



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ciencias

**ANALIZADOR DE POTENCIA
BASADO EN LabVIEW**

Tesis

Que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA

Lorena Rodríguez Salas

Asesores de Tesis:

Dr. Oscar F. Núñez Olvera
M.I. Griselda Rodríguez Pedroza

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. MÉXICO

10 DE JULIO DE 2018

Analizador de Potencia Basado en LabVIEW

Nombre del estudiante:
Lorena Rodríguez Salas

Comité que acepta la tesis:

Dr. Oscar F.Núñez Olvera (asesor) _____

M.I. Griselda Rodríguez Pedroza (asesor) _____

Dra. Marcela Mejía Carlos (sinodal) _____

Dr. Alfonso Lastras Martínez (sinodal) _____

Dr. Jorge Ortega Gallegos (sinodal) _____

Resumen:

Potencia eléctrica, calidad de la energía eléctrica y cogeneración de energía son términos de gran importancia para la industria y el mercado doméstico desde finales de 1980. El término *calidad de energía* abarca conceptos para los diferentes tipos de perturbaciones que se generan durante el suministro de la energía eléctrica. *Cogeneración de energía* implica periodos de medición de la misma a lo largo del día, para poder determinar que cantidad de la energía que se suministra a la red. Actualmente, los ingenieros encargados del manejo de los problemas con la energía eléctrica han determinado utilizar un solo sistema que abarque todos y cada uno de los problemas que se generan durante el suministro, en vez de tratar de solucionarlos de uno por uno en forma individual. Como sabemos, en tiempos actuales, la mayoría de los equipos eléctricos y electrónicos se encuentran interconectados a una red de suministro, lo cual implica que una falla en el suministro tiene grandes consecuencias tanto en los equipos así como en los procesos.

“A veces sentimos que lo que hacemos es tan solo una gota en el mar, pero el mar sería menos si le faltara esa gota.” —*Madre Teresa de Calcuta*—

...Para Silver, Mich y Adam, mis motores de vida.

AGRADECIMIENTOS

“El arte supremo del maestro consiste en despertar el goce de la expresión creativa y del conocimiento” – *Albert Einstein...* Gracias a mis asesores de tesis, el Dr. Oscar F. Núñez Olvera y M.I. Gricelda Rodríguez Pedroza.

A mis sinodales de tesis: Dra. Marcela Mejía Carlos, Dr. Alfonso Lastras Martínez, Dr. Jorge Ortega Gallegos. *Gracias por sus sabios consejos.*

A mis padres, por ser el comienzo de todo.

Silvestre, gracias por NO mencionar las palabras que yo quería escuchar en los momentos más difíciles de éste proyecto.

Princesa Michelle gracias por las porras antes de cada examen y la renta de libros.

Capitán Adam, gracias por aguantar el que no pude estar presente en todos tus partidos de soccer.

Marce, prometiste ayudarme en todo lo que necesitara y así lo hiciste. GRACIAS.

Al Dr. Raúl Balderas porque su gran capacidad inspira y su gran corazón... también.

A Lucia... mi fuente de admiración y consejo.

Cris, Vale y Janin, gracias por esperar por mi para la reunión del café, aunque algunas veces fue demasiado larga la espera ¿verdad?.

Ana, amiga, gracias por darme la bendición antes de cada examen y ser mi compañera de des-estrés cada mañana.

Gaby Arce tus consejos de diseño fueron únicos.

Beto, Juan y Balta... lo logramos !!!, gracias por todo el apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	IV
Índice de figuras	VIII
1 Introducción	1
1.1 Analizador de Potencia Eléctrica	2
1.1.1 Estado del Arte	2
1.1.2 Medidor de Potencia Electromecánico	2
1.1.3 Medidor Electromecánico de Estator Sencillo	3
1.1.4 Teorema de Blondell	3
1.1.5 Medidores Electrónicos	4
1.1.6 Medidor Multi-función.	5
1.1.7 Medidores Bidireccionales	6
1.2 Calidad en la Energía Eléctrica	7
1.3 Cogeneración de Energía ¹	8
1.4 Factores de Eficiencia de un Panel Solar	10
1.4.1 Punto de Máxima Potencia	10
1.4.2 Eficiencia en la Conversión de Energía	10
1.4.3 Factor de llenado	11
1.5 Instrumentación Virtual	11
1.5.1 Composición de un Instrumento Virtual	12
1.6 Síntesis del Proyecto Por Desarrollar	12
2 Marco Teórico	14
2.1 Marco Teórico	15
2.2 Electricidad Básica	15
2.2.1 Corriente Eléctrica	16
2.2.2 Voltaje Eléctrico	16
2.2.3 Valor máximo, Voltaje de Pico o de cresta (VP)	16
2.2.4 Valor eficaz o Voltaje RMS	17
2.2.5 Voltaje de Pico a Pico (Vpp)	17
2.2.6 Ángulo de Fase	17
2.3 Potencia Eléctrica y Factor de Potencia	19
2.4 Potencia Aparente (S)	19
2.5 Potencia Activa (P)	20
2.6 Potencia Reactiva (Q)	20
2.7 Potencia en Régimen Permanente Senoidal	20
2.8 Triángulo de Potencias	21
2.9 Sistemas Polifásicos	21
2.10 Fases en un Circuito CA Trifásico	22

2.11	La conexión Estrella o “Y”	23
2.12	La conexión Delta o “Triángulo”	23
2.13	Tensiones en un Sistema Trifásico	24
2.14	Potencia en Cargas Eléctricas Equilibradas.	24
2.15	Modelo de V-I Para Paneles Solares ²	25
2.15.1	Descripción del Modelo Matemático	26
3	Metodología y Desarrollo	28
3.1	Adquisición de Datos	29
3.2	Requerimientos de los Transductores	29
3.3	Niveles de Señal	30
3.4	Transductores de Voltaje	30
3.5	Transductores de Corriente	31
3.6	Dispositivo DAQ (cFP 2120)	32
3.7	Bus de Datos	32
3.8	PC y Software	32
3.9	Acondicionamiento de las Señales	33
3.9.1	Muestreo	33
3.9.2	Cuantización	35
3.10	Reconstrucción de la Señal	35
3.11	Reconstrucción de la Señal utilizando LabVIEW	36
3.11.1	Voltaje (220 Vrms)	36
3.11.2	Corriente	38
3.12	Potencia y Energía	38
4	Prototipo, Pruebas y Resultados	41
4.1	Pruebas y Resultados	42
4.1.1	Inversor Fase 1	42
4.1.2	Inversor Fase 2	45
4.1.3	Subestación Eléctrica	47
4.2	Transformada Discreta de Wavelet u Ondeleta	49
4.2.1	Dominio en tiempo-frecuencia	50
4.2.2	Análisis de Calidad de Energía	51
5	Alcances y Conclusiones	53
5.1	Alcances	54
5.2	Conclusiones	54
5.3	Posibles ampliaciones del sistema	55
A	Apendice	56
A.1	Transductor de Voltaje	57
A.2	Transductor de Corriente	57

B Apendice	58
B.1 cFP 2120	59
B.2 Entradas Analógicas de Voltaje (AI-102) Terminales	59
B.2.1 Entradas Analógicas de Voltaje (AI-102) Un solo Canal	60
B.2.2 Conexión de Entradas Analógicas de Voltaje (AI-102)	60
B.2.3 Entradas Analógicas de Voltaje (AI-110)	61
B.2.4 Medición de Voltaje con el Módulo AI-110	61
C Apendice	62
C.1 Reconstrucción de la Señal de Voltaje y Corriente	63
C.2 Add Zeros.vi	63
C.3 Función Sinc.vi	63
C.4 Diagrama de Bloques del Sistema Completo	64
C.5 Equipo Analizador de Potencia Fabricado	66
D Apendice	68
D.1 Perturbación Sag	69
D.2 Perturbación Swell	70
D.3 Perturbación de Armónicos	71
Bibliografía	72

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Principales Componentes de un Medidor de Potencia Electromagnético	4
1.2.	Diagrama de un Medidor Bidireccional	7
1.3.	Diagrama esquemático del Sistema Propuesto. El sistema debe ser capaz de medir la energía generada por los paneles solares y/o la energía que se esta consumiendo de la red con tan solo colocar los transductores en los puntos de medición. Existen tres puntos de medición propuestos para este fin, uno instalado en la subestación del instituto y los otros dos en cada uno de los inversores de los paneles solares. Las señales obtenidas de los transductores serán adquiridas por un equipo de adquisición de datos y posteriormente procesadas y analizadas por una computadora.	13
2.1.	Representación de una Onda Sinusoidal de un Sistema Monofásico	17
2.2.	En un elemento resistivo puro la intensidad de corriente y la tensión están en fase. El módulo de la impedancia es R	18
2.3.	En una bobina pura la intensidad de corriente se retrasa 90°	18
2.4.	En un condensador puro, la intensidad de corriente se adelanta 90°	19
2.5.	Triángulo de potencias, carga capacitiva	21
2.6.	Representación de un sistema trifásico	22
2.7.	(a) Conexión Estrella. (b) Conexión Delta	23
2.8.	Secuencia ABC	24
2.9.	Potencia en Carga Trifásica	25
2.10.	Circuito Equivalente de un Dispositivo de Unión P-N	27
3.1.	Proceso de Adquisición de Datos	29
3.2.	a) Conexión Deseada. b) Mala Conexión.	31
3.3.	Transductor de Corriente	31
3.4.	Reconstrucción de una Señal Analógica Sinusoidal a Partir de sus Muestras.	35
3.5.	Señal de Voltaje Adquirida con el cFP 2120	36
3.6.	Señal de Voltaje Reconstruida	37
3.7.	Diagrama de Flujo del sistema	40
4.1.	Parámetros de Inicialización	43
4.2.	Señal de Voltaje y Corriente	44
4.3.	Señal de Corriente	44
4.4.	Señal de Voltaje	45
4.5.	Señal de Voltaje y Corriente	46
4.6.	Análisis con la Transformada Discreta de Haar	46
4.7.	Parámetros de inicio para correr el sistema	47

4.8. Gráfica de Señales de Voltaje y Corriente	48
4.9. Parámetros de Potencia y Energía	49
4.10. Diagrama de un Análisis Multiresolución. Se puede observar que los coeficientes de salida de DWT, es la aproximación de los coeficientes del nivel más alto y el detalle de los coeficientes de cada nivel. También se pueden observar los elementos de salida.	50
A.1. Divisor de Voltaje utilizado para reducir el voltaje de fase de 220V Donde: $R1 = 12k\Omega$, $R2 = 330k\Omega$, $Vin = 220V$ y $Vout =$ $7.8V$	57
A.2. RCT-1800 Rogowski Coil w/ Integrator by Magnelab	57
B.1. Diagrama de Localización de Partes cFP 21XX	59
B.2. Tabla de Asignación de Terminales	60
B.3. Circuito de Entrada Analógica. Un solo Canal	60
B.4. Señal de Voltaje sin Suministro Externo de Alimentación	60
B.5. Tabla de Asignación de Terminales	61
B.6. Diagrama de conexión para el Modulo AI-110	61
C.1. Diagrama de Bloques de Reconstrucción de la Señal	63
C.2. Diagrama de Bloques Add Zeros.vi	63
C.3. Diagrama de Bloques Función Sinc.vi	64
C.4. Diagrama de Bloques del Sistema Completo	65
C.5. Analizador de Potencia Basado en LabVIEW. Parte frontal del equipo, donde de lado izquierdo se aprecian las terminales para tres fases de corriente y de lado derecho se encuentra un indicador, el interruptor general, y una conexión ethernet.	66
C.6. Analizador de Potencia Basado en LabVIEW trabajando. El equipo se alimenta con 120 V y se comunica con la computadora vía ethernet.	66
C.7. Parte posterior del equipo donde se pueden apreciar las conexiones realizadas y el cFP 2120.	67
C.8. Adaptación de los puntos de conexión donde se realizan las medicio- nes de potencia. Se puede observar que el transductor de corriente <i>abraza</i> el cable por el cual circula la corriente a monitorear y el transductor de voltaje está conectado a la línea de 220 V.	67
D.1. Perturbación tipo Sag	69
D.2. Análisis con DWT de una Perturbación tipo Sag	69
D.3. Perturbación tipo Swell	70
D.4. Análisis con DWT de una Perturbación tipo Swell	70
D.5. Perturbación con Armónicos	71
D.6. Análisis con DWT de una Señal con Armónicos	71

1

INTRODUCCIÓN

Este capítulo expone una breve descripción de los analizadores de potencia más comunes en el mercado, la importancia de la calidad en la energía eléctrica que nos es proporcionada, el auge que está tomando la cogeneración de energía eléctrica y el objetivo planteado para el presente trabajo de tesis.

Contenido

1.1	Analizador de Potencia Eléctrica	2
1.1.1	Estado del Arte	2
1.1.2	Medidor de Potencia Electromecánico	2
1.1.3	Medidor Electromecánico de Estator Sencillo	3
1.1.4	Teorema de Blondell	3
1.1.5	Medidores Electrónicos	4
1.1.6	Medidor Multi-función.	5
1.1.7	Medidores Bidireccionales	6
1.2	Calidad en la Energía Eléctrica	7
1.3	Cogeneración de Energía¹	8
1.4	Factores de Eficiencia de un Panel Solar	10
1.4.1	Punto de Máxima Potencia	10
1.4.2	Eficiencia en la Conversión de Energía	10
1.4.3	Factor de llenado	11
1.5	Instrumentación Virtual	11
1.5.1	Composición de un Instrumento Virtual	12
1.6	Síntesis del Proyecto Por Desarrollar	12

1.1 Analizador de Potencia Eléctrica

Un analizador de potencia eléctrica permite medir la potencia de un circuito monofásico o trifásico. Un analizador de potencia puede efectuar mediciones prolongadas y guardarlas en memoria para poder ser analizadas posteriormente a detalle en una computadora.³ Este tipo de medidores también pueden registrar la energía que se está consumiendo y/o generando, hacer mediciones de factor de potencia y de ángulo de fase. Además, la mayoría de los principales analizadores posicionados en el mercado, ofrecen también un análisis detallado de los principales factores que determinan la calidad de la energía suministrada.

1.1.1 Estado del Arte

Las mediciones eléctricas abarcan dos grandes rubros: energía y potencia. La energía es equivalente al trabajo y la potencia es la tasa o frecuencia de ese trabajo. La potencia aplicada o consumida por unidad de tiempo es la energía. En términos matemáticos, la potencia integrada en tiempo es energía. La unidad básica de la energía es el watt-hora. La unidad básica de la potencia es el watt. Un medidor de watt-hora mide energía (en watts por hora), mientras que un “medidor de watts” mide la tasa de energía (en watts hora o simplemente watts). Para un nivel de potencia constante, solo multiplicamos por el tiempo y obtenemos la energía. Por ejemplo, un medidor de watts por hora conectado a un circuito de 500W por 2 horas registrará al final de este periodo de tiempo 1000 W h.⁴

1.1.2 Medidor de Potencia Electromecánico

El medidor de watts por hora electromecánico es básicamente un motor eléctrico muy especializado que consiste en:

- Un estator y un rotor que juntos producen el torque.
- Un freno que crea un par contrario.
- Un registro para contar y mostrar las revoluciones del rotor.

1.1.3 Medidor Electromecánico de Estator Sencillo

Este medidor es simplemente un estator con dos terminales. El estator consta de dos electro imanes. Uno de los electro imanes es una bobina de potencial o de tensión conectada entre dos conectores del circuito. El otro electroimán está conectado a la bobina de corriente en serie con la carga. La Figura 1.1 muestra los componentes principales de este medidor.

El campo electromagnético de la bobina de corriente en serie con la carga y la bobina potencial generan el torque en el rotor del medidor. Este torque es proporcional al producto de la fuente de voltaje, la línea de corriente y el coseno del ángulo de la fase entre los dos. Así, el torque es también proporcional a la potencia. El dispositivo descrito hasta ahora está incompleto. Cuando se está midiendo una potencia constante con este circuito, se genera un torque constante que causa una aceleración constante en el rotor. El rotor girará cada vez más rápido hasta que el torque no pueda superar la fricción y otras fuerzas que están actuando sobre el rotor. Esta velocidad que se genera no representará el nivel de potencia presente en el circuito medidor.

Para resolver este problema, se agrega un imán permanente cuyo campo magnético actué en el rotor. Este campo interactúa con el rotor para generar un contra torque o par contrario proporcional a la velocidad del rotor. Un ajuste cuidadoso en la fuerza del campo magnético permite que el medidor gire a una velocidad proporcional a la potencia. Esta velocidad se mantiene muy despacio. El producto de la velocidad del rotor y el tiempo son las revoluciones del rotor. Las revoluciones son proporcionales al consumo de energía en el circuito medidor. Una revolución en el rotor del medidor representa un número fijo de watts por hora. Estas revoluciones se convierten fácilmente mediante un engrane mecánico para desplegar lo que se conoce como kilowatts por hora.⁴

1.1.4 Teorema de Blondell

Si la energía se provee a cualquier sistema de conductores a través de N hilos, la energía total en el sistema es dada por la suma algebraica de las lecturas de los N medidores de potencia o wattmetros. Así que cada uno de los N hilos contiene una bobina de corriente, la bobina de potencia correspondiente es conectada entre ese hilo y algún punto común. Si este punto común es uno de los N hilos, la medición puede ser hecha con N-1 medidores de potencia o wattmetros. Por tanto, tenemos que: En un sistema de N conductores, N-1 elementos de medición podrán

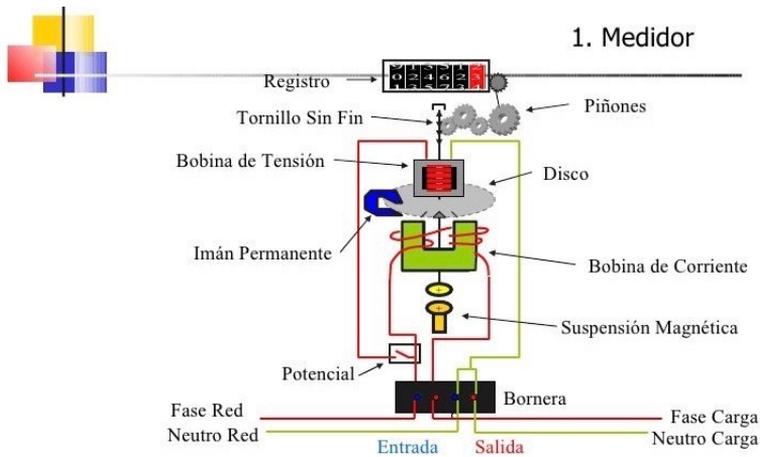


Figura 1.1: Principales Componentes de un Medidor de Potencia Electromagnético

medir la potencia o la energía tomada a condición de que todas las bobinas de potencial tengan una unión en común en el hilo que no tiene bobina de corriente. La medición de energía trifásica es lograda midiendo las tres fases individuales y sumándolas para obtener la energía trifásica total. En viejos medidores análogos, esta medida fue lograda usando hasta tres medidores separados. Según el teorema de Blondell, es posible reducir el número de elementos bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, un sistema trifásico en Delta a tres hilos se podrá medir correctamente con dos elementos (dos bobinas de potencial y dos bobinas de corriente) si las bobinas de potencial son conectadas entre las tres fases con una fase común. En un sistema trifásico Estrella a cuatro hilos, es necesario utilizar tres elementos. Tres bobinas de voltaje conectadas entre las tres fases y el conductor neutro común. En medidores digitales modernos el teorema de Blondell todavía se aplica para obtener la medición apropiada. La diferencia que tenemos con los medidores modernos es que medimos digitalmente cada corriente y cada voltaje de fase y se calcula la energía monofásica para cada fase y finalmente se realiza la suma de las tres para obtener la medida de energía trifásica.

