos generados por el software.-----	102

Figura.68.Inicio de sesión del software.	102
Figura.69.Interfaz modo Administrador.	103
Figura.70.Interfaz modo Operario.	103
Figura.71.modelo visualización grafica de voltaje.	104
Figura.72.modelo visualización grafica de corriente.	104
Figura.73.Modos visualización grafica de potencia.	105
Figura.74.Ángulo de disparo sobre la señal de voltaje.	106
Figura.A.1.tarjeta de desarrollo NI myRIO-1900.	112
Figura.A.2.disposición de pines para los conectores A y B.	113
Figura.A.3.conexión interna líneas DIO conector MXP a. DIO <13..0> b. DIO <15..14>	114
Figura B.1.seleccionar carpeta.	116
Figura B.2.Ventana de inicio del programa.	117
Figura B.3.Ventana administrador.	117
Figura B.4.Opciones de usuario.	118
Figura B.5.Menú ingresar nuevo usuario.	119
Figura B.6.Mensaje de error.	119
Figura B.7.Mensaje de verificación.	119
Figura B.8.Ventana administrador y comprobación ingreso de nuevos usuarios.	120
Figura.B.9.Ventana administrador y verificación de usuario a eliminar.	120
Figura.B.10.Menú eliminar usuario.	120
Figura.B.11.Mensaje de error.	120
Figura.B.12.Mensaje de verificación.	120
Figura.B.13.Guardar los cambios.	121
Figura.B.14.Ingreso de usuario en modo operario en la ventana principal.	121
Figura.B.15.Recolección y monitoreo de datos del ensayo.	121
Figura.B.16.Opción para guardar datos.	121
Figura B.17.Opción envío de enviar datos.	121
Figura.B.19.Cerrar software.	121

LISTA DE ANEXOS

A.Descripción del hardware tarjeta myRIO-1900.-----	111
B.Manual de usuario.-----	115

GLOSARIO

Adquisición: consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital).

Analizador: es un equipo de medición electrónica que permite visualizar en una pantalla parámetros de señales.

Aplicación: tipo de programa informático diseñado como herramienta para permitir a un usuario realizar uno o diversos tipos de trabajos.

Control: es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados.

Dato: es una representación simbólica (numérica, alfabética, algorítmica, espacial, etc.) de un atributo o variable cuantitativa o cualitativa.

Distorsión: diferencia entre la señal que entra a un equipo o sistema y la señal que sale del mismo. Por tanto, puede definirse como la "deformación" que sufre una señal tras su paso por un sistema.

Energía Eléctrica: diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico.

Fase: se encarga en un sistema eléctrico de la producción, distribución y consumo de energía eléctrica.

Flujo: cantidad escalar que expresa una medida del campo eléctrico que atraviesa una determinada superficie.

Instrumento: aparato que se usa para comparar magnitudes físicas mediante un proceso de medición.

Monofásico: sistema de producción, distribución y consumo de energía eléctrica formado por una única corriente alterna o fase y por lo tanto todo el voltaje varía de la misma forma.

Parámetro: es una constante o una variable que aparece en una expresión matemática y cuyos distintos valores dan lugar a distintos casos en un problema.

Potencia: es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado.

Redes: es un conjunto de equipos informáticos y software conectados entre sí por medio de dispositivos físicos que envían y reciben impulsos eléctricos, ondas electromagnéticas o cualquier otro medio para el transporte de datos, con la finalidad de compartir información, recursos y ofrecer servicios.

Sistema: Es una serie de elementos o componentes eléctricos o electrónicos, tales como resistencias, inductancias, condensadores, fuentes, o dispositivos electrónicos semiconductores, conectados eléctricamente entre sí con el propósito de generar, transportar o modificar señales electrónicas o eléctricas.

Tarjeta: etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos.

Variable: es un símbolo que puede ser remplazado o que toma un valor numérico en una ecuación o expresión matemática en general.

RESUMEN

TITULO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS ELECTRICOS EN REDES MONOFASICAS POR MEDIO DE UNA APLICACIÓN EN LABVIEW UTILIZANDO LA TARJETA DE ADQUISICION NI MYRIO DE NATIONAL INSTRUMENTS.

AUTORES

BAUTISTA LOPEZ, DIEGO ANDRES Y SIABATO ORDUZ, CARLOS ANDRES

PALABRAS CLAVES

Potencia, LabVIEW, monitoreo, adquisición, carga, control, variable.

DESCRIPCION

En este documento se presenta el diseño y montaje de un Medidor monofásico de Potencia y Calidad de la Energía Eléctrica con funciones adicionales de control de potencia entregada, utilizando instrumentación virtual, el cual emplea el software de programación LabVIEW. Dicho sistema permite monitorear cargas en corriente alterna conectadas a sistemas monofásicos de hasta 20 Amperios. Puede medir la potencia y la calidad de las señales eléctricas, tanto para la corriente como para el voltaje de un sistema monofásico.

Cuenta con el modo de trabajo en tiempo real, permite exportar y archivar las mediciones realizadas en cualquier momento según el usuario lo requiera. La digitalización de las señales se hace a través de la tarjeta de adquisición de datos, NI myRIO de la firma National Instruments y para acoplarla al sistema monofásico se diseñaron sensores de acondicionamiento, los cuales están basados en transformadores de voltaje y señores de corriente.

INTRODUCCIÓN

El consumo de la energía eléctrica en tiempos anteriores no era importante verificar la forma de onda de las señales de corriente y de voltaje, las cuales son vitales en la calidad del servicio en un sistema eléctrico. La compañía proveedora del servicio de energía, deja a libre voluntad del usuario final o consumidor, la forma en cómo va a utilizar y aprovechar la energía eléctrica. Cuando no se toma en consideración las características y parámetros de las cargas a conectar, tiene como consecuencia que en algunos casos se duplique el consumo lo cual trae problemas como: voltajes bajos, aumento desmedido de la intensidad de la corriente. Actualmente se vio la necesidad de investigar en lo referente a la calidad eléctrica con el fin de prevenir costos excesivos en el consumo.

Para obtener una medida cuantitativa del estado de una red eléctrica se requiere usar equipos de medición, que permitan visualizar variables de naturaleza eléctrica con funciones de análisis de la calidad eléctrica como:

- Frecuencia de cada fase.
- Voltajes eficaces promedio, máximos y mínimos.
- Corrientes eficaces promedio, máximas y mínimas.
- Potencia activa, reactiva y aparente por fase y total.
- Factor de potencia, por fase y promedio.
- Distorsión Armónica Total.
- Captura de transitorios.
- Etc.

Actualmente la Universidad Santo Tomás cuenta solo con multímetros y pinzas amperimétricas para el análisis de las variables eléctricas presentes en sistema de corriente alterna pero ninguna presenta funciones de analizador de la energía eléctrica. Y a su vez se requiere un instrumento de medición de medida, el cual permita modificar mediciones, controlar la potencia entregada por el usuario. La alternativa que suple estas necesidades es la instrumentación virtual.

Un instrumento virtual esencialmente consta de un computador, tarjetas de adquisición de datos análogos o digitales y software especializado, que es donde recae la funcionalidad del instrumento [URL 2].

JUSTIFICACION.

Actualmente la Universidad Santo Tomas Seccional Tunja no cuenta con un analizador de red, debido a esto se propone diseñar y construir un equipo o instrumento virtual para la Universidad. Para contar con infraestructura y poder realizar estudios de la calidad eléctrica de sistemas eléctricos y a si mismo facilitar el aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Electrónica en diversos temas que involucren calidad de la energía eléctrica.

La solución es mediante el uso de la instrumentación virtual, la cual hace posible diseñar y construir instrumentos de medición, este proyecto pretende explorar las capacidades reales que proporciona la instrumentación virtual en el desarrollo de instrumentos de monitoreo de parámetros de una red eléctrica monofásica.

La Universidad Santo Tomas Seccional Tunja adquirió el software LabVIEW y 2 tarjetas de adquisición de datos modelo NI-myRIO de la marca National Instruments. Ideales para la realización del proyecto, y demostrar la factibilidad de desarrollar sistemas de medición personalizados, usando tecnología existente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La energía eléctrica posee dos variables particulares que son corriente y voltaje, que inicialmente son señales con forma de onda sinusoidales y que se pueden encontrar a la misma frecuencia para el caso de la corriente alterna pero a diferente amplitud, características ideales, pero en la realidad dichas características son afectadas por las diferentes cargas que posea el sistema, ya que las cargas eléctricas están compuestas por elementos que hacen que no se presente un comportamiento lineal alterando de forma significativa las formas de onda. El ejemplo más evidente es la señal de corriente que se ve afectada al variar el tipo de carga por los armónicos generados y a su vez afectando la señal de voltaje donde se pueden presentar fluctuaciones, cambios repentinos que pueden ocasionar problemas eléctricos sobre las cargas como apagados o encendidos imprevistos, causando que los equipos presenten problemas de funcionamiento, consumos exagerados de energía entre algunos otros efectos.

Para evaluar estos problemas de la energía eléctrica, existen los analizadores de red, equipos capaces de visualizar diferentes parámetros de medición proporcionar información del comportamiento de las señales de corriente y voltaje. Permitiendo actuar de forma oportuna sobre las posibles fallas y así mismo aplicar la mejor solución que se presente sobre el sistema eléctrico.

Para solventar esta problemática se toma la iniciativa de diseñar y construir un equipo funcional para la Universidad. Como caso particular el diseño y construcción de un prototipo analizador de red para la facultad de ingeniería electrónica a un bajo costo de fabricación mediante el uso de circuitos integrados para realizar la medición de la energía eléctrica en sistemas monofásicos y para la adquisición de señales de tensión y corriente, una interfaz en LabVIEW para la visualización de los datos y así aplicar todos los conocimientos adquiridos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un equipo medidor monofásico de los parámetros eléctricos. Como voltaje, corriente, frecuencia, potencia y espectro de armónicos presentes en la energía eléctrica alterna utilizando instrumentación virtual, con el lenguaje de programación gráfico LABVIEW y la tarjeta de desarrollo NI myRIO de la compañía National Instruments, para su posterior procesamiento y visualización.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar reportes de las medidas de voltaje, corriente, de potencia activa, reactiva aparente y factor de potencia FP presente sobre diferentes cargas (resistiva, capacitiva e inductiva). Y así poder determinar la calidad de la energía eléctrica; Espectro de armónicos Y Distorsión armónica total (THD).
- Diseñar e implementar un sistema electrónico que permita el control de potencia suministrada a las diferentes cargas conectadas. Para obtener información de las variables de voltaje, corriente, frecuencia y potencia.
- Diseñar e implementar la interfaz HMI (interfaz de usuario), que realice el procesamiento de los datos obtenidos de los sensores y permita al usuario supervisar el comportamiento de la energía, por medio de una interfaz gráfica, así como la manipulación de diferentes parámetros para evaluar sus comportamientos.
- Diseñar y construir la estructura física que incorporará todos los sistemas electrónicos teniendo en cuenta su estabilidad, durabilidad y maniobrabilidad.

CAPITULO 1.

MARCO TEÓRICO

El objetivo de esta sección es definir varios términos usados frecuentemente al referirse a medidores de energía eléctrica, como también realizar una breve descripción de los parámetros importantes de la energía eléctrica alterna.

1.1. La señal de corriente alterna (CA).

Una señal sinusoidal es una forma de onda que se repiten en el tiempo con una frecuencia definida f , la cual determina el número de repeticiones que tendrá en un segundo, con un periodo fundamental T [2], como se muestra en la figura 1.

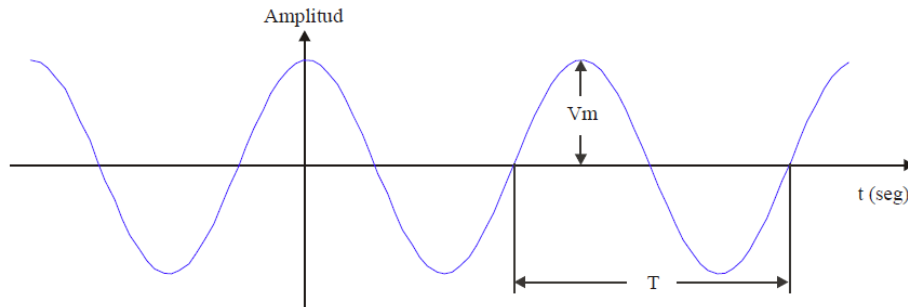


Figura.1. Señal de voltaje sinusoidal.

La señal de corriente alterna vista en la figura 1 puede escribirse matemáticamente para la corriente y el voltaje por las ecuaciones 1 y 2.

$$i(t) = I_m \cos(\omega t \pm \varphi) \quad (1)$$

$$v(t) = V_m \cos(\omega t \pm \theta) \quad (2)$$

Dónde:

ω = Frecuencia angular, en $\frac{\text{radianes}}{\text{segundos}}$.

f = Frecuencia, en (Hertz).

t = Tiempo, en segundos.

V_m e I_m = Amplitud de la señal, valor máximo o valor pico.

θ y ϕ = Ángulos de fase.

θ y ϕ es un desplazamiento que puede sufrir la señal a lo largo del eje horizontal, en el eje es el tiempo y se ve reflejado como un adelanto o retardo de la señal, sobre un punto fijo, no tiene efecto sobre la amplitud máxima de la señal.

Para la señal eléctrica de voltaje $V_m = 120\sqrt{2}$ y la frecuencia es de 60 Hz.

1.2. Valor Eficaz de la Corriente y el Voltaje (RMS)

Para tener una medida cuantitativa de una señal de corriente o voltaje, el valor instantáneo no es representativo debido a que su valor cambia con el tiempo, y su promedio es cero. Una opción es contar con un parámetro que relacione la potencia suministrada por una fuente de Corriente Directa con la que suministra una fuente de Corriente Alterna, y este valor es el valor eficaz o RMS (*Root Mean Square*) [3].

En el circuito de la figura 2 (a), la potencia que consume el resistor es constante, cuando esta misma resistencia se conecta a una fuente senoidal (ver figura 2 b), la potencia que demanda la fuente es $P = V_m^2 / 2R$, la cual es la potencia promedio. Aunque se tiene dos fuentes de señal diferentes, producen el mismo efecto en el elemento de circuito. De este razonamiento surge el concepto de “valor eficaz”, esto es, la fuente de Corriente Alterna puede ser considerada como una fuente de Corriente Directa de valor $V_m / \sqrt{2}$. El valor eficaz se usa tanto para señales de corriente como de voltaje.

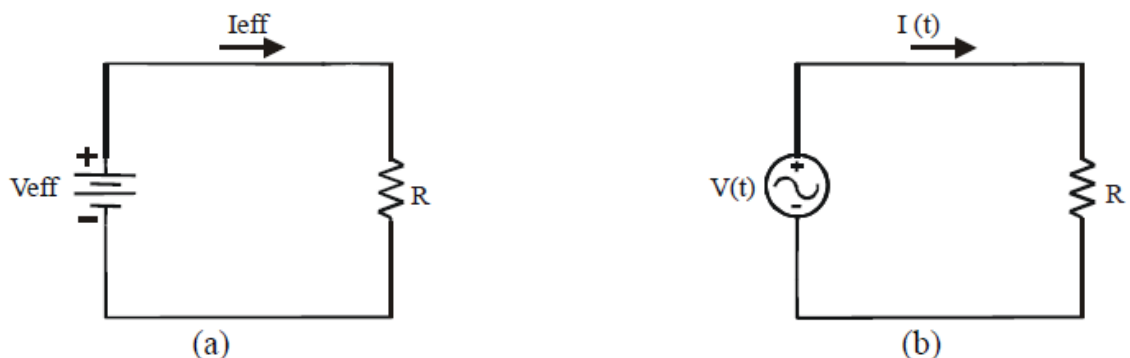


Figura.2. Circuitos equivalentes en potencia. (a) Fuente de excitación de CD. (b) Fuente de excitación de CA.

El valor eficaz para la corriente y el voltaje están dados por las ecuaciones 3 y 4:

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (3)$$

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (4)$$

Cuando la señal $i(t)$ o $v(t)$ es una senoidal pura, como las expresadas por las ecuaciones 1 y 2, el valor eficaz que se obtiene es:

$$I_{eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707I_m \text{ o } I_m = \sqrt{2}I_{eff} = 1.414I_{eff} \quad (5)$$

1.3. Potencia.

La potencia se define como: la energía necesaria para producir trabajo en una cantidad específica de tiempo, es decir, la velocidad para hacer trabajo [4]. Se expresada en forma matemática como:

$$P = \frac{W}{t} \quad (6)$$

Dónde:

W = la energía en joule (J)

t = el tiempo en segundos (s).

$$P = \text{potencia en } \frac{\text{joule}}{\text{segundo}} = \text{watts (w)}$$

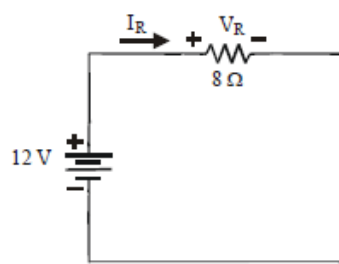
La potencia que proporciona o disipa un sistema eléctrico se encuentra en términos de corrientes y de voltajes, un concepto que surge de esto es la potencia instantánea, la cual es el producto del voltaje por la corriente en el dominio del tiempo, se define como:

$$P = v(t)i(t) \quad (7)$$

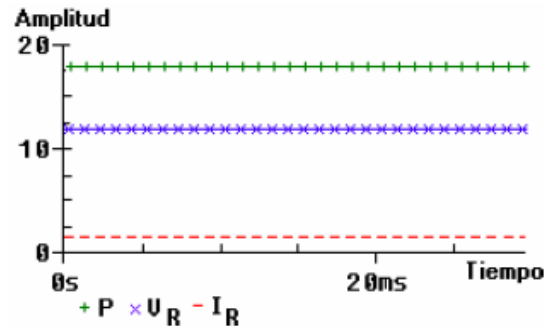
En donde el voltaje v y la corriente i son funciones del tiempo. Pero como la ecuación anterior puede variar en el tiempo, es necesario obtener la potencia promedio la cual en forma cuantitativa, se define por la ecuación:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t)i(t)dt \quad (8)$$

Donde P es la integral de $v(t)$ por $i(t)$ en un solo periodo.



(a)



(b)

Figura.3. Potencia en CD. (a) Circuito resistivo alimentado con una fuente de CD. (b) Respuesta del Circuito

Para ejemplificar el uso de la ecuación 7 en la figura 3 se muestra un circuito con una resistencia R de 8Ω , alimentada por una fuente de CD (corriente directa) de 12 V. Para este tipo de señal la potencia promedio y la potencia instantánea tiene el mismo valor, que es de 18 Watts.

En corriente alterna se tienen voltajes y corrientes variantes, la potencia que transmite a una resistencia un capacitor y a un inductor tiene efectos diferentes .En consecuencia se definen tres tipos de potencia [2].

- Potencia activa o promedio (P).
- Potencia Reactiva (Q).
- Potencia Aparente (S).

1.3.1. Potencia Activa o Promedio.

Las señales de corriente y voltaje están descritas por las ecuaciones 1 y 2, al aplicarlas en la ecuación 8, se obtiene la ecuación 9 que es el valor de la potencia promedio para señales de CA.

$$P = V_{eff} I_{eff} \cos(\theta - \varphi) \quad (9)$$

Las unidades de la potencia activa son los Watts y es la energía que la carga gasta para generar trabajo, tal como el movimiento de un motor, etc.

1.3.1.1. Potencia Activa entre los Elementos Básicos R, L y C

En una red eléctrica se encuentran conectadas diferentes tipos de cargas cuyo comportamiento puede ser modelado con los 3 elementos de circuitos básicos que son: el resistor (R), el inductor (L) y el capacitor (C). En la figura 4 (a), (b) y (c) se muestra el diagrama del circuito eléctrico para un resistor, capacitor e inductor, respectivamente, alimentado por una fuente de CA.

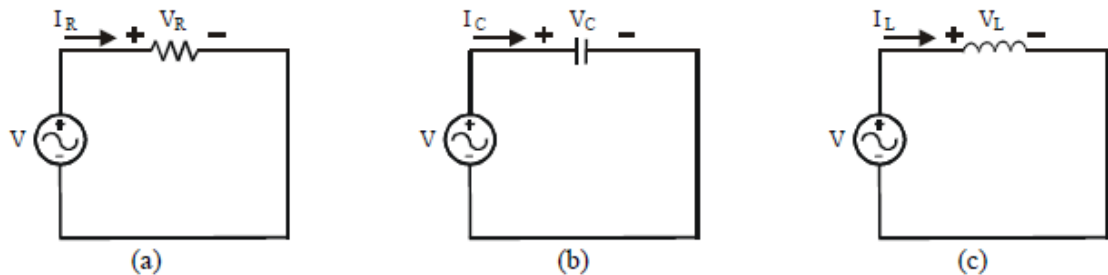


Figura.4. Circuitos básicos alimentados por una fuente de CA. (a) Resistor. (b) Capacitor. (c) Inductor.

1.3.1.1.1. Resistencia.

Si la señal de voltaje del circuito de la figura 4 (a), con $\theta = 0$, es:

$$v(t) = V_m \cos(\omega t)$$

Por la ley de Ohm la corriente que circula por ella es:

$$i = \frac{v}{R} = \frac{V_m \cos(\omega t)}{R} = I_m \cos(\omega t) \quad (10)$$

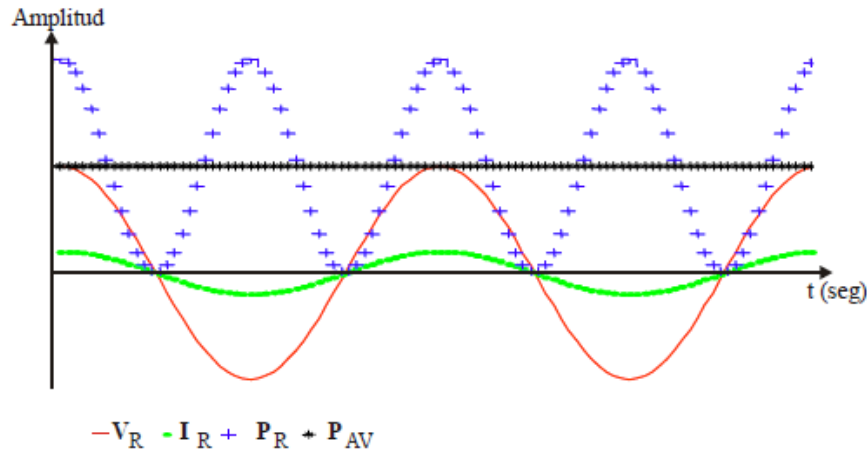


Figura .5. Potencia Promedio o Activa en un elemento resistivo.

La figura 5 muestra la gráfica de la corriente y voltaje, donde se observa que ambas señales están en fase y la única diferencia es en amplitud. La potencia instantánea tiene una forma senoidal con el doble de frecuencia y un nivel de Corriente Directa, donde la potencia promedio corresponde a este nivel de Corriente Directa.

1.3.1.1.2. El capacitor.

La relación corriente voltaje para un capacitor es:

$$iC = C \frac{dvc}{dt}$$

Si la fuente de voltaje con $\theta = 0$, es:

$$v(t) = V_m \cos(\omega t)$$

La corriente que circula es:

$$iC = I_m \cos(\omega t + 90^\circ) \quad (11)$$

Donde

$$I_m = \omega C V_m$$

La cantidad $\frac{1}{\omega C}$ se denomina reactancia de un capacitor se representa mediante X_C y se mide en Ohms.

En la figura 6 se muestran las gráficas de corriente, voltaje y potencia instantánea, para el capacitor. En ella se observan que la corriente adelanta 90° al voltaje. Al calcular la potencia promedio con la ecuación de la potencia promedio, se tiene que $\theta = 0, \varphi = 90^\circ$, por lo que:

$$P = V_{eff} I_{eff} \cos(\theta - \varphi) = 0$$

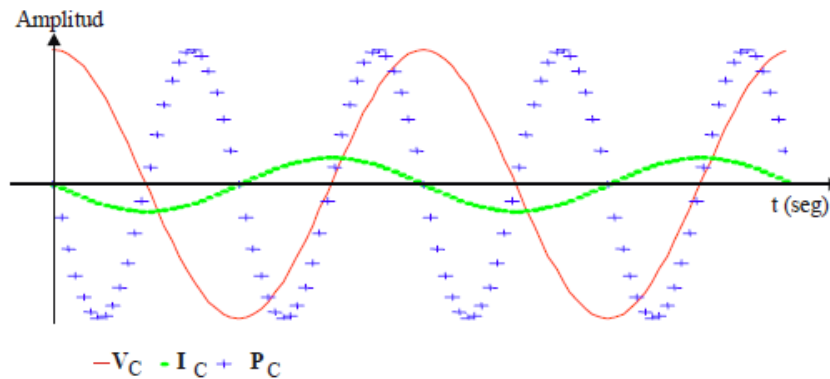


Figura.6. Potencia Promedio o Activa en un elemento capacitivo.

1.3.1.1.3 El Inductor.

La relación corriente voltaje para el inductor es: $V_L = L \frac{di_L}{dt}$

Si la señal de corriente con $\varphi = 0$, es:

$$i(t) = I_m \cos(\omega t)$$

El voltaje de este elemento es:

$$V_L = V_m \cos(\omega t + 90^\circ) \quad (12)$$

Donde $V_m = \omega L I_m$. La cantidad ωL , se le denomina reactancia inductiva, se representa por X_L , y sus unidades son Ohms. En la figura 7 se muestran las formas de onda del circuito de la figura 3 (c), donde el voltaje adelanta 90° a la corriente. Al calcular la potencia promedio con la ecuación 1.8, $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, por lo que:

$$P = V_{eff} I_{eff} \cos(90) = 0$$

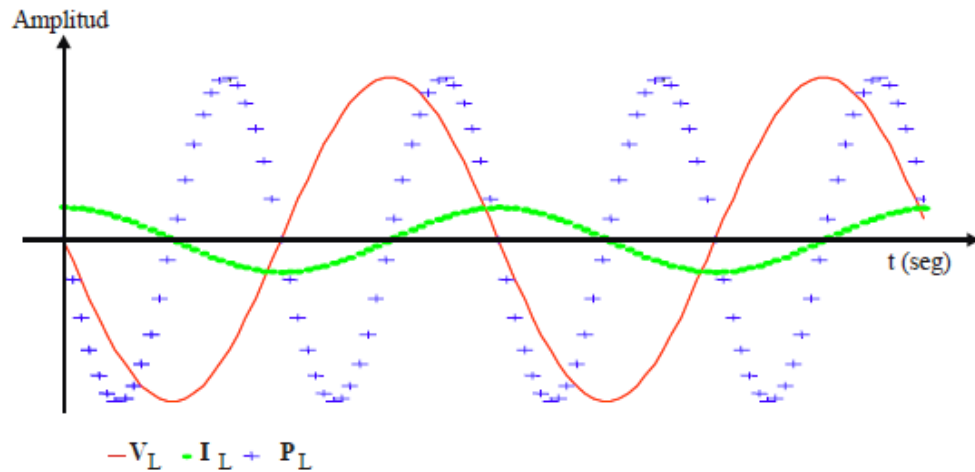


Figura.7. Potencia Promedio o Activa en un elemento inductivo

En general, un dispositivo puramente reactivo (que contiene capacitores e inductores) la potencia activa (promedio) es igual a cero, debido a que la corriente y el voltaje se desfasan $\pm 90^\circ$. Esto significa que son elementos que no absorben energía.

1.3.2. Potencia Aparente.

Un parámetro muy importante es la potencia aparente, se define como: la máxima potencia que “aparentemente” puede suministrar una fuente senoidal a una carga determinada [4].

