

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



**Diseño de un sistema prototipo para Monitorizar la
Calidad de Energía en una subestación eléctrica**

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

Esteban Rivel Hernández

Cartago, 26 de junio, 2013

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

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.


Esteban Rivel Hernández

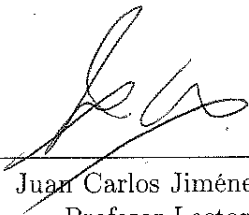
Cartago, June 22, 2013

Céd.: 1-1271-0753

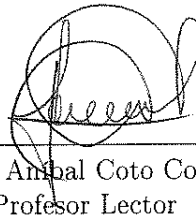
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador

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

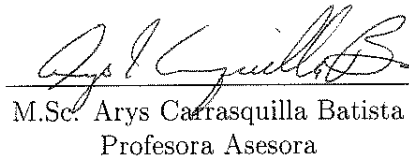
Miembros del Tribunal



Lic. Juan Carlos Jiménez Robles
Profesor Lector



M.Sc. Anibal Coto Cortés
Profesor Lector



M.Sc. Arys Carrasquilla Batista
Profesora Asesora

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

Cartago, June 22, 2013

Resumen

Mediante este proyecto se pretende desarrollar un prototipo de monitorización de calidad de energía el cual este compuesto de una estación maestra de energía en la cual se pueda desplegar en tiempo real la información proporcionada por una sub-estación, por medio de una interfaz gráfica. Los datos son adquiridos y enviados remotamente desde la sub-estación, la cual deberá ser un sistema autónomo sin interfaz gráfica, pero dotada con el equipo necesario para realizar la adquisición de datos. Además de contar con un sistema bajo medición, a este sistema es al que se realizará la monitorización de calidad de energía. Razón por la cual el sistema bajo medición debe ser capaz de generar distorsiones de calidad de energía para que estas distorsiones se reflejen en la interfaz gráfica de la estación maestra.

Para generar una red trifásica a la cual se pueda monitorizar la red, se utilizó un variador de frecuencia y como carga en la red para el sistema bajo medición se utiliza un motor trifásico, inductancia de línea y resistencias.

La sub-estación es un sistema autónomo el cual realiza la adquisición de datos, procesamiento y comunicación con la estación maestra, y luego transmite la forma de onda a la estación maestra, así como valores puntuales de parámetros de calidad de energía mediante el protocolo industrial DNP3.

La estación maestra es la que cuenta con la interfaz grafica para mostrar las variaciones de calidad de energía que se den en el sistema bajo medición, además de desplegar la forma de onda y los parámetros calculados por la sub-estación.

Entre los parámetros de calidad de energía calculados están la potencia real, reactiva, aparente, factor de potencia, frecuencia, tensión RMS, corriente RMS, distorsión armónica total y eventos en la red.

Palabras clave: LabVIEW, calidad de energía, variador de frecuencia, sub-tensión, sobre-tensión, interrupciones, DNP3, MODBUS

Abstract

The objective of this project is to develop an power quality monitoring demo, which is to be composed by an master station, in which can be displayed in real time information given by a sub-station, through a graphic user interface. This data is acquired and sent remotely by said sub-station, which is required to be an autonomous system without graphic interface, but outfitted with the necessary equipment to carry out data acquisition.

The power quality monitoring will be performed to a system under measurement, the system under measurement has to be able to affect and modify the power quality. A variable frequency driver was used in order to generate a tri-phase network to monitor. For the system being measured to load the network, it was used a tri-phase motor, line inductors and resistances.

The sub-station is an autonomous system which carries out data acquisition, processing and communication with the master station, then transmits the waveform to the master station, and also specific values for power quality parameters using the DNP3 industrial protocol.

It is the master station which is outfitted with a graphic user interface to show quality variations in the energy output given by the system under measurement, then displays the waveform and parameters calculated by the sub-station.

Some of the power quality parameters being calculated are: actual power, reactive power, apparent power, power factor, frequency, voltage RMS, current RMS, total harmonic distortion and events in the network.

Keywords: LabVIEW, power quality, variable frequency driver, sag, swell, under voltage, overvoltage, interruption, DNP3, MODBUS

A Dios por darme la fortaleza para seguir adelante a pesar de las adversidades y dificultades.

A mi madre Marta Hernández Herrera, quien ha sido una amiga incondicional y madre a través de mi vida personal y durante mis años de estudio.

A mi padre y amigo, Jorge Rivel Loría, quien lamentablemente no pudo ver el fin de mi carrera en la universidad y la defensa del proyecto de graduación.

Agradecimientos

El presente trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de la empresa National Instruments y las personas que me aceptaron para optar por la oportunidad de realizar mi proyecto de graduación en tan prestigiosa empresa, como los son: Jessica Stape, Esteban Baradin, Carlos O’Farril, Luis Camacho, además de Minor Coto Chavarría quien ha sido un amigo y apoyo durante el periodo de desarrollo del proyecto de graduación. Además, le agradezco a mi profesora asesora M.Sc. Arys Carrasquilla Batista, quien me dio la oportunidad de elaborar este proyecto de graduación.

Esteban Rivel Hernández

Cartago, 26 de junio, 2013

Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Lista de símbolos y abreviaciones	vi
1 Introducción	1
1.1 National Instruments y los prototipos para presentaciones	1
1.2 Prototipo de monitorización de calidad de energía y protocolos de comunicación	1
1.3 Objetivos y estructura del documento	3
2 Marco Teórico	5
2.1 Sistemas SCADA	5
2.1.1 Funciones de un sistema SCADA	5
2.1.2 Componentes y equipos de un sistema SCADA	6
2.2 DNP3	7
2.3 Modbus	7
2.3.1 Estructura del protocolo Modbus	8
2.4 Calidad de energía	8
2.4.1 Eventos y Variaciones	9
2.4.2 Términos y definiciones de calidad de energía	11
2.4.2.1 Variaciones de larga duración	11
2.4.2.2 Interrupciones de larga duración o sostenidas	11
2.4.2.3 Variaciones de corta duración	12
2.4.2.4 Interrupción de corta duración	13
2.4.2.5 Desequilibrio de tensiones	13
2.4.2.6 Distorsión de la forma de onda	13
2.4.2.7 Fluctuaciones de tensión (Flicker)	14
2.4.2.8 Variaciones de frecuencia en el sistema de potencia.	15
2.5 Variadores de frecuencia.	15

3	Prototipo de MCE y protocolos de comunicación	17
3.1	Sub-estación	17
3.1.1	Equipos utilizados en la implementación de la sub-estación . . .	17
3.1.2	Programas para la implementación de la sub-estación	19
3.1.3	Integración de la sub-estación	20
3.2	Estación maestra	21
3.2.1	Programas para la implementación de la estación maestra . . .	21
3.2.2	Implementación de la estación Maestra	22
3.3	Sistema bajo medición	23
3.3.1	Equipos utilizados en la implementación del sistema bajo medición	24
3.3.2	Programas para la implementación del sistema bajo medición .	28
3.3.3	Implementación del sistema bajo medición	28
4	Resultados y Análisis	31
4.1	Frecuencia de portadora del variador de frecuencia	31
4.2	Muestras por ciclo	33
4.3	Parámetros de calidad de energía obtenidos en la sub-estación	34
4.3.1	Valores RMS, potencias y factor de potencia	34
4.3.2	Distorsión armónica total	37
4.3.3	Variación de la frecuencia	37
4.3.4	Eventos	38
5	Conclusiones	39

Índice de figuras

1.1	Diagrama del prototipo de calidad de energía	3
2.1	Diagrama de un sistema SCADA[44]	6
2.2	Esquema general para mediciones de calidad de energía [33]]	10
2.3	Esquema general para mediciones de calidad de energía [33]	11
2.4	Medición de una falla de una de las líneas a la tierra [39]	12
2.5	Tensión instantánea por unidad [39]	13
2.6	Etapas de un variador de frecuencia [5]	16
2.7	Frecuencia portadora de un variador de frecuencia [38]	16
3.1	Diagrama del prototipo de calidad de energía	17
3.2	Equipo que compone la sub-estación	18
3.3	Diagrama de bloques de la sub-estación.	20
3.4	Diagrama de bloques de la sub-estación.	22
3.5	Interfaz de usuario de la estación maestra.	23
3.6	Equipo que compone el sistema bajo medición.	24
3.7	Diagrama de entradas, salidas y conexiones del variador de frecuencia.	26
3.8	Motor trifásico Nord SK1SI31-IEC63-63L4.[37]	26
3.9	Relé de 3 contactos 24V T3RC3[28]	27
3.10	Interruptor termo magnético Multi 9 C60N 2P 10A[29]	27
3.11	Inductancia de línea RLW-02P103.[6]	27
3.12	Resistencia de potencia de 100 y 50W.[30]	28
3.13	Circuito del sistema bajo medición.	29
3.14	Interfaz de usuario del sistema bajo medición.	29
3.15	Diagrama de flujo del control del sistema bajo medición	30
4.1	Forma de onda de la corriente y la tensión, con una frecuencia de portadora de 2kHz.. . . .	32
4.2	Forma de onda de la corriente y la tensión, con una frecuencia de portadora de 15kHz.. . . .	32
4.3	Forma de onda de la corriente y la tensión, con una frecuencia de portadora de 15kHz.. . . .	34
4.4	Circuito del sistema bajo medición.	35