1.1.5 Medidores Electrónicos

Desde 1980, los medidores disponibles en el mercado, tales como los electromecánicos con engranes, electromecánicos con displays digitales y los totalmente electrónicos o de estado sólido siguen aún trabajando. Pero los que han tenido un obvio repunte son estos últimos.

Los medidores electrónicos no contienen piezas mecánicas movibles como rotores, engranes y ejes. Estos están diseñados con circuitos de estado sólido, circuitos integrados y lógica digital, y cada vez son más parecidos a un equipo de cómputo. La operación de estos equipos difiere en gran medida de los medidores electromecánicos descritos con anterioridad, este tipo de equipos solo toma muestras de voltaje y de corriente durante cada ciclo y las convierte a una forma digital para manipular estos parámetros y obtener kW, kWh, kvar, kvarh, factor de potencia, corriente RMS y voltaje RMS.

El mercado está tan competido, que alguna de las características principales que podemos encontrar en este tipo de medidores pueden ser las siguientes y de ello depende también el costo de éstos.

- *Tiempo de uso.* El medidor se mantiene energizado y trabajando en múltiples periodos diarios.
- *Bi – direccionales.* El equipo mide energía entregada y recibida del cliente.
- *Compensación de pérdidas.* El equipo se programa para calcular watts perdidos en transformadores y conductores eléctricos.
- *Guardado de información por periodos de tiempo determinado.* El equipo contiene memoria sólida para el guardado de información.
- *Comunicación remota y/o inalámbrica.* El equipo puede ser consultado de forma remota vía telefónica, radio u otro medio de comunicación.
- *Diagnóstico de fallas.* El equipo verifica que los voltajes, corrientes y ángulos sean los adecuados de trabajo.
- *Calidad de potencia eléctrica.* El equipo puede medir y reportar las variaciones momentáneas de corriente o de voltaje que puedan existir en la línea y condiciones de armónicos.

1.1.6 Medidor Multi-función.

Un medidor multi-función es aquel que aparte de potencia real (kW) puede medir potencia reactiva y potencia aparente.

1.1.7 Medidores Bidireccionales

Los medidores que se han presentado hasta ahora registran la cantidad de energía en kWh consumida por las cargas conectadas al sistema. La compañía que suministra dicha energía, cobra al cliente la cantidad de energía consumida a una tarifa determinada. Generalmente los proveedores de energía tienen diferentes tarifas para lo que es consumo residencial, consumo industrial y consumo comercial. Para ello existen medidores que registran los consumos a lo largo del día y otros que son bidireccionales, los cuales registran en una dirección la energía que se provee por la compañía de energía y en otra dirección la energía que puede estar generando el cliente con Paneles solares.

El consumo neto en este tipo de medidores es el registro de la diferencia de la energía consumida por las cargas directamente de la compañía generadora, menos la energía generada por el cliente por medio de los paneles solares. En un sistema residencial típico con paneles solares inyectando energía a la red, los picos de mayor generación de energía se encuentran entre las 10:00 am y 3:00 o 4:00 pm. Durante este periodo de tiempo, los paneles solares están inyectando toda la energía generada a la red, mientras que las cargas se alimentan de la energía proporcionada por la compañía que proporciona el servicio de energía, durante la tarde, cuando ya no se genera energía por parte de los paneles solares, ya no existe inyección de energía a la red, y al final del día, el consumo de energía cobrado por la compañía prestadora del servicio será la energía consumida registradas en un sentido por el medidor menos la energía registrada en sentido opuesto, que es la generada por los paneles solares.

La desventaja de este tipo de medidores es que no proporcionan un informe exacto de cuanta energía generaron los paneles solares durante el periodo que se está cobrando al cliente. Para ello se recomienda instalar un medidor diferente al que proporciona la compañía prestadora del servicio, que se encargue únicamente de medir la energía generada exclusivamente por los paneles solares. Esto permitirá realizar un análisis detallado del desempeño y/o rendimiento del sistema de paneles solares para determinar con exactitud cuanta energía se está produciendo.⁴ La recomendación anterior tiene que respetar la norma bajo la que se rige la compañía que proporciona el servicio de energía, si la instalación de un medidor externo no es contemplado por la norma, los datos adquiridos por un equipo de ésta naturaleza solo sirven para un análisis interno.

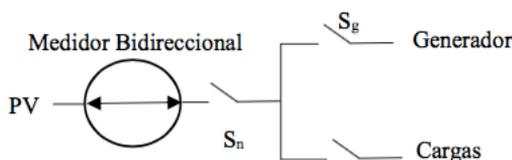


Figura 1.2: Diagrama de un Medidor Bidireccional

1.2 Calidad en la Energía Eléctrica

La calidad en la Energía Eléctrica ha surgido como un área de gran importancia en el área de la ingeniería eléctrica. La razón principal de este surgimiento es el incremento en la sensibilidad de los equipos electrónicos. La calidad de la energía eléctrica es un término utilizado para referirse al estándar de calidad que debe de tener el suministro de corriente alterna en las instalaciones eléctricas, en términos de:

- Tensión o voltaje constante.
- Forma de onda sinusoidal.
- Frecuencia constante.
- Armónicos.
- Transitorios.
- Cálculo de la pérdida de energía. Que es cuando se cuantifican las pérdidas clásicas de la potencia activa y reactiva, así como las potencias asociadas a los desequilibrios y a los armónicos, con el fin de mostrar las pérdidas de energía reales desde el punto de vista económico.
- Captura de datos y forma de onda.
- Miden las tres fases y el neutro.
- Visualización de gráficos y generación de informes.
- Miden parámetros clásicos de potencia, análisis detallados de pérdidas y análisis de desequilibrios.

Todos estos cálculos se utilizan para cuantificar el costo económico de las pérdidas de energía causadas por problemas de calidad eléctrica

El creciente interés del estudio de la calidad de energía o de la también llamada compatibilidad electromagnética en el suministro se ve reflejado en las exigencias de los clientes y en la problemática operativa de las redes eléctricas, si a esto agregamos que la cogeneración de energía renovable también está en una de las principales regiones de interés tanto de las empresas como del gobierno mismo. Ante esta realidad nos podemos hacer los siguientes cuestionamientos, ¿Cómo evaluar el producto entregable y o recibido?, ¿Cómo medirlo?, ¿Cómo determinar la incertidumbre apropiada al proceso de medición?, ¿Se está en condiciones de dar trazabilidad a la medición? Las respuestas a estas preguntas no son absolutas, más bien, es el inicio de este trabajo de tesis donde el objetivo es dejar lo más claro posible cada uno de los términos. En la actualidad, la competitividad de un mundo globalizado exige cada vez mejores productos, ante esta realidad el sector eléctrico no es la excepción. La industria ve a la energía eléctrica como uno de sus insumos vitales e importantes para sus procesos productivos. Como tal, este insumo debe de estar sujeto a requerimientos de control de calidad, confiabilidad en el suministro, etc. A estos requerimientos los estaremos llamando *Calidad de la energía*. Uno de los principales factores para entender las afectaciones de tiro de carga, es consecuencia de que en la actualidad una gran cantidad de equipos son altamente sensibles a las variaciones de la tensión eléctrica. Los equipos de control de procesos basados en micro-controladores y los sistemas electrónicos de potencia son más sensibles que sus antecesores de hace 20 años. La tarea de este trabajo de tesis es el desarrollo de un sistema que nos permita hacer mediciones de consumo de potencia, así como el monitoreo de otros parámetros de energía que nos proporcionen datos confiables de la energía suministrada por CFE y la energía cogenerada con los paneles solares instalados que inyecta energía a la red. Actualmente el equipo de medición instalado por CFE solo nos proporciona algunos parámetros de demanda eléctrica (kW), energía activa (kWh), energía reactiva (kWvarh). Cabe mencionar, que existen en el mercado equipos que miden a detalle los parámetros que conforman lo que se llama calidad de energía, pero esto incrementa el precio de los mismos.

1.3 Cogeneración de Energía¹

Cuando se habla de cogeneración de energía eléctrica, se refiere a la conexión simultánea de dos o más fuentes de energía que son utilizadas para realizar el trabajo de un solo proceso. La producción simultánea de electricidad, energía mecánica o energía calórica. En la actualidad, la utilización de paneles fotovoltaicos o más comúnmente conocidos como paneles solares se ha vuelto una necesidad, por ser el método de generación de energía más limpio conocido hasta ahora y que impacta directamente de forma sumatoria en la lucha contra el calentamiento

global. Los paneles solares están formados de muchas celdas solares, es importante no confundir estos dos términos, una cosa es una celda solar y otra cosa es un panel solar. Todas las celdas solares trabajando en conjunto, hacen que se produzca un campo eléctrico en el panel solar y es así como los paneles solares pueden generar energía que posteriormente podemos utilizar como electricidad. El funcionamiento básico de los paneles solares se puede resumir de la siguiente forma, si la radiación que llega es baja, no será absorbida dentro del panel solar. Si, al contrario, llega demasiada energía, las celdas solares rechazan el exceso de energía en forma de calor. Además, para complicar un poco más las cosas, la eficiencia de los paneles solares, a pesar de ser alta en comparación con otro tipo de energías, podría ser mejorada. Esto es debido a que por cada fotón que llega a una celda solar, se genera un único electrón. La relación 1:1, de ser mejorada y aumentada, supondría un gran respaldo para la utilización de la energía solar. Con el paso de los años, este tipo de generación de energía eléctrica ha ganado terreno en el ámbito de costos, debido al desarrollo de inversores de estado sólido y a la reducción de los costos de producción de los paneles solares. (4.4 – 7.9 USD/Watt en 1992, a 2.6 - 3.5 USD/Watt). Pero hablar de generación de energía eléctrica por medio de celdas solares o celdas fotovoltaicas (PV), implica entrar en el comportamiento de los paneles solares o módulos fotovoltaicos en diferentes condiciones climáticas ya que es una situación crucial para la estimación de la potencia de salida de las plantas fotovoltaicas (PV). En este trabajo se introduce un modelo explícito para describir el comportamiento de los módulos fotovoltaicos del artículo “An explicit I-V model for photovoltaic module technologies” / Energy Conversion and Management. El modelo requiere la estimación de tres parámetros que son: voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de corto circuito (I_{sc}) y un parámetro de forma (S). La validación del modelo se ha realizado a través de mediciones experimentales para cuatro tecnologías de módulos fotovoltaicos (silicio mono-cristalino, silicio multi-cristalino, Cobre Indio Galio Selenio ($CuInGaSe_2$) y Telurio de Cadmio) en dos lugares diferentes para demostrar su eficiencia. Aquí, se pretende utilizar este estudio para realizar la validación del proyecto, comparando los resultados de los datos medidos con los datos teóricos calculados.

1.4 Factores de Eficiencia de un Panel Solar

1.4.1 Punto de Máxima Potencia

Un panel solar puede operar en un amplio rango de voltajes e intensidades de corriente. Esto puede lograrse variando la resistencia de la carga, en el circuito eléctrico, por una parte, y por la otra variando la impedancia del panel desde el valor cero (valor de cortocircuito) a valores muy altos (circuito abierto) y se puede determinar el punto de potencia máxima teórica, es decir, el punto que maximiza V y tiempo frente a I , o lo que es lo mismo, la carga para la cual un panel solar puede entregar la máxima potencia eléctrica para un determinado nivel de radiación. El punto de potencia máxima de un panel solar varía con la iluminación incidente. Para sistemas bastante grandes se puede justificar un incremento en el precio con la inclusión de dispositivos que midan la potencia instantánea por medida continua del voltaje y la intensidad de corriente (y de ahí la potencia transferida), y usar esta información para ajustar, de manera dinámica, y en tiempo real, la carga para que se transfiera, siempre, la máxima potencia posible, a pesar de las variaciones de luz, que se produzcan durante el día.

1.4.2 Eficiencia en la Conversión de Energía

La eficiencia de una celda solar (η), es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por un panel, cuando una celda solar está conectada a un circuito eléctrico. Este término se calcula usando la relación del punto de potencia máxima, P_m , dividido entre la luz que llega a la celda, irradiancia (G , en W/m^2), bajo condiciones estándar (STC) y el área superficial del panel solar (A_c en m^2).

$$\eta = \frac{P_m}{GA_c} \quad (1.1)$$

La STC especifica una temperatura de $25^\circ C$ y una irradiancia de $1000 W/m^2$ con una masa de aire espectral de 1,5 (AM 1,5). Esto corresponde a la irradiación y espectro de la luz solar incidente en un día claro sobre una superficie solar inclinada con respecto al sol con un ángulo de $41,81^\circ$ sobre la horizontal. Esta condición

representa, aproximadamente, la posición del sol de mediodía en los equinoccios de primavera y otoño en los estados continentales de los EEUU con una superficie orientada directamente al sol. De esta manera, bajo estas condiciones una célula solar típica de 230 cm² (6 pulgadas de ancho), y de una eficiencia del 16 por ciento, aproximadamente, se espera que pueda llegar a producir una potencia de 4,4 W.

1.4.3 Factor de llenado

Otro término para definir la eficacia de un panel solar es el factor de llenado o fill factor (FF), que se define como la relación entre el máximo punto de potencia dividido entre el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) y la corriente en cortocircuito (I_{sc}):

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.2)$$

Donde:

P_m es la potencia máxima producida por los paneles solares.

V_{oc} es el voltaje en circuito abierto.

I_{sc} es la corriente en corto circuito.

1.5 Instrumentación Virtual

Muchas veces la realización de una medición requiere la intervención de varios instrumentos, unos generan estímulos sobre el dispositivo que se pretende medir y otros recogen la respuesta a estos estímulos. Este conjunto de instrumentos que hacen posible la medición recibe el nombre de sistema de instrumentación. Todo sistema de instrumentación consta de instrumentos, un sistema de interconexión de estos y un controlador inteligente que gestiona el funcionamiento de todo el sistema y da las órdenes para que una medición se realice correctamente.

El concepto de instrumentación virtual nace a partir del uso de la computadora personal PC, como una forma de reemplazar equipos físicos por software, permite a los usuarios interactuar con la computadora como si estuviesen utilizando un instrumento real. El usuario manipula un instrumento que no es real, se ejecuta en la computadora, tiene sus características definidas por software, pero realiza las mismas funciones que un equipo real.

El concepto de instrumentación virtual implica: adquisición de señales, el procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de los datos e información relacionados con la medición de una o varias señales, interfase gráfica hombre-máquina, visualización, monitoreo y supervisión remota del proceso, la comunicación con otros equipos, etc.

Un sistema de instrumentación virtual está enfocado a los instrumentos encargados de medir señales, registrar datos y decidir las acciones de control. Evidentemente, se requiere de una etapa de actuación, que conforma la interfase entre la computadora y el sistema a controlar y requiere drivers de potencia o transductores de señal especiales. Además, existen otras etapas auxiliares que no intervienen en el proceso de medida, como es el caso del sub-sistema de alimentación.

1.5.1 Composición de un Instrumento Virtual

La composición de una Instrumentación virtual puede resumirse de la siguiente forma:

- Bajo costo relativo
- Alto poder de cálculo
- Capacidad de almacenamiento
- Calidad en el graficado
- Arquitectura abierta

1.6 Síntesis del Proyecto Por Desarrollar

El objetivo del proyecto por desarrollar es el Diseño e Implementación de Un Sistema Analizador de Potencia Eléctrica basado en LabVIEW, que además de proporcionarnos los parámetros de potencia, podamos tener los valores de energía, factor de potencia, análisis de frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier y un análisis de parámetros de calidad de energía realizados mediante la Transformada Discreta de Wavelet u Ondeleta (DWT).

La necesidad de contar con un equipo de esta naturaleza en el IICO, surge a raíz de la instalación de dos sistemas de cogeneración de energía eléctrica por medio de paneles solares, los cuales se encuentran conectados a dos de las tres fases de

alimentación que proporciona la compañía de Comisión Federal de Electricidad. La configuración del sistema de medición propuesto para llevar a cabo el presente proyecto y cubrir las especificaciones recomendadas se ilustra en la Figura 1.3, donde la energía generada por paneles solares es inyectada a la red de suministro.