Esta potencia está dada por las unidades de los voltamperes, denotado como VA, cuya ecuación es:

$$S = V_{eff} I_{eff} \quad (13)$$

Como se puede observar en la ecuación anterior, solo se considera a los valores eficaces de la corriente y el voltaje, sin considerar la naturaleza de la carga alimentada. Cuando la carga es puramente resistiva la potencia aparente es igual que la potencia activa [4].

1.3.3. Potencia Reactiva.

La potencia reactiva se define como: la potencia eléctrica que se intercambia entre el campo magnético de un inductor y la fuente que lo excita o el campo eléctrico de un capacitor y la

fuente que lo excita [5], se denota como Q , y sus unidades son los voltamperes reactivos, simbolizado como VAR. Matemáticamente se expresa como.

$$Q = V_{eff} I_{eff} \sin(\theta - \varphi) \quad (14)$$

Donde el $\sin(\theta - \varphi)$ es el ángulo por el cual el voltaje adelanta a la corriente.

Tomando en cuenta la sección anterior, donde se mostró que para el inductor y el capacitor existe un ángulo de fase de 90° , al aplicarle la ecuación 14, cuando el elemento del circuito es resistivo, $\theta - \varphi = 0$, por lo que $Q = 0$.

1.4 Factor de Potencia (PF).

El factor de potencia es un indicador de la eficiencia con la que se está aprovechando la energía suministrada a una carga determinada. Matemáticamente se calcula por la siguiente ecuación.

$$PF = \frac{\text{potencia activa}}{\text{potencia aparente}} \quad (15)$$

Debido a que $\cos(\theta - \varphi)$ no puede tener una magnitud mayor que uno, la magnitud del factor de potencia no puede ser mayor a éste. Para el caso en que las señales de corriente y de voltaje son senoidales puras, el factor de potencia es:

$$PF = \cos(\theta - \varphi) \quad (16)$$

El factor de potencia puede ser de dos tipos, adelantado o atrasado, donde el adelanto o el atraso se refieren a la fase de la corriente con respecto al voltaje. Así, una carga inductiva tendrá un PF atrasado y una carga capacitiva un PF adelantado.

1.4.1 Relación Entre los tres tipos de Potencia, la Potencia Compleja.

Las potencias Activa (P) y Reactiva (Q) tienen diferentes significados y no pueden ser sumados aritméticamente. Sin embargo, pueden ser representados apropiadamente en forma de una magnitud vectorial denominada potencia compleja S , que se define como:

$$s = P + jQ \quad (17)$$

El módulo de esta potencia es a lo que se denomina potencia aparente y su expresión es:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (18)$$

De forma gráfica estas ecuaciones pueden ser vistas con un triángulo, llamado triángulo de potencia, figura 8, en donde el cateto adyacente al ángulo $(\theta - \phi)$ está representada por la potencia activa P , el cateto opuesto por la potencia reactiva Q y la hipotenusa es la potencia aparente S . Cuando una carga no tiene elementos reactivos tanto Q como el ángulo $(\theta - \phi)$ son cero, lleva a que S y P sean iguales, es decir que $Q = 0$.

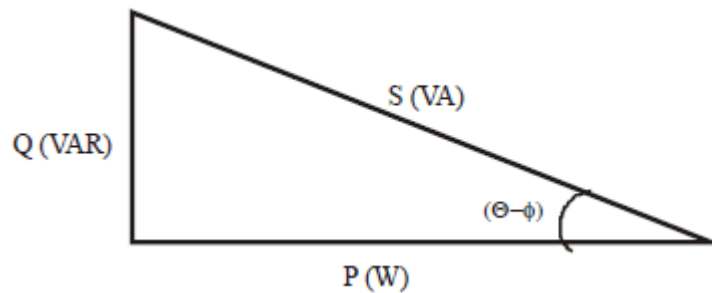


Figura.8. Triángulo de potencia.

Para apreciar los tres tipos de potencia se calculara cada uno de ellos así como el PF. En la figura. 9 muestra un circuito con una impedancia $Z = 19 + j5$ alimentado por una fuente de señal de CA, por simplicidad cada valor está representado en forma fasorial.

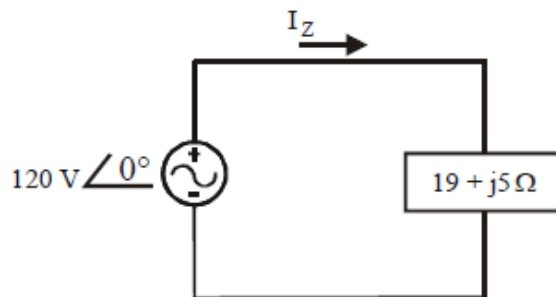


Figura.9. Circuito alimentado por una fuente de CA.

Dónde el voltaje de entrada y la resistencia en representación fasorial son:

$$V = 120 \angle 0^\circ$$

$$Z = 19 + j 5 \Omega = 19.64 \angle 14.74^\circ$$

Por la ley de ohm.

$$I = \frac{V}{Z} = \left(\frac{120}{19.64} \right) \angle -14.74^\circ = 6.10 \angle -14.74^\circ$$

Para la potencia activa, se aplica la ecuación 9, como:

$$P = V_{eff} I_{eff} \cos(\theta - \phi) = (120)(19.64) \cos((0^\circ) - (-14.74^\circ)) = 2.279 \text{ kW}$$

Lo que significa que la potencia consumida por la carga es 2.279 kW.

Para la potencia reactiva, se aplica la ecuación 14, como:

$$Q = V_{eff} I_{eff} \sin(\theta - \phi) = (120)(19.64) \sin((0^\circ) - (-14.74^\circ)) = 599.64 \text{ VAR}$$

Este resultado indica que la reactancia está contribuyendo con 609.98 VAR al circuito.

Para la potencia aparente se emplea la ecuación 13, como:

$$S = V_{eff} I_{eff} = (120)(19.64) = 2.356 \text{ kVA}$$

Indica que la fuente proporciona al circuito una potencia aparente de 2.356 kVA.

Para el PF, se emplea la ecuación 15, como:

$$PF = \frac{\text{potencia activa}}{\text{potencia aparente}} = \frac{2.279 \text{ kW}}{2.356 \text{ KVA}} = 0.9669$$

PF es atrasado, ya que $(\theta - \phi) = 14.79^\circ$, es positivo, indica que la corriente adelanta al voltaje y $\cos(\theta - \phi) = \cos(14.79^\circ)$. En la figura 10 se muestra el triángulo de potencia para este ejemplo, en donde se ven los resultados obtenidos.

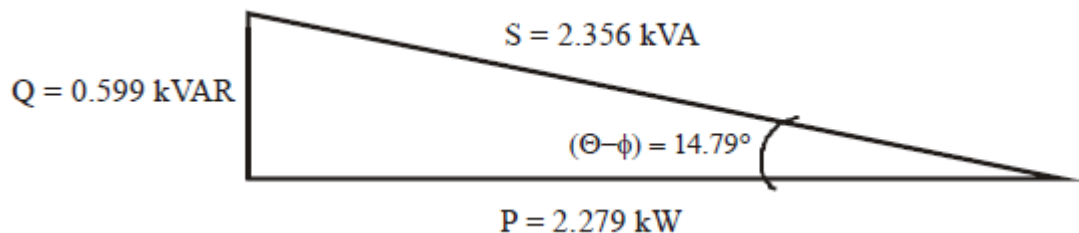


Figura.10. Relación de potencia.

1.5. Armónicos

Existe una herramienta matemática conocida como series de Fourier, la cual justifica, que cualquier señal periódica, puede ser descompuesta como una suma infinita de senos y cosenos, cuya frecuencia es múltiplo de una frecuencia fundamental [6]. La serie de Fourier se expresa por la ecuación 19:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{j2\pi k f_0 t} \quad (19)$$

Dónde:

$f_0 = \frac{1}{T_p}$, frecuencia fundamental.

c_k = Coeficientes de la serie de Fourier compleja de $x(t)$ y se calcula por la ecuación 20.

$$c_k = \frac{1}{T_p} \int_{T_p} x(t) e^{j2\pi k f_0 t} dt \quad (20)$$

Cuando la señal $x(t)$ es $v(t) = V_m \cos(\omega t \pm \theta)$, al obtener la expansión de serie de Fourier los únicos elementos que se obtienen, es c_1 y c_{-1} con valor de $V_m / 2$, los cuales son los componentes fundamentales. En la figura 11 (a) se observa la señal coseno pura y en la figura 11 (b) su representación en el dominio de la frecuencia, sólo se muestra el componente c_1 . Cuando la señal $x(t)$ es real, entonces $c_k = c_{-k}^*$.

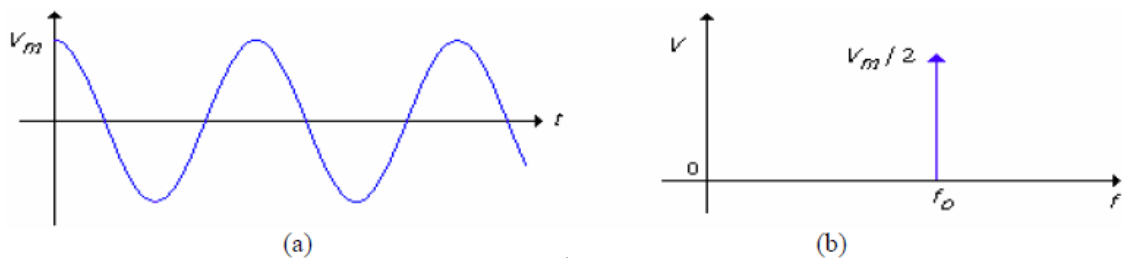


Figura.11. Representación de la ecuación 2 (a) Dominio del tiempo. (b) Dominio de la frecuencia.

Cuando la señal es periódica pero no senoidal pura, como la que se muestra en la figura 12 (a), al calcular los coeficientes se tiene un espectro como el mostrado en la figura 12 (b), cuyo valor se especifica en la tabla 1.2.

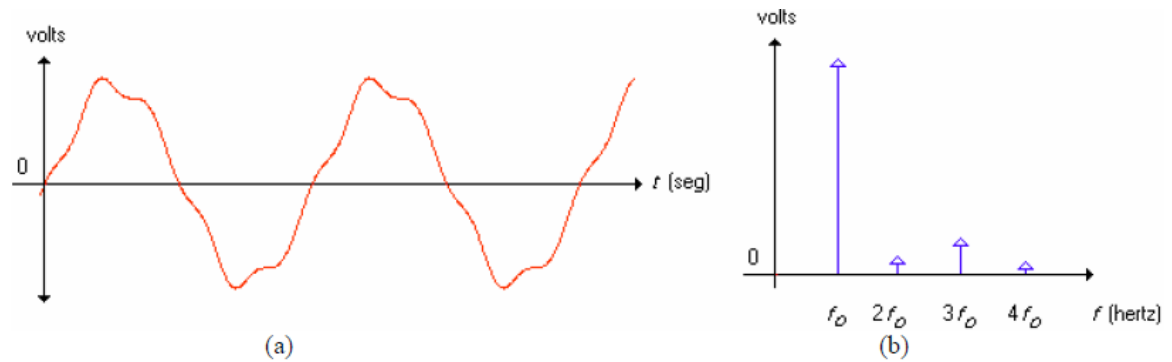


Figura.12. Señal senoidal no pura de voltaje. (a) Forma de onda. (b) Coeficientes de la Serie de Fourier.

Tabla 1.2 Valor de los coeficientes de Fourier para la señal de voltaje de la figura 1.22 (b).

Coeficiente	Frecuencia(Hz)	Amplitud(V)
0	0	0
1	60	120
2	120	4.8
3	180	12
4	240	3.6

1.5.1. Distorsión Armónica Total (THD).

Una medida cuantitativa de que tanta distorsión tiene una señal con respecto al armónico fundamental, es la distorsión armónica total THD (*Total Harmonic Distortion*) [5]. Para calcular el THD de la corriente y el voltaje se utilizan las ecuaciones 21 y 22.

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \Lambda + I_n^2}}{I_1} \quad (21)$$

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \Lambda + V_n^2}}{V_1} \quad (22)$$

Dónde:

I_n , V_n = Es la magnitud de la n-ésima armónica de la señal de corriente y voltaje

I_1 , V_1 = Componente fundamental de la señal de corriente y voltaje (para señales eléctricas es de 60 Hz.)

En sistemas eléctricos cuando se requiere representar la cantidad de distorsión armónica que contiene una señal de corriente o de voltaje, no se hace de manera directa con el resultado de la serie de Fourier, si no que se muestra como porcentaje del armónico fundamental en una gráfica de barras [1], como el mostrado en la figura 13(b).

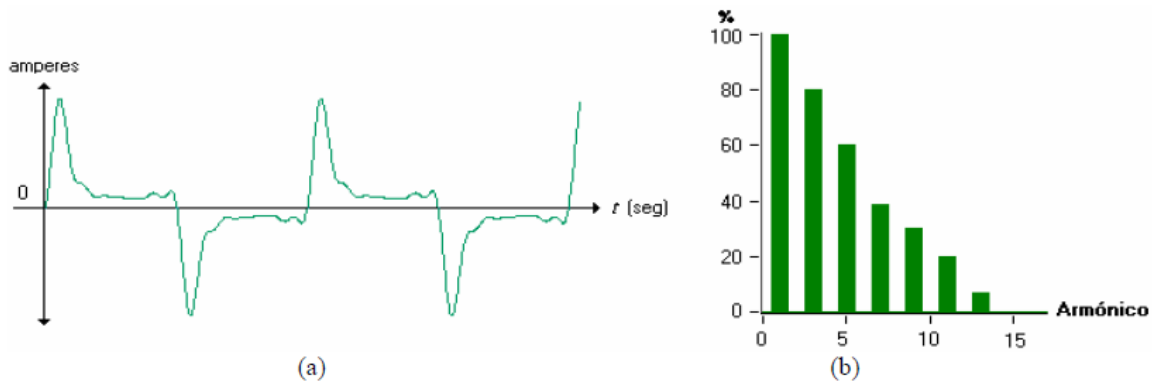


Figura.13. Señal de corriente con distorsión armónica. (a) Forma de onda. (b) Descomposición Armónica.

Para mostrar la forma de cómo se calcula el THD, se hará sobre la figura 13 (a), que representa a una señal de corriente $i(t)$. Para ello se descompone en armónicos cuyos valores se muestran en la tabla 1.3 y de forma gráfica en la figura 13 (b).

Tabla 1.3 Valores de los armónicos de la señal de corriente de la figura 1.13 (b).

Armónico	Valor RMS (V)	(I_n / I_1) 100 %
I_1	50	100
I_2	0	0
I_3	40	80
I_4	0	0
I_5	30	60
I_6	0	0
I_7	20	40
I_8	0	0
I_9	15	30
I_{10}	0	0
I_{11}	5	10
I_{112}	0	0
I_{13}	3.5	7

Con los valores de la tabla 1.3 y por ecuación 21 el THD de corriente es:

$$THD = \frac{\sqrt{(40^2) + (30^2) + (20^2) + (15^2) + (5^2) + (3.5^2)}}{50}$$

$$THD = \frac{\sqrt{3327.25}}{50} = (1.1231)(100\%) = 112.31\%$$

Este resultado al ser una cantidad que sobre pasa el valor del 100%, indica que los valores RMS de los armónicos, son mucho mayor que la senoide fundamental. El cálculo de THD implica obtener los coeficientes usando la ecuación 19, lo cual cuando se quiere medir en forma directa es muy complejo, debido a que no se tiene una expresión matemática definida para $x(t)$. Sin embargo, una forma alternativa de realizarla, es mediante el uso de técnicas de procesamiento digital de señales. La digitalización de una señal es necesaria pues una señal analógica computacionalmente no puede ser procesar de forma directa, por estar definida, por una serie de tiempo de forma infinita, lo que involucraría tiempo de procesamiento, memoria y recursos infinitos, cosa que no se puede conseguir. Para ello se necesita que la señal tenga una representación finita y esto se consigue digitalizando la señal y tomándola tramo a tramo [7].

1.5.2. Digitalización de señales analógicas.

El procesamiento de las señales se hacen en computadoras, procesadores y microprocesadores especializados, esto lleva a que las señales deben de acondicionarse de cierta forma para que sean procesadas en este tipo de hardware y software. El proceso de digitalización de una señal analógica se lleva a cabo en tres partes, que son: Muestro, Cuantificación y Codificación [7], mostradas en la figura 14.

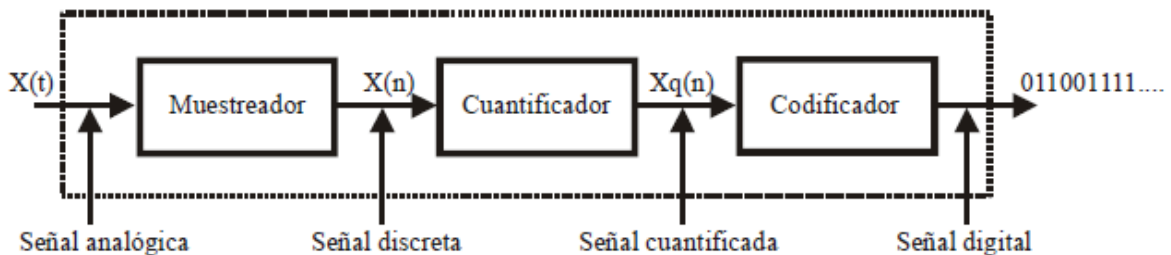


Figura.14. Elementos básicos de la conversión analógico-digital.

Muestreo.

Consiste en tomar muestras equiespaciadas en tiempo de la señal analógica, de tal manera que si se tiene una señal de entrada $x(t)$ y el tiempo de muestro es T_s , la señal de salida es $x(nT_s)$, donde ahora ésta se denomina señal en tiempo discreto $x(n)$ [7]. El valor más adecuado de T_s está relacionado con el teorema del muestro, el cual se expresa como:

$$F_s > 2 F_{max} \equiv 2 B \quad (23)$$

Dónde:

F_s = Frecuencia de muestreo, $\frac{\text{muestras}}{\text{segundo}}$ (Hertz).

F_{max} = Frecuencia máxima de la señal a muestrear, $\frac{\text{muestras}}{\text{segundo}}$ (Hertz)

B = Ancho de banda de la señal a muestrear.

La señal de la figura 13 (a) que corresponde a $i(t)$, ahora es muestreada con T_s como se observa en la figura 15.

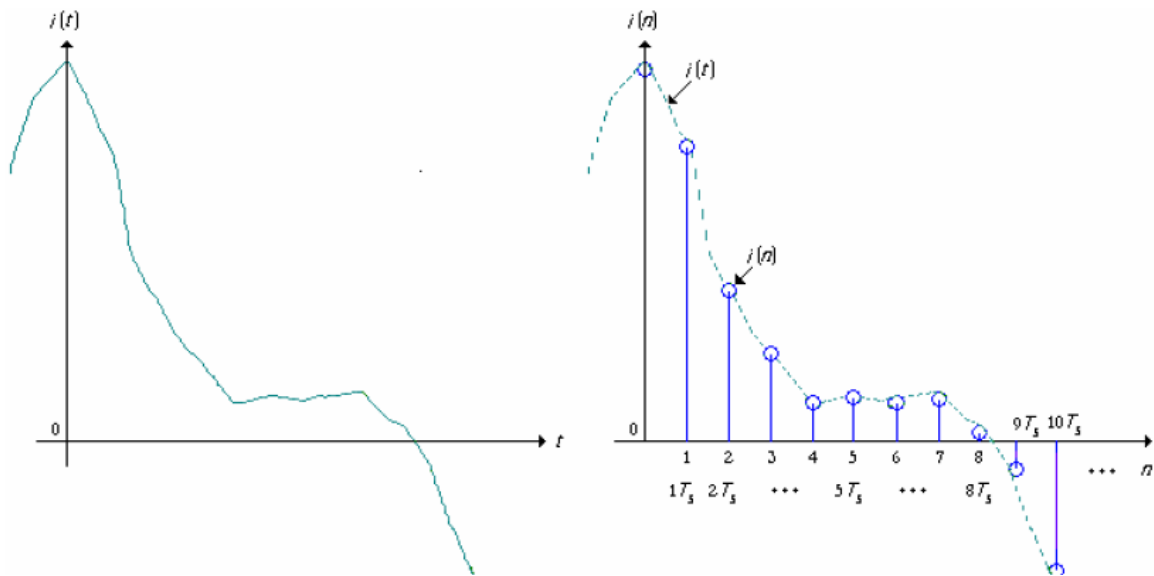


Figura.15. Muestreo periódico de la señal de corriente $i(t)$

Cuantificación.

Es la asignación de valores discretos a las muestras de la señal discreta $x(n)$ a $x_q(n)$, estos valores discretos depende del número de niveles que se tengan [7]. En la figura 16 se muestra la cuantificación de la señal $i(n)$.

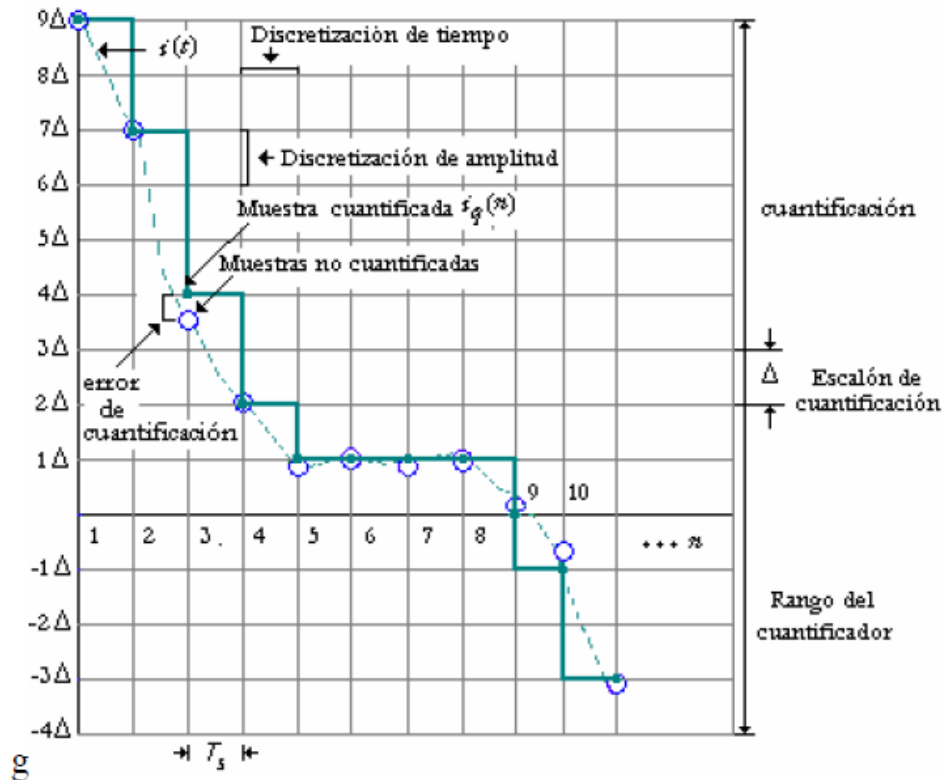


Figura.16. Cuantificación de la señal discreta $i(n)$.

Al asignar valores discretos puede existir una muestra que este entre dos niveles discretos y se le asigne un nivel que no corresponda a su valor, provocando un error, llamado error de cuantificación, es la diferencia entre $x_q(n)$ y $x(n)$. Los valores permitidos en la señal digital se denominan niveles de cuantificación y la distancia Δ entre dos niveles de cuantificación sucesivos se denomina escalón de cuantificación o resolución. Existen dos tipos de cuantificación por redondeo y truncamiento, el cuantificador por redondeo asigna a cada muestra de $x(n)$ el nivel de cuantificación más cercano, el cuantificador por truncamiento asigna el nivel inmediatamente por debajo de la muestra. El rango del cuantificador es el número de niveles posibles que se tengan disponibles.

Codificación.

Es la asignación de una secuencia binaria, *bits* que corresponden a cada valor de la señal discreta. Al menos debe de existir el igual número de niveles binarios distintos de bits que el número de niveles discretos. Si se tiene una palabra de *b bits* se pueden crear 2^b números binarios diferentes [7].

Cuando la señal $x(t)$, se encuentra digitalizada, se obtiene de tiempo discreto $x(n)$, y por lo tanto se puede procesar. Una herramienta útil en el procesamiento digital de señales es la Transformada Discreta de Fourier (DFT).

1.5.3. Transformada Discreta de Fourier (DFT).

La DFT es una operación matemática que permite obtener muestras de la representación en el dominio de la frecuencia de una señal discreta [8], expresada como:

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (24)$$

Dónde:

$x(n)$ = Señal discreta.

N = Longitud de la secuencia $x(n)$.

n = Número de muestra de la señal discreta.

$X(k)$ = Secuencia de las muestras en frecuencia.

Una señal discreta tiene un espectro periódico y continuo, lo que hace la DFT es muestrear en frecuencia un sólo periodo de ésta señal [8], el número de muestras dependerá de la frecuencia de muestreo $X(2\pi k/N)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$. Si se calcula la DFT de una señal es posible reconstruirla a partir de su representación frecuencial con la transformada inversa, denotada como:

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(k)e^{j2\pi kn/N} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (25)$$

Algunas de las propiedades más importantes de la DFT son:

- La DFT de una señal real es simétrica en amplitud y anti simétrica en fase.
- La frecuencia máxima que se puede analizar mediante el uso de la DFT es la frecuencia de muestreo entre 2.

Para ilustrar el cálculo de la DFT, se hará sobre la señal de corriente, que es representada por la figura 13 (a), la cual es una señal de CA con frecuencia fundamental de 60 Hz. Para

poder digitalizar esta señal, es necesario saber hasta que armónico se desea medir, para así tomar la frecuencia de muestreo, y por otro lado el número total de muestras que se tomarán para hacer el análisis de la señal. Se elige una frecuencia de muestreo de 21600 muestras/seg, tomando el teorema de muestreo donde dice que para poder reconstruir una señal se necesitan como mínimo dos muestras de cada periodo, en teoría con esta frecuencia de muestreo se podrá medir hasta el armónico 360. El número de muestras totales será de 720, es decir 2 periodos de la señal. En la figura 1.15 y 1.16 se muestra la señal $i(n)$ muestreada, cuantificada y codificada.

Digitalizando la señal $i(t)$, se obtiene la secuencia discreta $i(n)$:

$N = 720$, longitud de la señal.

k y $n = 0, 1, \dots, 719$, índices.

Para calcular la DFT se aplica la ecuación 24, donde la señal $x(n)$, es la señal $i(n)$. La exponencial compleja, se puede sustituir por su equivalente en seno y coseno como:

$$e \pm j\theta = \cos\theta \pm j \operatorname{sen}\theta \quad (26)$$

$$e^{-j2\pi kn/N} = \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (27)$$

Con lo que la ecuación 24 se puede expresar como:

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left(\cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right) \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (28)$$

Los índices n y k se inician con cero (n y $k = 0$), la señal $i(n)$ se multiplica con la exponencial compleja (en este caso por la sustitución de seno y coseno), variando n , estas multiplicaciones sucesivas se suman hasta llegar a $N-1$, el primer dato obtenido corresponde a la primera frecuencia de la señal de $i(n)$ a $I(k)$, mostrado en la tabla 4.