Índice de tablas

2.1	Estructura de un mensaje en Modbus	8
2.2	Código de funciones y su respectiva descripción.[1]	9
2.3	Valores de tensión estipulados por la norma ANSI C84.1[3].	11
4.1	Frecuencias de la portadora disponibles en el VF.[43]	31
4.2	Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las tres líneas sin ninguna carga.	34
4.3	Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las potencias totales y el factor de potencia sin ninguna carga.	35
4.4	Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las tres líneas con carga L.	36
4.5	Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las potencias totales y el factor de potencia con carga L.	36
4.6	Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las tres líneas con carga R.	36
4.7	Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las potencias totales y el factor de potencia con carga R.	36
4.8	Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las tres líneas con carga RL.	36
4.9	Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las potencias totales y el factor de potencia con carga RL.	37
4.10	Distorsión armónica total sin carga con el re-muestreo y una frecuencia portadora de 15Khz.	37
4.11	Distorsión armónica total sin carga con el re-muestreo y una frecuencia portadora de 2Khz.	37

Lista de símbolos y abreviaciones

Abreviaciones

CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
CE	Calidad de energía
DNP3	Distributed Network Protocol 3
EM	Estación maestra
HMI	Interfaz humano-máquina (HMI: Human-Machine interface)
KHZ	kilo Hertz
kS/s	muestras por segundo (kilo samples per second)
MCE	Monitorización de Calidad de Energía
NI	National Instruments
PCA	Análisis de componentes principales
PLC	Controlador lógico programable
pu	por unidad
PWM	Modulación de ancho de pulso (Pulse width modulation)
SBM	Sistema bajo medición
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
VF	Variador de frecuencia
WSN	Redes inalámbricas de sensores

Capítulo 1

Introducción

1.1 National Instruments y los prototipos para presentaciones

National Instruments (NI) transforma la manera en la que los ingenieros y científicos alrededor del mundo diseñan, desarrollan prototipos e implementan sistemas de pruebas, control, y diseño de aplicaciones empotradas. Usando los programas y equipos modulares de NI sus clientes simplifican el desarrollo e implementación de sus proyectos[8]

National Instruments constantemente se dedica a desarrollar prototipos para presentaciones en conferencias y para clientes, utilizando las herramientas de software y hardware, de manera que proporcionen una idea de los alcances y facilidades de estos, para solucionar necesidades empresariales, industriales, ingenieriles y científicas en distintas ramas y mercados. Ya sea que estas necesidades sean para cambiar equipo, renovar, rediseño, modernizar, etc.

Actualmente NI tiene una gran cantidad de prototipos que tienen como propósito demostrar la gran cantidad de las herramientas de NI para la implementación y desarrollo de proyectos, el cual puede ser tan versátil como para controlar inalámbricamente un robot. Tareas críticas y delicadas como el control para detener una sierra eléctrica para cortar madera que al detectar que una parte humana entra en contacto con el disco frena y retrae el disco, para mencionar algunas de las tantas soluciones y prototipos en los cuales se han utilizado estas herramientas .

1.2 Prototipo de monitorización de calidad de energía y protocolos de comunicación

Debido a la dificultad para poder demostrar el uso de las herramientas de NI para análisis de calidad de energía en plantas de generación de energía, subestaciones, estaciones de distribución de energía, industrias, entre otros; surge la necesidad de un prototipo que sirva para promocionar, demostrar y enseñar las herramientas de monitorización de calidad de energía (MCE) que tiene NI, las cuales facilitan el estudio y análisis desde un proyecto de pequeña escala a uno que pueda ser implementado en estaciones eléctricas, subestaciones, industrias de minería, etc. Para lo cual se debe tener en cuenta que a pesar de ser un prototipo, este deberá cumplir con normas de

seguridad, protocolos de comunicación utilizados internacionalmente y estipulados por la IEEE, comunicación entre distintos equipos que no necesariamente son de NI, regulaciones de calidad de energía nacionales e internacionales, exposición a ambientes industriales. Además de involucrar un alto diseño ingenieril electrónico para el estudio de calidad de energía, uso de diferentes equipos electrónicos, electrónica de potencia, control de sistemas y electro mecánica para el control de motores trifásicos.

El prototipo debe mostrar las distintas herramientas, módulos y programas de NI, como los son: la monitorización de energía (Electrical Power Suite), protocolos (DNP3 y Modbus), sistema operativo en tiempo real (Real-Time) y FPGA. Este sistema estará dividido en dos partes independientes entre sí, para garantizar el funcionamiento del MCE en cualquier ambiente industrial, sin que exista ninguna dependencia, consecuencia que afecte el MCE con respecto a la otra parte.

En la figura 1.1 se puede observar un diagrama de bloques de manera general de las dos partes. Donde la primera parte está compuesta por una estación maestra y una sub-estación, este sistema deberá utilizar equipos que puedan ser expuestos a ambientes industriales donde puede haber fuentes de calor, ruido, vibraciones, polvo, interferencia electromagnética, entre otros. Diseñado para tener una respuesta rápida y confiable en procesos críticos dentro de un sistema, de manera que cumpla con periodos de tiempo cortos y constantes para la ejecución de un mismo ciclo o rutina para las tareas críticas.

Comunicación por medio de protocolos utilizados internacionalmente y estipulados por la IEEE para compartir información y comandos entre una estación maestra y una sub-estación.

Este debe mostrar al usuario una interfaz con las opciones y mediciones realizadas en el subsistema de MCE, la potencia real, reactiva y aparente, además de otros cálculos o mediciones como el factor de potencia, estudio de los armónicos presentes, voltaje, corriente, entre otros.

La interfaz con el usuario debe ser posible de manera local o remota, para lograr un monitorizar automatizado a distancia sin necesidad de tener un operario en el lugar donde está ubicado el prototipo.

El sistema bajo medición tiene como tarea el poner a prueba el funcionamiento del MCE, de manera que permita afectar la calidad de la energía mediante una carga inductiva, dicha carga se implementará con un motor trifásico. Este sistema será totalmente independiente de la estación maestra y de la sub-estación de MCE, de manera que este no influya de ninguna manera en la medición, pero sí en la calidad de energía con la cual se energiza el motor.

Utilizando un variador de frecuencia (VF) de entrada de tensión monofásica, se logra implementar una red trifásica, la cual permita simular una red industrial de potencia para alimentar el motor trifásico. Además, el diseño de un control que permita la variación de velocidad y una etapa de arranque para el motor. El motor trifásico debe permitir el acople de un reductor para tener una salida con menos revoluciones y un mayor torque para facilitar el acople a una carga con una menor velocidad.

Además de poder implementar el uso de relés, para conectar y desconectar de manera segura inductores o resistencias en una o varias de las fases del motor, de manera que se desbalancen las fases de alimentación al motor.

Una interfaz que permita controlar la velocidad del motor, arranque y frenado. Además de poder controlar los relés de manera digital y segura.

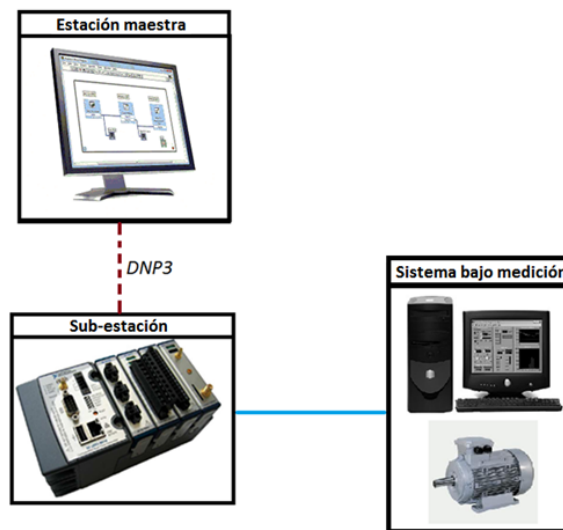


Figura 1.1: Diagrama del prototipo de calidad de energía

1.3 Objetivos y estructura del documento

Este proyecto tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema que permita el monitoreo en tiempo real de la calidad de la energía para una subestación eléctrica en un prototipo para demostraciones y que además le permita al usuario introducir variantes que distorsionen la calidad de energía.

Para esto se requiere implementar una estación maestra de monitoreo de calidad de energía en la cual se pueda desplegar en tiempo real la información en una interfaz gráfica, que se comunica con la sub-estación esclava la cual realiza las mediciones por medio de protocolos de comunicación industriales. Esto permitirá que la sub-estación que realiza las mediciones debe contar con un sistema operativo en tiempo real, que realice el MCE y se comunique con la estación maestra

Una vez implementadas tanto la estación maestra como la sub-estación se necesitará un sistema al cual se pueda monitorear, por lo que se deberá desarrollar un sistema que permita la variar de la calidad de la energía y le dé la posibilidad al usuario de introducir variantes que distorsionen la calidad de energía a una red trifásica.