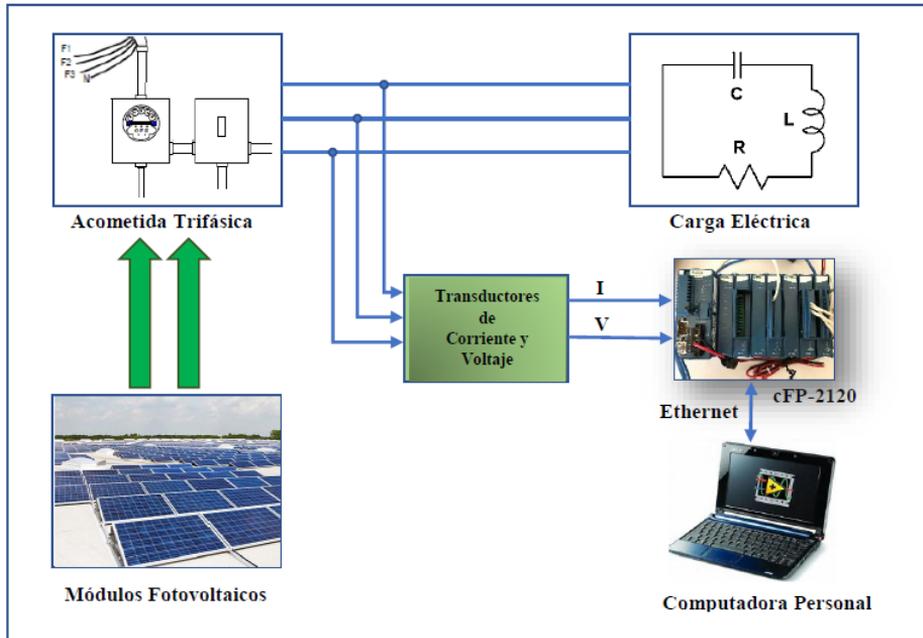


Figura 1.3: Diagrama esquemático del Sistema Propuesto. El sistema debe ser capaz de medir la energía generada por los paneles solares y/o la energía que se está consumiendo de la red con tan solo colocar los transductores en los puntos de medición. Existen tres puntos de medición propuestos para este fin, uno instalado en la subestación del instituto y los otros dos en cada uno de los inversores de los paneles solares. Las señales obtenidas de los transductores serán adquiridas por un equipo de adquisición de datos y posteriormente procesadas y analizadas por una computadora.

2

MARCO TEÓRICO

Este capítulo, provee una visión general de los conceptos básicos de las fases de la electricidad, los eventos más comunes de la calidad de energía y la predicción del comportamiento eléctrico de módulos fotovoltaicos para validar las mediciones del sistema.

Contenido

2.1	Marco Teórico	15
2.2	Electricidad Básica	15
2.2.1	Corriente Eléctrica	16
2.2.2	Voltaje Eléctrico	16
2.2.3	Valor máximo, Voltaje de Pico o de cresta (VP)	16
2.2.4	Valor eficaz o Voltaje RMS	17
2.2.5	Voltaje de Pico a Pico (Vpp)	17
2.2.6	Ángulo de Fase	17
2.3	Potencia Eléctrica y Factor de Potencia	19
2.4	Potencia Aparente (S)	19
2.5	Potencia Activa (P)	20
2.6	Potencia Reactiva (Q)	20
2.7	Potencia en Régimen Permanente Senoidal	20
2.8	Triángulo de Potencias	21
2.9	Sistemas Polifásicos	21
2.10	Fases en un Circuito CA Trifásico	22
2.11	La conexión Estrella o “Y”	23
2.12	La conexión Delta o “Triángulo”	23
2.13	Tensiones en un Sistema Trifásico	24
2.14	Potencia en Cargas Eléctricas Equilibradas.	24
2.15	Modelo de V-I Para Paneles Solares²	25
2.15.1	Descripción del Modelo Matemático	26

2.1 Marco Teórico

Hoy en día la mayoría de las redes eléctricas son trifásicas dadas las ventajas que este tipo de sistema presenta sobre las redes monofásicas, por lo que, en esta sección del trabajo, se procurará resumir y condensar los conocimientos básicos más importantes para comprender y calcular este tipo de circuitos, mostrando solo circuitos equilibrados cuyas ondas de tensión y de corriente sean perfectamente sinusoidales (circuitos sin armónicos). Los sistemas trifásicos son necesarios cuando se requieren potencias elevadas y las ventajas principales que ofrecen estos sistemas con respecto de un sistema monofásico son las siguientes:⁵

- Ahorro en las líneas de transporte de energía eléctrica.
- Proporciona una potencia instantánea constante.
- Facilita el arranque de los motores eléctricos.

Para entender el monitoreo de calidad de energía y medición de energía eléctrica se debe tener una comprensión básica de los sistemas trifásicos de energía.

2.2 Electricidad Básica

La energía eléctrica puede ser comparada con una analogía de un sistema de agua. En un sistema de agua usted tiene un tubo que puede llevar agua. Mientras más grande sea el tubo más agua puede llevar. Para mover el agua a través del tubo esta se tiene que presurizar y cuando el agua tiene la capacidad de moverse de un área de alta presión a un área de baja presión (como cuando se abre una válvula) usted obtiene un flujo. En esta analogía se reemplaza un tubo que conduce agua por un cable que conducirá corriente. En lugar de llevar agua el cable lleva electrones. Mientras más grande el cable más electrones puede llevar. Los electrones son presurizados aplicando voltaje. Cuando el circuito está completo los electrones fluirán desde un alto voltaje al hasta un bajo voltaje, y ahí es cuando se obtiene un flujo, conocido como corriente.⁴

2.2.1 Corriente Eléctrica

La corriente eléctrica es una carga en movimiento. La corriente presente en una trayectoria cualquiera, como un alambre metálico, tiene asociada a ella tanto una dirección como una magnitud; es una medida de la rapidez con que la carga se está moviendo al pasar por un punto dado de referencia en una dirección específica.⁶ La corriente se representa por la letra I o i , entonces,

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (2.1)$$

La unidad de corriente es el Ampere (A) y 1 A corresponde a una carga q que se mueve con una rapidez de 1 C/s, y t es el tiempo en segundos (s).

2.2.2 Voltaje Eléctrico

El voltaje eléctrico o *diferencia de potencial* entre un par de terminales es la medida del trabajo requerido para mover una carga positiva de 1 C de una terminal a la otra. La unidad de voltaje es el *volt* (V), que es igual a 1 J/C y se representa por V o v .⁶

En un circuito de Corriente Directa (CD) el voltaje y la corriente serán constantes con una carga constante. Sin embargo, en un circuito de Corriente Alterna (CA) el voltaje y la corriente varían en una forma sinusoidal. Los voltajes instantáneos y las corrientes varían sobre el tiempo basado en sus fases.

2.2.3 Valor máximo, Voltaje de Pico o de cresta (VP)

Existen dos valores máximos posible para la onda $x(t)$: el valor máximo positivo (X_{m+}) y el valor máximo negativo (X_{m-}). Pero, en general, cuando se habla de valor máximo (X_m) se hace referencia al mayor de los dos en valor absoluto. Si la onda es alterna simétrica se habla del valor máximo positivo como el valor máximo de la onda. $V_{max} = (1.414)(V_{RMS})$

2.2.4 Valor eficaz o Voltaje RMS

El valor eficaz (X) (Root Mean Square – Raíz Media Cuadrática) representa el valor cuadrático medio de la onda periódica $x(t)$, es decir, la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de la función de un periodo, esto es:

la Raíz media cuadrada de la forma de onda, o el valor de voltaje o corriente en CA que produce el mismo efecto de disipación de calor que su equivalente de voltaje de CD. Las tomas de corriente residencial alrededor del mundo se refieren a la medición RMS de la forma de onda. (120 V_{RMS} o 240 V_{RMS}).

$$V_{RMS} = (V_p)(0.707)$$

El valor eficaz es importante en la teoría de circuitos, pues de él dependen las expresiones de energía y potencia.

2.2.5 Voltaje de Pico a Pico (V_{pp})

Es el doble del valor máximo o voltaje de pico. Figura 2.1

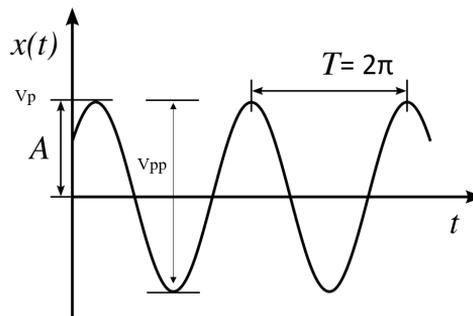


Figura 2.1: Representación de una Onda Sinusoidal de un Sistema Monofásico

2.2.6 Ángulo de Fase

Como tanto el voltaje como la corriente son funciones sinusoidales del tiempo y se representan gráficamente con la misma escala de tiempos, aparece un desplazamiento relativo entre ambas magnitudes que solo es nulo en el caso de tratarse de un

elemento resistivo puro. Dicho desplazamiento es el ángulo de fase y nunca puede ser superior a 90° o $\pi/2$ radianes. Por convenio, al hablar del ángulo de fase se considera el ángulo que forman la intensidad de corriente i con la tensión v . En un condensador, por ejemplo, la corriente se adelanta 90° al voltaje; en un circuito RL con R igual a ωL , el voltaje adelanta 45° o $\pi/4$ con respecto a la corriente (o bien la corriente está retrasada $\pi/4$ con respecto al voltaje); en una resistencia pura la corriente está en fase con el voltaje. Las Figuras 2.2, 2.3 y 2.4 aclaran los conceptos de ángulo de fase.⁷

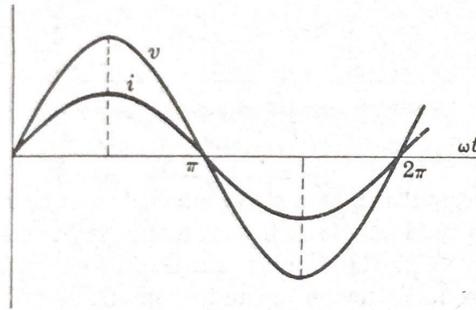


Figura 2.2: En un elemento resistivo puro la intensidad de corriente y la tensión están en fase. El módulo de la impedancia es R

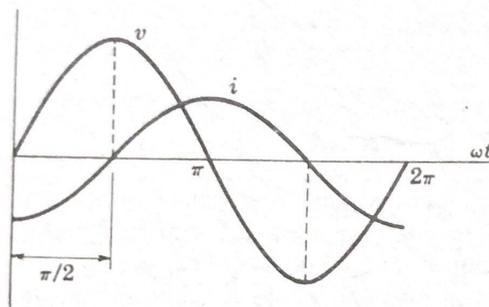


Figura 2.3: En una bobina pura la intensidad de corriente se retrasa 90° o $\pi/2$ respecto a la tensión o voltaje. El módulo de la impedancia es ωL

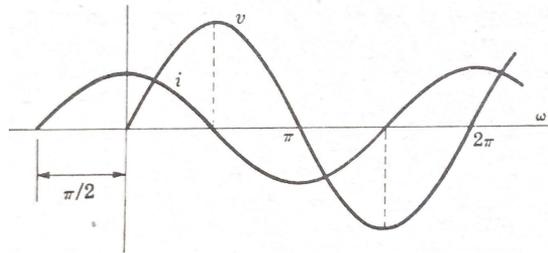


Figura 2.4: En un condensador puro, la intensidad de corriente se adelanta 90° o $\pi/2$. El módulo de la impedancia es $1/\omega C$.

2.3 Potencia Eléctrica y Factor de Potencia

En muchos dispositivos eléctricos uno de los parámetros que más interesa es el de la potencia. La potencia puede tomar valores positivos o negativos, según el instante o el intervalo de tiempo que se considere. Una potencia P positiva significa una transferencia de energía de la fuente a la red, mientras que una potencia P negativa corresponde a una transferencia de energía de la red a la fuente.⁵

El Factor de Potencia de una Carga, que puede ser un elemento único que consume energía o toda una instalación, lo da la relación de (P/S) , es decir, kW sobre kVA en un momento determinado. El valor del factor de potencia está comprendido entre 0 y 1. Si las señales de voltaje y corriente son perfectamente sinusoidales el factor de potencia es igual a $\cos \theta$.

Un factor de potencia cercano a la unidad significa que la energía reactiva es pequeña comparada con la energía activa, mientras que si el factor de potencia es bajo o cercano a cero, indica la condición opuesta.

2.4 Potencia Aparente (S)

La potencia aparente o potencia total, es el resultado de la suma geométrica de las potencias activa y reactiva. Esta potencia es la que realmente suministra una planta eléctrica cuando se encuentra funcionando sin ningún tipo de carga; es la potencia que suministra la red de alimentación ya que limita la utilización de transformadores y demás elementos componentes de los circuitos eléctricos.

La potencia aparente se representa con la letra S y su unidad de medida es el volt-ampere (VA) y su cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$S = VI \quad (2.2)$$

Donde:

S Potencia aparente o total, expresada en volts-amperes (VA)

V Voltaje expresado en volts (V)

I Intensidad de la corriente eléctrica, expresada en amperes (A)

2.5 Potencia Activa (P)

La potencia activa representa la capacidad de una instalación eléctrica para transformar la energía eléctrica en trabajo útil: mecánico (movimiento o fuerza), lumínico, térmico, químico, etc. Esta potencia es realmente la consumida en una instalación eléctrica. Se representa por P y se mide en vatios (W). La suma de esta potencia activa a lo largo del tiempo es la energía activa (kWh), que es lo que facturan las compañías eléctricas (término de energía).

2.6 Potencia Reactiva (Q)

Es la que aparece cuando existen cargas inductivas y capacitivas, y sus unidades son los Volts-Amperes Reactivos (VAR).

2.7 Potencia en Régimen Permanente Senoidal

Considerando el caso ideal en que un circuito pasivo contenga, exclusivamente un elemento inductivo al que se le aplica una tensión senoidal de la forma $v = V_m \text{sen}(\omega t)$. La intensidad de corriente que circula de la forma $i = I_m \text{sen}(\omega t - \pi/2)$. El valor de la potencia instantánea es $p = vi = V_m I_m \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\omega t - \pi/2)$. Como

$\text{sen}(\omega t - \pi/2) = -\text{cos}(\omega t)$ y $2\text{sen}(x)\text{cos}(x) = \text{sen}(2x)$, podemos escribir:
 $p = -\frac{1}{2}V_m I_m \text{sen}(2\omega t)$.⁷

2.8 Triángulo de Potencias

Las expresiones de las potencias activa, aparente y reactiva se pueden representar geoméricamente mediante los lados de un triángulo que se llama *triángulo de potencias*.⁵ Sea un circuito capacitivo, donde la corriente se adelanta al voltaje como lo indica la Figura 2.5 (a), esto es, tomando V como referencia. En la Figura 2.5 (b) está representada la intensidad de corriente con sus componentes activa y reactiva. La componente activa está en fase con la tensión o voltaje V y la componente reactiva está en cuadratura con el voltaje V, es decir desfasada 90° en adelante. La Figura 2.5 (c) muestra el triángulo de potencias para este caso.

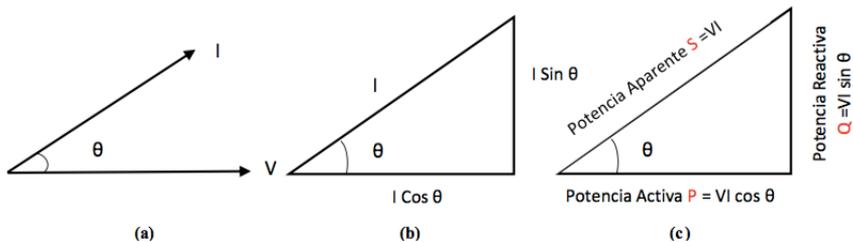


Figura 2.5: Triángulo de potencias, carga capacitiva

2.9 Sistemas Polifásicos

Un sistema polifásico está formado por dos o más tensiones iguales con diferencia de fase constantes que suministran energía a las cargas conectadas a la línea. Los sistemas trifásicos son los más comúnmente utilizados para la generación y transmisión de la energía eléctrica.⁵

2.10 Fases en un Circuito CA Trifásico

En un circuito CA trifásico el voltaje y la corriente varían de una forma sinusoidal. Los voltajes instantáneos y las corrientes varían con tiempo basados en sus fases. La fase en un circuito CA indica el valor de corriente o voltaje medida en grados, por lo que 360° son iguales a un ciclo completo. El valor de la sinusoidal del ángulo de fase es proporcional al nivel del voltaje. Las tres fases de energía de un sistema trifásico se refieren a los tres voltajes que están desfasados 120° el uno del otro o lo que es lo mismo $1/3$ de ciclo completo. Estos voltajes generalmente son conducidos en tres cables. Figura 2.6.

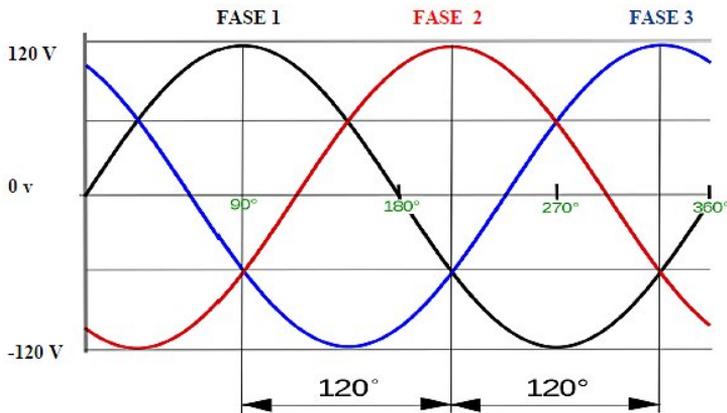


Figura 2.6: Representación de un sistema trifásico

La energía trifásica, como se mencionó con anterioridad, es el estándar alrededor del mundo porque usa menos y más pequeños conductores a diferencia de múltiples sistemas de fase sencilla que provee la misma energía. La energía trifásica tiene también la habilidad de alimentar motores con un torque constante en vez de un torque pulsante de los motores monofásicos. Debido a que cada una de las fases lleva un voltaje igual (y corriente a través de una carga) con un desfase de 120° , la energía que proveen las tres fases es constante. En el mundo de los sistemas trifásicos de CA, las conexiones pueden ser estrella o “Y” o delta “Triángulo”.

2.11 La conexión Estrella o “Y”

(*Conexión existente en el IICO*) Lleva tres fuentes de voltaje a un punto común. En algunos casos se conecta un cuarto cable de neutro al mismo punto para aliviar problemas si una de las fuentes de voltaje falla y queda desconectada. En este tipo de conexión, las corrientes de bobina y de línea son iguales y la tensión compuesta entre línea es $\sqrt{3}$ veces la tensión simple de la bobina (V_L). Figura 2.7(a).