Tabla 1.4 Valores para $k = 0$.

n	$I(n)$ volts
0	5.6342
1	5.6090 + i 0.0489
2	5.5338 + i 0.0964
⋮	⋮
719	5.6082 - i 0.1081

Después de que son llevadas al cabo estas multiplicaciones, se suman todos los valores obtenidos (debido a la sumatoria), y se obtiene $I(0) = 75.9846 + i 2.5691$, posteriormente se incrementa k y de nueva cuenta se hace lo mismo, así hasta llegar a $k = 719$, obteniéndose entonces a $I(k)$ que es la DFT de la señal $i(n)$, mostrada en la figura 17, en donde el eje horizontal es llamado eje de frecuencia y el eje vertical es de amplitud, sólo que para visualizar mejor el resultado, se graficó el valor absoluto de dicha secuencia, ya que al tener en la ecuación un seno complejo se obtiene números complejos.

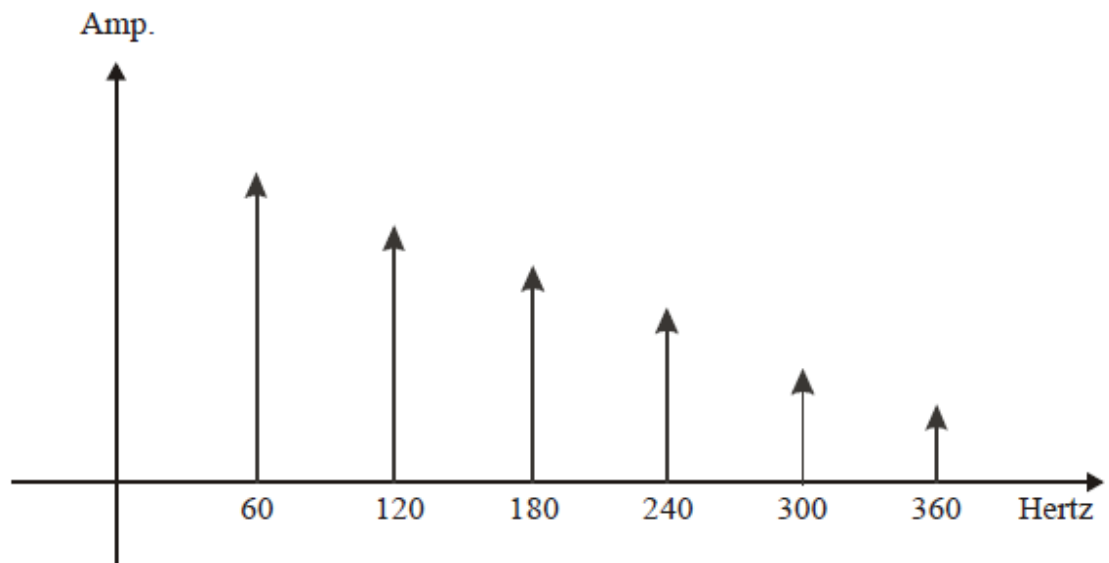


Figura .17. Representación de la señal $i(t)$ en el dominio de la frecuencia, aplicando la DFT a $i[n]$.

Al calcular la DFT de forma directa como 1.24 implica el cálculo de:

- a).- $2N^2$ cálculos de funciones trigonométricas.
- b).- $4N^2$ multiplicaciones reales.
- c).- $4N(N-1)$ sumas reales.
- d).- Numerosas operaciones de direccionamiento indexado.

Al ser la DFT un proceso matemático que requiere de numerosas operaciones para efectuarla, se empezaron a crear una serie de algoritmos que aprovechan propiedades de periodicidad y simetría que posee, que por su rapidez y alto rendimiento los hacen llamar algoritmos FFT (*Fast Fourier Transform*).

1.6. Sistemas de corriente alterna

Los circuitos o sistemas de corriente alterna se dividen en dos grupos principales: Monofásicos y Polifásicos [12].

Los circuitos polifásicos son aquellos en donde existe más de una fase de energía eléctrica y se emplean para la transmisión y distribución de energía a larga distancia y en los circuitos que alimentan motores y aparatos de fuerte consumo.

Se llaman circuitos monofásicos a los que están formados por una sola fase de energía eléctrica independientemente del número de hilos o conductores, en estos circuitos existe una sola serie de cambios en la corriente o voltaje, o lo que es lo mismo, que hay una sola fase de energía eléctrica.

Circuitos monofásicos.

En nuestro medio, los circuitos monofásicos empleados son dos:

- 1.- Circuito Monofásico de 2 Hilos.
- 2.- Circuito Monofásico de 3 Hilos o Trifilar.

Circuito monofásico de 2 hilos

Este tipo de circuito está formado por dos conductores que consisten de una fase y un neutro, tal como es mostrado en la figura 18.

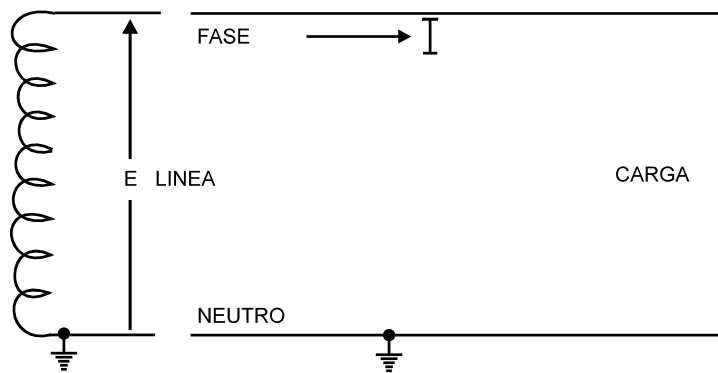


Figura.18. circuito monofásico de 2 hilos

A la izquierda de la figura 18 muestra un devanado que representa la fuente de energía de CA. De aquí en adelante, será común este tipo de esquematización, por lo que es conveniente comprender su significado.

Ya que desde el punto de vista de medición interesa únicamente el circuito de alimentación al consumidor, tendremos que considerar los circuitos de distribución, primarios o secundarios, a partir de los cuales es factible proporcionar una alimentación.

Refiriéndonos a las figura 19, podemos ver que un circuito monofásico de 2 hilos puede obtenerse de los siguientes sistemas de distribución:

a) Sistema Monofásico de 2 hilos: Puede tratarse de una distribución primaria o secundaria. En el caso de tratarse de una distribución secundaria, el sistema proviene de un par de hilos (fase y neutro) del transformador de distribución. Los voltajes más comunes son: 110, 115 y 120 volts.

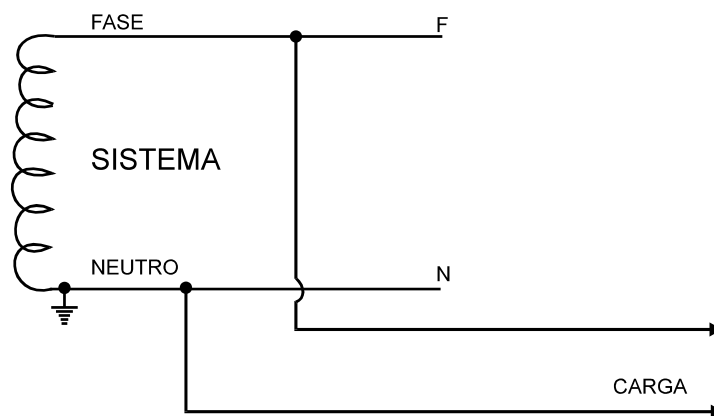


Figura.19. sistema monofásico de 2 hilos

b) Sistema Monofásico de 3 hilos.: Por lo común proviene de una distribución secundaria obtenida de un transformador monofásico de 3 hilos. Los voltajes más comunes de este sistema son 110/220, 115/230 y 120/240 volts. Si se desea, puede obtenerse alimentación monofásica a 2 hilos utilizando las terminales A-N o B-N. Un circuito obtenido de A-B no puede llamarse 2 hilos aun cuando físicamente sólo se tomen dos conductores, ya que el neutro está aterrizado y por lo tanto debe contarse como un tercer hilo. Obsérvese que si bien las terminales extremas se les denominan A y B, éstas pertenecen a una misma fase sólo que con polaridad opuesta figura 20.

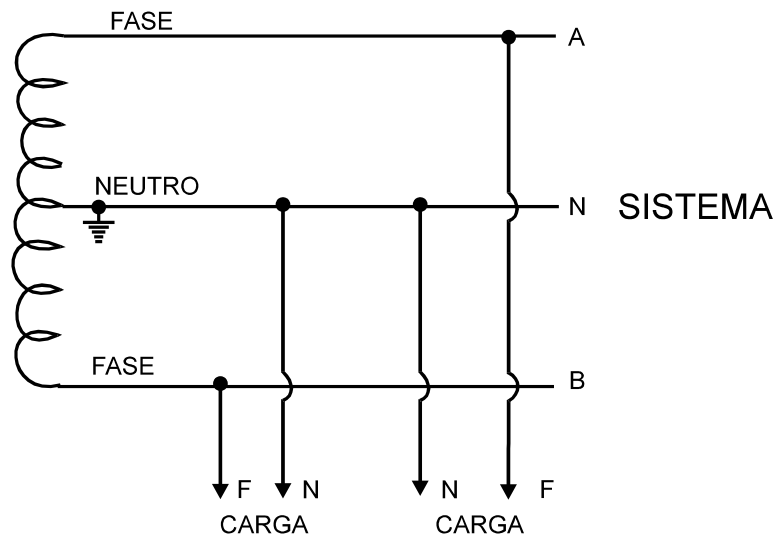


Figura.20. sistema monofásico Trifilar.

1.6.1. Formas de onda y diagramas fasoriales de un circuito monofásico de 2 hilos

En la figura.21. Se muestran las formas de onda monofásicas del voltaje y la corriente para tres casos: factor de potencia unitario, factor de potencia inductivo y factor de potencia capacitivo.

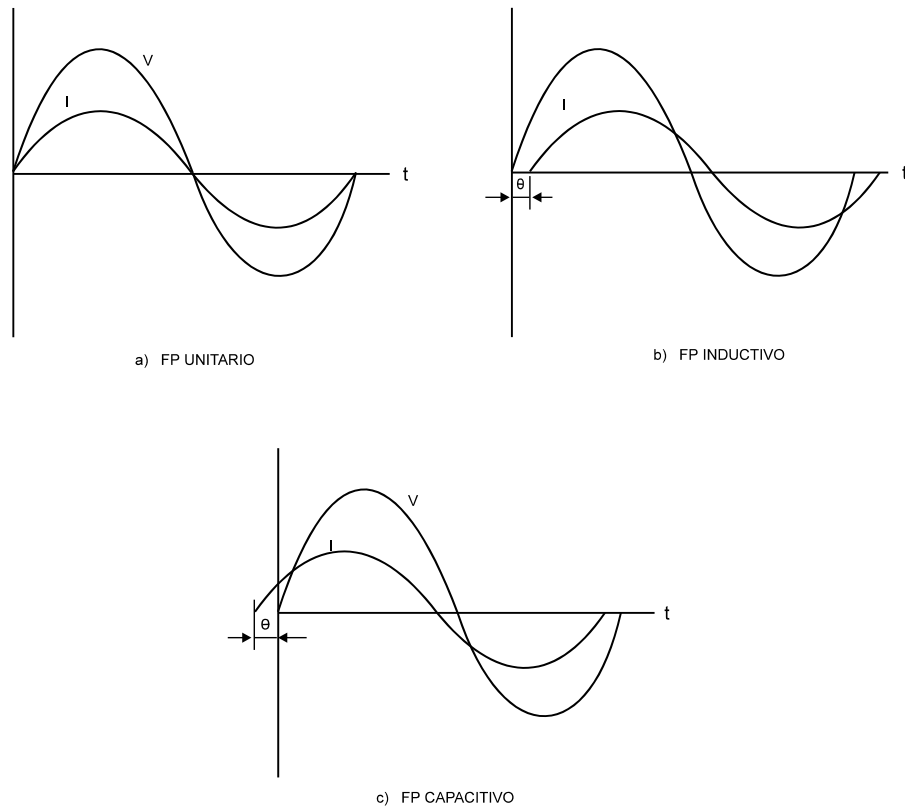


Figura.21. relaciones entre voltajes y corrientes.

En la figura 22 se muestran los diagramas fasoriales de estos tres casos.

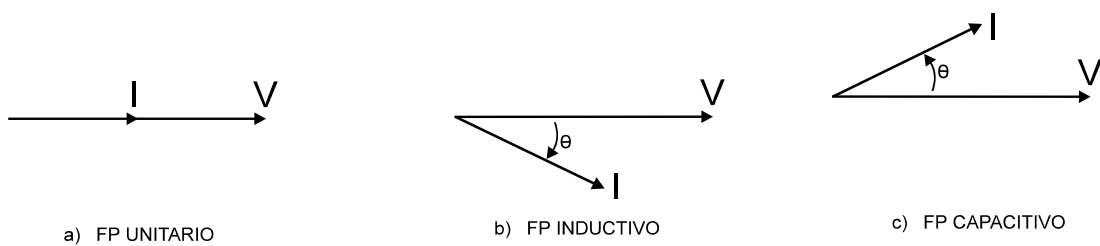


Figura .22. diagramas fasoriales relación entre voltaje y corrientes.

1.7. Instrumentación Virtual.

La Instrumentación Virtual se basa en el concepto de transformar el computador en un instrumento de medición mediante hardware y software. El término virtual surge de

funcionalidad y apariencia que (por software) el usuario puede definir para el computador utilizado como instrumento, creando una flexibilidad que no depende del fabricante como en el caso de los instrumentos tradicionales [URL 1]. El instrumento virtual queda definido como: el conjunto de software y hardware que agregado a un computador permite a los usuarios interactuar con la computadora como si se estuviera utilizando un instrumento electrónico hecho a medida [URL 2].

1.7.1. Elementos de la Instrumentación Virtual.

Un instrumento virtual consta de elementos de hardware y software, como son (ver figura 23):

- Computadora Personal: Realiza el procesamiento y visualización de los datos.
- Sistema específico: Su función es la de adquirir los datos, generalmente está constituido por una Tarjeta de Adquisición de Datos.
- El componente software: consiste en un programa que se ejecuta en el computador y que controla los elementos hardware, procesa y visualiza los datos analizados [URL 4].



Figura.23. Componentes de un Instrumento Virtual.

1.8. LabVIEW.

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*), es un lenguaje de instrumentación y análisis. Se distingue de los de la naturaleza secuencial de los lenguajes tradicionales de programación, ya que es un ambiente de programación gráfico, llamado “G”, el cual utiliza una notación de diagramas de bloques en forma de iconos [9]. LabVIEW integra la adquisición, el análisis y la presentación de los datos. Para adquirir datos y controlar instrumentos tiene funciones de RS-232/485, IEEE488 (GPIB), VXI y VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*), soporta tarjetas de adquisición de datos (DAQ) y NI myRIO.

1.9. Transformadores para instrumentos.

La mayoría de los circuitos de potencia tienen corrientes y voltajes demasiado altos para permitir su medición en forma directa, es por ello que se utilizan transformadores para disminuir su magnitud [9]. La función principal de estos transformadores es de aislar la línea con el instrumento (generalmente esta parte ya está integrada a cualquier instrumento) y atenuar la señal en las terminales secundarias. Existen dos tipos de transformadores que se utilizan para poder medir la corriente y el voltaje, los cuales se describen a continuación.

1.10. Transformadores de voltaje.

La característica principal de un transformador de voltaje es elevar o reducir el voltaje. En la figura 24 se ven los elementos de que consta un transformador, donde el devanado primario L_1 es donde se conecta la fuente eléctrica v_1 , el devanado secundario L_2 sale la señal. El núcleo está formado por láminas de acero que están aisladas eléctricamente unas con otras.

Dónde:

v_1 y v_2 = Voltaje en la terminal del devanado primario y secundario, en voltios (V).

i_1 e i_2 = Corriente en la terminal del devanado primario y secundario, en amperes (A).

L_1 y L_2 = Devanado primario y secundario, en Henrios (H)

N_1 y N_2 = Número de espiras en el devanado primario y secundario.

ϕ = Flujo de campo magnético (Webers).

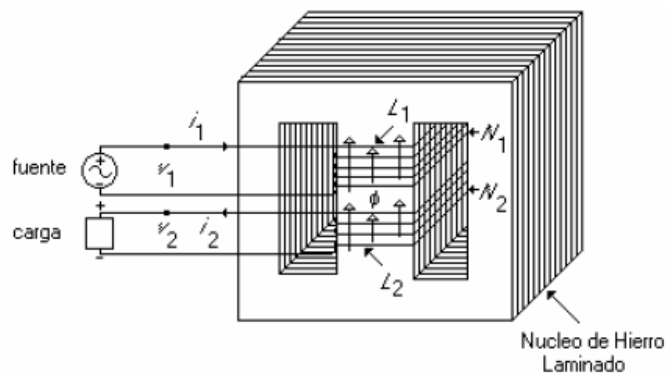


Figura.24. Elementos de un transformador de voltaje.

La relación matemática entre el voltaje del secundario y el primario está dado por [10]:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (29)$$

Dónde:

a = Razón de número de espiras entre los devanados o entre los voltajes (adimensional).

Los puntos que aparecen en los esquemáticos de los devanados de los transformadores indican la polaridad relativa de voltajes (en el caso de los transformadores de voltaje) o corrientes (en caso de los transformadores de corriente).

1.10.1. Transformadores de corriente.

Los transformadores de corriente reducen la corriente proporcionalmente a razón inversa del número de espiras. En la figura 25 se muestra el esquemático del transformador de corriente.

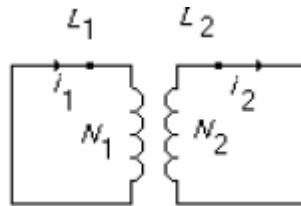


Figura.25. Transformador de corriente.

La razón de corrientes y número de vueltas de los devanados se expresa como:

$$i_1 = \frac{i_2}{a} \quad (30)$$

Dónde:

i_1 = Corriente del devanado primario, en Amperes.

i_2 = Corriente del devanado secundario, en Amperes.

$a = \frac{N_1}{N_2}$ Razón del número de espiras entre los devanados.

En la mayoría de los transformadores de corriente usados en equipos de medición la corriente típica del secundario es de 5 A. La razón de transformador generalmente se da de modo que incluya la corriente secundaria específica, por ejemplo, 1000:5, que significa que 1000 A en el primario producen 5 A al secundario. Cuando se va a medir grandes corrientes, el primario será casi siempre de una sola espira; es decir, el primario se forma pasando la línea a través de la ventana del núcleo alrededor del cual se devana el secundario. Existen varios tipos de transformadores de corriente, tales como: dona, barra, soporte, bushing, ventana y ventana desmontable o también conocido como de núcleo dividido [URL 3].

CAPITULO 2.

Metodología.

2.1. Tipo de investigación experimental.

Se trata de aquella situación en la que el investigador produce las condiciones en las que se va a observar la conducta, con un absoluto control de las variables restantes, además de su conducta.

Ya definido el tipo de estudio a realizar y establecidos los objetivos e hipótesis de la investigación para desarrollar el proyecto, se concibió la manera práctica para ejecutar la investigación, esto implicó seleccionar un diseño de investigación el cual sirvió como plan estratégico que contribuyó en responder a las preguntas derivadas de la investigación.

El diseño experimental permitió realizar experimentos virtuales en todos los campos de la ingeniería electrónica que permitan describir el sistema, el cual estuvo sometido a una serie de pruebas en las cuales se indujeron cambios deliberados en una o más variables de naturaleza eléctrica de entrada en el sistema, de manera que fue posible observar e identificar las causas en la respuesta de salida. En consecuencia el tipo de investigación que se aplicó es del tipo investigación experimental porque se manipularon distintas variables experimentales eléctricas que necesitan ser comprobadas en condiciones aleatorias controladas, con el fin de describir de qué modo o que causa produce una situación o comportamiento particular al intercambiar los tipos de cargas propuestos para la investigación.

CAPITULO 3.

Descripción del hardware.

Las características del hardware que tendrá el medidor son:

- Conexión directa a cargas (resistiva, capacitiva, inductiva) en sistemas monofásicos, con voltajes de 120 V y corrientes de hasta 20 Amperios. RMS.
- Medición del factor de potencia (PF) de cada una de las cargas.
- Medición de la potencia activa, reactiva y aparente por carga.
- La digitalización de las señales de corriente y voltaje con la tarjeta de adquisición de datos NI myRIO de *National Instruments*.
- Control de potencia sobre las cargas conectadas y monitorear su comportamiento.

Cuando se diseña un sistema, el primer paso es el identificar los requerimientos del mismo y con base a ellos seleccionar o diseñar el hardware que cumpla con ellos. De forma conceptual el sistema del medidor se puede modelar como una caja negra con entradas y salidas como se esquematiza en la figura 26. Para este caso las entradas son las señales de corriente y de voltaje del sistema monofásico y las salidas son las mediciones de los parámetros.

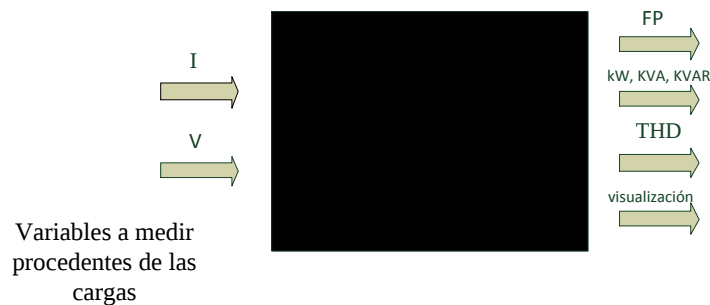


Figura.26. Forma conceptual del medidor de potencia y calidad de la energía eléctrica.

El problema se puede dividir en varios bloques funcionales, como se muestra en la figura 27 los cuales son.

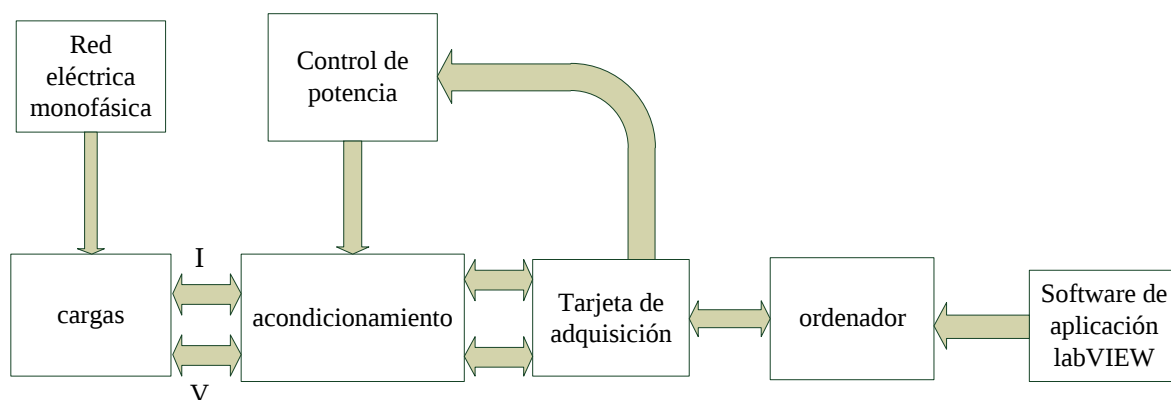


Figura.27. Diagrama a bloques del medidor de potencia y calidad de la energía eléctrica.

Descripción breve de las etapas más significativas en el diseño del medidor:

a). *Acondicionamiento*: La función principal que realiza este bloque es el transformar las corrientes y voltajes a valores más seguros para la medición, de tal manera que puedan ser procesados por la tarjeta de adquisición de datos, debido a que en la entrada se van a tener corrientes y voltajes muy elevados.

b). *Tarjeta de Adquisición de Datos NI myRIO*: La función de este bloque es tomar la señal del bloque de acondicionamiento y digitalizarla, para su posterior procesamiento. La velocidad de muestreo es uno de los parámetros más importantes que tiene que cumplir para una medición adecuada de las variables eléctricas.

c). *Computador*: Las funciones que realiza es interactuar con la tarjeta de adquisición de datos y con el software para analizar y mostrar los resultados obtenidos.

d). *LabVIEW*: Es el software bajo el cual se va a desarrollar el programa que analiza y procesa los datos para después visualizar las mediciones obtenidas del sistema trifásico, haciendo posible la interfaz con el usuario.

La etapa más importante del hardware es la tarjeta NI myRIO, sus principales características se describen a continuación.

3.1. Descripción de la tarjeta NI myRIO-1900

La tarjeta de desarrollo Myrio-1900 de National Instruments es un sistema reconfigurable de entradas y salidas incorporadas por sus siglas en inglés Reconfigurable Input Output

(RIO), dispositivo enfocado a desarrollos académicos aplicados para diseños de control, robótico y sistemas mecatrónicos.

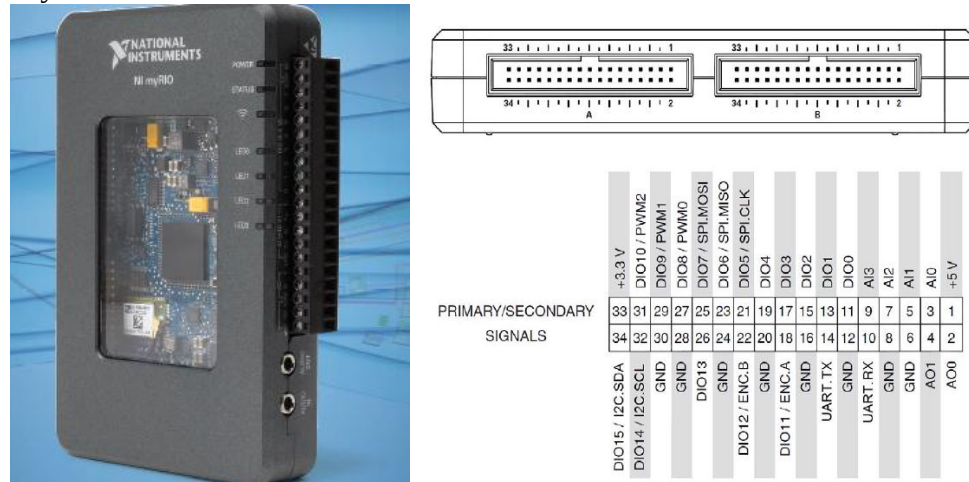


Figura.28. Tarjeta NI myRIO-1900 y disposición de pines en los puertos de expansión (MXP) A y B.

La tarjeta de adquisición NI myRIO-1900 Con tecnología de E/S reconfigurables (RIO) de National Instruments, posee conectores de entrada y salida, compatibilidad de conexión inalámbrica (WiFi), un procesador ARM en tiempo real dual-core y un FPGA Xilinx personalizada. Acceso a software y una biblioteca con recursos y tutoriales.

Las características principales de la tarjeta NI myRIO-1900 son:

- 8 entradas analógicas, 4 salidas analógicas; 32 líneas Entrada/Salida digitales.
- LEDs, push-button, acelerómetro interno.
- Xilinx FPGA y procesador Dual-core ARM® Cortex™-A9.
- Programable con LabVIEW o C; adaptable para diferentes niveles de programación.

La tarjeta NI Myrio-1900 proporciona entradas analógicas (Analogic Input), salidas analógicas (Analogic Output), entradas y salidas digital (Digital Input Output), y la potencia de salida necesaria en un solo dispositivo integrado compacto. La tarjeta NI Myrio-1900 permite conexión al computador a través del puerto USB.

La figura 29 muestra la disposición componentes y las funciones de la tarjeta NI Myrio-1900.