En el siguiente capítulo se esbozan los principales fundamentos teóricos necesarios para explicar en el capítulo 3 la integración del total del prototipo. En el capítulo 4 se muestran algunos resultados donde se puede apreciar las distintas distorsiones que se pudieron generar en la red para modificar los valores de calidad de energía y así monitorizarlos.

En el capítulo 5 se ofrecen las principales conclusiones, algunos aportes y recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Sistemas SCADA

SCADA es un acrónimo en inglés para Control de Supervisión y Adquisición de Datos (Supervisory Control and Data Acquisition). Las redes tipo SCADA son ampliamente usadas en industrias de gran escala para la monitorización y control de una sub-estación o estación remota desde una estación central. Las redes tipo SCADA son utilizadas en una gran variedad de industrias como generación y producción de energía, químicos, petroquímicos, autopistas, transporte, petróleo, gas, etc. La mayoría de los sistemas SCADA tienen un control lazo abierto y comunicaciones a larga distancia, aunque también se puede presentar casos contrarios con controles de lazo cerrado y comunicación a corta distancia.[44]

2.1.1 Funciones de un sistema SCADA

Un sistema SCADA presenta 4 funciones. La primera es la adquisición de datos, en la cual el sistema a monitorizar puede tener cientos o miles de dispositivos, como actuadores, sensores, interruptores, válvulas, transmisores, controladores entre otros. Con estos dispositivos se puede monitorear una entrada o salida de una planta, como por ejemplo la medición de un sensor de nivel y el monitoreo de un actuador como lo es una válvula. El monitoreo puede ser de señales lógicas o de valores analógicos. Los sistemas modernos pueden requerir una adquisición de datos en tiempo real, registro de datos y un procesamiento.[44]

La segunda función es la comunicación de datos. En sistemas de gran escala una estación central o maestra puede estar monitorizando y controlando varias sub-estaciones, razón por la cual se necesita una red o medio de comunicación, en los primeros sistemas SCADA la comunicación se realizaba de manera serial, radio o modem, en la actualidad se realiza por medio de Ethernet o Internet. Los protocolos utilizados al inicio eran privados al inicio, hoy en día los protocolos son más abiertos y tienen un estándar.

La tercera función es la presentación de datos. El sistema continuamente monitoriza la instrumentación de campo y alerta al operador cuando se presenta una anomalía como un valor fuera del rango nominal programado. Una interfaz de usuario permite presentar los datos además de permitirle el control del proceso.

La última función es la de controlar un sistema, un protocolo tipo SCADA puede regular muchos procesos industriales de manera automática. Como por ejemplo abrir

una válvula para liberar presión en un sistema o compensar la producción de energía para ajustarse a la demanda. Al manejar un sistema grande el cual puede abarcar grandes áreas geográficas es necesario que la comunicación entre la estación central y la remota sea confiable. Al manejarse un algoritmo de control de manera remota desde la estación central es crucial que la comunicación no se pierda, ya que esto puede llevar a errores y accidentes en la estación remota esclava, esta característica agregará un mayor costo ya que se debe garantizar dicha comunicación, razón por la cual generalmente se diseña un control para la estación remota de manera que si se llegara a perder la comunicación, la estación esclava puede manejar una rutina o control de sí misma a pesar de la pérdida de conexión, mientras se recobra la reconexión con la estación central.[44]

Los sistemas tipo SCADA sean adaptado a nuevas tecnologías como protocolos Ethernet y TCP/IP, aunque debido a algunas de las características del Ethernet como determinismo, sincronización, entre otras ha evitado la utilización de este en algunas aplicaciones especializadas.

2.1.2 Componentes y equipos de un sistema SCADA

Un sistema SCADA contempla la transferencia de información entre una estación central o maestra y una o varias sub-estaciones o estaciones esclavas, en la figura 2.1 se puede ver un diagrama de un sistema SCADA, en donde se puede ver una computadora con la interfaz humano-máquina (HMI: Human-Machine interface) el cual aparte de recibir, enviar y procesar información permite la interacción con el usuario. En el centro de la imagen tendremos el medio por el cual se transmitirá la información por medio de radio frecuencia y otros. Por último tendremos la o las sub-estaciones en las cuales por lo general se utiliza sistemas autónomos (stand-alone), el cual puede trabajar de manera automática o por lo menos permitir algún tipo de procesamiento o control como lo es el caso de un cRIO de la empresa National Instruments, un tipo de tarjeta, sistema embebido, un PLC entre otros.[44]

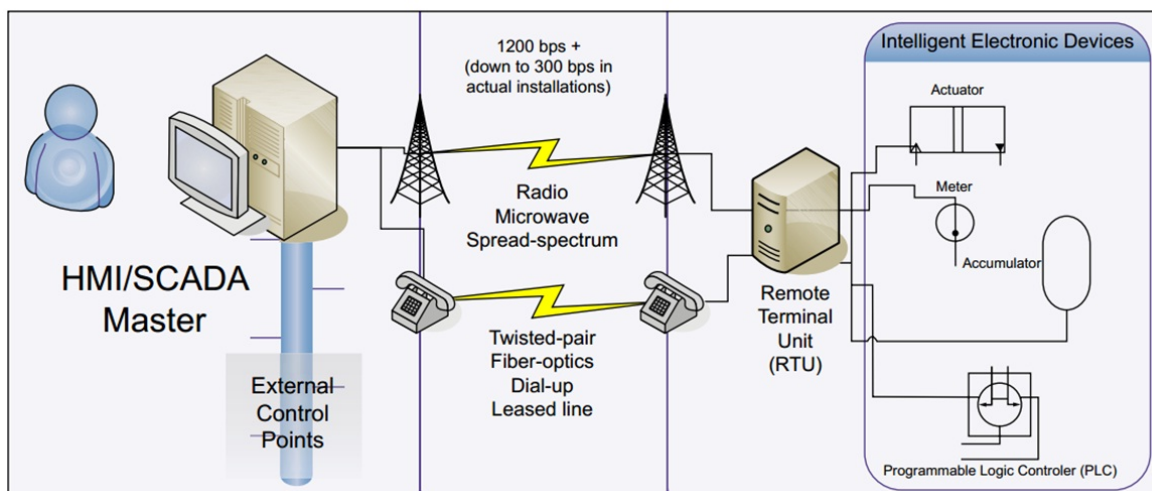


Figura 2.1: Diagrama de un sistema SCADA[44]

2.2 DNP3

DNP3 es el acrónimo de “Distributed Network Protocol 3.3” su lanzamiento fue a finales de 1993. Este protocolo ha ganado mucha aceptación en distintas industrias. Este protocolo se usa en plantas de generación de energía, infraestructuras de distribución y tratamiento de agua entre otros sectores. El DNP3 está diseñado para enviar pequeños paquetes de información de manera segura y confiable; además de llegar en secuencia y determinística.[44]

Puede trabajar con distintos modos de comunicación como: solicitud (polled) y operación en reposo (quiescent operation). La operación en reposo se refiere a un reporte por excepciones, puesto que no es necesaria una solicitud de parte del maestro para reportar un cambio. Esto se debe a que la estación maestra puede confiar que la sub-estación puede enviar una “respuesta sin solicitud” cuando un cambio necesita ser reportado. En general un sistema periódico corre en un segundo plano el cual solicita una respuesta de la sub-estación para resguardarse contra fallas de comunicación no detectadas, si esto no se hiciera la estación maestra no tendría manera de detectar fallas de comunicación con la sub-estación.

El DNP3 soporta múltiples sub-estaciones o estaciones con un sistema de comunicación bilateral donde cualquiera de las partes puede iniciar la comunicación, es decir la sub-estación puede enviar información o solicitar información sin que la estación maestra la haya solicitado. [44]

Algunas arquitecturas también pueden usar convertidores de protocolos, como lo es el caso del dispositivos DNP3 con puerto de red, el DNP3 se encapsula dentro de los paquetes de red TCP/IP. Lo cual permite incorporar un sistema tipo SCADA a la red corporativa ya existente.