2.12 La conexión Delta o “Triángulo”

Se llama así debido a su parecido con el signo griego “delta” Δ que parece un triángulo. En esta configuración cada lado del triángulo contiene una fuente de voltaje y no existe una conexión de punto común. En esta configuración no existe la necesidad de un cable neutro, ya que, si una de las fuentes llega a fallar, queda desconectada sin afectar la corriente o voltaje en el sistema. En este tipo de conexión, la tensión compuesta entre líneas es igual a la tensión de la bobina, pero la corriente es $1/\sqrt{3}$ veces la corriente de línea. Figura 2.7(b).

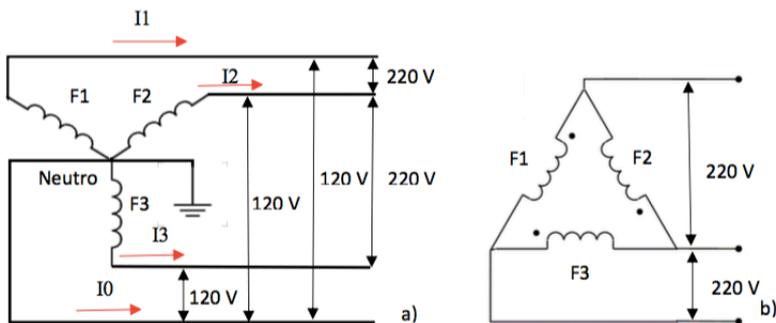


Figura 2.7: (a) Conexión Estrella. (b) Conexión Delta

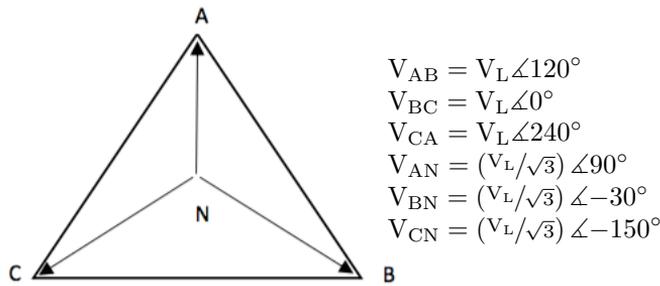


Figura 2.8: Secuencia ABC

2.13 Tensiones en un Sistema Trifásico

La elección de una tensión como referencia con un ángulo de fase nulo determina los ángulos de fase de todas las demás tensiones del sistema.⁸ Veamos como ejemplo el triángulo ABC mostrado en la Figura 2.8, donde se toma como referencia el voltaje V_{BC} .

2.14 Potencia en Cargas Eléctricas Equilibradas.

Como por la impedancia de las fases en cargas equilibradas, triángulo o estrella, circulan corrientes iguales, la potencia por fase es un tercio de la potencia total. La Figura 2.9 muestra una carga conectada en estrella, por la cual circulan las corrientes de línea (I_L) y la tensión o voltaje en Z_Y es la tensión simple de la fase (V_F). El ángulo entre ellas es el de la impedancia. Entonces la potencia por fase es:

La potencia total en cualquier carga trifásica equilibrada ya sea en delta o estrella es la misma y viene dada por $\sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$, siendo θ el ángulo de la impedancia de la carga o el ángulo en una impedancia equivalente en el caso de que varias cargas equilibradas sean alimentadas por el mismo sistema. La potencia aparente total ST y la potencia reactiva total QT están relacionadas con PT. Por consiguiente, una carga trifásica equilibrada tiene unas potencias activas, aparente y reactiva que vienen dadas por:

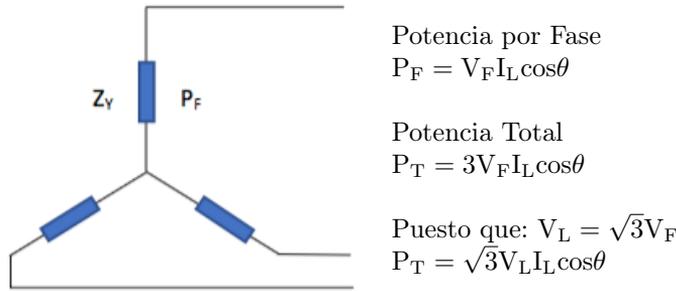


Figura 2.9: Potencia en Carga Trifásica

$$P_T = \sqrt{3}V_T I_T \cos\theta \quad (2.3)$$

$$S_T = \sqrt{3}V_T I_T \quad (2.4)$$

$$Q_T = \sqrt{3}V_T I_T \sin\theta \quad (2.5)$$

2.15 Modelo de V-I Para Paneles Solares²

La eficiencia de los paneles solares ha crecido considerablemente. La eficiencia más alta reportada en este tipo de tecnología es de $22.8\% \pm 0.6$ para los grandes módulos (multi-C-Si), $12.3\% \pm 0.3$ para silicio amorfo en tándem (a-Si) y $18.3\% \pm 0.3$ y $17.5\% \pm 0.3$ para Telurio de Cadmio (CdTe) e Indio Cobre Selenio Galio (CIGS) en módulos de película delgada,⁹ mientras que la eficiencia real de los productos comerciales es normalmente de 2-4 puntos porcentuales más bajos; mientras tanto el costo de producción de los módulos fotovoltaicos ha bajado, y el efecto combinado es una reducción significativa del costo-kWh – el punto clave para la evaluación de este tipo de fuentes de energía.

Para describir el comportamiento de una célula/módulo fotovoltaico, es conveniente utilizar un modelo matemático para la representación de la relación entre corriente y voltaje (I-V). En este contexto muchos modelos han sido desarrollados en la literatura. Ellos pueden ser clasificados globalmente en dos categorías: modelos implícitos y explícitos. Los modelos implícitos necesitan métodos numéricos iterativos para resolver la ecuación I-V no lineal mientras que los modelos explícitos se basan en las expresiones analíticas simples que son convenientes y necesarias en varias

aplicaciones prácticas.

Karmalkar y Haneefa¹⁰ desarrollaron un modelo explícito que permite la predicción de toda la curva I-V, el punto de potencia de pico y el factor de relleno (FF), a partir de cuatro mediciones de los puntos de polarización. Das, presentó un enfoque basado en una expresión explícita en corriente máxima (I_{mp}) y FF. Saloux et al.] propuso un modelo explícito de paneles fotovoltaicos sin resistencia en serie (R_s) y resistencia Shunt (R_{sh}) para determinar la corriente y el voltaje al máximo para una amplia gama de condiciones de funcionamiento. Un explícito modelo empírico se desarrolla, para predecir el rendimiento de módulos fotovoltaicos, cadenas y campos basados en parámetros eléctricos (voltaje en circuito abierto V_{oc}), corriente de corto circuito (I_{sc}), corriente máxima (I_{mp}), voltaje máximo (V_{mp}), el coeficiente de corriente/temperatura (m_{isc}), el coeficiente de voltaje/temperatura (m_{Voc}) suministrado por el fabricante del módulo fotovoltaico. El modelo se valida experimentalmente en el punto de potencia máxima (P_{mp}) para tres diferentes tecnologías de módulos fotovoltaicos. El desarrollo de un modelo preciso y sencillo para la predicción del comportamiento de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologías continúa siendo una tarea crucial. Por lo que en este trabajo se está sumamente motivados para trabajar en la segunda categoría (modelo explícito) debido a su simplicidad. Por lo tanto, se introduce a un modelo simple que describe empíricamente el comportamiento de módulos fotovoltaicos (PV) de diferentes tecnologías.

2.15.1 Descripción del Modelo Matemático

Como se muestra en la Figura 2.10, una celda solar, no es otra cosa mas que un dispositivo de unión P-N, como un diodo que está polarizado en forma directa con una fuente de corriente, una resistencia en serie (R_s), una resistencia en paralelo (R_{sh}) que puede ser modelada de la siguiente forma:¹⁰

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

Donde:

- I_{ph} es la fotocorriente (A).
- I_o es la corriente inversa de saturación del diodo.
- q es la carga del electrón ($1.60217646 \times 10^{-19} \text{ C}$)
- k es la carga del electrón ($1.3806503 \times 10^{-23} \text{ J/K}$).

- **T** es la temperatura en grados Kelvin (K) de la unión p-n.
- **n** es el factor de calidad del diodo ($1 \leq n \leq 2$).
- **R_s** es la resistencia en serie (Ω), que representa las perdidas por enlaces de soldadura.
- **R_{sh}** es una resistencia de derivación que representa la fuga de corriente a través de la alta conductividad de esta, en la unión p-n.

Las celdas FV pueden clasificarse en dos grupos principales según su tecnología de fabricación: Silicio (simple o múltiple cristalino) y películas delgadas (a-Si, CdTe, CIGS, etc).¹⁰ Una expresión simple para modelar y representar el comportamiento de una celda solar, donde la relación entre la corriente y el voltaje se da por la siguiente ecuación matemática.

$$I = I_{sc} \left(1 - \left(\frac{V}{V_{oc}} \right)^s \right) \quad (2.7)$$

Donde *s* representa el parámetro de forma.

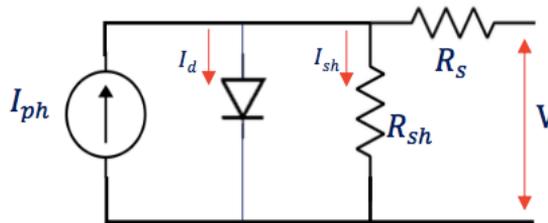


Figura 2.10: Circuito Equivalente de un Dispositivo de Unión P-N

Para una explicación mas detallada de las formulas que describen los cálculos matemáticos de cada uno de los diferentes parámetros de los paneles fotovoltaicos y el procedimiento para el cálculo del parámetro de forma (*s*) se recomienda consultar la referencia¹⁰

3

METODOLOGÍA Y DESARROLLO

En este capítulo se presenta la metodología para el desarrollo del proyecto, la descripción y explicación del hardware utilizado y el detalle de la programación realizada en LabVIEW.

Contenido

3.1	Adquisición de Datos	29
3.2	Requerimientos de los Transductores	29
3.3	Niveles de Señal	30
3.4	Transductores de Voltaje	30
3.5	Transductores de Corriente	31
3.6	Dispositivo DAQ (cFP 2120)	32
3.7	Bus de Datos	32
3.8	PC y Software	32
3.9	Acondicionamiento de las Señales	33
3.9.1	Muestreo	33
3.9.2	Cuantización	35
3.10	Reconstrucción de la Señal	35
3.11	Reconstrucción de la Señal utilizando LabVIEW	36
3.11.1	Voltaje (220 Vrms)	36
3.11.2	Corriente	38
3.12	Potencia y Energía	38

3.1 Adquisición de Datos

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema de medida DAQ consiste en sensores, hardware de medida DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medida más potente, flexible y rentable.¹¹

La Figura 3.1 muestra un diagrama de éste proceso, donde un transductor de voltaje y uno de corriente son utilizados para obtener las señales de voltaje y corriente respectivamente, adecuándolas de tal forma que puedan ser introducidas a los canales de un dispositivo DAQ. El dispositivo DAQ realiza una conversión analógico digital para que éstas señales puedan ser procesadas por un computador.

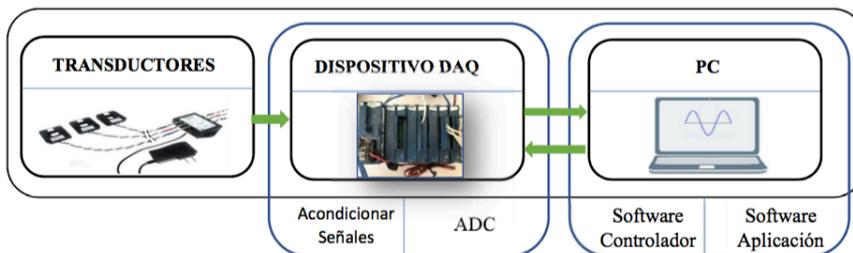


Figura 3.1: Proceso de Adquisición de Datos

3.2 Requerimientos de los Transductores

Un sensor, también llamado transductor, convierte un fenómeno físico en una señal eléctrica que se puede medir. Para el monitoreo de la calidad de la energía en sistemas de potencia se requiere de ciertos transductores para que nos entreguen señales aceptables de niveles de voltaje y de corriente (calidad de la energía = calidad en la señal de voltaje). El monitoreo del voltaje en sistemas secundarios puede usualmente ser realizado con conexiones directas, pero aun estas locaciones necesitan transformaciones (*Transductores de Corriente o CTs*) para obtener la señal. Diversos sistemas de monitoreo de calidad de energía están diseñados para una entrada de voltaje de hasta 600 Vrms y entradas de corriente de hasta 5

Arms. Existen dos importantes puntos a ser considerados para la selección de los transductores:

- *Niveles de Señal.* Los niveles de la señal deben de utilizar la escala completa del instrumento sin distorsionar o recortar la señal deseada.
- *Respuesta a la Frecuencia.* Esto es particularmente importante para la supervisión de la distorsión transitoria de armónicos, donde las altas frecuencias juegan un papel importante.

3.3 Niveles de Señal

Debe realizarse una consideración cuidadosa al seleccionar la capacidad de los transductores (VTs) y (CTs) y poder tomar ventaja de toda su resolución. Una inadecuada selección puede ocasionar daños en el equipo de medición y el equipo de adquisición de datos. Los instrumentos de monitoreo digital trabajan de la mano con el uso de convertidores analógico-digitales (A/D). Estas tarjetas A/D convierten una señal analógica recibida por el instrumento a una señal digital para poder ser procesada. Para obtener la más alta resolución, es importante utilizar el rango más alto posible. El nivel de ruido de un A/D típico es del 33% de la escala total (5 bits para un A/D de 16 bits). También tenemos por regla general, que la señal de entrada no debe ser menor de 1/8 de la escala total.¹²

3.4 Transductores de Voltaje

Los transductores de voltaje (VTs) deben ser seleccionados de tal forma que se evite la distorsión por saturación en el VT. Por lo general, para una selección adecuada, la curva de saturación del transductor debe estar un 200 por ciento arriba del voltaje nominal del sistema. Para una adecuada medición de frecuencias altas (armónicos) es necesario utilizar un divisor de voltaje capacitivo o puramente resistivo para poder adquirir la señal adecuadamente.

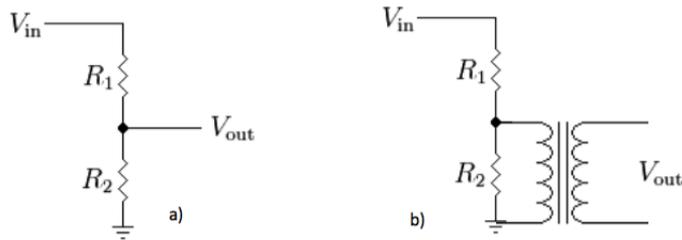


Figura 3.2: a) Conexión Deseada. b) Mala Conexión.

3.5 Transductores de Corriente

La selección de un adecuado transductor de corriente (CT) es más complicada. La corriente en cualquier sistema cambia constantemente dependiendo de la carga, mientras que el voltaje se mantiene constante. Si nos preocupa que la demanda de corriente sea muy alta de un momento a otro, el transductor de corriente debe ser seleccionado en un rango de 20 a 30 veces la corriente nominal del sistema. Esto trae como consecuencia una baja resolución en la adquisición de datos y medición de armónicos. Si lo que se desea es tener precisión en la medición para poder obtener las adecuadas mediciones de energía y/o potencia generada, los CTs, deben ser seleccionados para caracterizar con precisión la corriente de carga.



Figura 3.3: Transductor de Corriente

Ya que el presente proyecto incluye trabajar con señales de voltaje de línea (220V) y señales de consumo de corriente (250 A aproximadamente) para realizar las mediciones de la potencia consumida, ambos sensores han sido seleccionados y adaptados para poder ser utilizados con el dispositivo DAQ (cFP 2120). Consultar **Apéndice A**.

3.6 Dispositivo DAQ (cFP 2120)

La utilización de un controlador cFP 21xx con LabVIEW Real-Time proporciona un fácil manejo de aplicaciones con sistemas embebidos. Cuando corremos una aplicación en LabVIEW Real Time Engine en un cFP 21xx, el controlador puede correr aplicaciones sin la necesidad de una PC. Si se conecta el equipo cFP 21xx a una PC a través de una red de ethernet, el beneficio es que podemos visualizar las mediciones del equipo en la computadora.

Además del puerto ethernet, el cFP 21xx cuenta con uno o más puertos seriales RS 232. Cuenta también con LEDs indicadores para comunicar los estados de la información procesada.

Referirse al Apéndice B para ver las partes y algunos esquemas de conexión.

3.7 Bus de Datos

Los dispositivos DAQ se conectan a una PC a través de un puerto. El bus de datos sirve como interfaz de comunicación entre el dispositivo DAQ y la PC. Los buses que puede ofrecer un dispositivo DAQ pueden ser, USB, PCI, PCI Express, y Ethernet, aunque los más recientes ya ofrecen comunicación Wi-Fi para comunicaciones inalámbricas.

3.8 PC y Software

Existen varias razones por las cuales se desea transformar una señal analógica en una señal digital, pero la razón principal, es que el procesamiento digital ofrece la capacidad de programación (software), lo que significa que el mismo procesador (hardware) puede ser usado para muchas y variadas aplicaciones con solo cambiar el código que se aloja en la memoria del procesador. Otra razón es que un circuito digital proporciona una salida de mayor estabilidad que un circuito analógico.

Los diferentes componentes de software en un sistema DAQ son el software controlador y el software de aplicación. El software controlador ofrece al software de aplicación la habilidad de inter-actuar con un dispositivo DAQ. El software

controlador para este proyecto es NI-DAQ 15.5 LabVIEW interfase. El Software de aplicación facilita la interacción entre la PC y el usuario para adquirir, analizar y presentar datos de medidas. El software de aplicación utilizado en este proyecto es LabVIEW® 2015 Real Time.