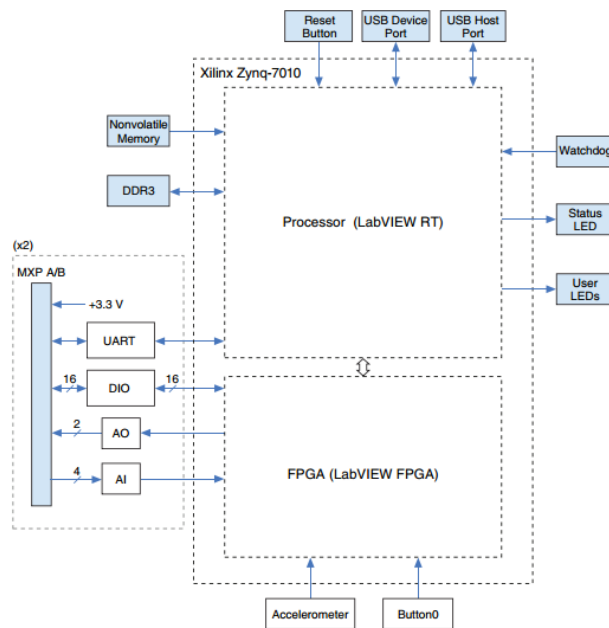


Figura.29. diagrama de bloques hardware Tarjeta NI myRIO-1900.

3.1.1 requerimientos de la tarjeta NI myRIO-1900.

Los requerimientos mínimos de hardware y software son:

Hardware.

Conexión USB con el computador.

Memoria: 1 Gb de RAM.

Procesador Dual Core o superior.

Display: Monitor VGA/SVGA/SVGA.

Disco duro: $\approx$ 120 GB.

Conexión de la tarjeta a la red eléctrica.

Voltaje de alimentación: 6 a 16 VDC.

Máxima potencia de consumo 14W.

Potencia típica de funcionamiento: 2.6W.

Software.

LabVIEW 2013 con los módulos integrados para la programación de la tarjeta NI myRIO-1900.

3.2. Requerimientos y diseño del hardware.

3.2.1 Adquisición de los datos

Con base en los requerimientos del sistema se comprobara que las características que tiene la tarjeta de adquisición de datos son suficientes para utilizarla en esta aplicación.

Existen cuatro puntos fundamentales a considerar, que son:

1. Frecuencia máxima de muestreo.
2. Número de canales.
3. Modo de operación de los canales analógicos.
4. Nivel máximo de voltaje en los canales analógicos.

3.2.1.1. Frecuencia máxima de muestreo.

Los parámetros que se van a medir son: potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia. La potencia activa y reactiva, se calcula con las ecuaciones 9 y 14, es necesario determinar el ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje. Para ello, es importante cumplir con una frecuencia mínima de muestreo para digitalizar cada una de las señales de corriente y de voltaje. Dos aspectos importantes que se deben de tomar en cuenta son:

- La frecuencia de cada señal de corriente y de voltaje.
- La precisión para medir el ángulo.

Cada señal de corriente y voltaje tiene una frecuencia típica de 60 Hz. El periodo de tiempo de un ciclo completo es de 16.66 ms o en grados de 0° a 360°. En la figura 30 se muestra la analogía entre la señal de corriente alterna en tiempo y en grados.

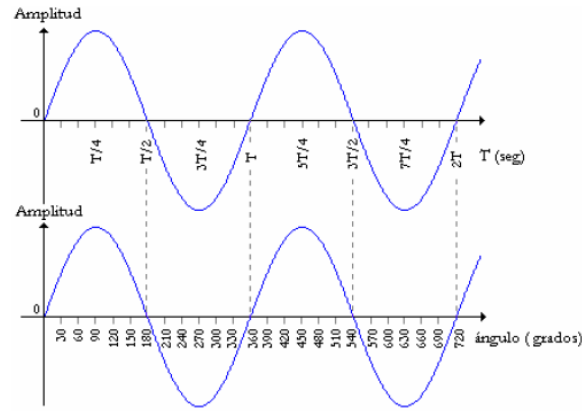


Figura.30. Analogía entre una señal de CA en el tiempo y en grados.

Cada muestra que se adquiere de las señales, tendrá su equivalente a un determinado número de grados. Según la cantidad de muestras que se tomen, será la precisión que se tenga para medir el ángulo de desfase. En la tabla 1.5 se muestra la precisión que se obtiene para el ángulo de desfase en función del número de muestras por periodo. Se puede observar que a medida que se toman más muestras sobre un período de la señal, el error al momento de calcular el ángulo disminuye, pero aumenta la frecuencia de muestreo. Considerando lo anterior, es necesario que cada muestra de la señal represente un grado, esto es, 360 muestras equivalentes a 360° . La mínima frecuencia de muestreo por canal está dada por la ecuación 31, la cual es la multiplicación entre el número de muestras y la frecuencia de la señal.

$$F_m = (F)(N^\circ \text{muestras}) \quad (31)$$

Sustituyendo en la ecuación 31, se obtiene, que:

$$F_m = (F)(N^\circ \text{muestras}) = (60 \text{ HZ})(360) = 21.6 \text{ kmuestras/seg}$$

Por otro lado la tarjeta tiene una velocidad de muestro de 500 kmuestras/s cuando se adquiere por un solo canal. La frecuencia máxima de muestreo a la cual debe de operar la tarjeta, es en función del número de canales que se necesitan (4 para las señales de corriente y 4 para las señales de voltaje), la frecuencia de muestro que se desea conseguir, como se especifica en la ecuación 32.

$$F_{m \max} = (N^\circ \text{canales})(F_m) \quad (32)$$

Sustituyendo en la ecuación 32, se obtiene, que:

$$F_{m \max} = (N^\circ \text{canales})(F_m) = (8) \left(21.6 \frac{\text{kmuestras}}{\text{seg}} \right) = 172.8 \text{ kmuestras/seg}$$

El resultado de 172.8 kmuestras/s comparado contra 500 kmuestras/s que es lo que ofrece la tarjeta, se justifica que cumple con la máxima frecuencia de muestreo.

Tabla 1.5 Relación de numero de muestras, frecuencia de muestreo, θ y ϕ .

N° de muestras / ciclo	Frecuencia de muestreo (kmuestras/seg)	Precisión (grados)
40	1.2	9
80	4.8	4.5
120	7.2	3
160	9.6	2.25
200	12	1.8
240	14.4	1.5
280	16.8	1.28
320	19.2	1.125
360	21.6	1
400	24	0.9
440	26.4	0.81
480	28.8	0.75

3.2.1.2. Número de canales.

Se requieren de 8 canales de adquisición de datos, dos por cada carga a conectar, la tarjeta posee 8 canales distribuidos en los puertos de expansión (MXP) . Cumpliendo de forma ajustada al requerimiento.

3.2.1.3. Modo de operación de los canales analógicos.

La tarjeta NI Myrio-1900 dispone de varios canales de entrada analógica distribuidos en los puertos de expansión (MXP) A y B. Las entradas analógicas están multiplexados figura 31 a un único convertidor de analógico digital (ADC) toma todas las muestras de todos los canales. Señales de entra con un nivel de tensión 0-5 Voltios.

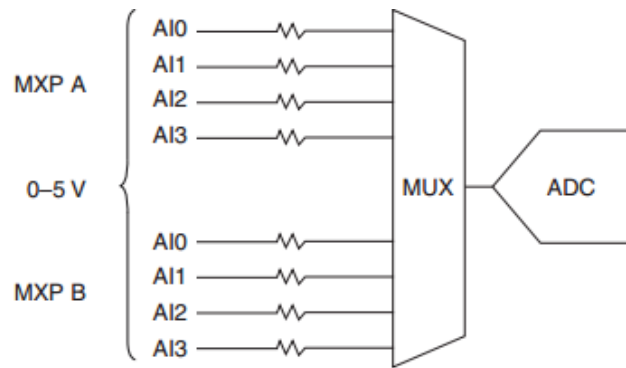


Figura.31. Topología entradas análogas tarjeta NI Myrio-1900.

El modo en que la tarjeta realiza la conversión de los datos procesados a valores en voltajes es aplicando las siguientes ecuaciones:

$$V = (\text{valores de datos sin procesar}) * (\text{bit menos significativo(LSB)}) \quad (33)$$

Donde el valor del bit menos significativo (LSB) está dado por la ecuación 34:

$$\text{LSB} = \frac{(\text{rango nominal})}{2^{\text{ADC resolución}}} \quad (34)$$

Dónde:

LSB: es el valor en voltios de acuerdo al incremento entre los valores de datos.

Rango nominal: es el valor absoluto, máximo en voltios del canal.

ADC resolución: la resolución de la conversión analógica digital en bits en este caso es de 12 bits.

Para calcular los valores de lectura del puerto análogo en función de la tensión se aplica la ecuación 33 de esta manera queda:

$$\text{LSB} = \frac{(\text{rango nominal})}{2^{\text{ADC resolución}}} = \frac{5V}{2^{12}} = 1.22 \text{ mV}$$

La máxima lectura en voltios es:

$$\text{maxima lectura} = 4095 * 1.221 \text{ mV} = 4.999 \text{ V}$$

3.2.1.4. Nivel de voltaje máximo de entrada en los canales analógicos.

La tarjeta tiene las siguientes especificaciones técnicas.

Tasa de muestreo: 500muestras/segundo.

Voltaje nominal: 0V a +5V.

Protección a sobre voltaje: $\pm 16V$.

Precisión: $\pm 50mV$.

Ancho de banda: 300 kHz.

Con base a las anteriores especificaciones de la tarjeta se debe diseñar la etapa de acondicionamiento de las señales.

3.3. Acondicionamiento señales.

La etapa de acondicionamiento al ser un medidor monofásico con 4 cargas conectadas se deben tomar dos conexiones por cada carga, una para corriente y otra para voltaje, donde los valores máximos y mínimos para la corriente esta entre los 0 y 20 amperios y para el voltaje en los 0 a 120 voltios.

Las funciones principales que debe de realizar esta etapa son: acoplar las corrientes y voltajes del sistema y acondicionar las señales a niveles más seguros.

Las características de las señales de entrada son:

- 4 voltajes senoidales de 60 Hz y 120 V RMS de amplitud (170 volts de pico).
- 4 señales de corriente de 60 Hz. y de amplitudes que varían de 0 a 20 Amp. (29 amperes pico).

La etapa de acondicionamiento debe de ser capaz de:

- Convertir todas las señales de voltaje y corriente a voltajes que varían en el rango de 0 a 5V. (rango de operación de la tarjeta de adquisición).
- Proporcionar un buen aislamiento eléctrico.

Existen varias formas de acondicionar las señales de corriente y de voltaje para hacer mediciones en un sistema eléctrico (tales como sensores de efecto Hall, optoacopladores, etc.), sin embargo los más utilizados son los transformadores de corriente y de voltaje, debido a que son una opción económica y confiable. Proporcionan un aislamiento muy grande, en el caso de los transformadores de voltaje de al menos 1200 V entre el primario y el secundario y para la corriente de 600 Amperios.

3.3.1. Acondicionamiento de las señales de voltaje.

Las características que el sistema debe cumplir para un óptimo funcionamiento son:

- a). Voltaje en el primario de 120 V_{RMS}.
- b). El voltaje en el secundario de 1 V a 12 V_{RMS} (17 volts de pico). Para cumplir con el requerimiento de la entrada por el canal analógico se debe acondicionar la señal en valores de voltaje de 5V.

Para el diseño existe una variedad de transformadores de voltaje que varían el voltaje en el secundario, pero siguiendo los requerimientos para la entrada analógica de la tarjeta, se utilizó un transformador de 120 Volts a 12 Volts. Estos transformadores son comerciales. Para este caso la señal de voltaje pico es de aproximadamente de ± 4.99 volts, este valor de voltaje está dentro del rango de operación de la entrada analógica.

Entre las terminales del secundario y las entradas de la tarjeta se implementaron fusibles para proteger al circuito de corrientes que puedan dañar los canales de entrada de la tarjeta. De adquisición de datos, el valor de los fusibles es de 100 mA, aquí el parámetro más importante es la corriente.

Por último se implementa los valores de resistencia para el diseño de los divisores de tensión que permitirán añadir un offset y ajustar el nivel de amplitud adecuado.

En la figura 32 se muestra el diagrama esquemático de la etapa de acondicionamiento y los valores de resistencias utilizados para obtener los valores requeridos para la obtención de la señal de entrada hacia los canales analógicos de la tarjeta.

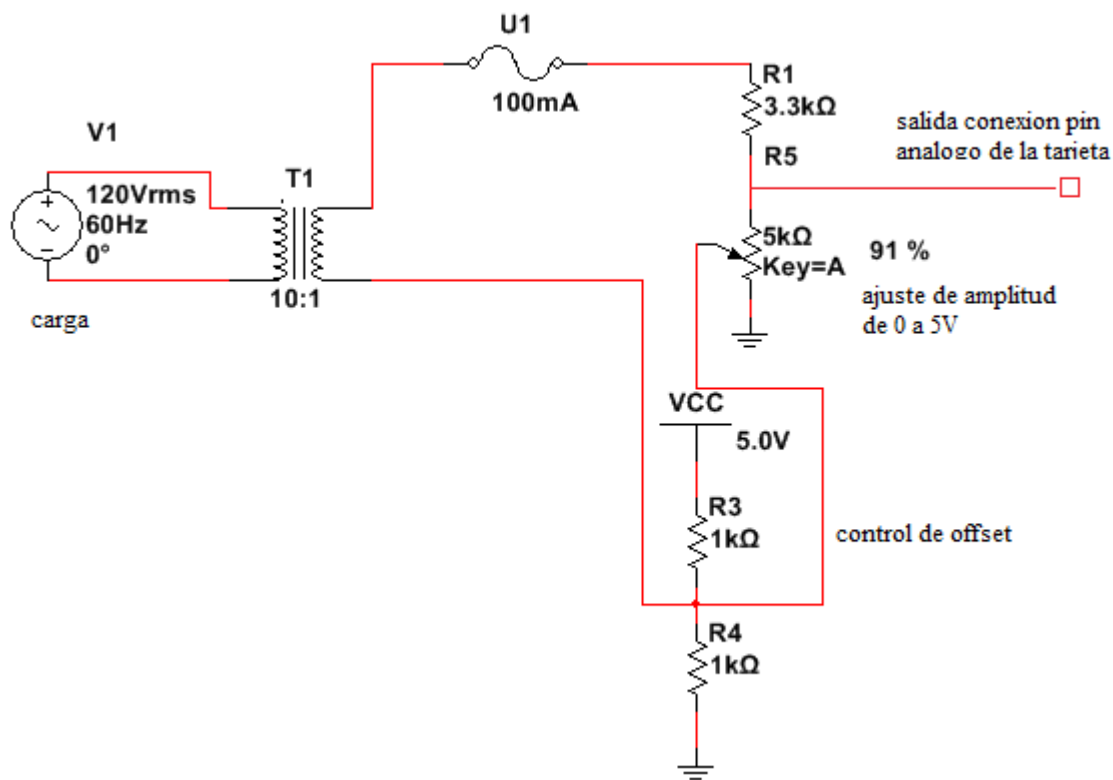


Figura.32. Acondicionamiento señal de voltaje entradas análogas tarjeta NI Myrio-1900.

Para el diseño de offset se utilizó un divisor de voltaje con resistencias de $1\text{k}\Omega$ que añaden a la señal senoidal de 12 voltios corriente alterna un offset de 2.5V proveniente del transformador. Con el ajuste de amplitud que también está conformado por un divisor de tensión y utilizando un potenciómetro se puede ajustar la amplitud de la señal entre 0 a 5V con punto central sobre 2.5 V valor de offset.

La señal de salida obtenida con el circuito anterior figura 32 ya se puede ingresar de forma segura al puerto análogo de la tarjeta, la forma de onda obtenida es la siguiente figura 33.

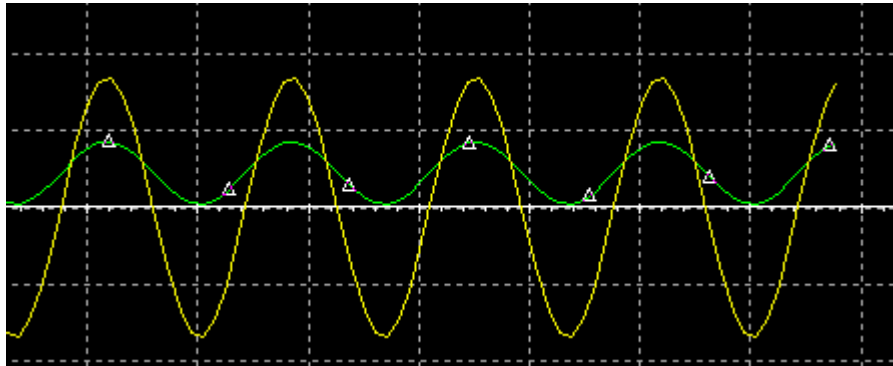


Figura.33. Forma de onda obtenida circuito acondicionamiento de voltaje, señal en amarillo voltaje salida transformador, señal en verde voltaje de salida del circuito.

Las características técnicas de las señales anteriores son

Voltaje de entrada al transformador: 120 V RMS.

Voltaje de salida del transformador. 12V RMS.

Voltaje pico de salida transformador: 16,581 V pico.

Voltaje pico a pico salida del transformador: 33,162 V pico a pico

Voltaje de salida circuito: 5V.

3.3.2. Acondicionamiento de las señales de corriente.

Las características que el sistema debe cumplir para un óptimo funcionamiento son:

- a). Corriente de entrada variable según el tipo de carga conectada rangos 3, 5, 20 Amperios.
- b). Convertir la corriente a un voltaje RMS entre 0 a 5V RMS.
- c). Disipar la menor cantidad de calor (por efecto térmico).
- d.) Permitir una fácil conexión al sistema para realizar las mediciones.

Para cumplir con los requerimientos se utilizó los sensores de corriente lineal ACS integrados en un tarjeta que permite fácil implementación física, para la explicación se tomara como ejemplo el sensor ACS714 -05B puesto que permite medir variaciones de corriente continua entre valores de -5 a 5 amperios corriente directa.

Al estar los valores de corriente en un rango de -5 a 5 A, se hace necesario utilizar un sensor basado en efecto Hall, ya que la corriente a medir no debe afectar al resto del circuito interna del medidor. Este sensor de corriente ACS714 -05B está basado en el efecto Hall, tiene contacto físico con el conductor, pero la corriente que atraviesa el sensor no genera ningún tipo de interferencia en éste. El sensor tiene separado la parte de potencia

de la circuitería que mide el campo magnético, para después transformarlo en un voltaje lineal, proporcional a la corriente aplicada. La salida del sensor varía entre 0V y 5V, con un offset en 2.5V que nos indica que no hay corriente, es decir es el cero del sensor de corriente.

Principales características son:

- Precisión: $\pm 1.5\%$
- Corriente de sensado: $\pm 5\text{A}$
- Sensibilidad: 185 mV/A
- Voltaje de alimentación: 5 VDC
- Corriente de alimentación: 10mA
- Ancho de Banda: 80 kHz
- Temperaturas máximas de operación: -40°C a 85°C
- Encapsulado: SOIC-8

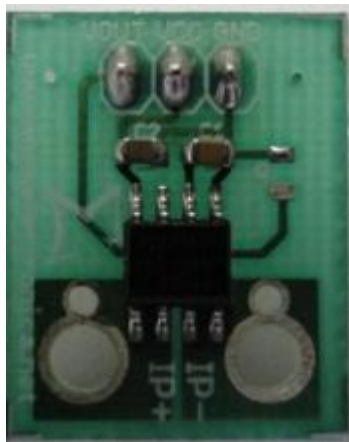


Figura.34. Tarjeta ACS714 -05B.

La salida del sensor se tiene valores de voltaje proporcionales a los valores de entrada de corriente de entrada y están entre 1.5 a 3.5 voltios corriente directa, dichos valores pasan por el convertidor análogo digital de la tarjeta de adquisición cumpliendo con el rango óptimo de operación.

El funcionamiento de pines figura 35 de la tarjeta ACS714 -05B es que el pin VOUT emite una señal analógica, que varía linealmente con la corriente alterna unidireccional o bidireccional o corriente directa primaria corriente detectada, en el pin IP, dentro del rango especificado.

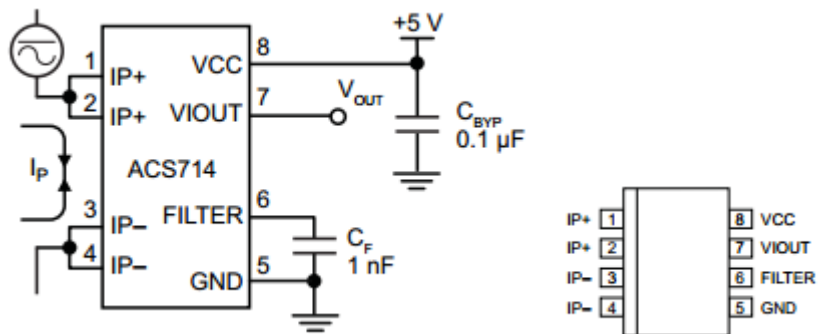


Figura.35. Diagrama de pines Tarjeta ACS714 -05B

De la figura 35 se puede interpretar que el capacitor C_f elimina el ruido de voltaje de polarización y el capacitor C_{BYP} elimina el ruido de amplificación interna del integrado, dicha configuración es recomendada por el fabricante en la hoja técnica del dispositivo.

El voltaje de salida del sensor de corriente se muestra en la figura con su correspondiente tabla de valores.

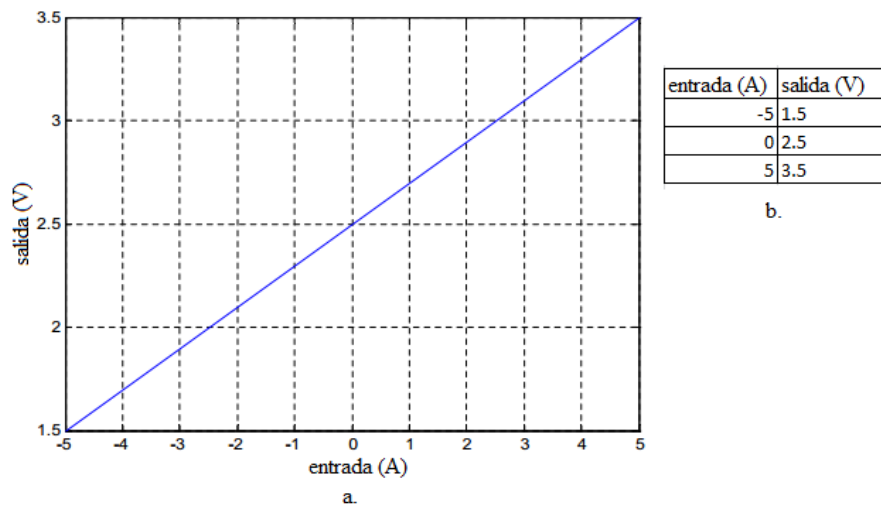


Figura.36. a. grafica de entrada vs salida del circuito sensor de corriente. Valores de entra y salida del sensor de corriente ACS714 -05B.

Por último la conexión de la tarjeta ACS714 -05B se realiza en serie con la carga conectada de la siguiente manera figura 37.

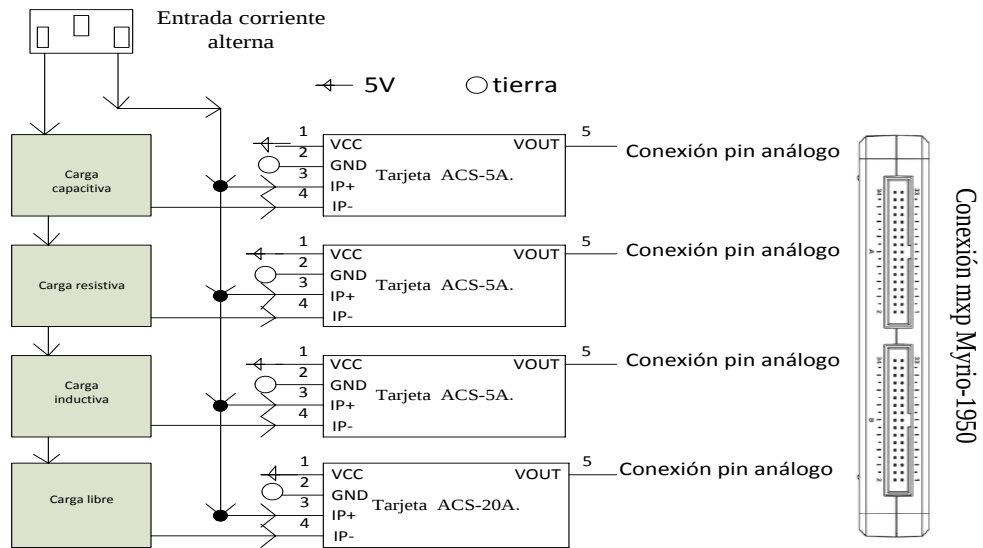


Figura.37. Diagrama de conexiones con la tarjeta ACS714 -05B y la tarjeta de adquisición.

3.4. Diseño del circuito de disparo.

El circuito de disparo presenta el control para el circuito de potencia dentro del actuador, permite tener el control del voltaje aplicado a la carga por medio de señales que controlan al elemento de potencia.

Existen algunos tipos de circuitos de disparo como rampa lineal, rampa cosenoidal, o con el uso de UJT para obtener el control de fase directo o para otro tipo de convertidores como el AC – DC monofásicos o trifásicos. En este caso se opta por el uso de la rampa lineal debido a su simplicidad de diseño y variación de ángulo de disparo directamente con el voltaje al comparador de la rampa.

La rampa lineal básicamente es un circuito que genera ondas en forma de diente de sierra, que tiene la característica de estar en sincronización con la señal de la red eléctrica, detectando el cruce por cero, permitiendo realizar el control al convertidor AC – AC (control de fase directo).

El diseño del circuito de disparo, comprende varias etapas que se muestran en la siguiente figura 38.

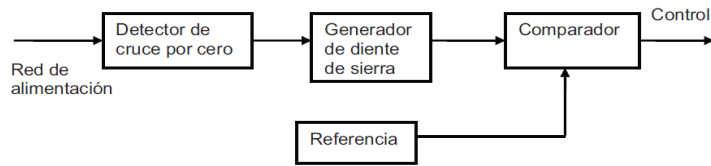


Figura.38. etapas de diseño circuito de disparo.

3.4.1. Circuito detector de cruce por cero.

El circuito detector de cruce por cero tiene como función la sincronización de la señal de la red eléctrica con el circuito de control. Para obtener la señal que detecte el momento cuando la señal de la red eléctrica es de 0 V para los dos semiciclos (positivo y negativo).

El detector de cruce por cero se realiza cumpliendo las siguientes etapas:

- reducir la señal de la red eléctrica para poderla ingresar a un amplificador operacional.
- se realiza un rectificador de onda completa para obtener el momento en que pasa por 0 V tanto cuando va de positivo a negativo y cuando va de negativo a positivo.
- comparar la anterior señal generada con un voltaje constante de bajo valor en el orden de los milivoltios, para minimizar el tiempo de la señal pulso que se genera.

En la siguiente figura 39 se presenta el diagrama del circuito detector de cruce por cero para obtener la señal de sincronización con la red eléctrica.

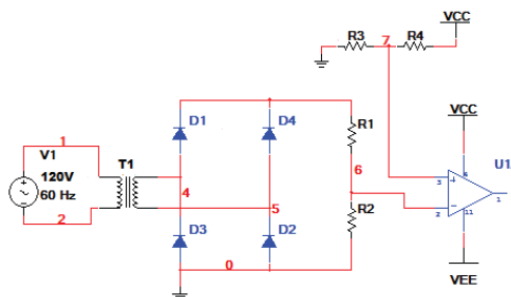


Figura.39. etapas de diseño circuito de disparo.