2.3 Modbus

Modbus es un protocolo de transmisión desarrollado por Gould Modicon, ahora llamado Schneider Electric para sistemas de control de procesos. Este protocolo es considerado público y se ha convertido en un estándar integrado en una gran cantidad de equipos. A diferencia de otros protocolos este no cuenta con una interfaz física definida (Capa OSI 1). [41]

Modbus es un protocolo simple, flexible y público que permite a los equipos y dispositivos intercambiar datos discretos y analógicos. Muchas empresas aun implementan este protocolo debido a que los clientes todavía usan este protocolo en equipos que aún se utilizan dentro de sus empresas; además de tener un costo menor en comparación a otros protocolos. Este se puede encontrar con EIA-232 y EIA-485.¹

Integradores de sistemas saben que es un protocolo del cual pueden encontrar equipo en el mercado para implementar sus diseños y comunicarse entre estos equipos a pesar de ser de diferentes compañías. Pero hoy en día este protocolo está sufriendo por las limitaciones impuestas por dispositivos serial tipo EIA-232/485. Estos dispositivos seriales son relativamente lentos alrededor de los 9600-11500 baud lo que significa aproximadamente 0.01-0.115Mbps en comparación a la velocidad de sistemas de control

¹La organización EIA dejó de funcionar en febrero del 2011 y asigno a la ECA para mantener toda la existencias de interconexiones, pasivas y electromecánicas (IP&E) además de EIA estándares[eiastandards]

actuales por medio de red donde se puede alcanzar 100Mbps hasta 10Gbps. Con EIA-232 se pueden interconectar 2 dispositivos y con EIA-485 de 20 a 30 dispositivos de manera que conectar 30 o más dispositivos se convierten en una tarea complicada. Además el protocolo Modbus con interconexiones serial está diseñado para utilizar un maestro para uno o varios esclavos.[41]

A pesar de estas limitaciones Modbus es ampliamente aceptado por las empresas de dispositivos de instrumentación, empresas e integradores. Ciertas características de los protocolos ya están predeterminadas y no se pueden cambiar como el formato del mensaje, la secuencia de mensajes, el manejo de errores y excepciones. Otras características se pueden cambiar como el formato del mensaje por ejemplo ASCII o RTU (formato hexadecimal). [41]

El modo RTU también llamado Modbus-B por Modbus binario, es el formato preferido. Modbus además permite revisar errores de transmisión y comunicación del error. Errores de comunicación son detectados por el mensaje mediante la revisión de la paridad del mensaje, revisión redundante o una revisión de 16 bits cíclica redundante CRC-16 (cyclic redundancy check). Los paquetes de Modbus también pueden ser enviados por medio de red encapsulando el protocolo en paquetes de información TCP/IP. [41]

2.3.1 Estructura del protocolo Modbus

En el cuadro 2.1 se muestra la típica estructura de un mensaje en Modbus

Dirección	Función	Datos	Revisión de error
1 byte	1 byte	variable	2 byte

Tabla 2.1: Estructura de un mensaje en Modbus

El primer campo de cada mensaje es la dirección compuesta de un byte, este indica el controlador o dispositivo al cual el mensaje es dirigido, de haber una respuesta de este dispositivo la dirección ahora corresponderá al dispositivo que envió primeramente el mensaje para indicarle que se estableció la comunicación. Esta respuesta puede ser la revisión del error. La dirección puede tener un número entre 1 hasta 247 aunque debido a limitaciones del medio de comunicación la cantidad de dispositivos esclavos es mucho menor. Un sistema típico contará con un maestro y dos o tres dispositivos esclavos.[1]

El segundo campo corresponderá a la función, es decir en qué consiste la operación. La tabla 2.2 resume algunas de las funciones de este protocolo de comunicación.

2.4 Calidad de energía

El tema de la calidad de energía ha tenido mucho auge en los últimos años en máquinas eléctricas y sistemas de potencia. Este tema ha sido de mucho interés por parte de universidades e industrias, razón por la cual se ha publicado una gran cantidad de libros y artículos técnicos. [31]

Algunos textos definen calidad de energía de la siguiente manera “Calidad de energía es la combinación de calidad de tensión y calidad de corriente”[33]. Donde la calidad

Código de función	Descripción
01	Lectura de un bit
05	Escribir un bit
15	Escribir N bits
02	Lectura de N bits
04	Lectura de registro de entrada
03	Lectura de registro retenedor
06	Escribir un registro
16	Escribir múltiples registros
07	Lectura de excepciones
08	Diagnóstico de la prueba de lazo cerrado (loopback)

Tabla 2.2: Código de funciones y su respectiva descripción.[1]

de tensión está ligada a las desviaciones de tensión actual con las de la tensión ideal. De igual manera se puede definir la calidad de corriente.

De manera simplificada se puede tomar como referencia para una tensión ideal una señal senoidal de amplitud y frecuencia constante donde tanto la frecuencia y la amplitud son iguales a sus valores nominales. La corriente ideal también debería tener una amplitud y frecuencia constante, pero la frecuencia y la fase de la corriente debe ser la misma a la frecuencia y fase del voltaje. Cualquier desviación en la tensión o corriente de los parámetros ideales es considerada una perturbación a la calidad de energía. Una perturbación se puede dar en la tensión o la corriente, pero no siempre es posible distinguir entre las dos ya que cualquier cambio en la corriente afecta la tensión y viceversa.[31]

Un criterio a utilizar para distinguir entre ambas perturbaciones es la causa. Por ejemplo las algunas perturbaciones de tensión se originan en la red y pueden afectar a los clientes mientras que las perturbaciones de corriente se pueden originar por el consumidor y afectar a la red eléctrica.

Esta definición considera de manera implícita otras perturbaciones y distorsiones que son parte de la calidad de energía como las variaciones en la frecuencia y factor de potencia. Otros términos usados generalmente cuando se habla de calidad de energía son la continuidad y la calidad. La continuidad es la que incluye las posibles interrupciones que se den en la red. La calidad cubre todas las otras perturbaciones.

2.4.1 Eventos y Variaciones

Es importante distinguir entre los distintos tipos de perturbaciones de la calidad de energía ya sean variaciones o eventos. Las variaciones son perturbaciones constantes o semi-constantes que se pueden registrar de manera continua en las mediciones; un ejemplo de esto son los cambios que hay en la frecuencia de la red o el sistema, la cual debe de tener un valor nominal de 60Hz, pero este valor siempre está cambiando hasta por 1Hz en un sistema normal. En cualquier momento las variaciones de la frecuencia puede ser medida y registrada para análisis posteriores.

En el caso de los eventos, estos son perturbaciones repentinas que tienen un inicio y un fin, el típico ejemplo de un evento es una interrupción. Durante una interrupción la tensión medido o registrado es cero. Para medir una interrupción se debe hacer de manera automática, en la mayoría de los monitores de calidad de energía se hace

comparando la tensión medido con un valor o rango límite, cuando la tensión esta dentro de ese rango de tensión por cierto intervalo de tiempo es considerado una interrupción. Este ejemplo demuestra la complejidad para la medición y detección de los eventos, ya que se debe escoger un método para la medición de la tensión de la forma de onda adquirida, se deben escoger el o los valores límites, ya que estos pueden ser iguales o diferentes además de escogerse el tiempo mínimo de la interrupción.[33]

En la figura 2.2 se puede observar un esquema general para llevar acabo mediciones de calidad de energía. En la etapa 1 tenemos los dispositivos de medición con los cuales se realiza la adquisición de la tensión y la corriente eléctrica del sistema donde las señales analógicas se convierten en valores digitales, seguidamente tenemos una etapa de procesamiento previo de los datos adquiridos, donde se puede realizar un filtrado de los datos y un re-muestreo de los datos. Para un posterior procesamiento de la información ya que por ejemplo no se puede utilizar de manera directa la forma de onda de la tensión eléctrica para detectar los eventos, esto produciría la detección de una gran número de eventos de caída de tensión además de que no sería adecuado para describir variaciones en la magnitud de la tensión. Para la detección de las caídas de tensión se utiliza la tensión RMS de un ciclo, este se compara con el valor límite cada medio ciclo; de acuerdo con la norma IEC 61000-4-30. [33]

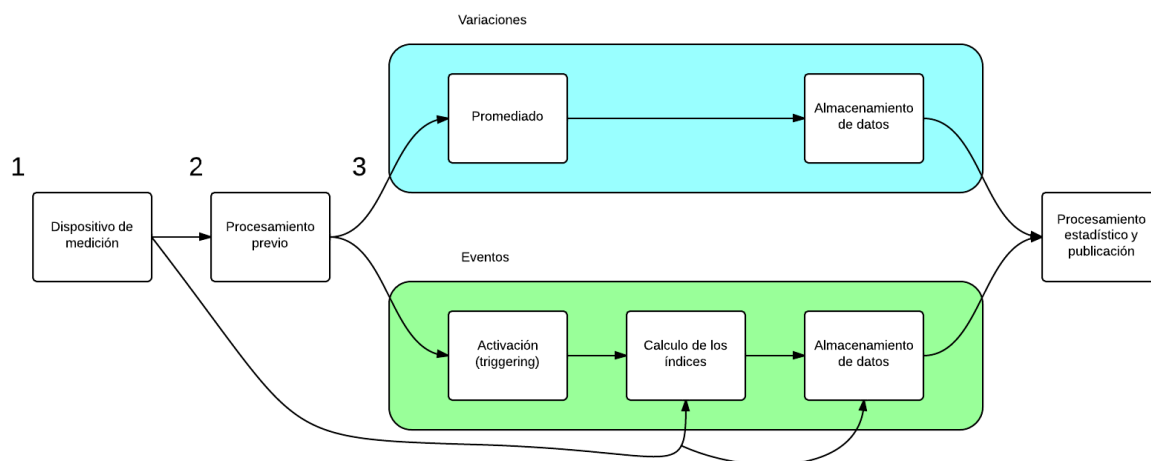


Figura 2.2: Esquema general para mediciones de calidad de energía [33]

Una vez que el evento es detectado sus índices son calculados y guardados, algunas veces no solamente se guardan y registran las variaciones y eventos sino que también la forma de onda de la tensión y la corriente para estudios posteriores como estudios estadísticos, índices y propósitos educativos.