3.9 Acondicionamiento de las Señales

El campo del Procesamiento Digital de Señales (DSP) ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas dos décadas, principalmente debido a la disponibilidad y el avance en los Procesadores de Señales Digitales (DSP 's). En la actualidad, sistemas DSP tales como los teléfonos celulares y módems de alta velocidad son ahora parte integral de nuestra vida diaria.

En general, los sensores generan señales analógicas en respuesta a variados fenómenos físico que ocurren de forma análoga. Para realizar el procesamiento de una señal analógica en el dominio digital, se requiere que la señal digital sea formada por un muestreo y una cuantización (digitalización) de la señal analógica. Por lo tanto, en contraste con una señal analógica, una señal digital es discreta en tiempo y amplitud. El proceso de digitalización se logra por medio de un convertidor analógico-digital (A/D).¹³ Para minimizar cualquier pérdida de información que pudiera ocurrir durante la conversión, debemos entender los principios que existen detrás del muestreo y la cuantización

3.9.1 Muestreo

Muestreo es el proceso de generación de muestras en tiempo discreto de una señal analógica. Consideremos una señal analógica sinusoidal $x(t) = \text{Acos}(\omega t + \phi)$. Muestreando esta señal con $t = nT_s$, donde T_s es el intervalo de tiempo de muestreo, es generada una señal discreta en el tiempo.¹³

$$x[n] = \text{Acos}(\omega nT_s + \phi) = \text{Acos}(\theta n + \phi), \quad \text{dode } n = 1, 2, 3, \dots, \quad (3.1)$$

donde $\theta = \omega T_s = \frac{2\pi f}{f_s}$ denota la frecuencia digital en radianes

(la frecuencia analógica w se encuentra dada en radianes/seg). En otras palabras, la frecuencia de una señal analógica f y su frecuencia de muestreo f_s definen la frecuencia correspondiente de la señal digital θ .

Para entender las restricciones asociada con el proceso de muestreo, se analiza la señal en el dominio de la frecuencia con la transformada de Fourier.

Transformada de Fourier para Señales Analógicas Periódicas

$$X_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j\omega_0 kt} dt \quad (3.2)$$

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k e^{j\omega_0 kt} \quad (3.3)$$

Transformada de Fourier para Señales Discretas Periódicas

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad , \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.4)$$

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\frac{2\pi}{N}nk} \quad , \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.5)$$

Cuando se tiene una señal analógica con una frecuencia máxima (f_{\max}), ésta debe ser muestreada en un rango de $T_s = \frac{1}{f_s}$, y su respuesta en frecuencia correspondiente se repite cada 2π radianes. En otras palabras, la Transformada de Fourier en el dominio digital llega a ser una versión periódica de la Transformada de Fourier en el dominio analógico. Por esta razón, para señales discretas solo nos interesa el análisis en el rango de $[0, \frac{f_s}{2}]$.

Partiendo de esto y para evitar cualquier distorsión o aliasing de la frecuencia contenida en la señal discreta, y por tanto ser capaces de reconstruir la frecuencia contenida en la señal analógica original, se debe tomar una frecuencia de muestreo $f_s \geq 2f_{\max}$. Esto es conocido como el rango de muestreo de Nyquist; que nos indica que la frecuencia de muestreo deberá ser al menos dos veces la frecuencia más alta de la señal.

3.9.2 Cuantización

Un convertidor A/D tiene un número finito de bits (o resolución). Como resultado de esto tendremos que el resultado de una señal continua será una aproximación de esta representada por valores discretos. Este proceso se llama cuantización. Esta aproximación conlleva errores llamados de ruido cuantificado.¹³

3.10 Reconstrucción de la Señal

Hasta ahora, se ha examinado el proceso de muestreo. Pero es también muy importante entender el proceso inverso, es decir, reconstruir la señal original a partir de las muestras. De acuerdo con el teorema de Nyquist, una señal analógica v_a puede ser reconstruida a partir de sus muestras utilizando la siguiente ecuación:¹³

$$v_a(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} v_a[kT_s] \left[\text{sinc} \left(\frac{t - kT_s}{T_s} \right) \right] \quad (3.6)$$

Como se puede observar, la reconstrucción de la señal está basada en la sumatoria del desplazamiento de la función Sinc. En la Figura 3.4 se puede observar éste proceso, la señal punteada, es la señal a reconstruir, los puntos rojos son las muestras de la señal. La reconstrucción teórica resulta de la suma de la función sinc y sus versiones correspondientes desplazadas en el tiempo, las cuales podemos observar en color azul, verde, naranja y morado. El máximo de cada función sinc pasa por el punto rojo que corresponde a la muestra de la señal.

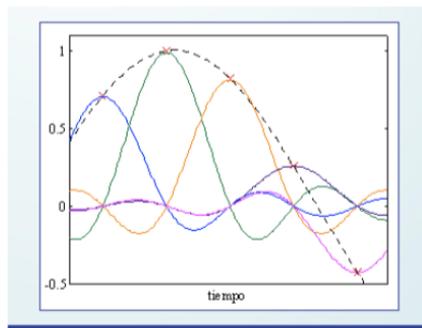


Figura 3.4: Reconstrucción de una Señal Analógica Sinusoidal a Partir de sus Muestras.

3.11 Reconstrucción de la Señal utilizando LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) es un entorno de programación gráfico desarrollado por National Instruments (NI) que permite desarrollar sistemas de un alto nivel de diseño. Utiliza un lenguaje de programación gráfica para crear los llamados bloques de instrumentación virtual (VI) en forma de un diagrama de flujo intuitivo. Un diseño es desarrollado con la interacción de diferentes bloques, componentes o sub-sistemas dentro de un marco gráfico. LabVIEW proporciona adquisición de datos, análisis, y características visuales muy adecuadas para el diseño de sistemas con DSP's. Es también muy accesible para trabajar con MATLAB.¹¹

3.11.1 Voltaje (220 Vrms)

Ahora bien, ¿Porqué es necesario la reconstrucción de la señal?. La Figura 3.5 nos muestra la señal de voltaje que está siendo adquirida con el equipo DAQ cFP 2120. Como se puede observar, es una señal deformada, es una señal que es necesario reconstruir para poderla visualizar y procesar adecuadamente.

Para iniciar con el proceso de reconstrucción de la señal de voltaje, se utiliza la ecuación (3.6) que no es otra cosa, mas que la operación de sumatoria con una función *Sinc*.

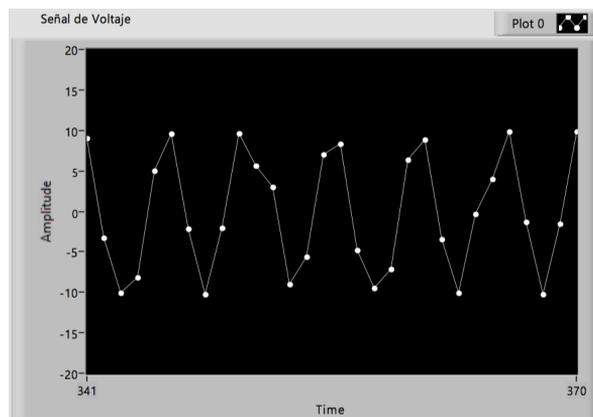


Figura 3.5: Señal de Voltaje Adquirida con el cFP 2120

Para la construcción de la VI, se toman los valores característicos de la onda sinusoidal de voltaje que nos entrega el sensor de voltaje (divisor resistivo de voltaje), el cuál proporciona una señal de aproximadamente 7.8 Vrms ($7.8V \times 1.414 = 11.03 V_p$) a una frecuencia de 60 Hz para una señal de voltaje de entrada de 220 Vrms. (Voltaje de fase). Es importante recalcar, que se debe seleccionar el rango de voltaje adecuado en el canal que se está utilizando para la adquisición de la señal (AI 102). Por ejemplo, para la señal de $11.03 V_p$ se ha seleccionado un rango de canal de $\pm 20 V$, lo cuál nos da margen por si la señal de voltaje sube inesperadamente. La Figura 3.6 muestra la señal de voltaje reconstruida, la función sinc y el número de ceros insertados.

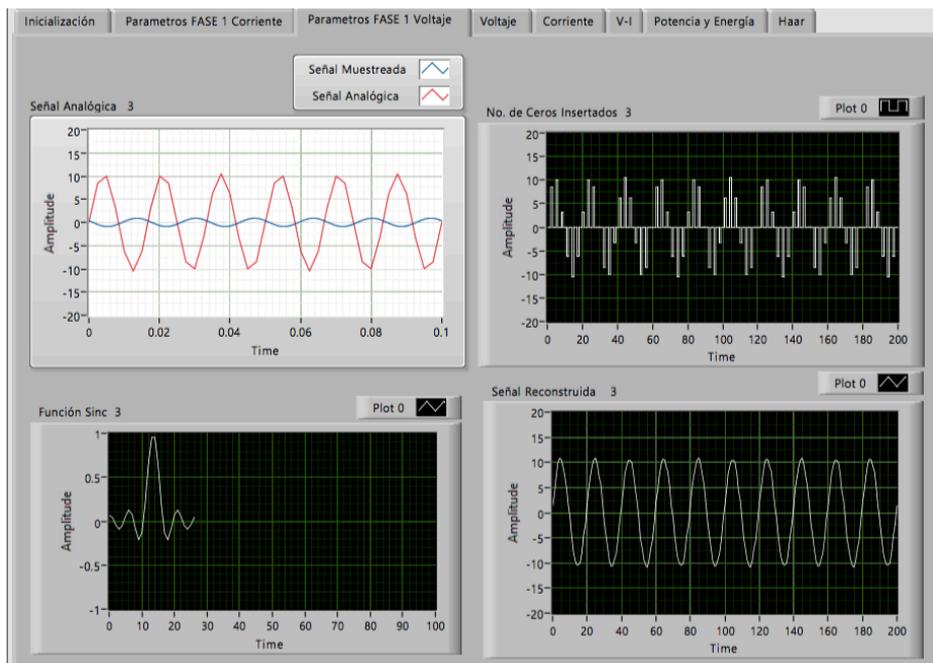


Figura 3.6: Señal de Voltaje Reconstruida

En el Apéndice C se encuentra el Diagrama de Bloques del sistema de reconstrucción de señal. En él se pueden observar dos Sub-VIs personalizadas. La Sub-VI *Add Zeros*, la cuál es utilizada para insertar ceros entre muestras consecutivas para simular un sobre muestreo, y la Sub-VI *Sinc Function*, que es utilizada para generar muestras de una función *Sinc* de un número específico de cruces por cero.

Sub-VI Add Zeros. Filas de ceros están concatenadas en un arreglo de dimensión 1D. Un arreglo 2D se transpone y se re-configura a un arreglo 1D para que los ceros sean localizados (insertados) entre las muestras. El numero de ceros insertados entre las muestras puede ser controlado a través de un control numérico. La forma de onda de salida mostrada en el diagrama de bloques toma su entrada desde otra

VI y es creada haciendo click derecho en la función Get Waveform Components y escogiendo *create >> control*. La salida del VI comprende el arreglo de muestras de ceros insertados y el número total de muestras.

Sub-VI de la Función Sinc. Genera muestras de una función sinc a partir de un número de muestras, retraso, y parámetros de intervalo de muestreo.

Ambas Sub-VIs (Add Zeros y Función Sinc), se convolucionan utilizando la función Convolution VI. (*Function >> SignalProcessing >> Convolution*).

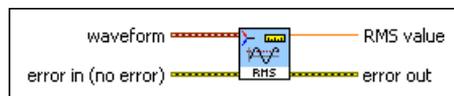
3.11.2 Corriente

Para la reconstrucción de la señal de corriente, se utiliza exactamente el mismo procedimiento que se siguió para la reconstrucción de la señal de voltaje, la única diferencia, es que ahora utilizaremos otro canal de adquisición (módulo AI 110) y el rango de la señal de entrada del canal dependerá de la señal de corriente que se esté midiendo. Para verificar dicho valor, antes de correr la aplicación deberemos asegurarnos en la ventana de *Measurement & Automation Explorer*(MAX) de LabVIEW, cuál es el valor máximo de corriente que es registrado por el transductor de corriente, para seleccionar adecuadamente el rango de entrada del canal.

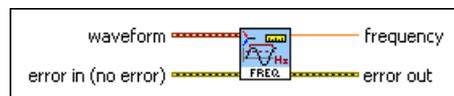
3.12 Potencia y Energía

Una vez que ya tenemos las señales de voltaje y de corriente se utiliza la paleta de **Electrical Power Suite** para LabVIEW previamente descargada. De aquí se seleccionan los siguientes bloques para realizar el análisis de las señales:

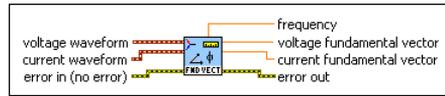
RMS.vi. *Es un bloque* que calcula el valor RMS de la señal de voltaje y/o de la señal de corriente, según se requiera.



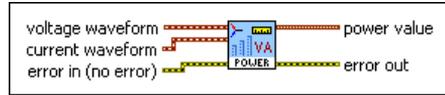
Frecuencia.vi. *Es un bloque* que calcula la frecuencia fundamental de la señal de voltaje.



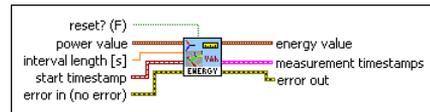
Fundamental Vector.vi. *Es un bloque que calcula el vector fundamental de la señal de voltaje y la señal de corriente.*



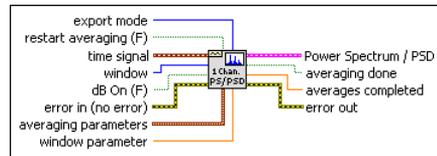
Power.vi. *Es un bloque que calcula los valores de potencia, los cuáles dependen de las señales de entrada de voltaje y de corriente. Nos entrega Potencia Activa en *Watts*, Potencia Aparente en *Volts-Amperes* y Potencia Reactiva en *Volts-Amperes-Reactivos*.*



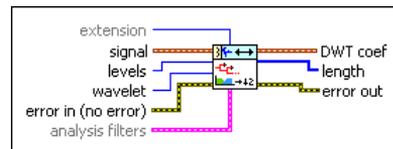
Energi.vi. *Es un bloque que calcula los valores de energía de la potencia en un tiempo específico. Nos entrega Energía Activa en *Wh*, Energía Aparente en *VAh* y Energía Reactiva en *VARh*.*



FFT.vi. *Es el bloque de la Transformada Rápida de Fourier, el cuál nos muestra el análisis de la señal en frecuencia.*



DWT.vi. *Es el bloque de la Transformada Discreta de Wavelet (Haar), el cuál nos da un análisis de la señal de voltaje en tiempo y frecuencia. Se utiliza para detectar fallas y/o perturbaciones en la señal.*



En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de flujo utilizado para la programación del sistema.

En el Apéndice C se encuentra el diagrama de bloques de la programación completa del sistema.

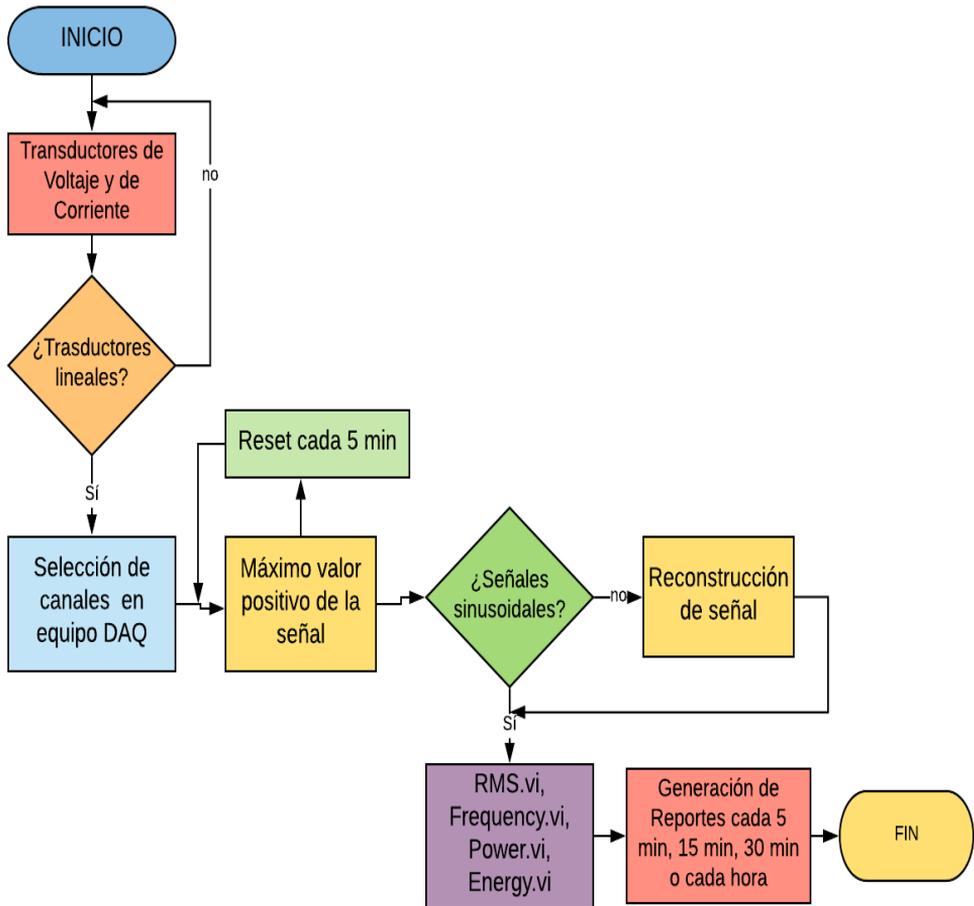


Figura 3.7: Diagrama de Flujo del sistema

4

PROTOTIPO, PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se muestran pruebas y resultados del sistema, así como también un análisis de la calidad de la energía mediante la Transformada Discreta de Wavelet (Haar).