Para el diseño, se utiliza un transformador de voltaje para reducir su valor y aislar la señal de la red de nuestro circuito. El voltaje de salida de transformador es de 12 VRMS. Para rectificar el voltaje se utiliza un puente de diodos.

El voltaje rectificado tiene como valor pico:

$$\begin{aligned}v_{1p} &= 12\sqrt{2} \text{ v} \\v_{1p} &= 16.97 \text{ v}\end{aligned}$$

Para mantener los voltajes menores a los de polarización se utiliza un divisor de voltaje a la salida del rectificador.

El voltaje pico sobre r2:

$$v_{r2p} = 12 \text{ v}$$

La corriente que circula por r2 es en el orden de las decenas de los miliamperios, se escoge un valor referencial de:

$$i_{r2p} = 12 \text{ ma}$$

Entonces el valor de la resistencia r2 se calcula con la ley de ohm, ecuación 35.

$$r_2 = \frac{v_{r2p}}{i_{r2p}} \quad (35)$$

$$r_2 = \frac{12 \text{ v}}{12 \text{ ma}}$$

$$r_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

El valor de r1 se calcula por medio de un divisor de voltaje en la rama de r1 y r2, ecuación 36.

$$v_{r2p} = v_{1p} * \frac{r_2}{r_1 + r_2} \quad (36)$$

Despejado r1 de la ecuación 36 se tiene:

$$r_1 = r_2 * \left(\frac{v_{1p}}{v_{r2p}} - 1 \right)$$

$$r_1 = 1\text{k}\Omega * \left(\frac{12 * \sqrt{2}}{12} \right)$$

$$r_1 = 414.2 \text{ }\Omega$$

Se busca un valor comercial cercano al obtenido teóricamente:

$$r_1 = 420 \, \Omega$$

Para detectar los cruces por cero se utiliza un voltaje de comparación de 0 V y la onda generada, pero debido al puente de diodos, la onda no llega a cruzar por cero ya que los diodos tienen un voltaje mínimo para conducir. Se requiere de un voltaje bajo de comparación superior a cero para generar las señales impulso requeridas. Para esto se utiliza un divisor de voltaje con r_3 y r_4 .

$$r_3 = 10 \, \Omega$$

$$r_4 = 3 \, \text{k}\Omega$$

El comportamiento del circuito anteriormente diseñado se muestra en la siguiente figura 40. Se muestra la forma de onda del voltaje sobre la resistencia r_2 , así como también la onda obtenida del detector de los cruces por cero.

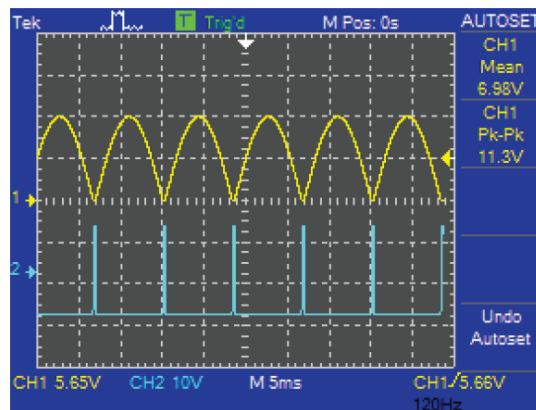


Figura.40. señal en amarillo forma de onda del voltaje sobre la resistencia r_2 y señal en azul detector de los cruces por cero.

3.4.2 circuito generador de la onda diente de sierra

En esta etapa del circuito de disparo, para generar la onda por ancho de pulso sincronizada, se requiere de una onda diente de sierra sincronizada con la red eléctrica. Esta onda se basa en la generación de una rampa lineal, la misma que llega a su condición inicial cuando se produce el cruce por cero de la onda cosenoidal.

Una forma para generar una rampa lineal, es utilizando la integración de una señal de valor constante, para esto se utiliza un amplificador operacional en configuración de integrador, como se muestra en la siguiente figura 41.

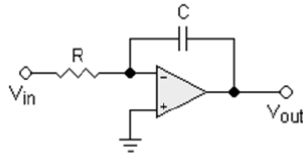


Figura.41. amplificador operacional en configuración de integrador.

El voltaje de salida del amplificador operacional se obtiene a partir de la siguiente ecuación 37:

$$v_{out} = \int_0^t \frac{V_{in}}{RC} dt + v_o \quad (37)$$

La condición inicial difiere de cero se presenta cuando el condensador se encuentra cargado. Para que el voltaje de salida sea cero en cualquier instante, se debe descargar al condensador para generar la condición de 0 V para el voltaje de salida.

La señal generada por la detección de cruce por cero realiza la función de descargar al condensador del integrador, esto puede realizarse por medio de un transistor. En ese instante el voltaje a la salida del integrador es cero llegando a la condición inicial. El circuito integrador realiza la integración en forma negativa a la onda de voltaje de entrada. Entonces para generar la rampa con pendiente positiva, el voltaje de entrada tiene que ser negativo y constante. La siguiente figura 42 muestra el circuito generador de diente de sierra sincronizado con la red.

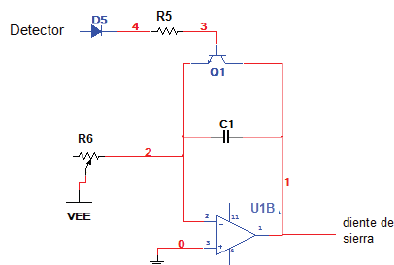


Figura.42. circuito generador de diente de sierra sincronizado con la red

El amplificador seleccionado para hacer esta prueba es el lm741.

Para el diseño se toma como voltaje de entrada

$$V_{EE} = -18 V$$

La frecuencia de la señal rectificada es de 60 Hz, por lo tanto el periodo es:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60 \text{ Hz}} = 0.01666 \text{ s}$$

$$T = 16.66 \text{ ms}$$

Para tomar el valor máximo al que se quiere llegar con la rampa se toma en cuenta la polarización, y el voltaje máximo de control del circuito de disparo.

Se utiliza como voltaje final de la rampa

$$V_{t=0.01666 \text{ s}} = 12 V_{rms}$$

Utilizando la ecuación (38) del circuito integrador:

$$V_{out} = \int_0^t - \frac{18v}{RC} dt + V_o \quad (38)$$

Dónde:

$$V_o = 0 V$$

Se obtiene la ecuación 39:

$$V_{out} = \frac{18t}{RC} \quad (39)$$

Para $t = 0.01666\text{s}$, el voltaje de salida es:

$$V_{out} = 12 V_{rms}$$

Para encontrar RC despejamos de la ecuación 39:

$$RC = \frac{18t}{V_{out}} \quad (40)$$

$$RC = \frac{(18v)(0.01666s)}{12}$$

$$RC = 0.025\Omega F$$

Para determinar el valor del condensador se toma en cuenta el rango de voltaje de funcionamiento y el valor de capacitancia, al realizar el switcheo del transistor, la descarga debe de ser inmediata para no alterar la onda diente de sierra.

Entonces: sea

$$c1 = 100 \text{ nF}$$

El valor de la resistencia r6 se obtiene de la siguiente ecuación 41:

$$RC = r * c_1 \quad (41)$$

Despejando obtenemos:

$$r6 = \frac{RC}{c_1} \quad (42)$$

Reemplazando el valor c1 y RC en la ecuación 42:

$$r6 = \frac{0.025\Omega F}{100nF}$$

Obtenemos el valor de r6:

$$r6 = 250 \text{ k}\Omega$$

La resistencia r5 se calcula a partir de la corriente de base del transistor. Y el voltaje pico de los pulsos del detector de cruce por cero.

El transistor utilizado es 2N222A, Los pulsos de corriente a la base del transistor lo damos como $IB = 9 \text{ mA}$, ya que su corriente máxima es de 200 mA.

El voltaje pico de los pulsos del detector de cruce por cero cuyo valor es:

$$V_{pulsos} = 18 \text{ V}$$

La resistencia r5 se calcula a partir de la siguiente ecuación 43.

$$V_{pulsos} = IB * r5 \quad (43)$$

Despejando obtenemos la ecuación 44:

$$r5 = \frac{V_{pulsos}}{IB} \quad (44)$$

$$r5 = \frac{18V}{9mA}$$

$$r5 = 250\text{ k}\Omega$$

El diodo d5 tiene como función recortar la parte negativa de la señal del detector de cruce por cero, las formas de onda simuladas de la onda diente de sierra se presentan en la siguiente figura 43.

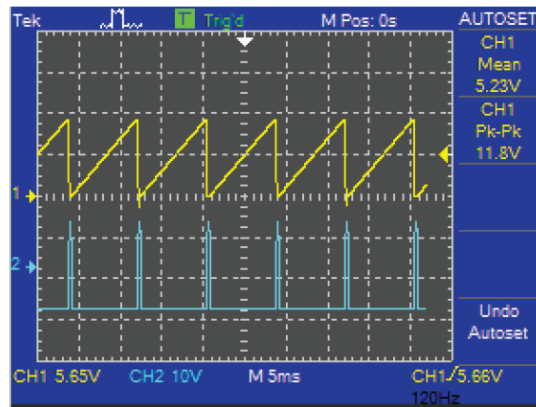


Figura.43. onda diente de sierra

El cruce por cero de la onda sinusoidal se encarga de descargar al condensador, generando la onda diente de sierra. El voltaje máximo que llega es de

3.4.3 circuito comparador.

En la generación del circuito de disparo, el circuito comparador realiza la función de comparar la señal diente de sierra con el voltaje de referencia. El voltaje de referencia, es el voltaje que determina el ángulo de disparo por medio de una señal de ancho de pulso para el circuito de potencia. Este voltaje puede provenir desde el controlador, o directamente desde un potenciómetro.

Para el diseño del circuito del comparador se toma en cuenta la señal diente de sierra. Al momento del cruce por cero de la onda, la señal de ancho de pulso tiene que estar en nivel bajo para tener apagado el optoacoplador. Cuando el voltaje de la rampa sea mayor al de la referencia, la señal ancho de pulso se coloca en alto, en ese instante se genera el ángulo de disparo.

Con las condiciones anteriores, al aumentar el voltaje de referencia, el ángulo de disparo aumenta, entonces, la conducción del TRIAC es menor y por ende el voltaje aplicado a la lámpara disminuye cuando el voltaje de referencia aumenta. Para resolver este problema, se utiliza un circuito restador de un valor constante de voltaje con el voltaje de referencia, obteniendo el voltaje hacia el comparador.

El voltaje de referencia utilizado es estandarizado de 0 a 10v para variar el ángulo de disparo de 180° a 0° respectivamente. El voltaje constante debe tener el valor máximo del voltaje de referencia, para el diseño del actuador, el voltaje es 10 v.

La siguiente figura 44 muestra el circuito comparador para generar la señal ancho de pulso modulada y aumentar el voltaje del conversor AC – AC conforme aumente el voltaje de referencia.

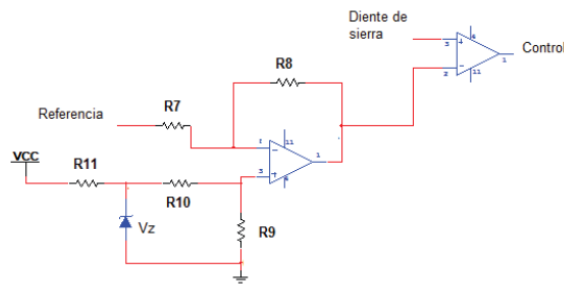


Figura .44. Circuito comparador

Para realizar la comparación se utiliza el amplificador operacional lm741. En el circuito restador los valores de las resistencias son los mismos.

$$r7 = r8 = r9 = r10 = r \quad R_7 = R_8 = R_9 = R_{10} = R$$

Asumiendo que

$$R = 10 \text{ K}\Omega$$

El voltaje para la resta es de 10 v. para esto se utiliza el diodo zener 1n4740, que tiene las siguientes características:

- voltaje zener:

$$V_z = 10 \text{ V}$$

- corriente zener:

$$I_z = 25 \text{ mA}$$

La resistencia limitadora de corriente se calcula con la siguiente expresión:

$$r_{11} = \frac{V_{cc} - V_z}{i_z} \quad (45)$$

$$r_{11} = \frac{12 \text{ v} - 10 \text{ v}}{25 \text{ ma}}$$

$$r_{11} = 80 \Omega$$

El valor comercial de la resistencia:

$$r_{11} = 82 \Omega$$

La figura 45 muestra las formas de onda simuladas, de la onda diente de sierra, del voltaje de referencia y de la señal de control para el circuito de potencia.

El circuito de control genera las señales tipo PWM para activar el TRIAC. Esta señal permite garantizar el encendido del TRIAC debido a que este elemento sólo requiere un pulso para activarse.

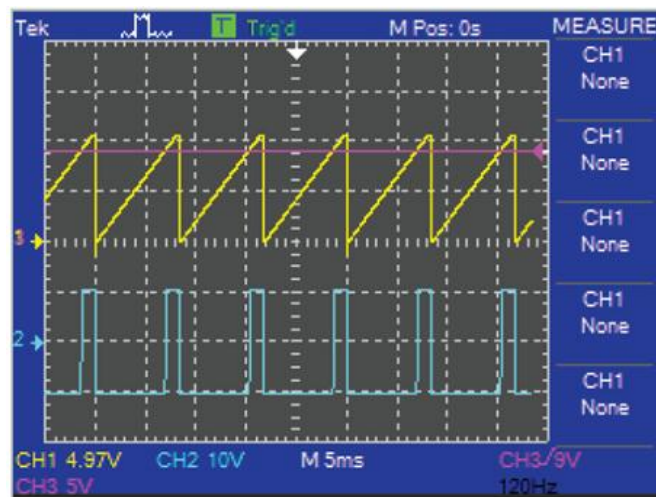


Figura.45. señales en amarillo onda diente de sierra, señal en morado voltaje de referencia y señal azul control para el circuito de potencia.

3.5. Diseño circuito de potencia

El desarrollo de la tecnología de los semiconductores de potencia permite el control de la potencia eléctrica o del acondicionamiento de la misma, para esta etapa es importante conocer cuáles son los parámetros para realizar los cálculos correspondientes en la etapa de potencia del TRIAC.

En la figura 45 se observa la etapa de potencia del TRIAC, como primero se debe calcular la resistencia de disparo (RD) el cual es necesaria para el Led de disparo del optoacoplador, se aplica la ley de voltaje de Kirchhoff al voltaje conformado entre Vcc el cual es el voltaje de entrada que en su defecto son 5V corriente directa, Ift la corriente máxima del optoacoplador y RD tenemos:

$$RD = \frac{V_{cc}}{I_{ft}} \quad (46)$$

El cálculo de esta resistencia es aplicada a la etapa de potencia del tiristor. La resistencia encargada de la protección generada por el pulso, está dada a partir del voltaje del circuito de control que genera las señales tipo pwm para activar el TRIAC. Esta señal permite garantizar el encendido del TRIAC debido a que este elemento sólo requiere un pulso para activarse. El cual es de 5V corriente directa para activarlo y 0V corriente directa para desactivarlo.

Para el funcionamiento del circuito es necesario fijar la corriente que pasa por la resistencia de puerta (RG), el cual tiene como función evitar que el TRIAC se dispare cuando el optoacoplador no conduzca permitiendo así asegurar el voltaje en la puerta (VG) cuando este activado. A continuación se describe la ecuación para calcular la resistencia:

$$RG = \frac{VR - VG}{IG} \quad (47)$$

Donde VR es el voltaje de conducción del optoacoplador, esta expresión se aplica para el cálculo de la resistencia de puerta que se calcula en la etapa de potencia del TRIAC. La resistencia RT tiene como función ser la resistencia limitadora permite dar un valor apropiado de corriente de conducción (IF) y dispara el TRIAC:

$$RT = \frac{VR}{IF} \quad (48)$$

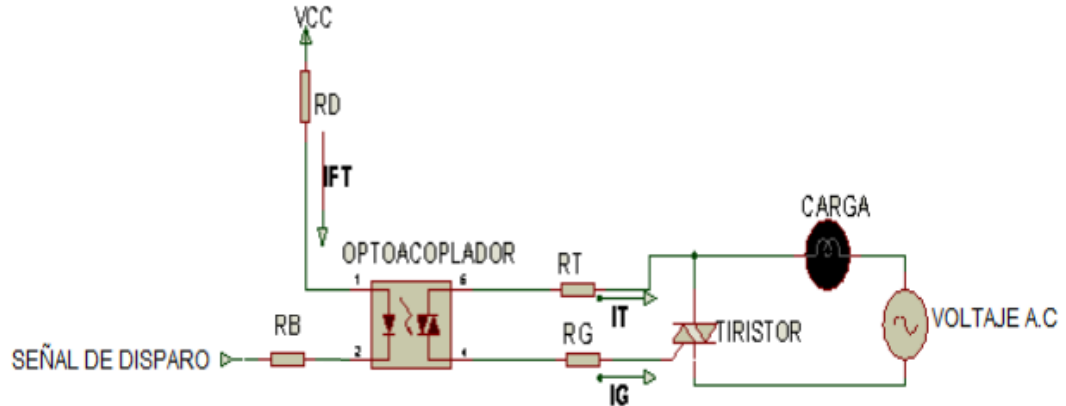


Figura.46. Etapa de potencia TRIAC

3.5.1. Cálculos etapa de potencia TRIAC

Para el cálculo de la resistencia RD figura 46 se debe tener en cuenta la hoja técnica del optoacoplador, se implementó el optoacoplador MOC 3021 en la tabla 3.1 se exponen sus principales características:

Tabla 3.1 características principales MOC3021.

Símbolo	Significado	Rango	Unidad
VR	Voltaje de conducción	3	V
IF	Corriente de conducción	10	mA
IFT (Max)	Corriente máxima de conducción	15	mA

La corriente de conducción y el voltaje de conducción en los optoacopladores de la serie MOC 3021, MOC 3022, MOC 3023 son iguales solo varia la corriente máxima de conducción. Entonces de la ecuación 46 se obtiene lo siguiente:

$$RD = \frac{5v}{0.015A} = 333,3\Omega$$

Pero este valor comercialmente no se encuentra, el valor más próximo comercial es de 330 Ω .

Para el cálculo de la resistencia de puerta (RG) se toman la hoja técnica del TRIAC BTA137 con los siguientes parámetros tabla 3.2:

Tabla 3.2 características principales TRIAC BTA137

Simbolo	Significado	Rango	Unidad
IG	Corriente de disparo de puerta	10	mA
VG	Voltaje disparo de puerta	1.5	V

El voltaje de conducción del optoacoplador (VR) fue expuesto en la tabla de ahí se toma el valor para aplicarlo en la siguiente ecuación 47.

$$RG = \frac{3V - 1.5V}{0.01 A} = 150 \Omega$$

El cual el valor de la resistencia es comercial y de fácil adquisición.

Para el cálculo de la resistencia RT se toma la información suministrada por la tabla y aplicar la ecuación 48 para obtener el valor RT.

$$RT = \frac{3V}{0.01} = 300\Omega$$

El cual el valor de la resistencia no es comercial pero se puede aproximar a 330 Ω valor comercial.

3.5.2. Red Snubber

Las redes snubbers se utilizan para suprimir transitorios indeseables y eliminar problemas en los circuitos de conmutación con elementos inductivos y capacitivos. La conmutación en estos circuitos puede producir interferencias electromagnéticas que afecten a otros equipos y si no se suprimen las sobretensiones transitorias se pueden exceder los límites de los dispositivos y producir su degradación o destrucción.

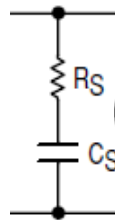


Figura.47. Red Snubber.

Para el diseño de la red Snubber de protección se toma el máximo pico de tensión, la máxima derivada del pico, máximo pico de corriente y de potencia disipada en la red de

protección, y la obtención del mínimo producto de la tensión pico por derivada de la tensión.

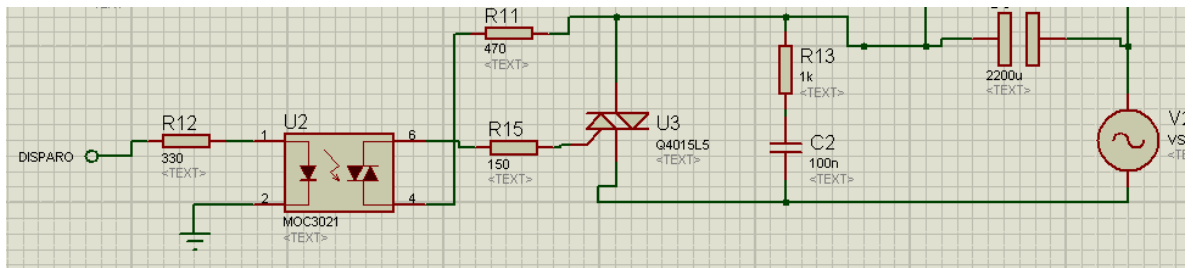


Figura.48. Diseño Etapa de potencia y protección con red Snubber.

Los valores típicos de resistencia y capacitor son de RS de 33Ω y CS de $0,01\mu\text{f}$ figura 45. Pero para efectos de diseño y dependiendo las cargas a conectar, se aumentaron dichos valores para elevar la protección del TRIAC.

3.6. Potenciómetro digital.

El potenciómetro digital permite variar la resistividad de un circuito desde un entorno digital, en este caso desde la tarjeta Myrio-1900 conectado a los pines digitales de entrada y salida.

La idea es controlar digitalmente el ángulo de disparo por medio del potenciómetro digital, haciendo una modificación al circuito de disparo, se debe sustituir el potenciómetro de $500\text{K}\Omega$ análogo por el potenciómetro digital de acuerdo al siguiente figura 49:

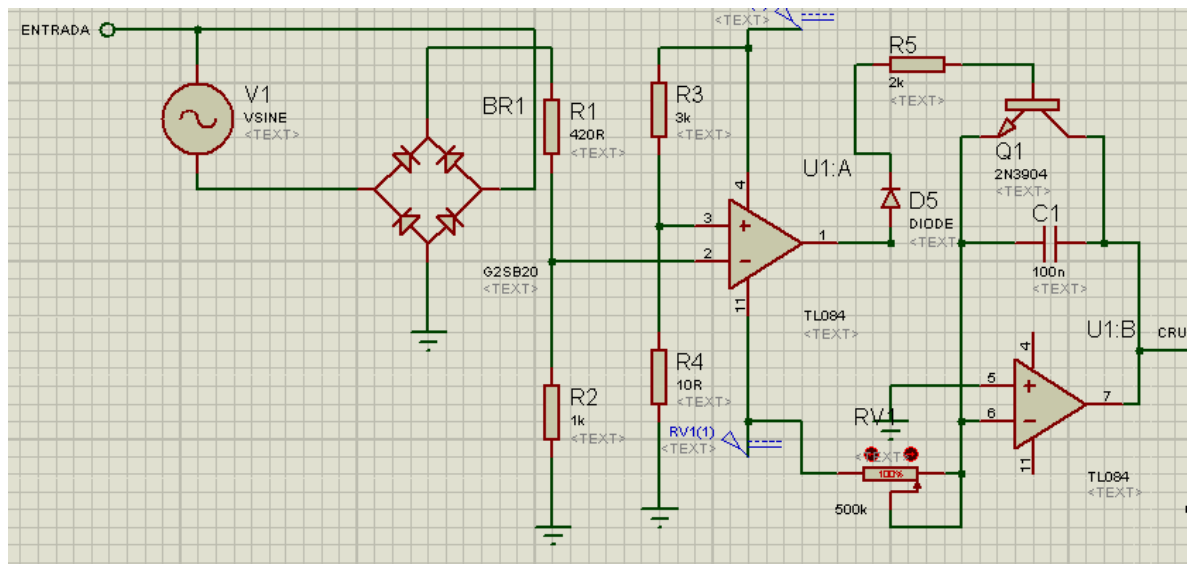


Figura.49. Circuito de disparo, identificación potenciómetro de 500K Ω

Se observa que el potenciómetro análogo de 500K Ω está conectado al último amplificador operacional, ingresa al terminal inversor y su otro extremo está conectado al voltaje de alimentación negativo, este potenciómetro tiene la función de ajustar el valor de crecimiento de la rampa hasta un voltaje pico establecido, al ajustar esta rampa se pueda tener control sobre el ángulo de disparo. De ahí la necesidad de realizar dicho ajuste directamente desde el computador, para añadir esta función se modificó el circuito figura 49. Reemplazando el potenciómetro análogo por uno digital de la siguiente manera figura 50:

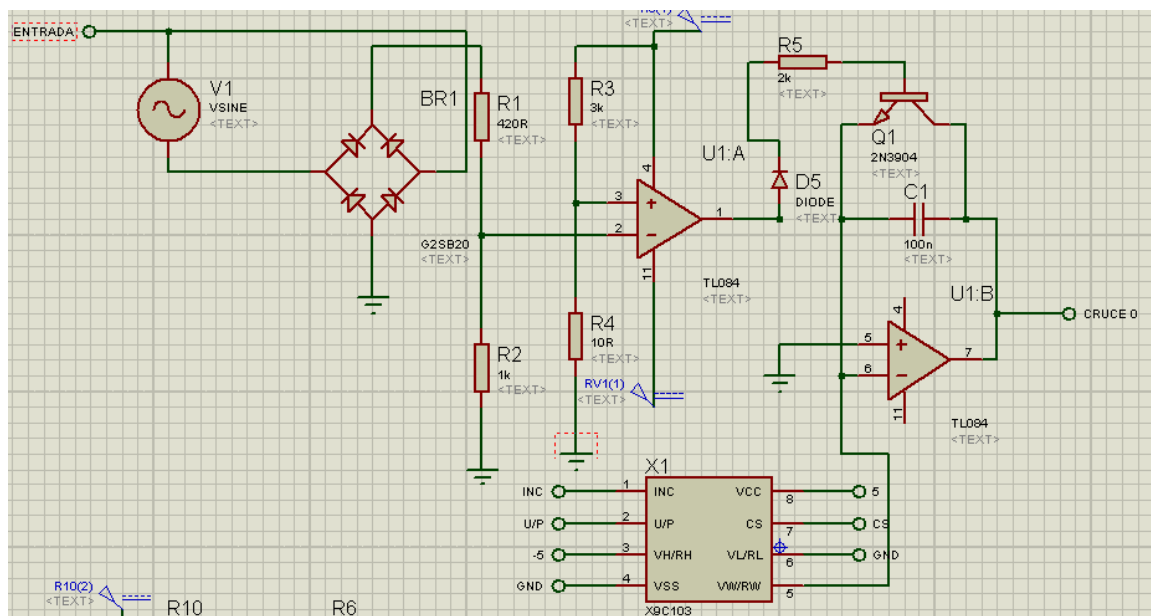


Figura.50. Circuito de disparo, modificación potenciómetro de 500K Ω por potenciómetro digital de 10K Ω

El nuevo integrado es el circuito X9C103P el cual forma parte de una familia de circuitos integrados que tienen la función de potenciómetro. Entre la “C” y la “P” existe una numeración que permite identificar el valor de la resistividad. En este caso es 103, lo que significa 10×10^3 . Eso equivale a 10000 Ohm, es decir, 10KOhm por lo que el integrado X9C103P tendrá un valor máximo de 10K Ω .