El procesamiento de las forma de onda de la tensión y la corriente para el cálculo de las variaciones y eventos son muy distintos. Para el caso de las variaciones de la calidad de energía el primer paso es realizar los cálculos apropiados, estos pueden ser la tensión RMS, la frecuencia y el espectro. Típicamente se utiliza valores promedio de un intervalo de tiempo como por ejemplo una ventana de 10 ciclos para realizar estos cálculos.[39]

Por otro lado para realizar la detección de los eventos, tomando en cuenta las características y los tipos de eventos a detectar como interrupciones cortas y largas, caídas y subidas de tensión, sobre-tensión y sub-tensión de larga duración. El primer paso para este procesamiento es el cálculo de la tensión RMS en una ventana de un ciclo. Pero estos cálculos y datos no son guardados al menos que alcance el valor o rango límite.

En la figura 2.3 se puede ver un diagrama general en el cual se puede hacer distinción de las caídas, subidas e interrupciones de tensión por corta o larga duración, aunque más adelante se profundizará más en este tema. [33]

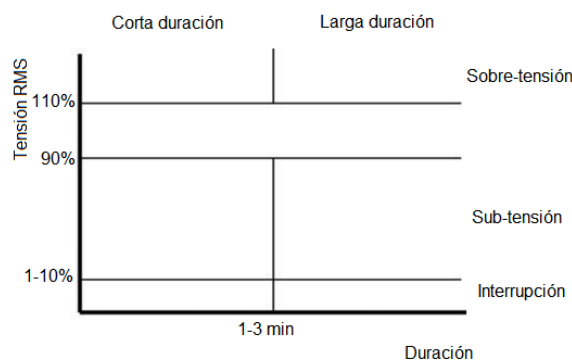


Figura 2.3: Esquema general para mediciones de calidad de energía [33]

2.4.2 Términos y definiciones de calidad de energía

2.4.2.1 Variaciones de larga duración

Son aquellas desviaciones del valor RMS de la tensión que ocurren con una duración superior a un minuto.

En la tabla 2.3 se pueden apreciar los valores de tensión estipulados por la norma ANSI C84.1 la cual especifica las tolerancias en la tensión de estado estable en un sistema de potencia. Una variación de tensión se considera de larga duración cuando excede el límite de la ANSI por más de un minuto. Debe prestarse atención a los valores fuera de estos rangos [3]

Valor nominal	Rango deseable	Rango aceptable
120	126-114	127-110
208	218-197	220-191
240	252-228	254-220

Tabla 2.3: Valores de tensión estipulados por la norma ANSI C84.1[3].

Podemos clasificar las variaciones de larga duración en dos tipos: la sobre-tensión (overvoltage) y la sub-tensión (undervoltage).

La sobre-tensión (overvoltage) es el incremento de la tensión RMS por encima del 110 % del valor nominal por una duración mayor de un minuto, las sobretensiones normalmente se dan por la desconexión de grandes cargas o debido a la conexión de bancos de capacitores. La sub-tensión es un decremento de la tensión RMS por debajo del 90 % del valor nominal por una duración mayor de un minuto.[39]

2.4.2.2 Interrupciones de larga duración o sostenidas

Interrupciones sostenidas, estas se dan cuando la fuente de tensión es cero por un periodo de tiempo mayor a un minuto, esta variación de tensión de larga duración es

considerada una interrupción larga y es conocida en inglés como “sustained interruption”. Interrupciones que duran más de un minuto son usualmente permanentes y se necesita una intervención humana para restablecer la tensión. [39]

2.4.2.3 Variaciones de corta duración

En esta categoría están incluidas las sobre-tensiones, sub-tensiones e interrupciones pero cuando estas son menores a un minuto de duración, estas variaciones son producto de fallas, como energizar grandes cargas, que requieren corrientes de arranque o pérdida de conexión debido al cableado. Dependiendo de la falla, localización y condiciones del sistema puede ocasionar caídas, subidas de tensión o pérdida de la tensión (interrupción) de manera temporal.[39]

Sub-tensiones de corta duración (sag- dips) La sub-tensión es el resultado de eventos como la conexión de una carga, la desconexión de un capacitor o sobrecarga de la red. La sub-tensión se mantendrá hasta que el equipo de regulación de tensión en el sistema pueda subir la tensión al rango nominal.

Una sub-tensión de corta duración es una caída de tensión entre el 0.1 y 0.9 pu (por unidad) en tensión RMS o bien entre el 10 % y 90 % a frecuencia de la red por una duración de 0.5 ciclos hasta un minuto. Estas fallas se pueden dar por la conexión de grandes cargas, encendido de motores

Aunque en inglés se conoce comúnmente como “sag” el término correcto en inglés para este fenómeno es “dip” según la IEC. El tiempo de corrección de estas fallas puede variar de entre 3 hasta 30 ciclos dependiendo de la falla de magnitud de corriente y el tipo de protección de sobre corriente. [39]

En la figura 2.4 se puede ver la falla en la medición de una de las líneas a la tierra en la cual se puede ver la tensión pu (por unidad) decaer o disminuir a menos de 0.7 por aproximadamente 3 ciclos

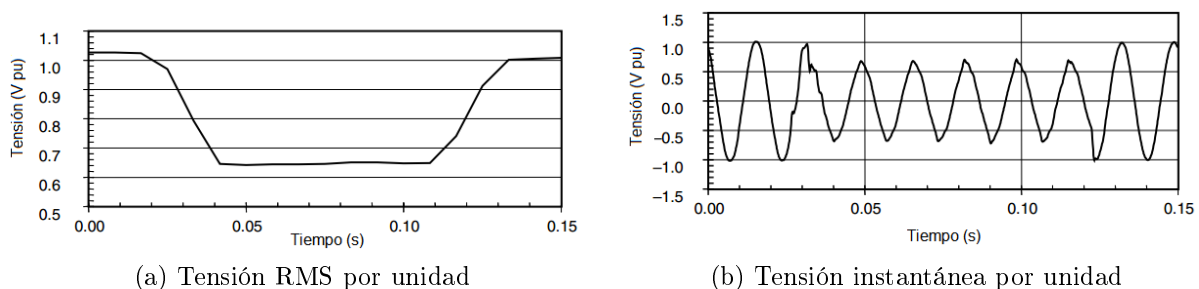


Figura 2.4: Medición de una falla de una de las líneas a la tierra [39]

Sobre- tensión de corta duración (Swells) Estas son caracterizadas por un incremento en la tensión o corriente RMS de 1.1 hasta 1.8 pu a la frecuencia nominal por un tiempo mayor a 0.5 ciclos y menor a un minuto. Este fenómeno no es tan común como las sub-tensiones en la figura 2.5 se puede ver una sobretensión causada por una falla de la línea a tierra.[39]

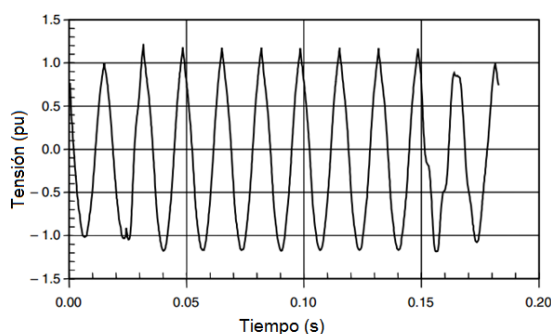


Figura 2.5: Tensión instantánea por unidad [39]

2.4.2.4 Interrupción de corta duración

Una interrupción ocurre cuando la fuente de tensión y corriente de carga disminuye menos de 0.1pu (por unidad) por un periodo de tiempo que no excede un minuto. Como se mencionó anteriormente la interrupción puede ser resultado de fallas en el sistema de energía, equipo y el control. Siempre que la magnitud de la tensión sea menor al 10 % del valor nominal. La duración de la interrupción debido a una falla en el sistema está determinada por el tiempo de respuesta del sistema de operación.

Usualmente la interrupción está precedida de una caída de tensión, en el caso que haya medidas de protección y corrección la interrupción estará presente hasta que se logre corregir la falla de manera automática o ésta se prolongará hasta convertirse en una interrupción de larga duración. [39]

2.4.2.5 Desequilibrio de tensiones

El desequilibrio de Tensiones en un sistema eléctrico ocurre cuando las tensiones entre las tres líneas no son iguales y puede ser definido como la desviación máxima respecto al valor promedio de las tensiones de línea, dividida entre el promedio del las tensiones de línea, expresado en porcentaje.[39]

El desbalance también puede ser definido usando componentes simétricas como la relación del componente de secuencia cero ó el componente de secuencia negativa entre la componente de secuencia positiva, expresada en porcentaje.

Las fuentes más comunes del desequilibrio de tensiones son las cargas monofásicas conectadas en circuitos trifásicos, los transformadores conectados en delta abierto, fallas de aislamiento en conductores no detectadas.