Contenido

4.1 Pruebas y Resultados	42
4.1.1 Inversor Fase 1	42
4.1.2 Inversor Fase 2	45
4.1.3 Subestación Eléctrica	47
4.2 Transformada Discreta de Wavelet u Ondeleta	49
4.2.1 Dominio en tiempo-frecuencia	50
4.2.2 Análisis de Calidad de Energía	51

4.1 Pruebas y Resultados

Para la presentación de las pruebas del sistema, se han seleccionado tres puntos de monitoreo para realizar las mediciones de potencia y visualización de gráficos. El primero de ellos, es el inversor del sistema de paneles solares que se encuentra en el almacén del IICO (fase 1), el segundo, es el inversor del segundo módulo de paneles solares, el cuál se encuentra localizado en la parte posterior del laboratorio de computación (fase 2) y el tercer punto de medición es la acometida eléctrica de llegada. En cada uno de estos puntos estratégicos para realizar mediciones se han hecho instalaciones eléctricas adecuadas para trabajar con seguridad y evitar cualquier riesgo o accidente durante el período de pruebas.

Para garantizar el óptimo funcionamiento del sistema, antes de correr el programa se debe verificar que los sensores de voltaje y corriente estén debidamente conectados y visualizar los valores máximos de corriente y voltaje que los transductores proporcionan, (esto se puede realizar abriendo la ventana de *Measurement & Automation Explorer* MAX de labVIEW) con el fin de asegurar que los rangos de medición de los canales del cFP-2120 sean los adecuados. Si por alguna razón la medición sobrepasa el rango de medición del canal que está adquiriendo los datos, el rango debe ser aumentado. Una vez que los datos anteriores son verificados se procede a correr el programa.

4.1.1 Inversor Fase 1

Los paneles solares de ésta fase se encuentran sobre el edificio B del IICO.

Pasos para el arranque del sistema:

- Encienda el switch principal del sistema (esto energizará cada uno de los componentes, debe de esperar un minuto aproximadamente para que el cFP realice un barrido de inicialización).
- Conecte la PC al equipo de medición mediante el cable de ethernet.
- Abra el lazo del sensor de corriente y abra el cable por el cuál circula la corriente a monitorear.
- Conecte el cable del sensor de voltaje a 220 V

- Antes de correr el programa en LabVIEW, ajuste los parámetros de inicialización como se muestra en la Figura 4.1. Los parámetros se encuentran localizados en la pestaña de *Inicialización* del panel frontal, los cuáles, para facilidad del usuario, ya se encuentran fijos en el programa cada vez que éste se arranca, pero pueden ser modificados en cualquier momento si es requerido.
- Corra el programa de LabVIEW.



Figura 4.1: Parámetros de Inicialización

La Figura 4.2 muestran las señales de voltaje y corriente de las mediciones hechas en el Inversor ubicado en el almacén, como se puede observar, la señal de voltaje es de 302 V pico, lo cual equivale a los 214 V_{RMS} de la línea ($214 V_{RMS} \times 1.414 = 302.566 V_p$) y una corriente de 24 A_{pico} que equivale a una corriente de 17 A_{RMS} . Esta gráfica se visualiza al dar click en la pestaña *V-I* del panel frontal del sistema.

La Figura 4.3 Muestra la señal de corriente de 24 A_{pico} que está siendo medida, aquí se aprecia la señal más grande, ya que la escala de la gráfica que la muestra es mucho más pequeña que las escala de la Figura 4.2 . Esta gráfica puede ser localizada en la pestaña de *Corriente* del panel frontal del sistema.

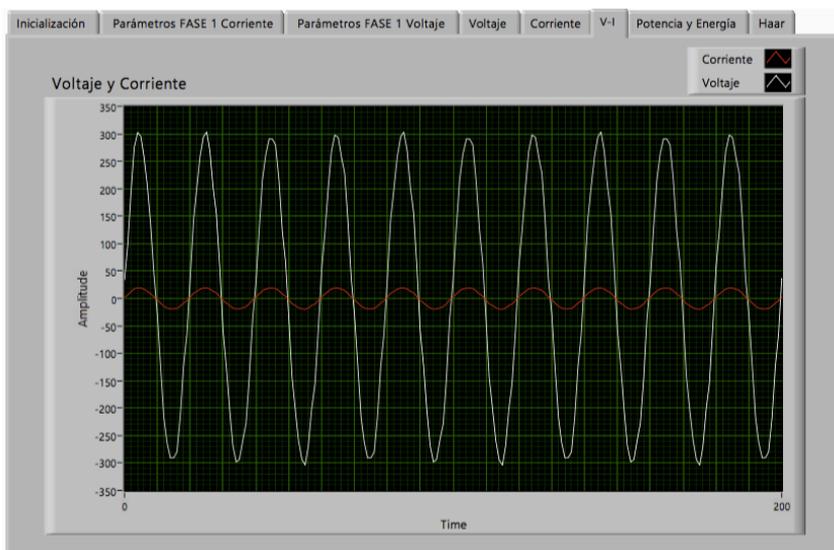


Figura 4.2: Señal de Voltaje y Corriente

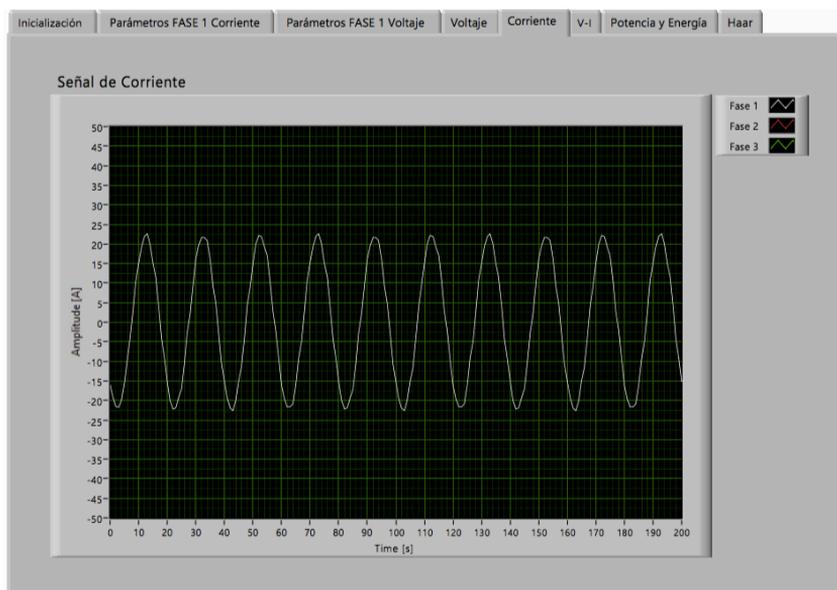


Figura 4.3: Señal de Corriente

4.1.2 Inversor Fase 2

Los paneles solares de esta fase se encuentran localizados sobre el edificio C del IICO.

Siga los pasos para el arranque que se especifican en el Inversor Fase 1.

En la Figura 4.4 se puede observar la señal de voltaje (302 V pico), además de un análisis de frecuencia realizado mediante la transformada rápida de Fourier, donde se puede apreciar que la señal analizada es de 60 Hz. Esta gráfica puede ser observada al dar click en la pestaña de *Voltaje* del panel frontal del sistema.

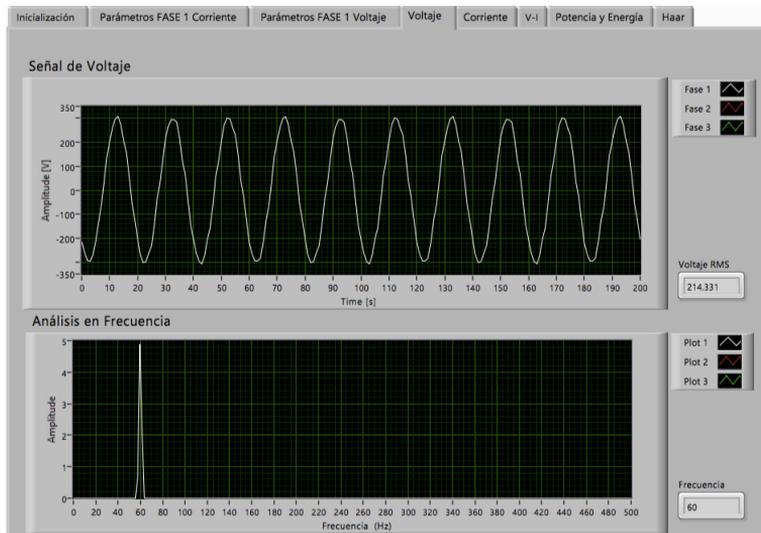


Figura 4.4: Señal de Voltaje

La Figura 4.5 Muestra las señales de Voltaje y de Corriente en una sola gráfica. Aquí podemos observar que las señales se encuentran en fase.

En la Figura 4.6 se observa un análisis con la Transformada Discreta de Haar en 6 niveles, se puede apreciar que la señal está a un voltaje pico constante y en el *eje x* observamos el análisis en frecuencia de la señal (a los 60 Hz se aprecia un pico más alto).

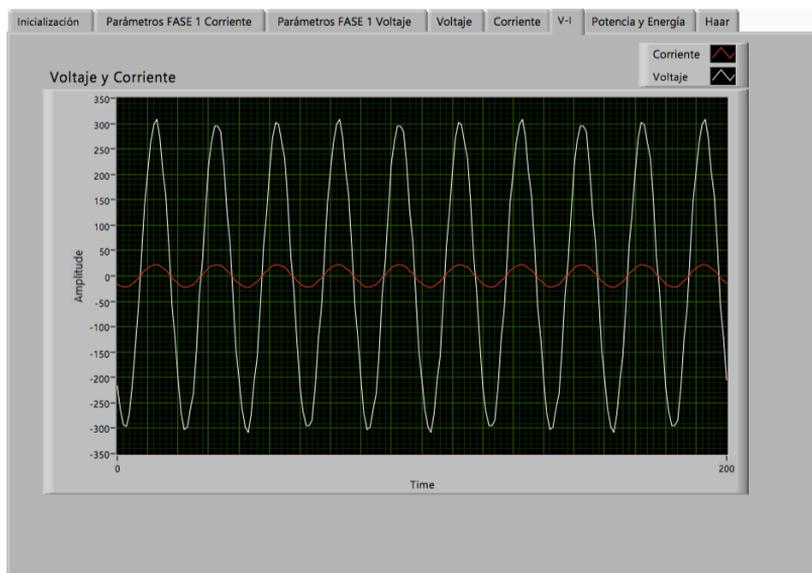


Figura 4.5: Señal de Voltaje y Corriente

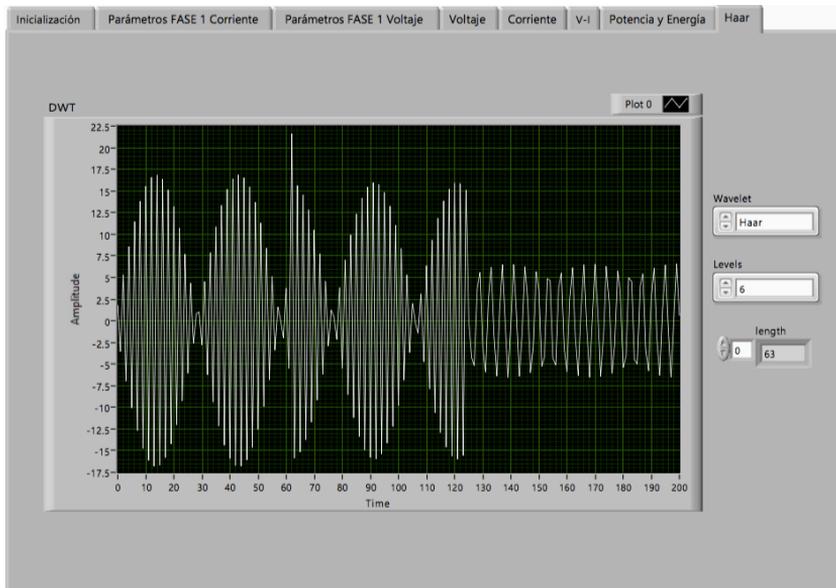


Figura 4.6: Análisis con la Transformada Discreta de Haar

4.1.3 Subestación Eléctrica

Siga los pasos de arranque de sistema que se especifican en la sección del Inversor Fase 1.

La Figura 4.7 muestra la pantalla de inicialización de los parámetros para el arranque del sistema, y si observamos con cuidado, podemos ver que son los mismos parámetros predeterminados que se utilizaron en las mediciones anteriores. El control deslizante *Oversample rate* indica la cantidad de ceros que se están insertando para la reconstrucción de la señal, y con el control numérico denominado *# de Periodo Función Sinc*, se puede modificar el periodo de la función Sinc, también utilizado para la reconstrucción de la señal. En ésta pantalla, también se selecciona el voltaje de la señal por analizar, el periodo de tiempo que se desea para la generación de reportes, así como el número de muestras de la señal.

NOTA: Los reportes se pueden generar cada 5 min, cada 15 min, cada 30 min o cada hora. Esto es muy conveniente, ya que podemos tener registros rápidos de la energía generada.

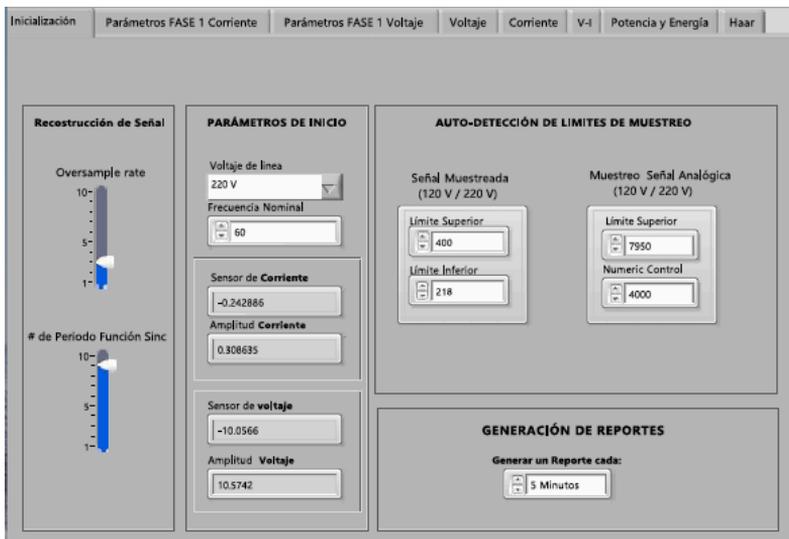


Figura 4.7: Parámetros de inicio para correr el sistema

En la Figura 4.8 se muestran las señales de voltaje y de corriente en una sola gráfica, aquí se puede observar que las señales están fuera de fase (desfasadas) la una de la otra.

La Figura 4.9 muestra la pantalla de Potencia y Energía, la cuál podemos localizar al dar click en la pestaña de *Potencia y Energía* del panel frontal del sistema. En

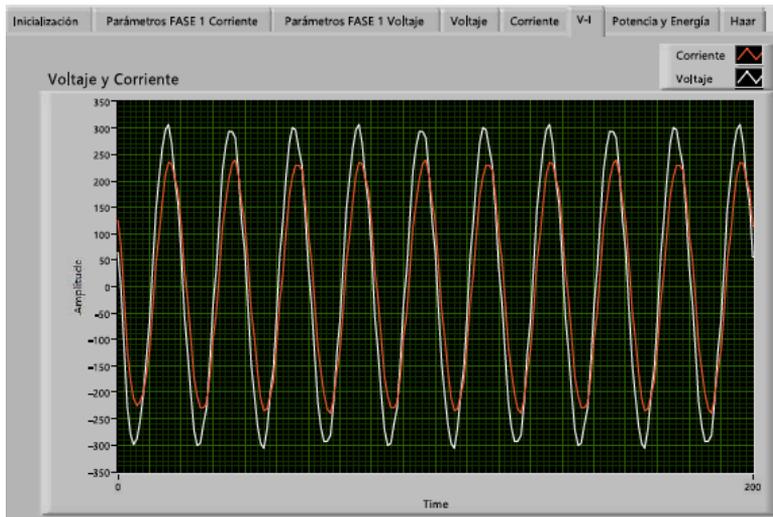


Figura 4.8: Gráfica de Señales de Voltaje y Corriente

ésta pantalla se encuentra el cluster que contiene los valores de Potencia Activa, Potencia Aparente, Potencia Reactiva y el Factor de potencia. Cada uno de estos valores son en tiempo real.

El cluster que contiene los valores de energía, nos muestra, la Energía Activa en Wh, Energía Aparente en VAh y Energía Reactiva en VARh que se está generando, también en tiempo real.

El Indicador de potencia muestra el vector de potencia que se genera a partir de los vectores de las señales de voltaje y corriente. Y en el apartado de Generación de Reportes se puede observar el tiempo transcurrido en segundos a partir de que corremos el sistema, éste tiempo vuelve a cero cada vez que se cumple el periodo de generación de reportes seleccionado en la pantalla de inicialización, es decir, si se selecciona un periodo de generación de reportes cada 5 min, equivale a decir que el indicador de tiempo transcurrido contara un lapso de $5 \times 60 = 300$ segundos y luego inicia nuevamente en cero para contar otros 300 seg (5 min) para generar otra impresión de reporte y así sucesivamente.