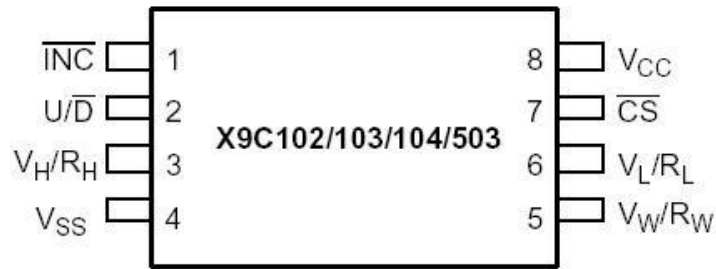


Figura.51. Esquemático circuito integrado X9C103P

el potenciómetro digital nos permite incrementar o reducir el valor de su resistividad , cuando se le aplica una señal de onda cuadrada por el pin INC , dependiendo del estado del pin U/D, este pin se le aplique una onda cuadrada en el INC el valor de la resistividad aumentara o decrecerá. El pin V_H/R_H es el equivalente a uno de los pines de los extremos del potenciómetro análogo y su rango de operación en voltios es de 5V a -5V, el pin V_W/R_W figura o wiper es la salida del potenciómetro digital en este caso va conectado a la entrada inversora del amplificador operacional figura 50. El pin V_L/R_L es el equivalente al otro extremo del potenciamiento análogo, (pines figura 51). Este dispositivo también tiene funciones de memoria al poder almacenar un valor de resistencia de acuerdo a la configuración del pin CS figura 51, cuando está en estado lógico bajo o low es posible cambiar la resistividad del potenciómetro. Pero una vez cambie a un estado lógico alto o high el circuito guardara el valor de resistencia en dicho instante en la memoria no volátil la cual es capaz de mantener dicho valor por un periodo de 100 años.

Para configurar este integrado es necesaria una combinación de estados lógicos entre altos y bajos, lo que es muy difícil operarlo manualmente.

En la siguiente figura 52 está la conexión con los puertos digitales de salida de la tarjeta Myrio-1900.

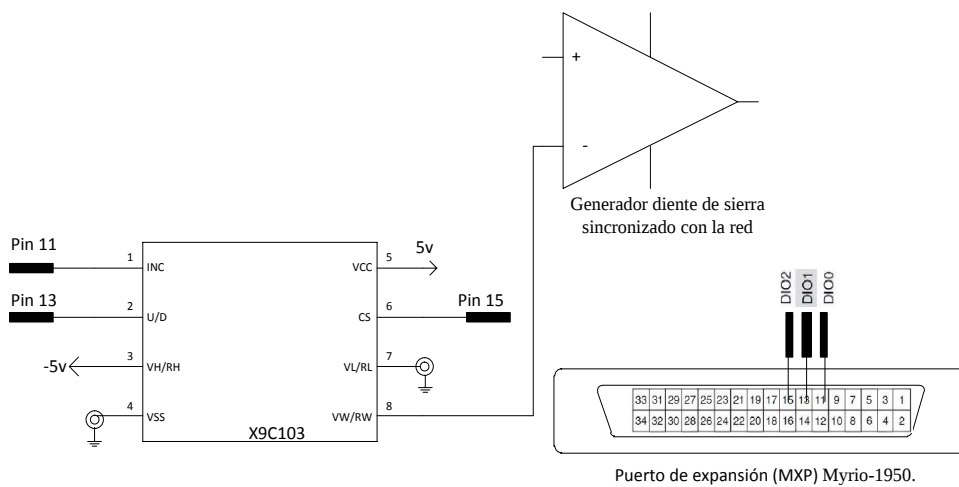


Figura 52. Conexión con los puertos digitales de salida de la tarjeta Myrio-1900.

En la figura 52 está el esquema de conexión físico donde cabe resaltar que el voltaje de entrada hacia el potenciómetro es negativo, porque la entrada hacia el amplificador se está realizando por la entrada inversora lo cual nos revierte dicho voltaje a un valor positivo ideal para realizar el ajuste de la señal rampa de forma digital y conseguir variar el ángulo de disparo efectivamente.

CAPÍTULO 4

Diseño instrumento virtual.

En los capítulos anteriores se describió la teoría elemental para comprender el funcionamiento de un medidor de potencia y calidad de la energía, y los diseños funcionales preliminares del hardware, el cual esencialmente es tarjeta de adquisición de datos Myrio-1900, sistema de acondicionamiento de señales y por ultimo control de potencia.

El paso a seguir es el desarrollo del Instrumento Virtual, donde se tendrán las funciones de control adquisición de datos y con base en las mediciones obtenidas determinar los valores de las variables de corriente, voltaje, armónicos, etc.

Para la construcción de esta parte se podría utilizar cualquier lenguaje de programación, como: Turbo C, C++, Borland C, Visual C, etc., pero se deben considerar puntos a favor o en contra que podrían tener cualquiera de los lenguajes mencionados anteriormente. Los puntos más relevantes son , tiempo de desarrollo, complejidad del sistema, herramientas que proporcionen, etc.,. Para el medidor monofásico de potencia y calidad de la energía Eléctrica se va plantear utilizar el lenguaje LabVIEW, por las siguientes razones:

- LabVIEW opera en conjunto con la tarjeta de adquisición datos Myrio-1900, por ser ambos de la misma firma fabricante.
- Tiene incluidos el software y controladores de la tarjeta para poder configurarla.
- Forma de programación intuitiva y fácil de comprender ya que se basa en lenguaje gráfico.
- Es un lenguaje de programación dedicado a aplicaciones de instrumentación y control para aplicaciones de medición y monitoreo.

4.1 Descripción general del medidor monofásico de potencia y calidad de la energía eléctrica.

Para el diseño del Instrumento Virtual, se consideran los objetivos generales, de acuerdo a ellos se propone el diagrama a bloques de la figura 53, el cual consta de tres bloques principales: Opciones de operación, Modos de trabajo y Parámetros a medir.

a). Opciones de operación.

Las señales de corriente y voltaje se adquirirán del sistema monofásico interconectado a diferentes cargas para monitorear sus parámetros eléctricos en tiempo real.

b). Modos de despliegue de la información: Medidor y generar reportes.

Modo de Medidor: Se calculan los valores de las variables eléctricas en tiempo real.

Modo generación de reportes: se guardará el valor promedio de las variables eléctricas, cada vez que el usuario lo solicite.

c). Opciones de medición: Se tendrán 3 opciones:

- Voltios/Amperes/Hertz: Medición de los valores RMS y Frecuencia.
- Potencia: Medición de la potencia activa, reactiva, aparente y el factor de potencia.
- Armónicos: Medición de los armónico y el THD.

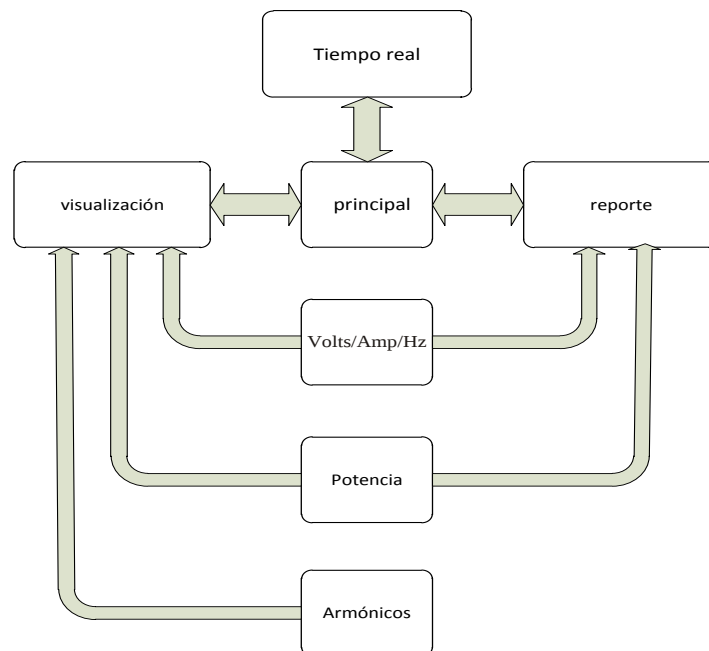


Figura.53. Diagrama a bloques del software para el Medidor de Potencia monofásico y Calidad de la Energía.

4.1.1. Diseño del instrumento virtual.

En LabVIEW un instrumento virtual está compuesto de dos elementos, panel frontal y diagrama a bloques [9]. El panel frontal es la presentación estética de instrumento y el diagrama de bloques es el código que hace funcionar el panel frontal. Para el medidor monofásico, se tiene que diseñar de forma conjunta tanto el panel frontal, como el diagrama a bloques, utilizando la técnica *Top-down*, es decir de arriba hacia abajo, identificando los bloques funcionales hasta llegar a las funciones particulares.

Se inicia considerando que debe de existir un programa principal que controla e interactúa con los demás bloques o submódulos como son Opciones de Trabajo, Modos de Trabajo y los Parámetros a Medir. Con base a la figura 53. Se diseña el Instrumento Virtual, el cual se explica a continuación.

4.2. Opción de trabajo.

Se diseñó el software para que trabaje en la Opción Real, en donde todo el análisis de las variables eléctricas se hace sobre un sistema trifásico real y además cualquier instrumento de este tipo funciona de esta forma.

4.2.1. Opción de trabajo real.

La función principal de este submódulo es configurar a la tarjeta de adquisición de datos NI myRIO-1900, para poderla configurarla LabVIEW cuenta con VI's llamados VI's myRIO, que involucran operaciones de entrada y salida analógica, contadores y E/S digital [10]. Estos VI's están organizados en categorías como son: básicos, intermedios, de utilería y avanzados [15].

- VI's Básicos: Son de alto nivel, tiene un método simplificado para el manejo de funciones y errores.
- VI's Intermedios: Tiene mayor funcionalidad de hardware, flexibilidad y eficiencia para desarrollar aplicaciones, cuentan con un manejo más cómodo de los errores, se puede pasar información sobre el estado de los errores a otros VI's.
- VI's Avanzados: Son de bajo nivel.
- VI's de Utilería: Son agrupaciones convenientes de los VI's intermedios, se utilizan cuando se necesita mayor funcionalidad que la proporcionada por los VI's básicos [15].

Los VI's que se utilizan para el analizador de red y calidad de la energía, son los VI's intermedios, ya que estos cuentan con un mayor control del hardware y posibilitan mayor flexibilidad al momento de manipular las funciones de la tarjeta NI Myrio-1900. Para

adquirir señales de la tarjeta NI Myrio-1900, se utilizan un VI's, los cuales tienen la función de:

Configuración e inicialización.

Analog input, sub VI que especifica:

- El número de canales a utilizar.
- leer los valores de uno o más canales de entrada analógica en la NI Myrio-1900.

4.2.1.1. Configuración de la tarjeta NI myRIO-1900.

En el software LabVIEW para configurar la tarjeta se utiliza el sub VI siguiente:

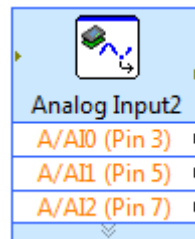


Figura.54. SubVI Analog Input. Configuración pines análogos.

Tiene la función de añadir o eliminar canales de adquisición análogos, el cual puede agregar hasta 12 canales de entrada analógica, en la siguiente figura 55 está el submenú que despliega el subVI.

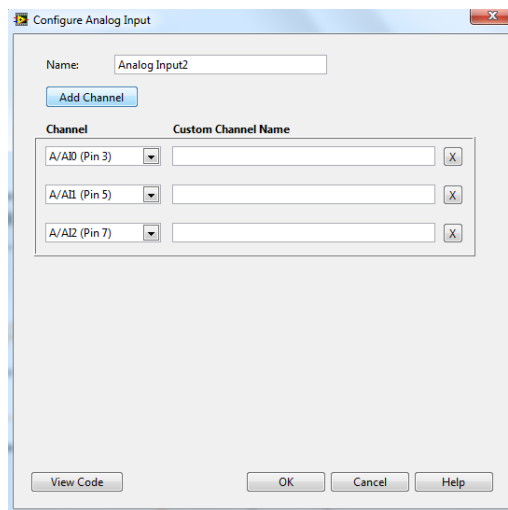


Figura.55. Submenú del SubVI Analog Input.

Donde se especifica el canal o canales habilitados para realizar la lectura de datos, también permite personalizar el nombre de cada canal de entrada, y también la opción de eliminar canales de entrada, también permite generar el código que precede al subVI de la siguiente forma:

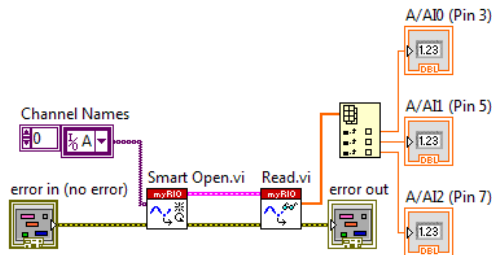


Figura.56. Diagrama de bloques SubVI Analog Input.

Físicamente la tarjeta tiene los canales de entrada analógica en los puertos de Expansión (MXP) A y B. Las entradas analógicas son multiplexadas a un único convertidor de analógico al digital (ADC) que toma las muestras de todos los canales. Cada conector A y B posee cuatro canales de entrada analógica que se utilizan para medir señales con nivel de voltaje de 0V a 5V.

El valor leído por la tarjeta por las entradas analógicas es dado en voltaje en un rango de 0V a 5V.

4.3. Modo medidor.

Este submódulo muestra en forma gráfica las variables eléctricas en tiempo real, sin llevar consigo un reporte de cómo ha interactuado el sistema.

Está integrado por tres Instrumentos virtuales, cuyas funciones son:

1. Voltios/Amperios/Hertz.: Muestra información de las formas de onda, indicando sus principales parámetros.
2. Potencia: Obtiene el consumo de potencia de las cargas conectadas (resistiva, capacitiva, inductiva).
3. Armónicos: Refleja el contenido armónico de cada señal de corriente y voltaje.

4.3.1. Medición de Voltios/Amperios/Hertz.

En esta opción se intenta emular las funciones principales de un osciloscopio, para lo cual cuenta con controles de tiempo y amplitud, presenta en tiempo real las señales de corriente y de voltaje, así como el valor RMS y la frecuencia fundamental.

Las acciones que realiza este módulo son:

- Adquisición / generación de señales de corriente y voltaje.
- Cálculo de valores RMS y frecuencia.
- Despliegue de valores RMS y frecuencia
- Graficado de formas de onda.

4.3.2. Adquisición de Señales.

La función principal de este subVI, es configurar la tarjeta NI myRIO-1900, leer las señales de los canales analógicos, para su posterior tratamiento, esto se hace en un subVI llamado *Analog Input.vi*. En la figura 57 se muestra el diagrama a bloques, la forma en como son adquiridas las señales. Los canales analógicos de la tarjeta NI myRIO-1900 se encuentran multiplexados, por lo tanto toma una muestra por canal, almacenándose internamente en una matriz, cada columna es un canal analógico.

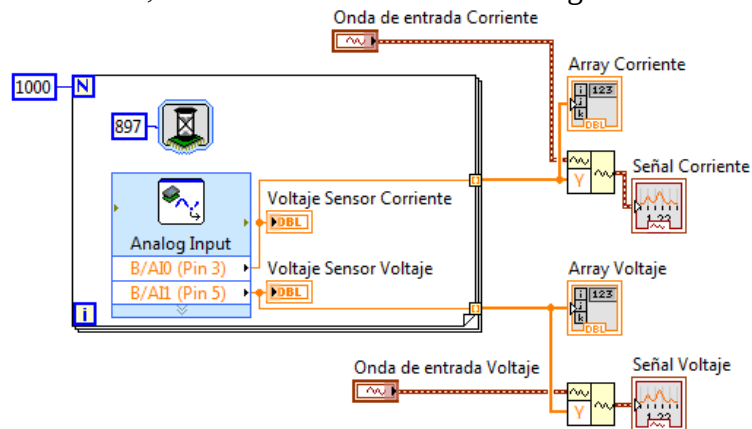


Figura.57. Diagrama de bloques SubVI Analog Input adquisición de señales.

Simplemente para adquirir las señales provenientes de los sensores se configura el subVI Analog Input para habilitar el número de puertos análogos a utilizar, con los datos obtenidos se construye la forma de onda analógica almacenándolos en un array para su posterior visualización en las salidas de señal corriente y señal voltaje.

4.3.3. Deducción del valor RMS.

El valor RMS de corriente o voltaje se calcula con las ecuaciones 3 y 4, para corriente y voltaje respectivamente. El valor RMS se obtiene resolviendo la integral numérica, esto se conoce como el cálculo del valor eficaz verdadero TRMS (*True Root Mean Square*). Donde se evalúa la integral, para ello se obtiene un solo periodo de la señal, ya que con el número total de muestras contenida en un periodo se calcula el valor RMS.

Una relación para encontrar el número de muestras que contiene un periodo es por la ecuación 49, en la cual se divide el valor de la frecuencia de muestreo entre la frecuencia fundamental.

$$N^{\circ}muestras\ Perido = \frac{F_{muestreo}}{F_{fundamental}} \quad (49)$$

La frecuencia de muestreo siempre será constante, con un valor de 21.6 kmuestras / segundo, la que puede presentar variaciones es la frecuencia fundamental. Después de ello se extrae en un subarreglo un solo periodo, elevado al cuadrado, con lo que se obtienen el cuadrado de la señal. Se hace una sumatoria de todos los elementos y se divide entre el número total de ellos, para así obtener la media y por último se calcula la raíz cuadrada, obteniendo la raíz de la media al cuadrado, lo que equivale al valor RMS.

En la figura 58 se muestra el diagrama a bloques, para calcular el valor RMS de una señal. Las primeras operaciones son para determinar el número de muestras que contiene una señal y después se resuelve la integral numérica.

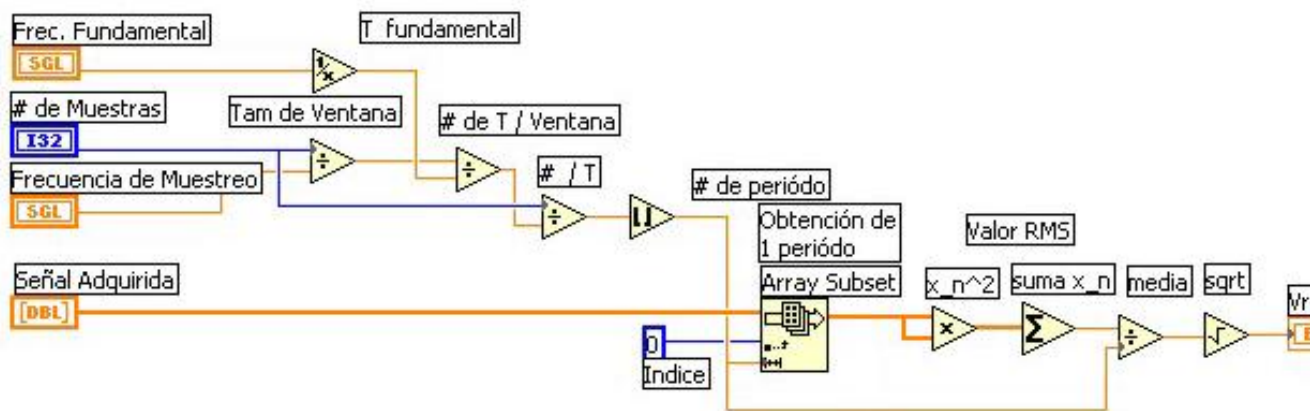


Figura.58. Diagrama a bloques para el cálculo del valor RMS.

4.3.4. Deducción de la frecuencia fundamental.

Para determinar la frecuencia fundamental de una señal, existen varias herramientas y métodos como: Detección de cruce por cero, la FFT, etc. se eligió la FFT porque es una herramienta que se utiliza para hacer un análisis espectral de señales, en este caso solo se usa para encontrar el componente de frecuencia más significativo.

LabVIEW cuenta con un subVI que permite llevar a cabo este cálculo, llamado Real FFT.vi. La FFT se calcula con la ecuación 24.

En la figura 59 se muestra el código o diagrama a bloques que hace posible la determinación de la frecuencia fundamental.

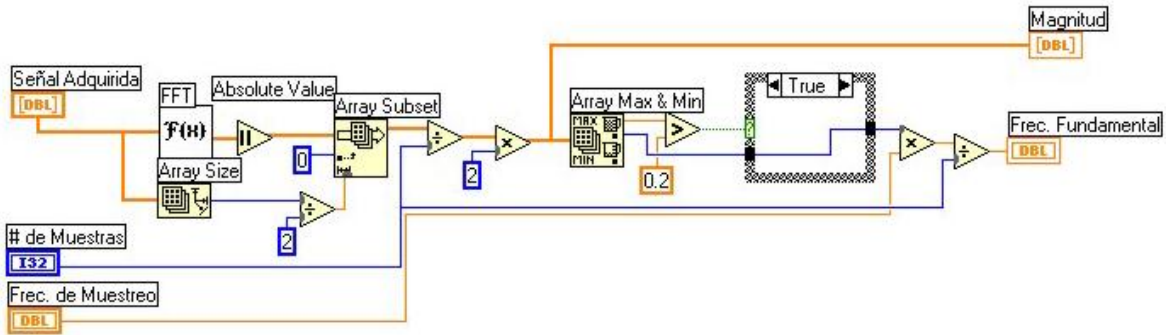


Figura.59. Diagrama a bloques Diagrama a bloques para el cálculo de la frecuencia fundamental.

El subVI *Real FFT*, recibe como entrada única el arreglo Señal Adquirida, la cual corresponde a un solo canal adquirido, la salida de *Real FFT* es un arreglo con números complejos, en este caso solo interesa la magnitud y se calculan mediante el valor absoluto. Aprovechando la propiedad de simetría de la FFT solo se toma la mitad del arreglo de salida. Posteriormente se busca en el arreglo el componente de frecuencia más grande en amplitud, extrayendo el índice para determinar la frecuencia fundamental. El índice es multiplicado por la frecuencia de muestreo y dividido por el número total de muestras para obtener la frecuencia fundamental.

4.3.5. Potencia.

En esta opción se muestra el consumo de potencia de todo el sistema eléctrico, para ello se tiene que determinar la: Potencia Activa (kW), Potencia Reactiva (kVAR), Potencia Aparente (kVA) y PF, de manera monofásica. Para efectuar el cálculo de estas variables eléctricas, se dividió el problema en 2 bloques funcionales, cada uno de ellos tiene las siguientes funciones:

- Adquirir/General señales.
- Calcular valores RMS.
- Determinar el ángulo de desfase (entre la corriente y voltaje).
- Calcular la Potencia.

4.3.5.1. Cálculo de la potencia y factor de potencia (PF).

Para calcular la potencia y PF en sistemas monofásicos es necesario conocer el ángulo de fase de la corriente con respecto del voltaje.

4.3.5.2. Cálculo del ángulo de desfase ($\theta - \phi$).

Cada señal es adquirida con una tasa de muestro de 21,6 kmuestras/segundo, para tener una correspondencia de que cada muestra equivalga a un grado radial. El diagrama de bloques para determinar el ángulo ($\theta - \phi$) es mostrado en la figura 60, y funciona de la siguiente forma: Se toma el arreglo que contiene a la señal y se extrae un solo periodo, posteriormente se hace una búsqueda sobre la señal para encontrar un valor instantáneo que sea mayor que 0, el índice es equivalente a un desplazamiento en fase. El procedimiento es válido cuando se inicie con una secuencia de valores menores o iguales que cero, es decir se busca un cambio de valor instantáneo negativo a positivo. En caso de que se trate de una secuencia de valores instantáneos positivos, se busca un cambio de signo del valor negativo a positivo, al encontrar esta transición se vuelve al paso en donde se inicia con una secuencia negativa.

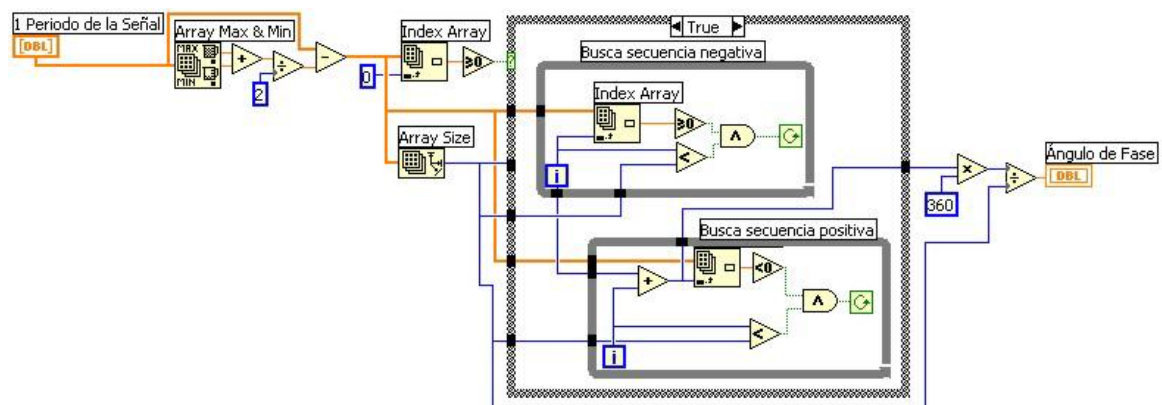


Figura.60. Diagrama de bloques para el cálculo del ángulo de desfase.

4.3.5.2. Cálculo de la Potencia Activa, Reactiva, Aparente y PF.

Para determinar el valor de potencia activa y reactiva, es necesario conocer el valor RMS de corriente y de voltaje, así como el ángulo de fase de la corriente con respecto al voltaje, por las ecuaciones 8 y 13 respectivamente. En la potencia aparente solo es necesario conocer los valores RMS, calculada con la ecuación 12, y por último el PF que es calculado por la ecuación 16.

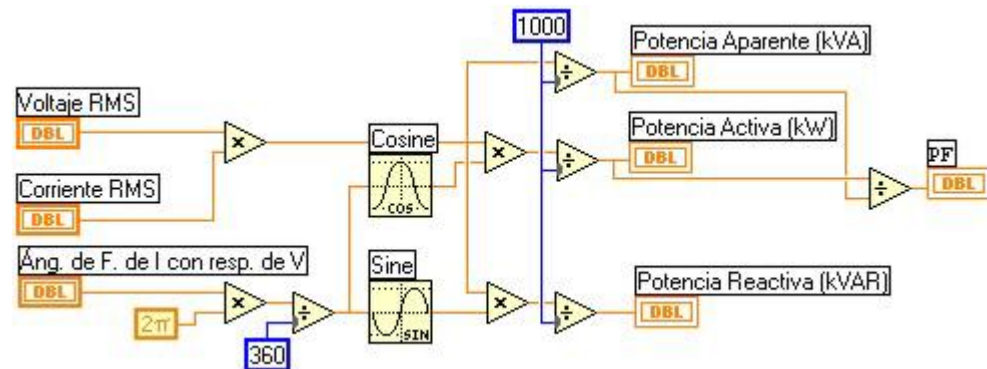


Figura.61. Diagrama de bloques para el cálculo Potencia Activa, Reactiva, Aparente y PF..

El diagrama de bloques de la figura 61 funciona de la siguiente forma El ángulo de fase $\theta - \phi$, se convierte a radianes, después se calcula el seno y coseno del ángulo. La potencia Activa se obtiene multiplicando los valores RMS de corriente y de voltaje por el coseno del el ángulo de fase, y se divide entre de 1000, para así obtener los kW. Para la potencia Reactiva se hace lo mismo, pero ahora el ángulo es senoidal y se obtienen los kVARs. La potencia aparente, solo se multiplican los valores RMS, obteniéndose los kVA. Para el PF se divide los valores de potencia Activa y Aparente, siendo este adimensional y Recibe como entradas a los valores RMS y el ángulo de fase, solo se calcula el valor de ángulo en función del seno y coseno, haciendo después la multiplicación, para obtener los tres tipos de potencia y por último el PF.