Se recomienda que el desequilibrio de tensiones sea menor al 2% [3]

2.4.2.6 Distorsión de la forma de onda

Es la desviación que existe de la forma de onda con respecto a una señal senoidal de frecuencia fundamental igual a la frecuencia nominal de la red. Las 5 principales distorsiones de la forma de onda son: [3]

- Corrimiento CC (CC offset)
- Armónicos

- Interarmónicos
- Hendiduras (Notching)
- Ruido (Noise)

Corrimiento CD (CD offset) Este está definido por la presencia de tensiones o corriente CC en un sistema de corriente alterna

“Esto puede ocurrir debido al efecto de la rectificación de media onda, extensores de vida o controladores de luces incandescentes. Este tipo de controlador, por ejemplo, puede consistir en diodos que reducen el valor R.M.S. de la tensión de alimentación por rectificación de media onda.” [3]

Armónicos Los armónicos son tensiones y corrientes senoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental a la cual el sistema está diseñado, en general la frecuencia fundamental es de 50Hz o 60Hz dependiendo del país. Formas de ondas periódicas y deformadas pueden ser descompuestas en una sumatoria de frecuencias, entre las cuales está la fundamental y las armónicas. La distorsión armónica se origina debido a dispositivos o cargas con características no lineales que están presentes en la red.

Los niveles de distorsión armónica se pueden ver en el espectro armónico con las magnitudes, ángulos de fases y cada una de las componentes armónicas con su respectiva frecuencia. Muchas veces se utiliza el término y valor de distorsión armónica total como una medida de la distorsión. Algunos de los efectos negativos de los armónicos es: el decremento del factor de potencia, calentamiento de condensadores, entre otros. [39]

Ínter-armónico Estos son los armónicos presentes en la tensión o corriente los cuales no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental a la cual el sistema está diseñado. “Las principales fuentes de interarmónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, los ciclo convertidores, los motores asincrónicos y los dispositivos de arco.” [3]

Debido a que los interarmónicos son fuentes de las fluctuaciones de tensión, se presenta alto riesgo de la generación de flicker.

2.4.2.7 Fluctuaciones de tensión (Flicker)

Fluctuaciones de tensión son variaciones simétricas de tensión o cambios de tensión aleatorios, la magnitud de estas fluctuaciones de tensión no necesariamente exceden los rango especificados para ser considerado una sobre-tensión o sub-tensión es por esa razón que la IEC 61000-2-1 define las fluctuaciones de tensión como cambios aleatorios o continuos en la tensión.

El término usado generalmente para las fluctuaciones de tensión es flicker, pero el flicker realmente se refiere al impacto de las fluctuaciones de tensión en las lámparas, fenómeno el cual es percibido por el ojo humano. Por lo que el flicker es un resultado indeseado causado por las fluctuaciones de tensión. Sin embargo es usual de que ambos términos sean usados en normas.[39]

Las fluctuaciones de tensión (flicker) es medido en relación a la sensibilidad del ojo humano, variaciones de tensión de 0.5 por ciento son percible por el ojo humano en una lámpara si la frecuencia de estas fluctuaciones están en el rango de 6 a 8HZ.

Para poder medir las fluctuaciones de tensión se utilizan dos parámetros el Pst y Plt los cuales definen la métrica y el rango de valores a los cuales este fenómeno es pecible y molesto al ojo humano. Para esto se realizó un estudio en el cual personas fueron expuestas a fluctuaciones de tensión. La ideas era determinar los valores en los cuales el fenómeno era molesto para la persona, al percibir el fenómeno de la luz en una lámpara a través de sus ojos para ser luego procesada por el cerebro, de esta manera las normas establecieron la métrica para medir las fluctuaciones de tensión [39]

La severidad y nivel de Pst (short-term flicker) es definido en la IEC 61000-4-15 y es basado en periodo de observación de 10min. Un PST mayor a 1 corresponde a un nivel de irritabilidad para el 50 por ciento de las personas que fueron expuestas a este fenómeno. [39]

Por otro lado el Plt (long-term flicker) es basado en un periodo de observación de dos horas.

2.4.2.8 Variaciones de frecuencia en el sistema de potencia.

Las variaciones de frecuencia son definidas como desviaciones en la frecuencia fundamental y nominal del sistema de potencia, es decir las variaciones a partir de los 50Hz o 60Hz dependiendo del país. La frecuencia en el sistema de potencia está directamente relacionada con la velocidad rotacional de los generadores de electricidad. [3]

2.5 Variadores de frecuencia.

Los variadores de frecuencia (VF) son muy usados en la industria para proveer un control velocidad ajustable a motores de corriente alterna monofásicos o trifásicos, muchas veces si una industria o fábrica no cuenta con una red trifásica, ésta podría optar por usar un variador de frecuencia de entrada monofásica y de salida trifásica para poder generar no solamente la red si no también el control para el motor trifásico.

EL variador de frecuencia cuenta con tres etapas principales como se puede ver en la figura 2.6: la primera es la etapa de rectificación donde se conecta la red monofásica o trifásica para ser rectificadas y convertidas a corriente directa para pasar a la segunda etapa que es la de almacenamiento de energía en un banco de capacitores, seguidamente la tercera y última etapa descargará los capacitores en la tapa inversora donde transistores de potencia como los IGBT u otros se utilizan para generar la salida de corriente alterna que simularían una señal senoidal a partir de una modulación de ancho de pulso (PWM pulse width modulation). [5]

Los transistores de potencia o IGBT funcionan como interruptores semiconductores de muy alta velocidad los cuales son accionados electrónicamente. La velocidad de actuación de estos transistores puede ir desde 2kHz hasta 15kHz dependiendo del dispositivo y configuración, ya que esto depende de la frecuencia portadora (carrier frequency) En la figura 2.7 se puede ver como se genera la modulación de ancho de pulso a partir de la frecuencia portadora.[5]

Una tensión de corriente continua se utiliza para reconstruir una forma de onda de tensión de corriente alterna que trata de imitar una señal senoidal, a pesar de que

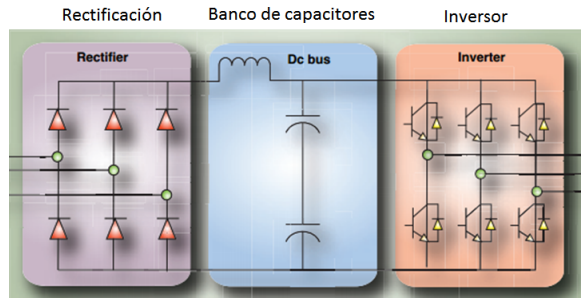


Figura 2.6: Etapas de un variador de frecuencia [5]

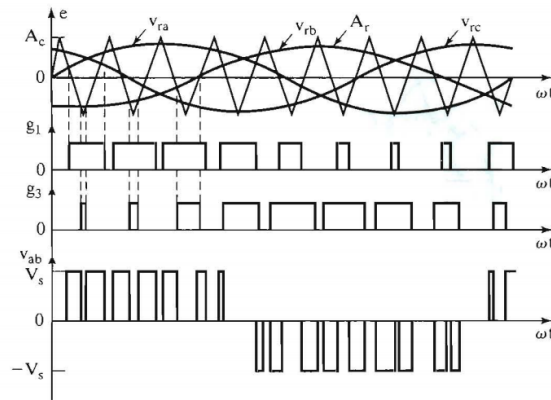


Figura 2.7: Frecuencia portadora de un variador de frecuencia [38]

realmente la salida de tensión es un señal de modulación de ancho de pulso cuadrada con igual o similar tensión RMS que el de una señal senoidal pura de la misma frecuencia. Como se puede ver en la figura pwm. Este sistema de modulado de ancho de pulso sirve bien ya que el motor es una carga inductiva grande la cual no permite cambios bruscos de corriente por lo que la forma de onda de la corriente es casi una señal senoidal perfecta. [5]

Frecuencia portadora, en un variador de frecuencia por modulación de ancho de pulso es la tasa o frecuencia a la cual los transistores son activados y/o desactivados

Inductor de línea, este es un inductor compuesto de un conductor de cobre enrollado en un núcleo ferro magnético, el cual no permite los cambios bruscos de corriente, usualmente es conectado antes del variador de frecuencia para reducir los armónicos que agrega el variador de frecuencia a la red eléctrica que energiza tanto al variador de frecuencia como otros dispositivos.[5]

Capítulo 3

Prototipo de monitorización de calidad de energía y protocolos de comunicación

En la figura 3.1 se puede observar el diagrama de bloques de forma general, como se vio anteriormente, el sistema está dividido en dos partes independientes entre sí. La primera parte está compuesto por la estación maestra y la sub-estación. La segunda parte es el sistema bajo medición

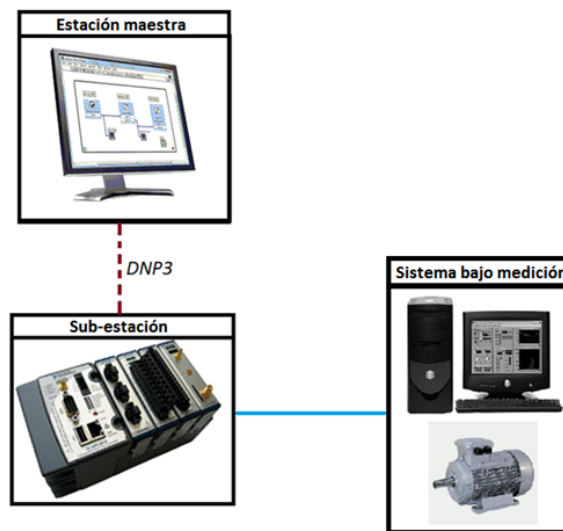


Figura 3.1: Diagrama del prototipo de calidad de energía

3.1 Sub-estación

La sub-estación es la encargada de realizar las mediciones de tensión y de corriente para realizar los primeros análisis de calidad de energía y la comunicación de parámetros calculados y la forma de onda a la estación maestra.