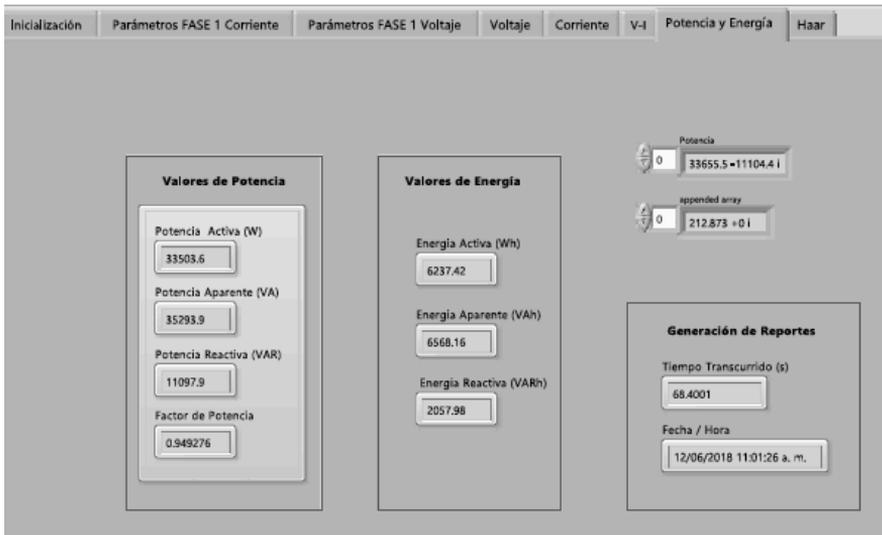


Figura 4.9: Parámetros de Potencia y Energía

4.2 Transformada Discreta de Wavelet u Ondeleta

La Transformada de Wavelet u Ondeleta (*DWT*) es una eficiente herramienta que permite el análisis local de señales no estacionarias y de tránsito rápido, actúan de manera similar a la transformada de Fourier *ventaneada* mapeando la señal en una representación de tiempo-frecuencia-escala. Una de las diferencias marcadas que tiene la transformada de Wavelet u ondeleta es un análisis multi-resolución que permite dilatar las ventanas según el tipo de frecuencia que se quiere analizar, en el caso de frecuencias de mayor rango, se usan ventanas angostas, y para las de menor rango, se usan ventanas anchas. Las *wavelets u ondeletas* son funciones base de la transformada, que son generadas de una función *ondeleta madre* mediante traslaciones y dilataciones y ésto permite la reconstrucción de la señal a partir de la *Transformada Wavelet Inversa*.¹⁴

La Transformada Discreta de Wavelet u ondeleta (*DWT*), se utiliza debido a que las señales que se presentan cotidianamente no son de carácter continuo, si no por el contrario, son deformaciones punto a punto (discretizadas), es por ello, que para su análisis se hace necesario realizar un conjunto finito de valores a través de una aproximación por sumatorias que permiten presentar la señal por medio de funciones elementales acompañadas de coeficientes.

La Figura 4.10 muestra un ejemplo de una descomposición de la transformada discreta de wavelet en 3 niveles. $G_1(z)$ denota que la señal pasa a través de un filtro pasa altas. $G_0(z)$ denota que la señal pasa a través de un filtro pasa bajas. $G_1(z)$ y $G_0(z)$ forman el análisis del banco de filtrado. $\downarrow 2$ denota una atenuación de la señal con un factor de 2.

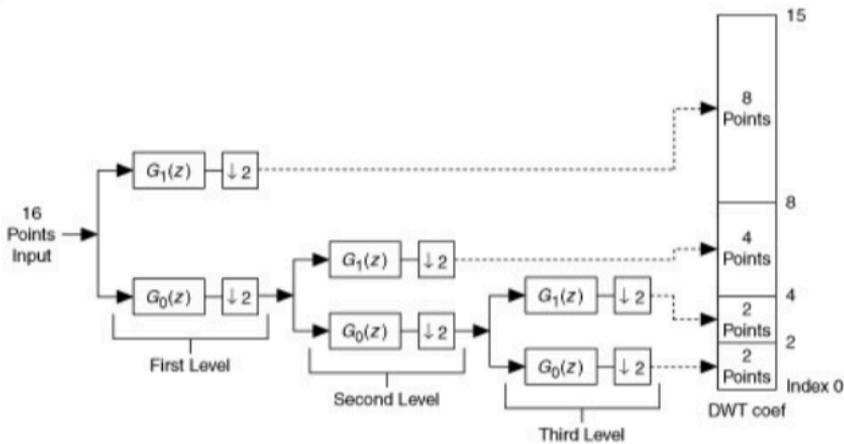


Figura 4.10: Diagrama de un Análisis Multiresolución. Se puede observar que los coeficientes de salida de DWT, es la aproximación de los coeficientes del nivel más alto y el detalle de los coeficientes de cada nivel. También se pueden observar los elementos de salida.

4.2.1 Dominio en tiempo-frecuencia

Un análisis con transformada wavelet u ondeleta es una herramienta para convertir una señal en el dominio del tiempo a una señal en el dominio de tiempo-frecuencia y traerla de vuelta. Como las señales base son de naturaleza transitoria y corresponden a una parte del espectro, somos capaces de localizar un evento en el dominio del tiempo. Una segunda observación es que el espectro de la señal se divide en partes desiguales. Esto se adecua al análisis de la señal ya que un ancho de banda más largo e intervalos de tiempo más cortos son apropiados para detectar una componente de alta frecuencia y viceversa. Estas son las dos características principales del análisis de la transformada de wavelet, y las ventajas de la DWT en en análisis de la señales se derivan de estas características.¹⁴

4.2.2 Análisis de Calidad de Energía

Hablar de calidad de energía es equivalente a decir calidad en la señal de voltaje suministrada. Esto se refiere a que la señal de voltaje debe presentar el menor número de perturbaciones posibles durante el suministro.¹⁵ Una *perturbación* es cualquier ocurrencia manifestada en desviaciones de corriente, de voltaje o de frecuencia en un intervalo de tiempo determinado, que ocasionan fallas o salidas de operación de los equipos eléctricos.

$$\text{Calidad de Energía} = \text{Calidad en la Señal de Voltaje}$$

Algunas de las perturbaciones que se presentan con mayor frecuencia en una señal de voltaje, son las siguientes:

- *Sags*. Un Sag o variación de corta duración, es un hundimiento en la forma de onda sinusoidal de tensión, el cuál puede variar entre 10 % y 90 % del valor registrado en la operación normal y puede tener una duración entre 8.3 ms y 60 s. Esta clase de perturbación puede deberse a corrientes elevadas, corto circuito, o entrada en operación de grandes cargas eléctricas.
- *Swell*. Un swell es un elevamiento en la forma de onda sinusoidal que está por arriba del 110 % del valor registrado en la operación normal y puede tener una duración entre 8.3 ms y 60 s. Esta clase de perturbación puede deberse a un corto circuito o a la salida de operación de grandes cargas eléctricas, y tiene como efecto el daño parcial o total de equipos o instalaciones, incremento súbito de la iluminación y/o entrada de las protecciones de la red eléctrica.
- *Flicker*. Los Flickers o parpadeos son variaciones permanentes en la onda de tensión que están por abajo o por arriba de los rangos establecidos, y son percibidos por el ojo humano a través del sistema de iluminación. Este fenómeno es producido por variaciones repentinas en el voltaje debido a la conexión de equipos que demandan grandes potencias.
- *Armónicos*. Se llama armónico a la tensión sinusoidal cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación del sistema. Estas señales dentro de la onda de voltaje provocan distorsiones en la misma.
- *Variaciones de Frecuencia*. Son alteraciones de la frecuencia medidas en promedios de 10 segundos, estas variaciones provocan el incorrecto funcionamiento de los motores eléctricos, tanto asíncronos como síncronos; aparatos electrodomésticos, etc.

- *% de Corriente Directa en la señal (DC)* . En ocasiones, la señal de voltaje puede traer un porcentaje de corriente directa y ésto se observa cuando la señal sinusoidal viene *montada* sobre ésta, aparentando ser de una amplitud mayor.

Con el fin de hacer una interpretación del análisis de las perturbaciones descritas con anterioridad, el **Apéndice D** muestra una simulación realizada a señales sinusoidales que presentan dichas perturbaciones y los resultados obtenidos después del análisis con la Transformada Discreta de Wavelet u Ondeleta.

5

ALCANCES Y CONCLUSIONES

En este capítulo se exponen los alcances que tiene el presenta trabajo de tesis, así como del equipo diseñado. También se especifican los trabajos futuros del sistema y se describen los beneficios del mismo.

Contenido

5.1	Alcances	54
5.2	Conclusiones	54
5.3	Posibles ampliaciones del sistema	55

5.1 Alcances

- Sabemos que los gastos energéticos son una parte importante del costo operativo total, es por ello que varias empresas están recurriendo a la utilización de generación de energía limpia o paneles solares para disminuir éstos costos. Un analizador de potencia nos permite saber de forma precisa cuanta energía se está generando y a la vez inyectando a la red.
- También es posible utilizar éste equipo para detectar los elementos que tengan un alto consumo de energía, para realizar una reducción de cargas en los periodos de tiempo donde la tarifa es mas alta.
- Ayuda a tener un parámetro de comparación con la cantidad de energía que está cobrando la compañía que proporciona el servicio y en un momento dado, si la diferencia es considerable solicitar una revisión o cambio del equipo de medición.
- La captura y análisis de datos durante un amplio periodo de tiempo ayuda a resolver problemas de calidad de energía.

5.2 Conclusiones

- El diseño del sistema presentado, proporciona mediciones *precisas y en tiempo real* de parámetros de potencia y energía eléctrica, que fungieron como objetivo general del trabajo de tesis. Los clusters que proporcionan dicha información incluyen un desglose de dichos parámetros, ya que podemos visualizar los datos de potencia aparente, activa y reactiva, energía aparente, activa y reactiva y el factor de potencia.
- El sistema nos da un acceso directo a la visualización de gráficas de las señales de voltaje y corriente en tiempo real, así como valores RMS y análisis de frecuencia.
- El almacenamiento de datos de medición durante periodos prolongados de tiempo, permitirá realizar un análisis de los mismos para que en un momento dado, si así se requiere, sean una herramientas para toma de decisiones.

- La generación de reportes resulta una herramienta muy útil porque permite evaluar periodos específicos de generación o consumo de energía, que también facilita la toma de decisiones.
- Otra ventaja, no menos importante, es la movilidad del equipo, ya que éste puede ser trasladado con facilidad de un punto de medición a otro.

5.3**Posibles ampliaciones del sistema**

- Diseñar un método de calibración con un patrón de referencia o laboratorio de metrología certificado.
- Complementar el sistema actual para poder realizar mediciones de potencia trifásica.
- Monitoreo de parámetros de temperatura y humedad son factibles y el equipo de adquisición de datos facilita éste proceso.
- Manejo inteligente de entrada y salida de cargas. La entrada y salida de cargas eléctricas dependiendo con la cantidad de energía que generen los paneles solares es un proceso viable y recomendado para bajar costos. Las cargas eléctricas de mayor consumo de energía pueden ser programadas para entrar cuando la tarifa de consumo es mas baja y/o la generación de energía eléctrica es mas alta.

A

APENDICE

Transductores de Voltaje y Corriente

Contenido

A.1 Transductor de Voltaje	57
A.2 Transductor de Corriente	57

A.1 Transductor de Voltaje

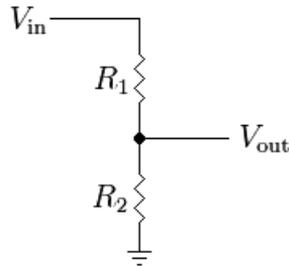


Figura A.1: Divisor de Voltaje utilizado para reducir el voltaje de fase de 220V
 Donde: $R_1 = 12k\Omega$, $R_2 = 330k\Omega$, $V_{in} = 220V$ y $V_{out} = 7.8V$

A.2 Transductor de Corriente

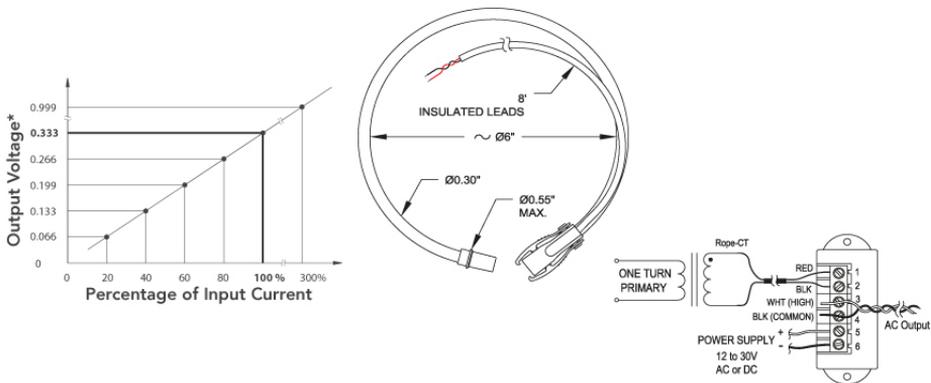


Figura A.2: RCT-1800 Rogowski Coil w/ Integrator by Magnelab

B

APENDICE

Compact Field Point 2120 (cFP 2120)

Contenido

B.1	cFP 2120	59
B.2	Entradas Analógicas de Voltaje (AI-102) Terminales . .	59
B.2.1	Entradas Analógicas de Voltaje (AI-102) Un solo Canal . .	60
B.2.2	Conexión de Entradas Analógicas de Voltaje (AI-102) . .	60
B.2.3	Entradas Analógicas de Voltaje (AI-110)	61
B.2.4	Medición de Voltaje con el Módulo AI-110	61

B.1 cFP 2120

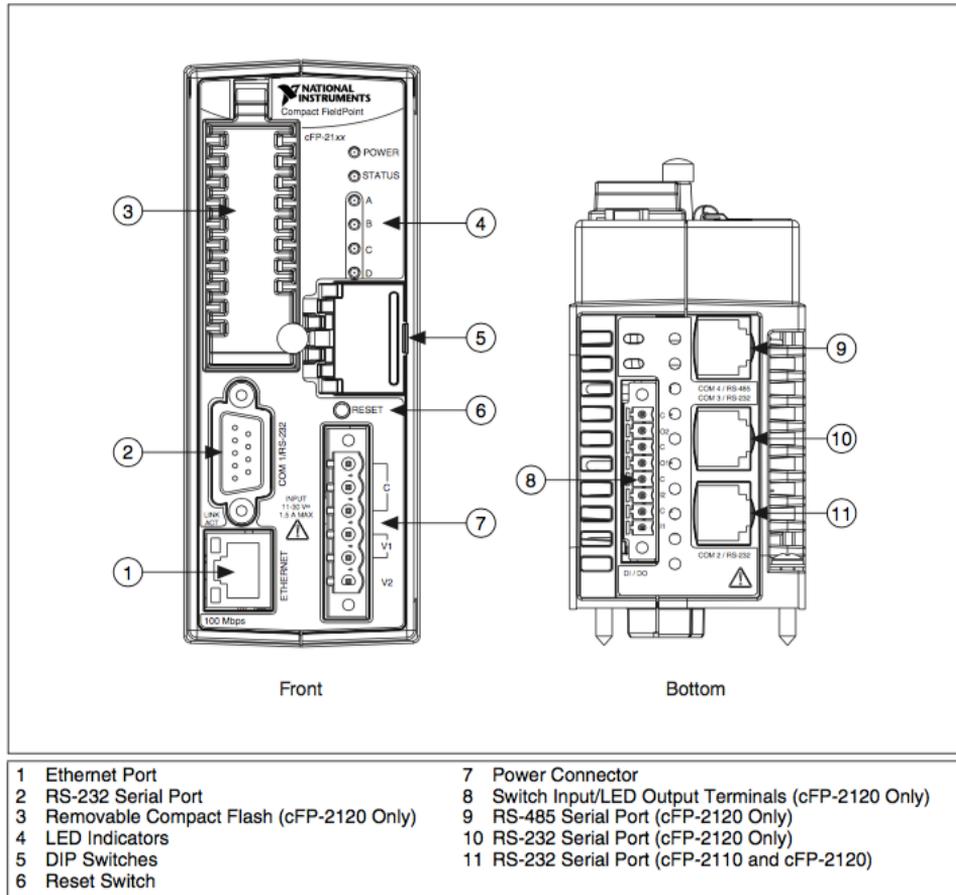


Figura B.1: Diagrama de Localización de Partes cFP 21XX

B.2 Entradas Analógicas de Voltaje (AI-102) Terminales

Cada canal tiene una terminal (V_{in}) para el voltaje de entrada. Los 8 canales de entrada comparten la terminal común (COM) como se muestra en la Tabla de Asignación de Terminales.

Table 1. Terminal Assignments

Channel	Terminal Numbers		
	V _{in}	V _{sup}	COM
0	1	17	2, 18
1	3	19	4, 20
2	5	21	6, 22
3	7	23	8, 24
4	9	25	10, 26
5	11	27	12, 28
6	13	29	14, 30
7	15	31	16, 32

Figura B.2: Tabla de Asignación de Terminales

B.2.1 Entradas Analógicas de Voltaje (AI-102) Un solo Canal

Los rangos por canal de la señal de entrada de voltaje son: 0-20, 0-60, 0-120, ±20, ±60, ±120 V. Conecte el positivo a la entrada (V_{in}) y el negativo a la entrada (COM).

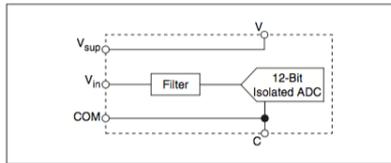


Figura B.3: Circuito de Entrada Analógica. Un solo Canal

B.2.2 Conexión de Entradas Analógicas de Voltaje (AI-102)

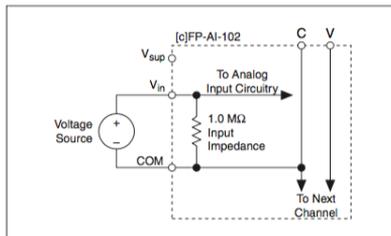


Figura B.4: Señal de Voltaje sin Suministro Externo de Alimentación

B.2.3 Entradas Analógicas de Voltaje (AI-110)

El módulo AI-110 cuenta con 8 canales, todos ellos comparten la misma terminal de tierra (GND). Este módulo puede ser programado para aceptar entradas de voltaje o de corriente (pero no las dos a la vez). En este proyecto se está trabajando con los canales programados para medición de voltaje, ya que el transductor de corriente que se está utilizando, nos entrega una salida de voltaje de CA. Los rangos de los canales son los siguientes: de 0-1 V, 0-5 V, 0-10 V, $\pm 60\text{ mV}$, $\pm 300\text{ mV}$, $\pm 1\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$ y $\pm 10\text{ V}$.

Table 1. Terminal Assignments

Channel	Terminal Numbers			
	V_{IN}^1	I_{IN}^2	V_{SUP}^3	COM
0	1	2	17	18
1	3	4	19	20
2	5	6	21	22
3	7	8	23	24
4	9	10	25	26
5	11	12	27	28
6	13	14	29	30
7	15	16	31	32

¹ Install a 2 A, fast-acting fuse on each V_{IN} terminal.
² Install a 2 A, fast-acting fuse on each I_{IN} terminal.
³ Install a 2 A maximum, fast-acting fuse on each V_{SUP} terminal.