4.3.6. Armónicos.

Los Armónicos son una forma de medir la cantidad de distorsión contenida en una señal, que puede ser de corriente o voltaje. Los instrumentos que miden la distorsión muestran esta información en una gráfica de barras paralelas, cada barra representa un componente armónico de la señal (ver figura 13b). Para la opción de Armónicos el medidor se diseña de tal forma que sea posible visualizar de manera simultánea los armónicos de corriente y voltaje.

Para visualizar el THD de una señal se puede hacer con base a las siguientes funciones principales:

- Cálculo de valores RMS, armónicos y THD.
- Visualización de las gráficas y valores de THD.

4.3.6.1. Cálculo de los Armónicos y de THD.

El THD se obtiene usando la ecuación 21, para ello, es necesario conocer los componentes espectrales de la señal para obtener los Armónicos. La forma en como se hace esto es usando la FFT, con la cual se obtiene el componente espectral de la señal, después se busca el componente fundamental de la señal y por último las frecuencias armónicas. En la figura 62 se muestra el diagrama de flujo para determinar los armónicos y el THD.

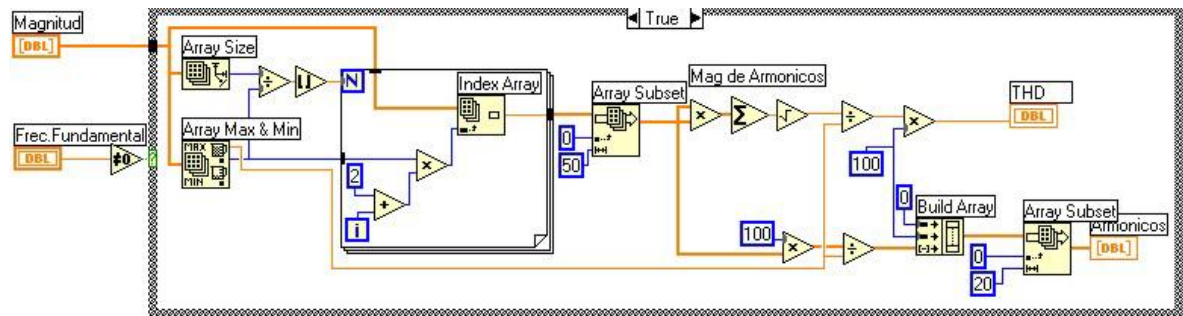


Figura.62. Diagrama de bloques para el cálculo Armónicos y de THD.

El procedimiento es el siguiente Tomar la magnitud de la señal, la cual fue calculada en el del cálculo de la frecuencia buscar el componente de frecuencia fundamental, extraer el índice e iniciar una búsqueda en múltiplos de la posición que guardaba el componente fundamental dentro de ese arreglo, para ello se inicializan dos índices, uno de ellos accederá a la posición del arreglo que contiene a los armónicos y el otro guardara el número que ha encontrado de ellos. Por cada armónico encontrado se almacena el valor. Después se calcula el THD, tomando el valor de cada armónico, elevado al cuadrado, después se hace una sumatoria de estos valores, se calcula la raíz y se divide con el valor del componente fundamental y se multiplica por 100 para obtener el respectivo porcentaje.

4.3.7. Modo de visualización.

Para realizar el procesamiento de los datos y sus correspondientes graficas se debe de cumplir con los siguientes ítems:

- Las variables más importantes de la red eléctrica deben ser presentadas gráficamente, tiempo contra amplitud.
- Los valores de las variables eléctricas deben de ser presentados en forma tabular como: máximos, mínimos, actual y promedio, con el fin de tener una mejor comprensión de los resultados.

Todos los anteriores ítems están respaldados e integrados por los siguientes diagramas de bloques mencionados anteriormente:

- Voltios/Amperios/Hertz: Desplegará los valores RMS.
- Potencia: Mostrará el consumo de potencia.
- Armónicos: presentara información del THD del sistema.

En la opción Voltios/Amperios/Hertz se debe de visualizar los valores RMS de corriente y voltaje de forma gráfica, para lo cual se deben de realizar ciertas funciones, tales como:

- Inicialización de gráficas.
- Cálculo de valores RMS.
- Desplegado de valores RMS.
- Graficar valores RMS.

En la opción de potencia se obtiene el valor de las mediciones de potencia, tales como, potencia activa (kW), reactiva (kVAR), aparente (kVA) y el PF. Sus funciones principales son:

- Inicialización de gráficas y convertir datos de inicio.
- Cálculo de valores RMS.
- Desplegado de valores RMS.
- Graficar valores RMS.

Y por último en la opción de Armónicos se encarga de efectuar los cálculos necesarios para obtener THD de corriente y voltaje.

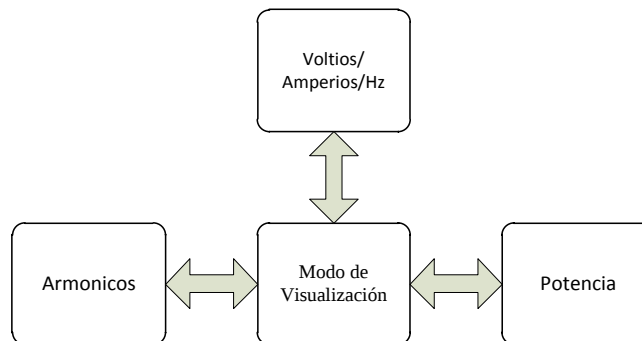


Figura.63. Diagrama a bloques del Modo de visualización.

Con base a los requerimientos antes mencionados se diseña el modo de visualización, en la figura 63 se muestra la forma como está integrado el modo de visualización con sus bloques principales. Se observa que el submódulo de visualización es quién se encarga de interactuar con sus bloques, existiendo un flujo de información, solo uno de ellos puede ser ejecutado a la vez. Los datos obtenidos tienen la posibilidad de ser exportados a un documento en Microsoft Word tipo plantilla el cual puede ser almacenado para su posterior análisis.

4.3.7. Control de potencia.

El diagrama de bloques siguiente permite ejercer control sobre el potenciómetro digital descrito en el capítulo 2, se inicia configurando los pines digitales de la tarjeta a través del subVI Digital Output y activando las salidas o entradas dependiendo la necesidad.

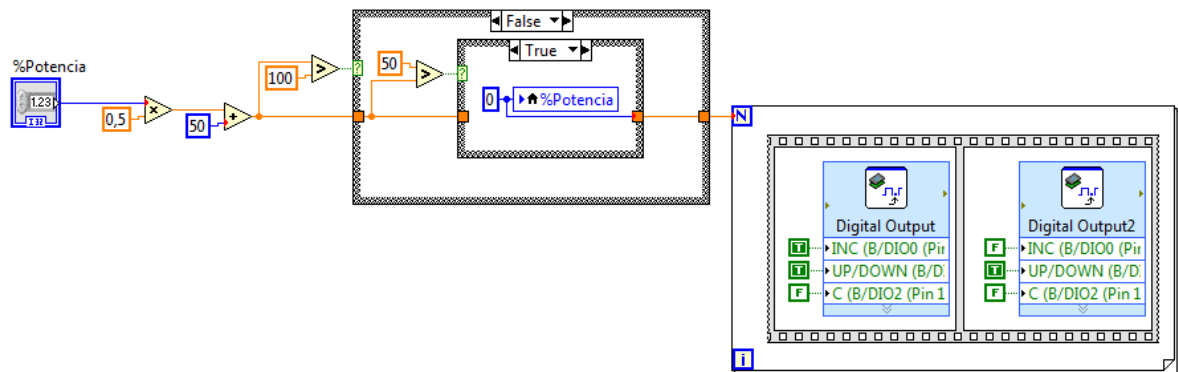


Figura.64. Diagrama a bloques control de potencia.

El diagrama de bloques permite tener control de la potencia entregada hacia las cargas por medio de un dial el cual primero baja el valor de resistencia presente en el potenciómetro digital o también permite llevarlo al que se desee, permitiendo ajustar el control desde un valor mínimo y un valor máximo preestablecido.

CAPÍTULO 5.

Pruebas y resultados

En este capítulo se exponen las mediciones realizadas con el IMQE (instrumento de medición de la calidad de la energía) en los laboratorios de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomas Tunja; con las cuales se probó las capacidades de medición del equipo y se hace una comparación de estas contra las obtenidas de un multímetro digital UNIT y uno osciloscopio OWON.

5.1 Descripción del montaje.

El medidor monofásico de potencia y calidad de energía, se instaló y probó en la una maqueta destinada para el uso de cargas AC monofásico, utilizada por los estudiantes de la Universidad en diferentes materias relacionadas con los parámetros de la red eléctrica, además con el circuito diseñado para variar el ángulo de disparo sobre las cargas monofásicas se iba monitoreando en el osciloscopio como se alteraba la forma de onda entregada a la carga.

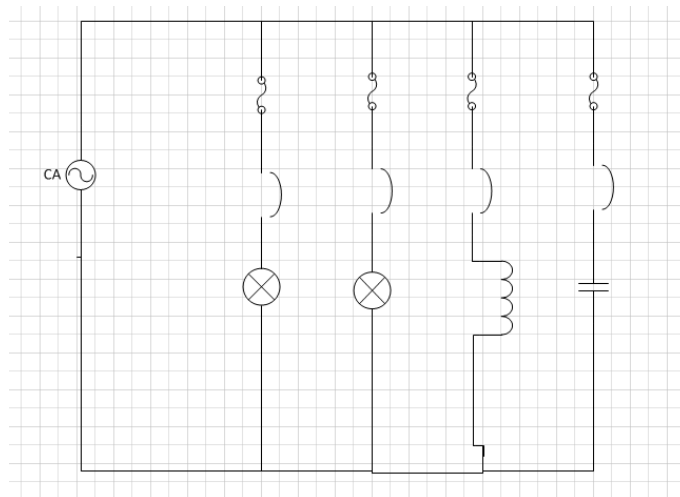


Figura.65. esquema eléctrico monofásico para la maqueta de Universidad Santo Tomas.

El montaje se compone de las siguientes características eléctricas:

- Conexión a 4 cargas resistivas, capacitivas e inductivas, y conexión libre. Todas la cargas conectadas a la red eléctrica monofásica de 120 V AC.
- Interruptor de encendido del instrumento.
- Fusibles de protección de 5A a 150V.

En la siguiente figura 66 se muestra las conexiones del medidor y el montaje en conjunto de sus componentes para formar el instrumento virtual.

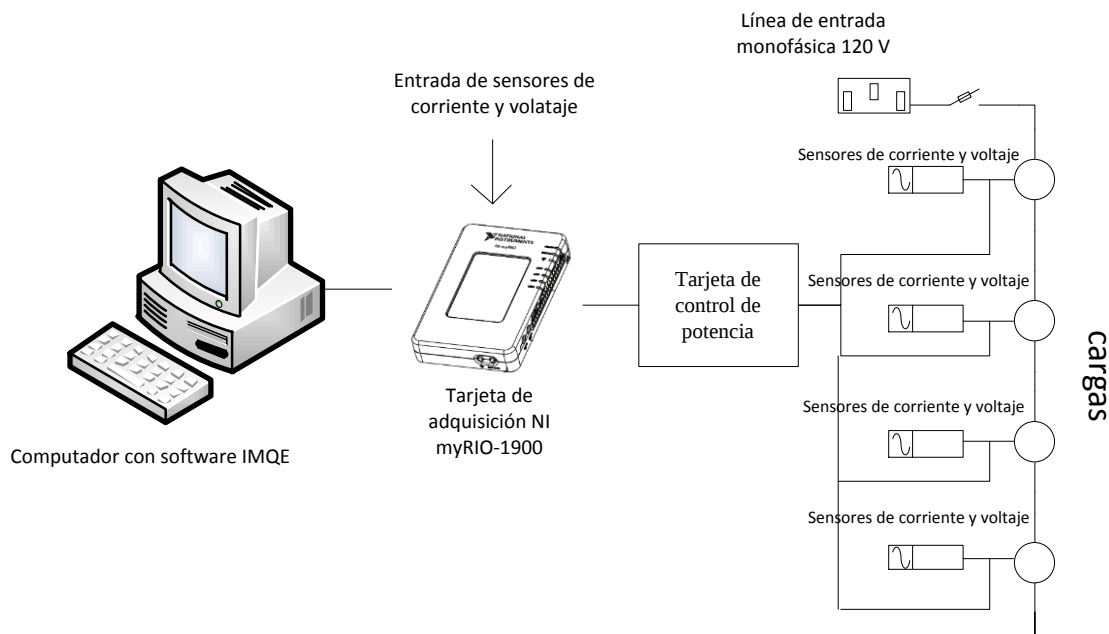


Figura.66. Montaje del IMQE a las cargas monofásicas.

5.2 Pruebas del IMQE.

Las pruebas que se realizaron son las siguientes:

- Interfaz de usuario (HMI).
- Volts/Amperes/ Potencia/Hertz/Armónicos
- Angulo de Disparo Carga

A continuación se describen las mediciones realizadas a cada modo de trabajo.

5.2.1 Interfaz de usuario (HMI).

En este modo se da al usuario una interfaz agradable, además de segura y óptima

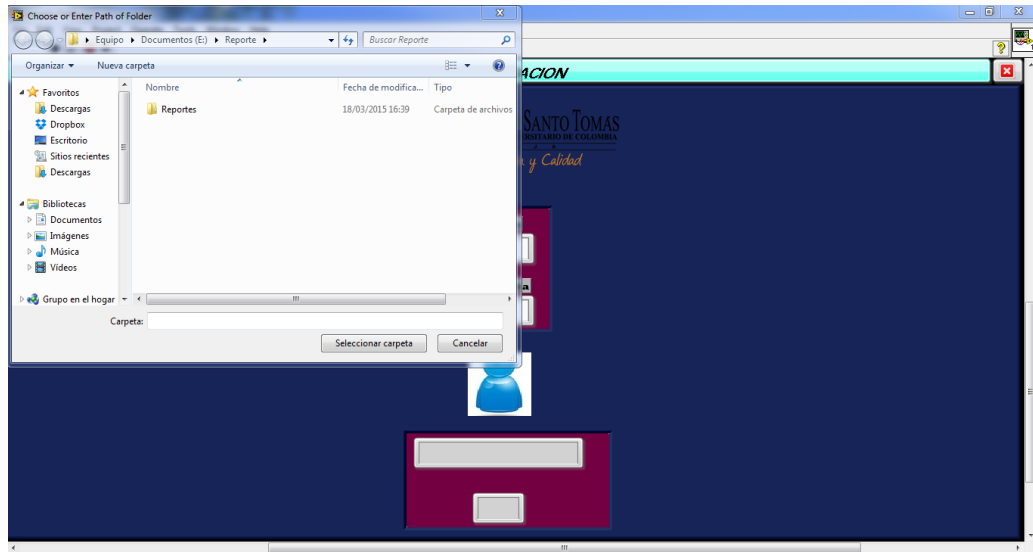


Figura.67. Elección de la carpeta deseada para guardar los diferentes archivos generados por el software.



Figura.68. Inicio de sesión del software.

La interfaz de usuario posee dos modos de usuario que son los siguientes:

- Administrador: tiene facultades especiales como crear, borrar o editar usuarios además puede cambiar parámetros de las mediciones o calibrar el equipo.

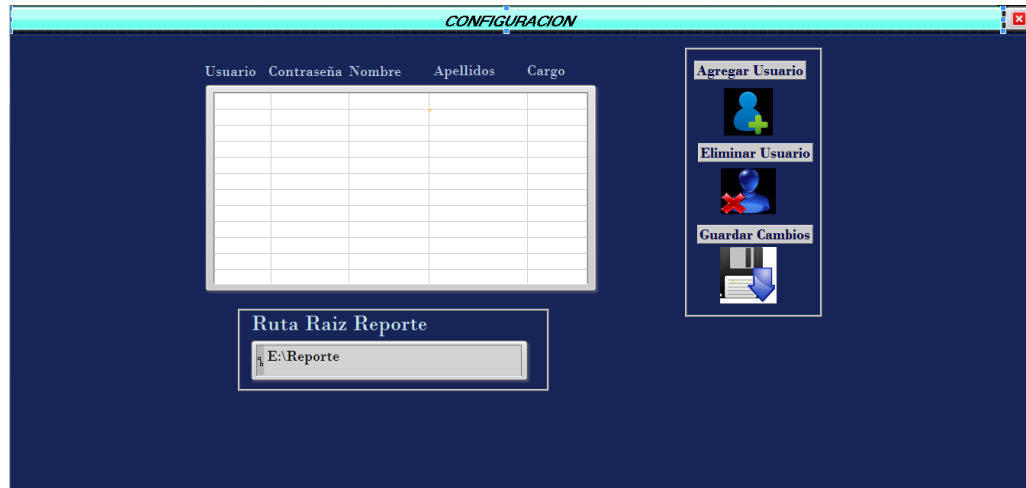


Figura.69. Interfaz modo Administrador.

- Operario: es un usuario que solamente puede visualizar las pruebas o ensayos generados por las diferentes clases de mediciones que se pueden realizar, tiene una interfaz emulando un osciloscopio además con la posibilidad de cambiar la visualización de las señales. Cuando finaliza el ensayo pregunta si desea guardar los datos y si desea enviar un correo con estos datos generados.



Figura.70. Interfaz modo Operario.

5.2.2 Volts/Amperes/ Potencia/Hertz/Armónicos.

En este modo se muestra valores instantáneos, así como el valor RMS, valores pico y frecuencia de cada variable con su respectiva gráfica a continuación se muestran las gráficas correspondientes a voltaje, corriente y potencia sobre una carga resistiva.

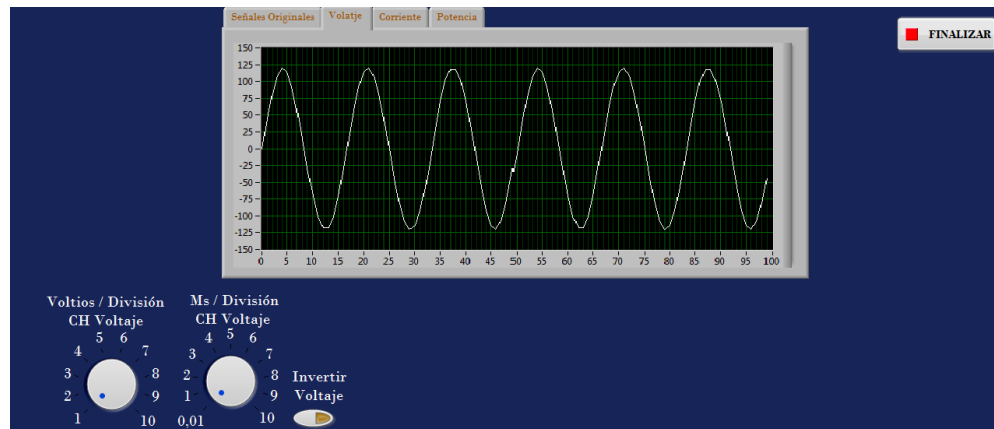


Figura.71. modo visualización grafica de voltaje.

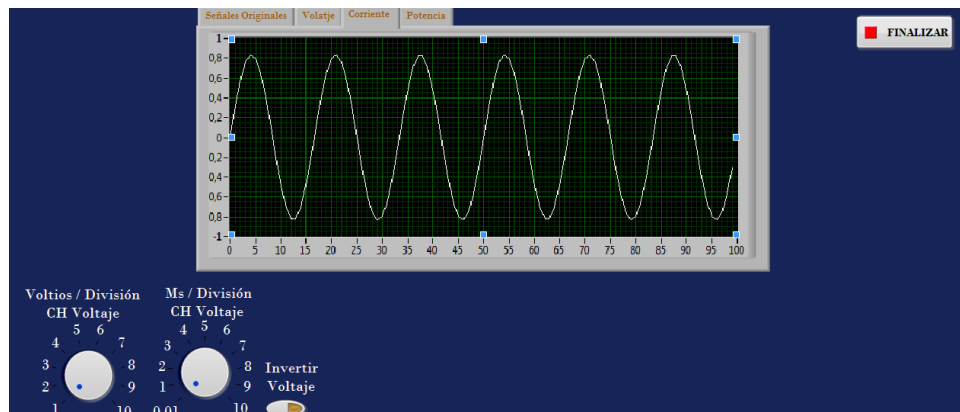


Figura.72. modo visualización grafica de corriente.

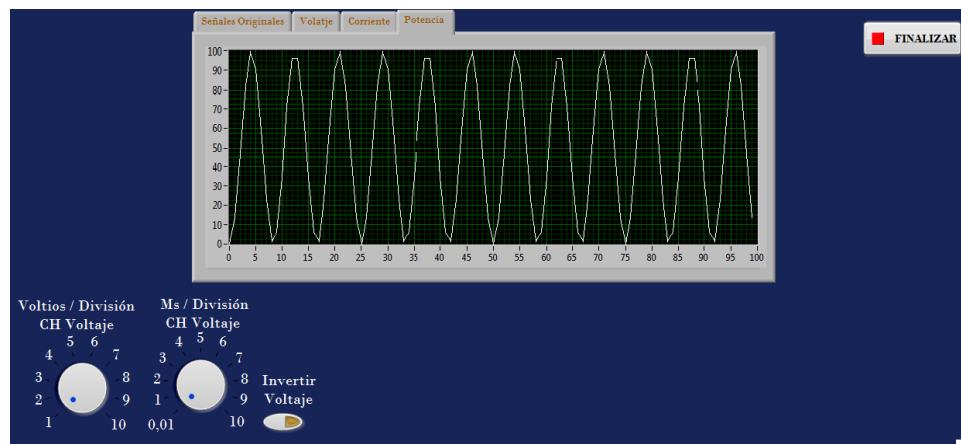


Figura.73. Modo visualización grafica de potencia.

Las señales de voltaje medidas poseen forma de onda casi sinusoidal, las variaciones del valor eficaz son de $\pm 1V$ sobre el valor medido y su frecuencia es constante, las señales de corriente presentan deformaciones considerables en su forma de onda esto se debe que las cargas conectadas no tienen un comportamiento lineal, lo cual incrementa la presencia de armónicos.

A continuación se muestra un cuadro comparativo de mediciones realizadas sobre una carga resistiva con un consumo de potencia de 100 W con el instrumento virtual y un multímetro digital UNIT, y su correspondiente error porcentual:

Tabla 5.1 Comparación entre el IMQE y multímetro digital UNIT en la opción de Voltios/Amperios.

		Medicion		
Variable Electrica		Instrumento	Multimetro Digital	%error
voltaje	RMS	118,34	117,4	0,94
frecuencia	Hz	60	60	
corriente	RMS	0,87	0,811	0,059
frecuencia	Hz	60	60	

5.2.3 Angulo Disparo Carga.

Este modo permite variar la cantidad de energía entregada a la carga conectada al instrumento, tiene como fin principal ver cómo va cambiando la potencia RMS mientras el ángulo de disparo va siendo más grande o más pequeño dependiendo del movimiento del dial en el programa.

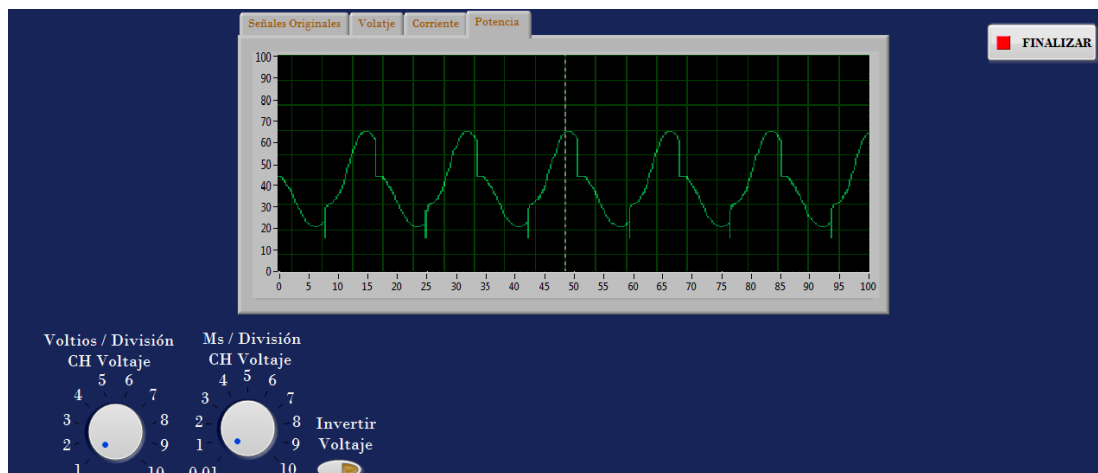


Figura.74. Angulo de disparo sobre la señal de voltaje.

En la figura 75 se encuentra un Angulo de disparo de aproximadamente 45° , sobre la carga permitiendo controlar el suministro de voltaje entregado hacia la carga conectada en el prototipo.

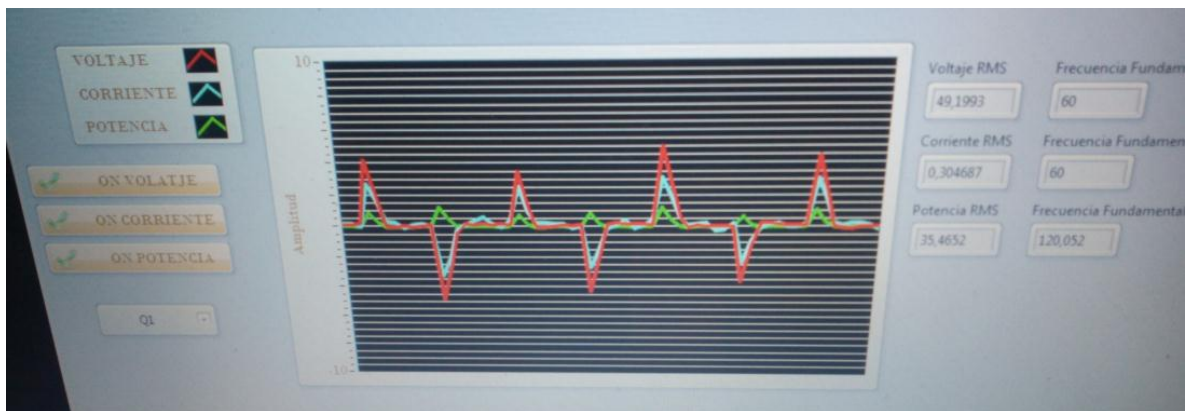


Figura.75. Angulo de disparo instrumento virtual.

Para calcular el ángulo de disparo se relacionó el tiempo de disparo del Triac figura 76, observando el comportamiento de las formas de onda y sus respectivos cambios al variar el potenciómetro,

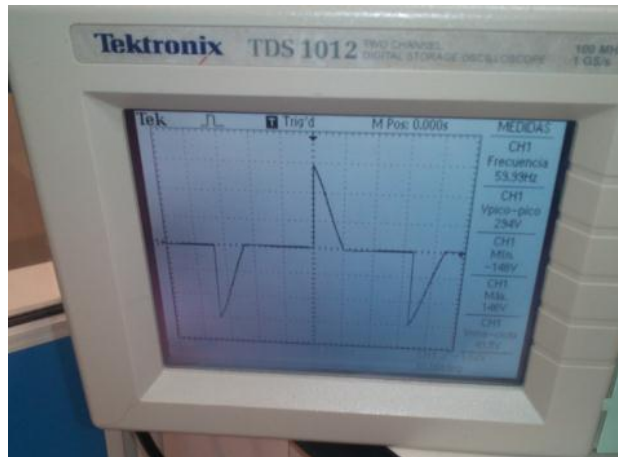


Figura.76. Angulo de disparo en el osciloscopio.

Para calcular el valor del ángulo conociendo el respectivo tiempo de disparo se realizó el siguiente cálculo tomando como ejemplo la señal de la figura 76.