3.1.1 Equipos utilizados en la implementación de la sub-estación

En la figura 3.2 se puede observar el equipo que se utilizó para la implementación de la sub-estación:



Figura 3.2: Equipo que compone la sub-estación

NI cRIO-9024

Este es un controlador en tiempo real de 800MHz, 512 MB DRAM y 4GB de almacenamiento. Este cuenta con un procesador Freescale, para aplicaciones en tiempo real deterministas y fiables, dos puertos Ethernet, un puerto USB y un puerto serial RS232.

Estos controladores están diseñados para funcionar sin necesidad de una interfaz de usuario o de un operario. Su sistema operativo en tiempo real permite correr aplicaciones empotradas de manera determinativa.[19]

NI cRIO-9111

La carcasa cRIO-9111 es reconfigurable y tiene 4 ranuras para conectar los módulos deseados según lo requiera el usuario y la aplicación. Además cuenta con FPGA Xilinx LX30 Virtex-5[20]

NI PS-15

La fuente de alimentación para el cRIO-9024, tiene una entrada de tensión de 120V o 220V en corriente alterna y una salida de tensión de 24V en corriente directa con un máximo de 5A de corriente. Esta salida de tensión no solamente sirvió para energizar el cRIO-9024 si no también los relés utilizados en la otra parte como se discutirá más adelante.[26]

NI 9225

Módulo de tres canales de entrada analógica de 300Vrms, el cual cuenta con filtros anti alias integrados, este módulo cuenta con adquisición simultánea para los tres canales es decir tiene un convertidor de analógico a digital por cada canal, con una velocidad de muestreo de 50KS/s (cincuenta mil muestras por segundo)[14]

NI 9227

Módulo de entrada de 4 canales de corriente de 5Arms, de igual manera cuenta con filtros anti alias integrados, adquisición simultánea para los cuatro canales y con una velocidad de muestreo de 50KS/s (cincuenta mil muestras por segundo) [15]

NI 9977

Es un módulo de relleno para proteger los puertos y conectores de la carcasa cRIO-9111 de contaminación, polvo, ruido e interferencia.[17]

3.1.2 Programas para la implementación de la sub-estación

Módulo de LabVIEW FPGA

Tradicionalmente la programación de un FPGA se realizaba mediante programas usando VHDL o Verilog. LabVIEW FPGA permite la programación del FPGA manteniendo la plataforma de desarrollo gráfico de LabVIEW. La carcasa cRIO-9111 cuenta con un FPGA el cual se puede programar y configurar mediante este módulo, permitiendo una respuesta mucho más rápida para la etapa de re-muestreo de la cual se discutirá más adelante.[24]

Módulo de LabVIEW Real-Time

Plataforma de desarrollo gráfico de LabVIEW para programar controladores con un sistema operativo en tiempo real, el cual permite tener aplicaciones funcionales sin necesidad de un operario o interfaz gráfica, razón por la cual resulta práctico para monitorizar remoto, en lugares de difícil acceso, lejanos, control autónomo o simplemente no se requiere una interfaz o control manual en el lugar.[25]

Módulo de LabVIEW Electrical Power Suite

El módulo de LabVIEW Electrical power suite, permite desarrollar un sistema de monitoreo de calidad de energía según lo requiera el usuario o el sistema. Desde una red monofásica hasta una red trifásica ya sea esta en delta o “Y”. Este módulo brinda las herramientas para realizar la monitorización de calidad de energía desde la primera etapa de adquisición de datos con un FPGA, re-muestreo, comunicación entre la etapa el FPGA y el procesador en tiempo real, análisis y cálculos según la norma IEC 61000-4-30-2008. Esta norma incluye entre otros los siguientes cálculos y análisis:

- Frecuencia de la red
- Magnitud de la tensión
- Fluctuaciones de tensión (Flicker)
- Sobre-tensiones y sub-tensiones
- Interrupciones de tensión
- Balance de la red trifásica de tensión
- Armónicos de la tensión
- Cambios rápidos de tensión
- Mediciones de potencia

- Mediciones de energía
- Agregación (Aggregation)

Para la elaboración de este prototipo se utilizó una parte de todas la herramientas de análisis y cálculos. Esta plataforma cuenta con funciones que pueden ser usadas en un FPGA, en un sistema de tiempo real o en una computadora para análisis más complejos y extensos una vez que se haya recopilado los datos. [23]

Módulo de LabVIEW Driver for DNP3 Outstations support

Este módulo permite implementar un sistema tipo SCADA con el protocolo DNP3, el cual se utiliza para comunicar sistemas maestros, sub-estaciones y unidades remotas. Donde normalmente se tiene un maestro el cual monitorizar y controla todo el sistema basado en la información recopilada. Por otro lado la sub-estación es la encargada de recopilar la información e incluso de realizar un análisis previos de manera local.

Este módulo da la flexibilidad de acoplar los equipos y herramientas de NI con otros sistemas y equipos mediante protocolos de comunicación reconocidos. [10]

3.1.3 Integración de la sub-estación

El sub-estación se puede dividir en 2 bloques principales, como se puede ver en la figura 3.3 el del FPGA y el de sistema operativo en tiempo real (RTOS). Cada uno de estos bloques se puede dividir en 3 partes.

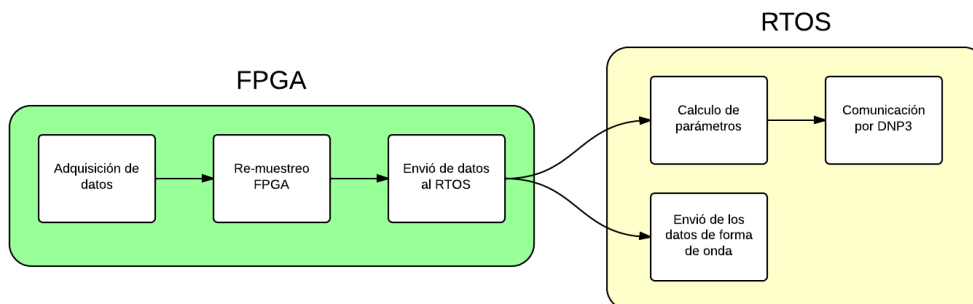


Figura 3.3: Diagrama de bloques de la sub-estación.

En el primer bloque de la figura 3.3 podemos ver un diagrama de lo que sería la primera parte de la sub-estación la cual consiste en la adquisición de los datos mediante los módulos de tensión y corrientes, NI 9225 y NI 9227 respectivamente. Además para esto se implemento el código de colores para sistemas trifásicos de 208VAC, para distinguir las fases de la siguiente manera negro, rojo y azul, respectivamente en ese orden para las tres fases.[2, 40, 32, 4]

Seguidamente en el FPGA se realiza un re-muestreo de los datos para eliminar ruido y mejorar la forma onda adquirida de la salida de tensión del variador de frecuencia

la cual es una salida de modulación por ancho de pulso a una alta frecuencia, con lo cual se logra que la salida de tensión del variador de frecuencia se asemeje más a una señal senoidal.

Por último el FPGA se encargará de enviar todos los datos de la forma de onda del FPGA al sistema operativo en tiempo real (RTOS) para eso se implementa una memoria FIFO y así evitar la pérdida de datos.

Una vez que se han adquirido los datos de la forma de onda de la red trifásica tanto de la tensión como de la corriente y después de haber pasado por la conversión de analógica a digital, re-muestreo y el envío de los datos al RTOS, será este último el que se encargará de realizar los primeros cálculos, procesamiento de la información y comunicación con la estación maestra.

La forma de onda de las 3 fases serán recibidas en el RTOS a través de la FIFO que comunica a éste con el FPGA, seguidamente estos datos se reenviarán por medio de la red a la estación maestra, para que esta pueda guardar los datos y realizar cálculos y procesamientos más complejos.

Los principales parámetros serán calculados de manera local en el RTOS de la sub-estación, de esta manera el sistema podrá enviar datos puntuales a la estación maestra para que en una aplicación real esta pueda tomar decisiones del caso según los datos recibidos.

Los parámetros calculados de manera local en la sub-estación serán enviados a la estación maestra utilizando el protocolo DNP3, mediante una rutina para realizar dicha comunicación.

3.2 Estación maestra

La estación maestra es la encargada de recibir la forma de onda tanto de la tensión como de la corriente a través de la red, además de realizar análisis de calidad de energía más complejos y extensos y de almacenar los datos de ser necesario.

En este prototipo la estación maestra no requirió de ningún equipo especial para su implementación, pero si requirió de varios programas.

3.2.1 Programas para la implementación de la estación maestra

LabVIEW

Plataforma de programación gráfica de alto nivel de programación, a diferencia de C que es de bajo nivel, para sistemas operativos en Windows, Linux o IOS. En este caso el sistema operativo utilizado para la estación maestra es Windows 7 de 64 bits.[11]

Keepware

Es un programa en el cual la empresa Kepware Technologies ha integrado una gran cantidad de protocolos de comunicación para poder brindar una interoperabilidad entre sistemas. Este programa sirve para conectar, manejar, monitorizar y controlar una gran diversidad de dispositivos y programas.