Figura B.5: Tabla de Asignación de Terminales

B.2.4 Medición de Voltaje con el Módulo AI-110

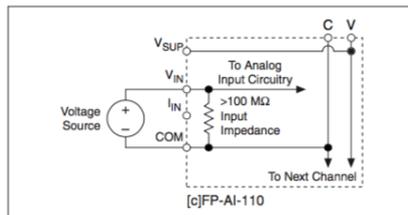


Figura B.6: Diagrama de conexión para el Modulo AI-110

C

APENDICE

Diagramas de Bloques de la Programación en LabVIEW y fotografías de equipo fabricado (Hardware).

Contenido

C.1	Reconstrucción de la Señal de Voltaje y Corriente . . .	63
C.2	Add Zeros.vi	63
C.3	Función Sinc.vi	63
C.4	Diagrama de Bloques del Sistema Completo	64
C.5	Equipo Analizador de Potencia Fabricado	66

C.1 Reconstrucción de la Señal de Voltaje y Corriente

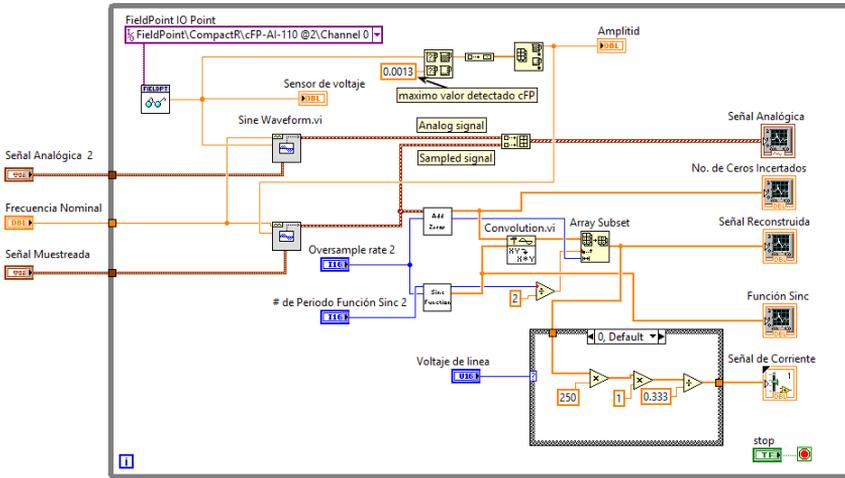


Figura C.1: Diagrama de Bloques de Reconstrucción de la Señal

C.2 Add Zeros.vi

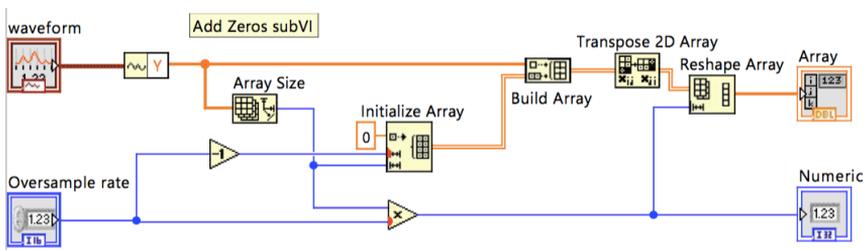


Figura C.2: Diagrama de Bloques Add Zeros.vi

C.3 Función Sinc.vi

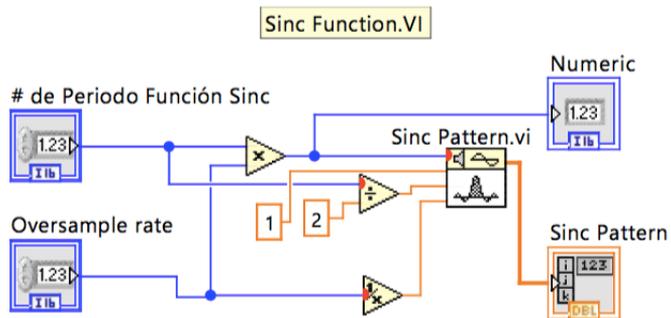


Figura C.3: Diagrama de Bloques Función Sinc.vi

C.4

Diagrama de Bloques del Sistema Completo

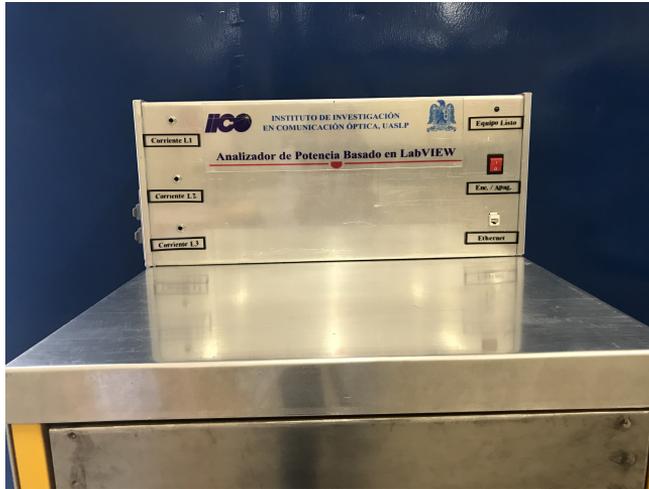
C.5 Equipo Analizador de Potencia Fabricado

Figura C.5: Analizador de Potencia Basado en LabVIEW. Parte frontal del equipo, donde de lado izquierdo se aprecian las terminales para tres fases de corriente y de lado derecho se encuentra un indicador, el interruptor general, y una conexión ethernet.

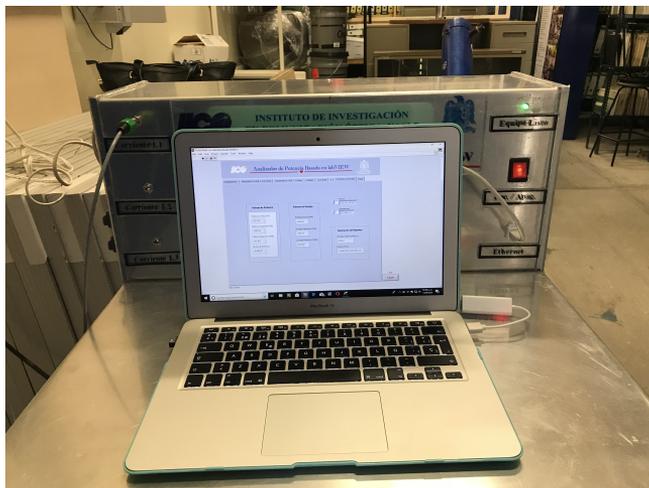


Figura C.6: Analizador de Potencia Basado en LabVIEW trabajando. El equipo se alimenta con 120 V y se comunica con la computadora vía ethernet.

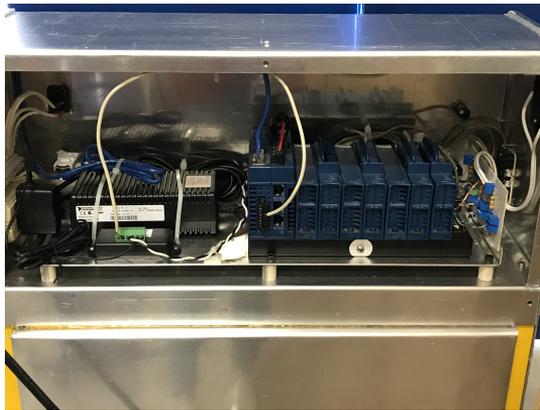


Figura C.7: Parte posterior del equipo donde se pueden apreciar las conexiones realizadas y el cFP 2120.



Figura C.8: Adaptación de los puntos de conexión donde se realizan las mediciones de potencia. Se puede observar que el transductor de corriente *abraza* el cable por el cual circula la corriente a monitorear y el transductor de voltaje está conectado a la línea de 220 V.

D

APENDICE

Simulación de diferentes perturbaciones en la onda de voltaje y los resultados obtenidos con un análisis realizado con la Transformada Discreta Wavelet, utilizando el tool box Wavelet del software Matlab; el análisis se realiza en 1D para señales discretas. Se cargan cada una de las señales simuladas y el análisis se realiza con la wavelet Haar, la cual ofrece un buen comportamiento en la detección de este tipo de fenómenos eléctricos.

Contenido

D.1 Perturbación Sag	69
D.2 Perturbación Swell	70
D.3 Perturbación de Armónicos	71

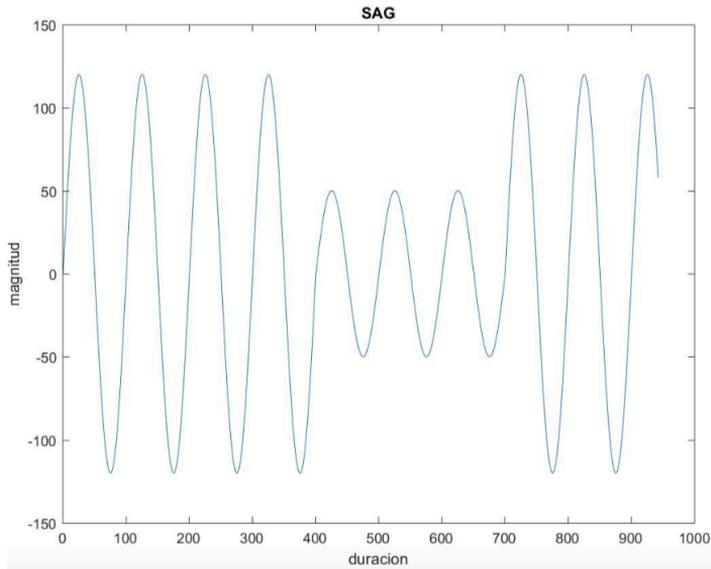
D.1 Perturbación Sag

Figura D.1: Perturbación tipo Sag

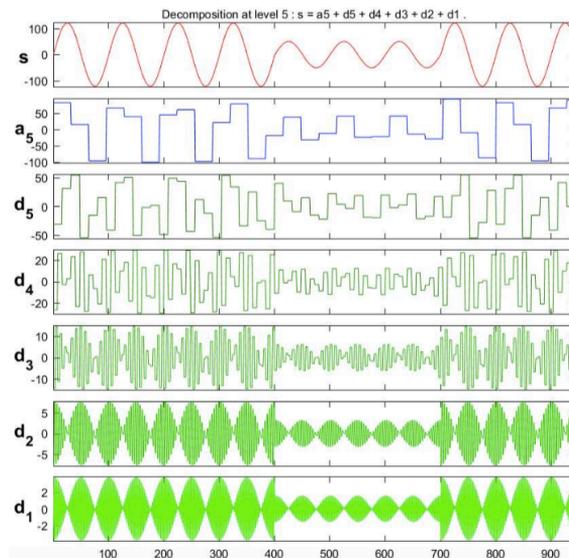


Figura D.2: Análisis con DWT de una Perturbación tipo Sag

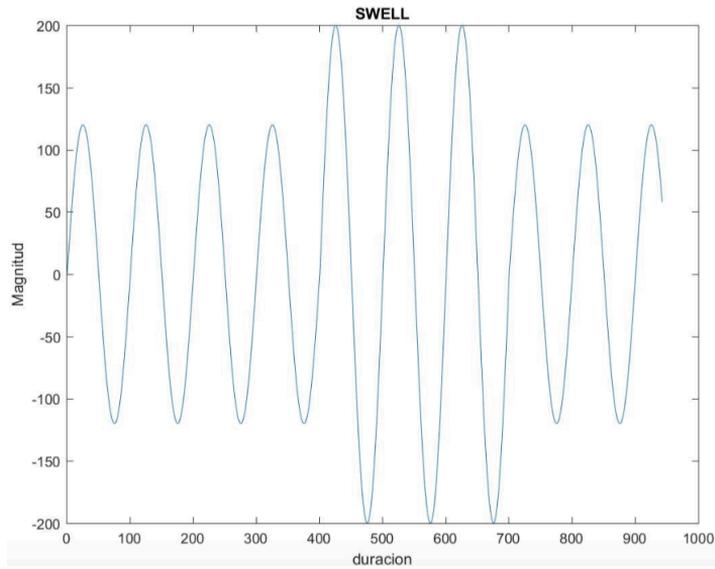
D.2 Perturbación Swell

Figura D.3: Perturbación tipo Swell

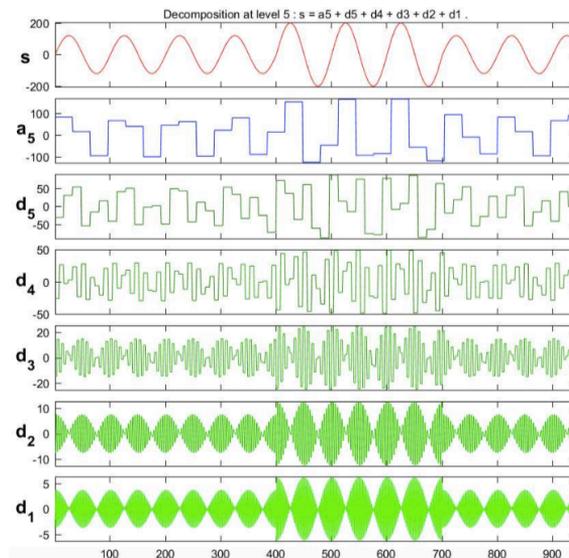


Figura D.4: Análisis con DWT de una Perturbación tipo Swell

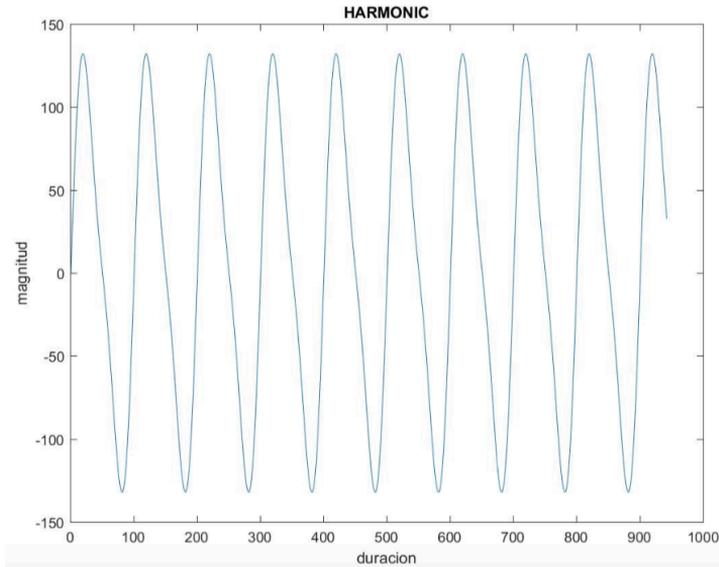
D.3 Perturbación de Armónicos

Figura D.5: Perturbación con Armónicos

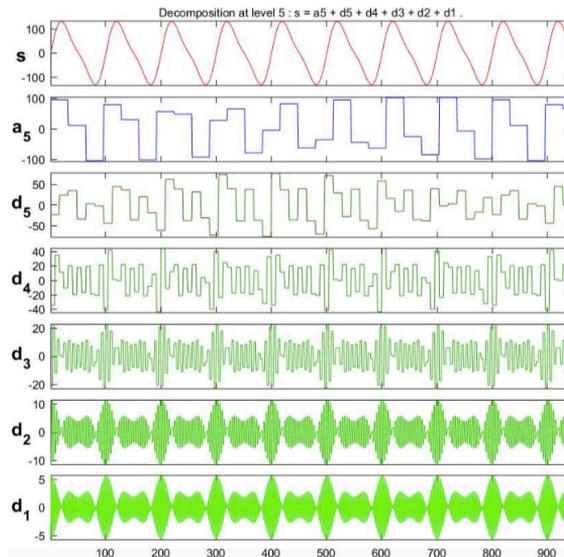


Figura D.6: Análisis con DWT de una Señal con Armónicos

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Olga Moraes Toledo, Dely Oliveira Filho, and Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz. Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1):506–511, 2010.
- [2] Geoff Stapleton and Susan Neill. *Grid-connected solar electric systems: the earthscan expert handbook for planning, design and installation*. Routledge, 2012.
- [3] Fluke. *Analizador*. <https://www.fluke.com/fluke/ares/soluciones/calidad-potencia/notas-de-aplicacion/analizador-trifasico-de-calidad-de-la-energia-serie-430>.
- [4] Leonard L Grigsby. *Electric power generation, transmission, and distribution*. CRC press, 2016.
- [5] National Instruments. *Monitoreo Potencia*, 2009. <https://http://www.ni.com/white-paper/4714/es/>.
- [6] William H Hayt, Jack E Kemmerly, and Steven M Durbin. *Análisis de circuitos en ingeniería*. McGraw-Hill, 1975.
- [7] EDMINISTER JOSEPH. Circuitos eléctricos, serie schaum, 1997.
- [8] AJ Cornejo, Alguacil Polo, Antonio Sánchez, and Natalia Conde. Circuitos eléctricos para la ingeniería. *Editorial Mc Graw Hill, Madrid*, 2004.
- [9] Nasser Kehtarnavaz and Namjin Kim. *Digital signal processing system-level design using LabVIEW*. Elsevier, 2011.
- [10] N Boutana, A Mellit, S Haddad, A Rabhi, and A Massi Pavan. An explicit iv model for photovoltaic module technologies. *Energy Conversion and Management*, 138:400–412, 2017.
- [11] National Instruments. *Adquisición de Datos*, 2009. <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>.
- [12] Roger C Dugan, Mark F McGranaghan, and H Wayne Beaty. Electrical power systems quality. *New York, NY: McGraw-Hill, c1996*, 1996.
- [13] Kehtarnavaz Nasser. Digital signal processing system design labview based hybrid programming, 2008.
- [14] D Sundararajan. *Discrete wavelet transform: a signal processing approach*. John Wiley & Sons, 2016.
- [15] Nestor Javier Campos. *Detección de Perturbaciones*. <https://es.scribd.com/document/286509236/Deteccion-y-Clasificacion-de-perturbaciones-en-calidad-de-potencia/-con-la-transformada-discreta-de-Wavelet>.