Frecuencia de la red eléctrica.

$$F = 60 \text{ Hz}$$

Calculando el tiempo de ciclo.

$$T = \frac{1}{60 \text{ Hz}} = 16.67 \text{ ms}$$

Tiempo de disparo.

$$T = 2.1 \text{ ms}$$

El potenciómetro se encuentra al 75% de su valor relacionamos los datos de la siguiente forma.

$$16.67 \text{ ms} \text{ --- } 360^\circ$$

$$2.1 \text{ ms} \text{ --- } X$$

Donde el valor de X representa el valor de grados que queremos obtener, el cálculo queda de la siguiente forma.

$$X = \frac{2.1 \text{ ms}}{16.67 \text{ ms}} (360^\circ) = 45^\circ$$

En la figura 77 está el prototipo final, el cual está conformado por el hardware de adquisición, acondicionamiento y el software de análisis y visualización.



Figura.77. prototipo Instrumento virtual medidor calidad de la energía eléctrica.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

El presente documentó, plantea el diseño e implementación de un instrumento el cual permite monitorear el comportamiento de las variables más importantes, de una red eléctrica, voltaje y corriente, por medio de la instrumentación virtual.

El instrumento está basado en un lenguaje de programación de tipo grafico dedicado al desarrollo de aplicaciones enfocadas al control y a la instrumentación, LabVIEW, con el propósito de comprobar las facilidades que tiene este lenguaje para el desarrollo de aplicaciones de instrumentación.

Las ventajas más importantes que se tienen al trabajar con instrumentación virtual es que están basadas en torno a un computador, las aplicaciones tienen capacidades significativa, porque se aprovechan todas sus características técnicas como memoria, velocidad de procesamiento y el despliegue de la información, además las funciones que tendrá el instrumento son definidas por el usuario y con la posibilidad de incorporar nuevas tecnologías. La principal desventaja de la instrumentación virtual, es que al inicio se requiere una fuerte inversión por la compra de tarjetas adquisición y el software con sus respectivas licencias, pero se puede compensar debido a la reutilización que se le puede dar a los equipos que integran el instrumento.

El diseño de la interfaz del medidor se hizo emulando las funciones de osciloscopios y medidores del mismo tipo, además, se le incorporaron algunas funciones adicionales en modo de visualización, control de potencia, todo con el fin que el usuario pueda interpretar e interactuar con los datos obtenidos con el instrumento.

Una de las ventajas con que cuenta el sistema, es que con el control de potencia se puede observar como varían las señales de corriente y voltaje, según la carga conectada al instrumento. Y además la función de exportar datos, gráficas y tablas a Microsoft Word cuando el usuario lo desee.

El hardware está diseñado en módulos o tarjetas de conexión, el cual permite separar la tarjeta de adquisición del instrumento y utilizarlo en otras aplicaciones.

La principal falencia que tiene la tarjeta de adquisición, es que para la conexión de los transformadores y señales de corriente no cuenta con circuitos de protección a sobre cargas.

Para las mediciones de Potencia es importante mantener las fases de las señales de Corriente y voltaje, se tuvo que determinar el “punto de conexión” de los Transformadores

de Voltaje, es decir, las terminales de las bobinas que tendrán la misma polaridad para los valores instantáneos.

El concepto acerca del uso del analizador de redes o central de medida, es reconocido como una herramienta indispensable para el monitoreo de la red eléctrica, el cual combinado con transformadores de voltaje y sensores de corriente, permite ser aplicado sobre cualquier red o carga dependiendo de los límites de trabajo del analizador, el avance tecnológico permite controlar procesos de potencia de forma segura e interactiva desde el campo de la instrumentación virtual.

Los problemas que se tuvieron al desarrollar la presente proyecto fueron:

La tarjeta permite conexión inalámbrica para acceder a sus funciones remotamente, pero no se debe conectar a redes del tipo ad hoc, porque automáticamente pierde la conexión y obliga a la tarjeta a entrar al modo seguro donde se restringen funciones esenciales de funcionamiento. Para solucionar el problema es intentar reiniciar los adaptadores de red para su defecto establecer la configuración de fábrica de la tarjeta.

Expectativas a futuro.

El instrumento virtual es sistema totalmente expandible y permite adiciones que contribuyan a mejorar las funciones del sistema presentado, las cuales son:

Se puede replantear el funcionamiento del sistema para que no esté limitado como medidor de sistemas monofásicos si no también la posibilidad de trabajar en sistemas trifásicos realizando algunas consideraciones de diseño tanto en software y hardware,

Habilitar o implementar una función que permita hacer un Zoom sobre las gráficas y contar con cursores para posicionarse en las gráficas. Construir un módulo autónomo del software que de acuerdo a ensayos anteriores pueda hacer un diagnóstico del comportamiento de la red eléctrica.

La aplicación desarrollada podría convertirse en un proyecto que abarque el control y monitoreo de más procesos implicados en la calidad de la energía eléctrica, entre esos procesos están: factor de cresta, potencia de distorsión, los cuales permiten cuantificar y evaluar la distorsión armónica de las ondas de tensión y de corriente.

Bibliografía.

- [1] Robert Boylestad. *Análisis Introducción de Circuitos*. (Ed. Prentice Hall), (1998)
- [2] Hayt W. Y Kemmeerly J. *Análisis de Circuitos en Ingeniería*. (Ed. McGraw-Hill), (1993)
- [3] J. David Irwin. *Análisis Básico de Circuitos en Ingeniería*. (Ed. Pearson Educación), (1999).
- [4] James W. Nilsson y Susan A. Riedel. *Circuitos Electrónicos*. (Ed. Person Educación), (1999).
- [5] Alan v. Oppenheim y Alan S. Willsky. *Señales y Sistemas*. (Ed. Prentice Hall), (1994).
- [6] John G. Proakis y Dimitris G. Manolakis, *Tratamiento Digital de Señales, Principios, algoritmos y aplicaciones*. (Ed, Prentice Hall, Madrid), (1998).
- [7] Alan V. Oppenheim y Ronald W. Schafer. *Tratamiento de señales en tiempo discreto*. (Ed. Prentice Hall, Madrid), (2000).
- [8] George McPherson. *Introducción a Máquinas Eléctricas y Transformadores*. (Ed, Limusa, México), (1987).
- [9] National Instruments Corporation, *LabVIEW Básico I Manual*. (EUA), (1998)
- [10] Johnson, David e. *Análisis Básico de Circuitos eléctricos*. (Ed. Prentice Hall), (1995).
- [11] N. Brata & E. Campero, *Instalaciones Eléctricas Conceptos y Diseño*. (Ed. Alphaomega), (1992).
- [12] R.O. Asociates ltd. *Conexión a Tierra Para Los Sistemas Eléctricos De Distribución CA y C*. (Ed. Prentice Hall), (1994).

URL's

[URL 1] http://www.instrucontrol.com/referencia_DAQCON.html. “Definición de Instrumentación Virtual

[URL 2] http://www.instrucontrol.com/referencia_instrumento_virtual.html. “Instrumentación Virtual”.

[URL 3] <http://www.pwrn.com/>. “Analizadores de calidad de energía eléctrica”.

ANEXOS

A. Descripción del hardware tarjeta myRIO-1900

La tarjeta myRIO es un dispositivo portátil y reconfigurable de entradas y salidas (reconfigurable input output RIO) , orientado a la comunidad académica para el desarrollo de sistemas de control, robótica y sistemas mecánicos a continuación se describen pines de conexión, conectividad e instrucciones de montaje.

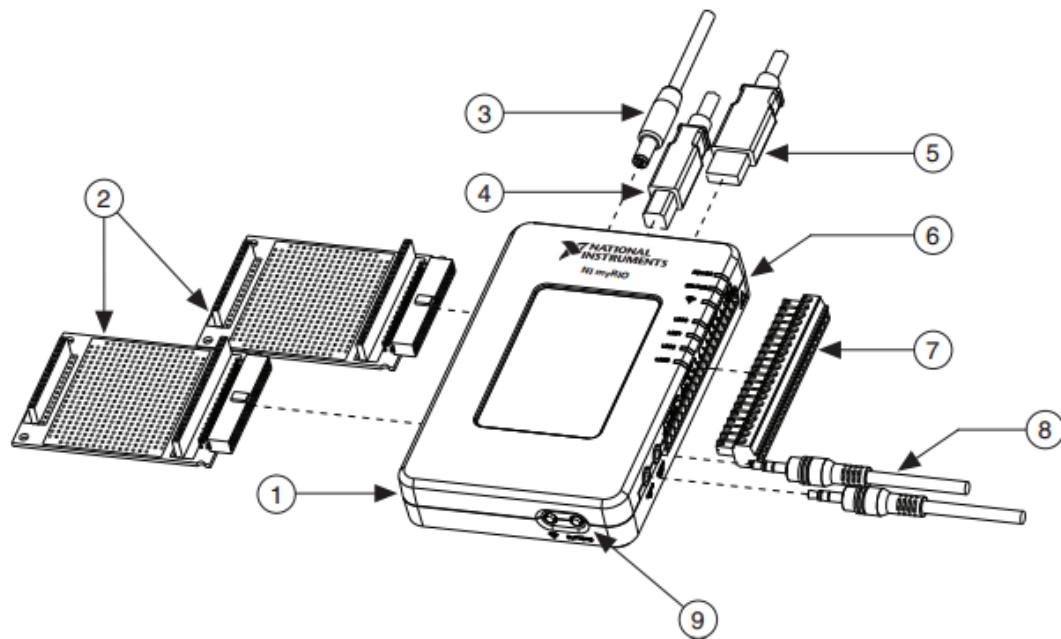
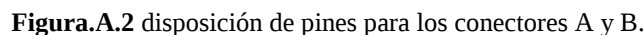


Figura.A.1 tarjeta de desarrollo NI myRIO-1900.

1. tarjeta NI myRIO-1900.
2. puertos de expansión (MXP) y tarjetas de conexión.
3. cable de alimentación.
4. cable de conexión USB.
5. cable de conexión HOST.
6. LEDS.
7. mini puerto del sistema (MSP)
8. entrada y salida de audio.
9. botón reset.

La tarjeta NI myRIO posee dos puertos de expansión (MSP) A y B , los cuales tienen la misma distribución de pines de conexión y en el software se distinguen como conector A o conector B a continuación se muestra la función de cada pin.



Nombre	Referencia	Direccion	Descripcion
5V	DGND	salida	alimentacion de 5 voltios
AI <0..3>	AGND	entrada	referencia de 0-5V, canales de entrada analogica.
AO <0..1>	AGND	salida	referencia de 0-5V, canales de salida analogica.
AGND	N/A	N/A	referencia para entradas y salidas analogas
3.3V	DGND	salida	alimentacion de 3 voltios
DIO <0..15>	DGND	entrada o salida	entradas y salidas digitales con voltajes de salida 3.3V y 3.3V/5V de entrada
UART.RX	DGND	entrada	linea UART recepcion, funcionan electricamente igual a las DIO
UART.TX	DGND	salida	linea UART transmision, funcionan electricamente igual a las DIO
DGND	N/A	N/A	referencia para entradas y salidas digitales de 3.3V y 5V
AUDIO IN	N/A	entrada	entrada derecha e izquierda estero
AUDIO OUT	N/A	salida	salida derecha e izquierda estero

Líneas de entradas y salidas digitales.

Los conectores de expansión (MXP) A y B poseen 16 líneas de entradas y salidas digitales (DIO), las líneas que van del DIO 0 al 13 poseen una resistencia de pullup de $40\text{k}\Omega$ conectadas a 3.3V, y las líneas DIO 14 y DIO 15 poseen una resistencia de pullup de $2,2\text{k}\Omega$ conectadas a 3.3V, la línea DGND es la referencia para todas las líneas DIO.

Se pueden programar todas las líneas individualmente como entradas o salidas o activar sus funciones secundarias que alguna líneas DIO poseen, como son SPI, I2C y PWM.



Figura.A.3 conexión interna líneas DIO conector MXP a. DIO <13..0> b. DIO <15..14>

Cuando el valor sobre la línea no es correcto o es flotante, toma el valor dado por la resistencia de pullup, tener en cuenta los siguiente casos.

Se presenta un valor flotante cuando se inicia myRIO.

Cuando se configura la línea DIO como una entrada.

Cuando el dispositivo myRIO se está apagando.

Para cambiar el valor de la resistencia de pullup se puede añadir un valor de resistencia más grande.

Botón de Reset.

Al presionar y soltar el botón reset reinicia el procesador y la FPGA, si se mantiene pulsado el botón durante 5 segundos se reinicia el procesador, la FPGA y obliga a entrar a la tarjeta MyRIO en modo seguro donde solo están disponibles los servicios necesarios para actualización de software y configuración del sistema. Cuando la tarjeta está en modo seguro se puede comunicar por el puerto UART. Para realizar la conexión UART necesita los siguientes elementos:

- Cable convertidor TTL (TL-232RG-VSW3V3-WE).

Programa para configurar el puerto serial con las siguientes características:

- Velocidad de comunicación: 115200 bits por segundo.
- Trama de datos: ocho bits.
- Sin bit de paridad.
- Un bit de parada.
- Sin control de flujo.

Especificaciones eléctricas.

Las siguientes son especificaciones de funcionamiento típicas a una temperatura de operación de 0 40 °C.

Procesador

Tipo: Xilinx Z-7010

Velocidad: 667 MHz

Núcleos: 2

Memoria

Memoria no volátil: 256mb

Memoria RAM DDR3: 512mb

Frecuencia: 533 MHz

Potencia de salida

+5V voltaje de salida: 4.75V a 5.25V

Máxima corriente: 100 mA

+3.3V voltaje de salida: 3.0V a 3.6V

Máxima corriente: 150mA

+15V voltaje de salida: +15 V a +16 V

Máxima corriente: 32mA

-15V voltaje de salida: -15 V a -16 V

Máxima corriente: 32mA

Requerimientos de alimentación

Rango voltaje de alimentación: 6-16 V DC

Máximo consumo de potencia: 14W

Consumo en reposo de potencia: 2W

B. Manual de usuario.

MANUAL DE USUARIO INSTRUMENTO DE MEDICION DE CALIDAD DE ENERGIA ELECTRICA

Instrucciones de uso

Comprobar la conexión física con la tarjeta de desarrollo NI MyRio y el computador antes de iniciar el programa en Labview.

1. Iniciar software Labview
2. Abrir el programa.
3. Correr el programa en la parte superior izquierda donde se encuentra el siguiente icono.



4. Cuando se inicia el programa por primera vez pedirá la ubicación de la carpeta donde se guardaran los reportes generados correspondientes a cada ensayo.

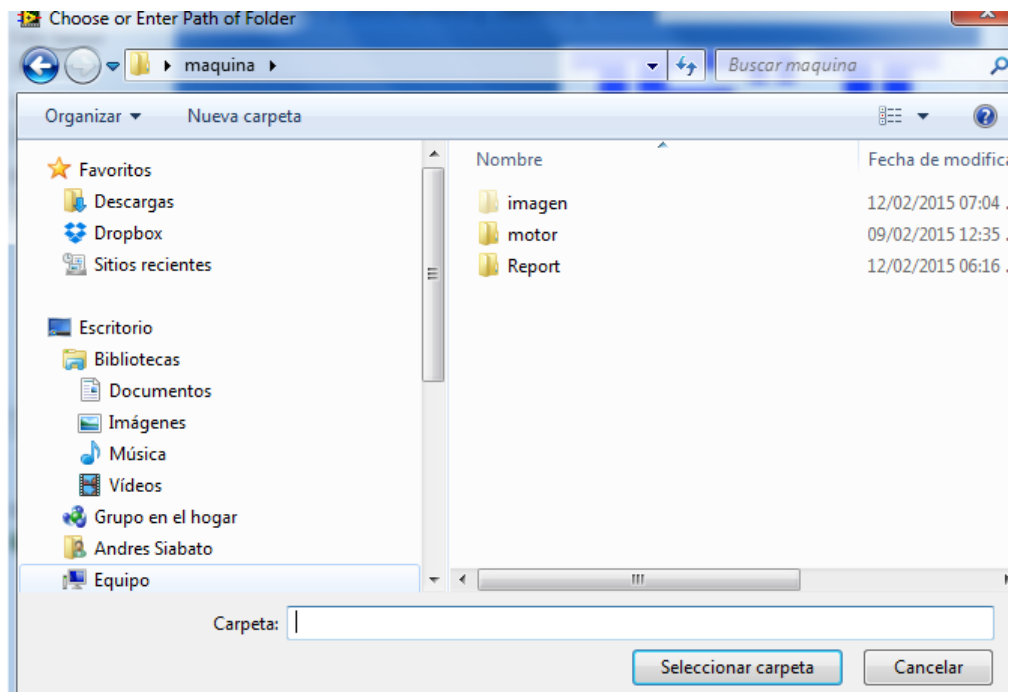


Figura B.1 seleccionar carpeta.

Después de seleccionar la ubicación el programa figura.1 está listo para iniciar con los ensayos.



Figura B.2. Ventana de inicio del programa.

Después de seleccionar la ubicación el programa figura.1 está listo para iniciar con los ensayos.

Ingreso modo administrador

5. En esta pantalla de inicio figura B.2 encontramos información relevante como la hora y fecha en que se realizara el ensayo. Cuando se inicia el programa por primera vez se debe ingresar con un usuario y clave predeterminados para el modo administrador figura.3, este modo predeterminado se pueden ingresar nuevos usuarios para que puedan usar el programa y los cuales serán clasificados como los operarios.

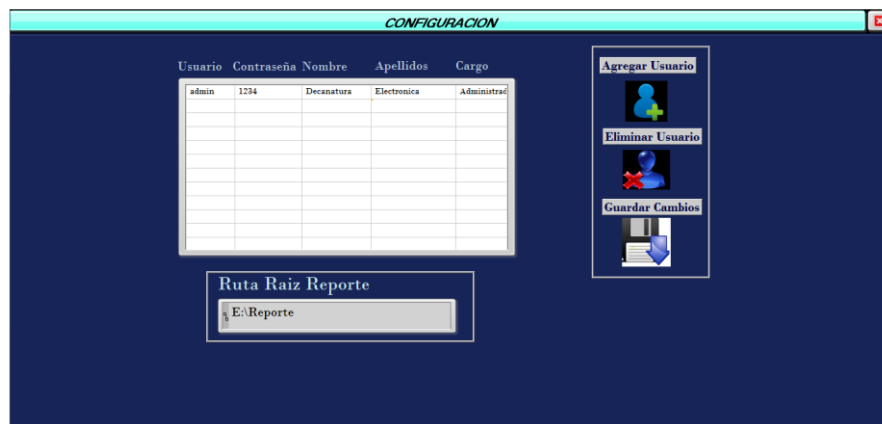


Figura B.3. Ventana administrador.

Ingresar nuevo usuario

6. En el modo administrador figura B.3 podemos encontrar una tabla donde se presentan los usuarios autorizados por el administrador para usar la máquina, el puerto de conexión serial con la tarjeta de desarrollo arduino y conocer la ruta donde se guardaran los reportes. En este caso solo se encuentra el usuario predeterminado o administrador principal del programa, el administrador podrá ingresar los usuarios que tendrán acceso a la máquina de la siguiente forma.



Figura B.4. Opciones de usuario.

7. Presionar el botón ingresar usuario figura B.4, el cual desplegara un menú de requerimientos mínimos para ingresar un nuevo usuario.

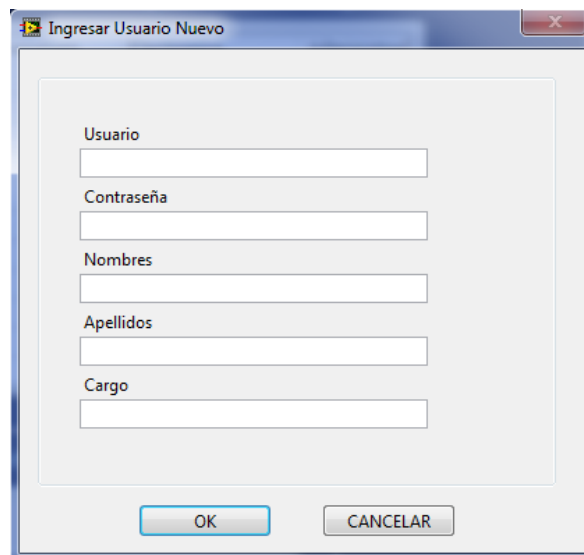
A standard Windows-style dialog box titled 'Ingresar Usuario Nuevo'. It contains five text input fields stacked vertically, each with a label to its left: 'Usuario', 'Contraseña', 'Nombres', 'Apellidos', and 'Cargo'. At the bottom of the dialog are two buttons: 'OK' and 'CANCELAR'.

Figura B.5. Menú ingresar nuevo usuario.

8. Es importante completar todos los espacios requeridos para poder ingresar el usuario figura B.5, porque si no se completan generara un mensaje de error y no dejara continuar con el programa hasta que se complete toda la información. El mensaje de error es el siguiente:

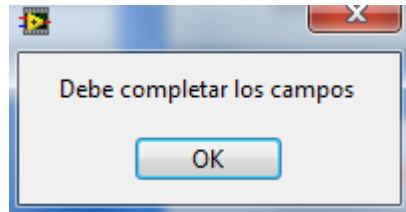


Figura B.6. Mensaje de error.

9. Si se completan todos los campos y se presiona ok se recibirá el siguiente mensaje de verificación de usuario creado figura B.7:

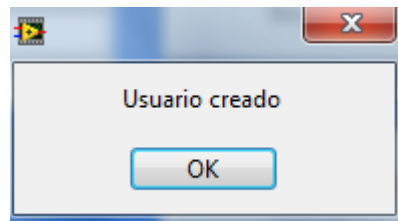


Figura B.7. Mensaje de verificación.

10. Se procede a verificar en la tabla de usuarios que aparezca el nuevo usuario con los datos requeridos.



Figura B.8. Ventana administrador y comprobación ingreso de nuevos usuarios

11. Encontramos que el nuevo usuario está en la tabla de usuarios permitidos figura.8, para completar el ingreso se debe presionar el botón guardar cambios. El cual nos retornara la

pantalla de inicio figura B.2 donde se solicitara nuevamente el ingreso al programa ya sea como administrador u operario.

Eliminar un usuario existente

12. Para eliminar un usuario existente primero se debe ingresar como administrador y presionar el botón borrar usuario y por ultimo verificar que el usuario a eliminar exista previamente en la tabla de usuarios figura B.9.

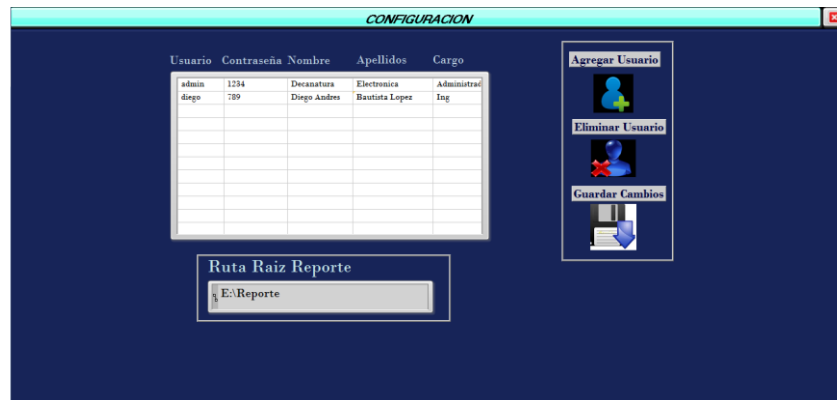


Figura.B.9. ventana administrador y verificación de usuario a eliminar

13. Al presionar el botón borrar usuario se desplegara el siguiente menú:

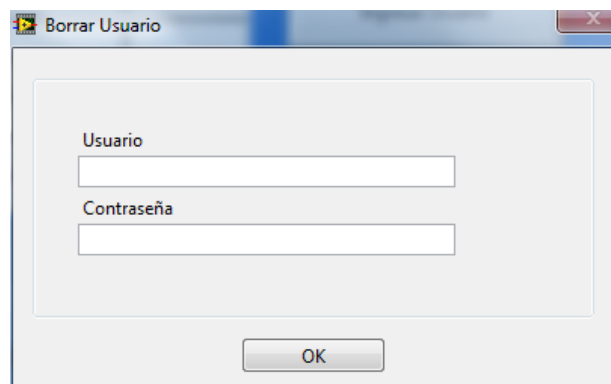


Figura.B.10. menú eliminar usuario

14. Ingresamos los datos correspondientes al usuario que elegimos eliminar figura.B.10. Es importante completar todos los campos porque si no se completan se generara la siguiente ventana de error.

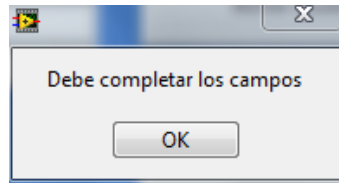


Figura.B.11. mensaje de erro

15. Cuando los campos se encuentren completos con la información requerida se generara una ventana que confirmara la eliminación del usuario seleccionado.

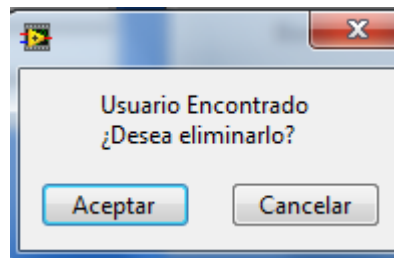


Figura.B.12 mensaje de verificación

16. En esta ventana figura B.12 nos informara que el usuario existe en la base de datos de usuario permitidos y nos solicitara si lo queremos eliminar o deseamos revertir la operación de eliminación.



Figura.B.13. guardar los cambios

17. en la ventana figura.B.13 tenemos una opción para regresar al inicio

Ingreso en modo operario

18. Digitamos el usuario y su respectiva contraseña el cual ya pertenece a la tabla de usuarios permitidos, en la figura.B.14 vemos de nuevo en menú de usuario y los datos requeridos.



Figura.B.14. ingreso de usuario en modo operario en la ventana principal



Figura.B.15 recolección y monitoreo de datos del ensayo

19. En esta nueva ventana figura.B.15 se podrá observar los diferentes parámetros de la red eléctrica, además posee pestañas que se puede especificar el comportamiento para cada variable de la red eléctrica.

El panel frontal de la figura B.15. Desde este panel se tiene información de las ondas, posee controles de tipo osciloscopio para cambiar la escala de tiempo y amplitud, proporciona información de frecuencia y el valor RMS de las señales de corriente y de voltaje. También se tiene la posibilidad de guardar la información desplegada en pantalla, en un archivo con formato de Microsoft Word.

20. Cuando se da por terminado el ensayo el programa pregunta al operario si desea guardar los reportes generados, figura.B.16.

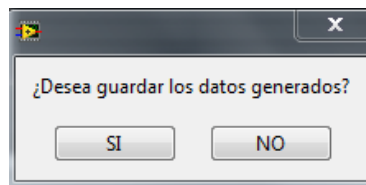


Figura.B.16 opción para guardar datos

21. si desea guardar los datos preguntara si desea enviar los archivos generados, figura B.17. Si no, se deseó guardar los datos lo rediccionara al inicio.

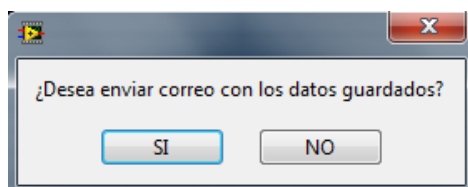


Figura B.17. Opción envió de enviar datos

23. El programa queda nuevamente a la espera de realizar un nuevo ensayo por parte del operario o de ingresar nuevos operarios por partes del administrador según sea el caso figura.B.2.

24. El programa se cerrara cuando se presione la X en la parte superior derecha del software figura B.19.



Figura.B.19. cerrar software.