Este programa permite la comunicación por medio del protocolo DNP3, de manera que es este el que recibe todos los parámetros calculados por la sub-estación y por medio de un servidor OPC (OLE for Process Control) exportar los datos a LabVIEW [42]

Módulo de NI LabVIEW Datalogging and Supervisory Control (LabVIEW DSC)

Este módulo de LabVIEW extiende los beneficios de la plataforma de programación gráfica para incorporar el desarrollo e implementación de interfaces humano maquina (Human Machine Interface, HMI), protocolos de comunicación, comunicación con servidores OPC. Permitiendo la monitorización y control de sistemas mediante etiquetas de una gran cantidad de equipos y dispositivos como un PLC para mencionar algunos de ellos. Además de tener la funcionalidad de guardar información en una base de datos, el uso de alarmas, manejar eventos, entre otros. [22]

3.2.2 Implementación de la estación Maestra

En la figura 3.4 se puede apreciar un diagrama de bloques que abarca la implementación de la estación maestra de manera general, en este se puede ver el uso del programa de Kepware, se utilizó debido a que el módulo de LabVIEW para DNP3 en su primera versión no contaba con la facilidad de crear una estación maestra para implementar este protocolo, se tuvo que recurrir a implementar la estación maestra en el programa llamado Kepware. Este es el primer bloque que se puede notar en la figura 3.4, el cual está dividido en dos sub-bloques los cuales corresponden a la recepción de los datos por medio del protocolo DNP3 y el segundo sub-bloque corresponde a la publicación de estos datos en el servidor OPC.

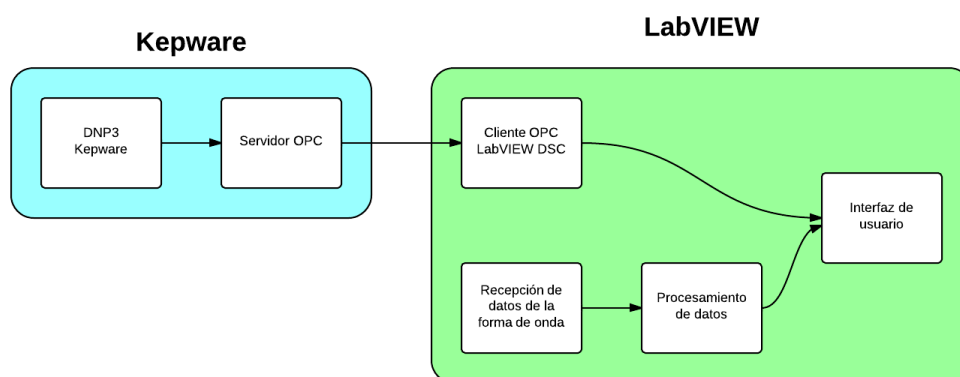


Figura 3.4: Diagrama de bloques de la sub-estación.

Una vez que los datos son publicados en el servidor OPC, mediante el módulo de LabVIEW DSC y un cliente OPC que es parte del módulo DSC, se importan los datos a LabVIEW para que puedan ser leídos, manipulados y se puedan visualizar los datos

en la interfaz de usuario. Por otro lado se reciben los datos de la forma de onda del sistema trifásico tanto la tensión como la corriente, estos datos son enviados a través de network streaming, sistema el cual funciona como una memoria FIFO, una vez importados los datos en la estación maestra se procede a realizar el procesamiento y cálculo de parámetros, los cuales demandarían mucho procesamiento y recursos de la sub-estación, recordemos que la aplicación de la sub-estación deberá funcionar de manera autónoma y evitar exceso de procesamiento o funciones que puedan afectar el determinismo de la aplicación.

En la figura 3.5 se puede ver la interfaz de usuario en la cual se despliegan los datos calculados en la estación maestra y los parámetros calculados en la sub-estación los cuales fueron enviados a través del protocolo DNP3

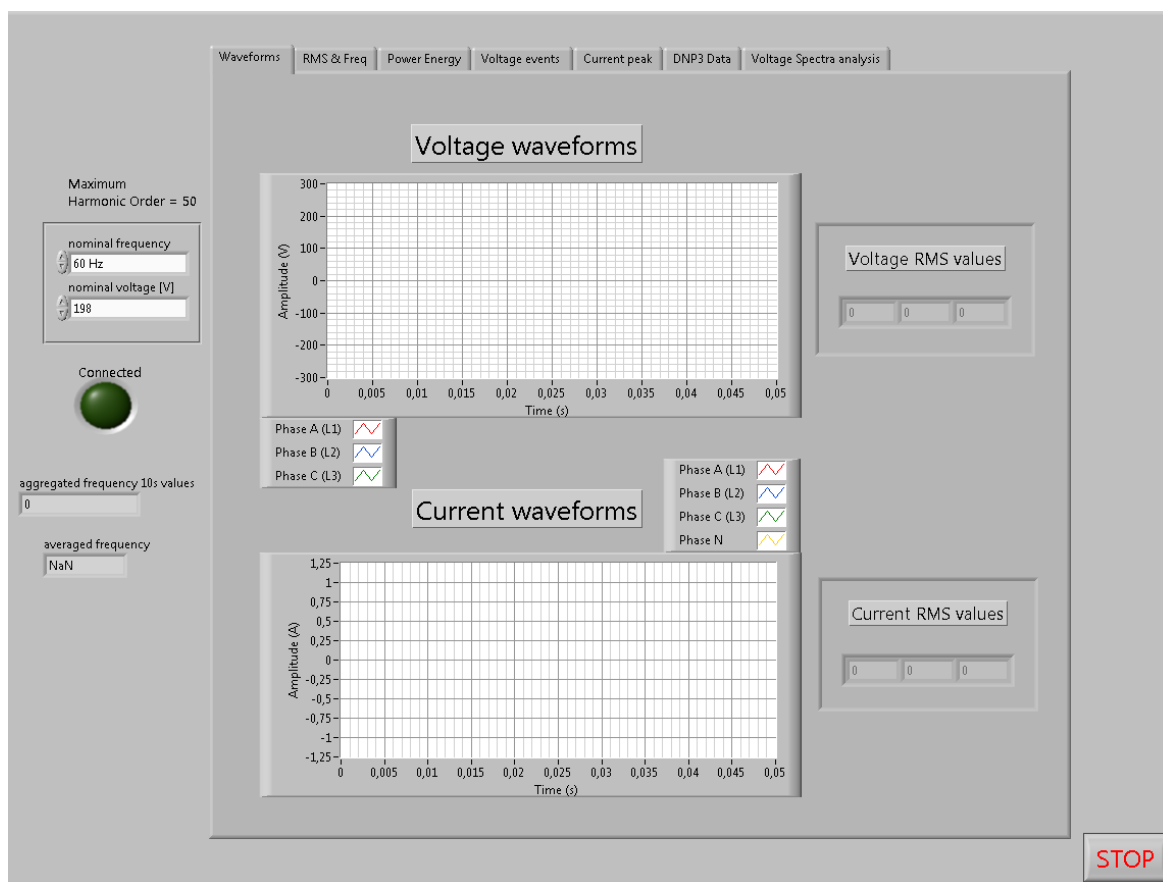


Figura 3.5: Interfaz de usuario de la estación maestra.

3.3 Sistema bajo medición

El sistema bajo medición es totalmente independiente de la sub-estación y la estación maestra, es decir, la ausencia o presencia de ellos no influyen de ninguna manera en el funcionamiento de esta. La función del sistema bajo medición es simular una red trifásica industrial la cual cuenta con la presencia de un motor trifásico el cual es una carga inductiva que va a afectar directamente la calidad de la energía de la red trifásica. Debido a la dificultad de manejar un prototipo que tenga como requisito una red trifásica para su funcionamiento no es usual que se cuente con una red trifásica en lugares de eventos y presentaciones, por lo que se optó por generar la red trifásica mediante un variador de frecuencia.

En la figura 3.6 se puede observar el equipo utilizado para la implementación del sistema bajo medición, en la siguiente sección se especifica con más detalle las partes del sistema.



Figura 3.6: Equipo que compone el sistema bajo medición.

3.3.1 Equipos utilizados en la implementación del sistema bajo medición

Algunos de los equipos utilizados ya fueron mencionados y detallados anteriormente en la sub-estación como lo son:

- NI PS-15: La fuente de poder NI PS-15
- NI 9977: El módulo NI 9977 de relleno.

Además de los dos dispositivos ya mencionados también se utilizó en la implementación del sistema bajo prueba los siguientes equipos y dispositivos.

USB-485

El convertidor de USB a puerto serial RS-485, el cual permite la comunicación por medio del protocolo Modbus desde la computadora al variador de frecuencia y se utiliza con los drivers de VISA (Virtual Instrument Software Architecture) de National Instruments. [12, 27]

NI 9472

Este es un módulo de 8 salidas digitales industriales las cuales pueden manejar un máximo de 0.75A por canal, pero requiere una fuente de tensión externa que permita

proporcionar esa corriente. En caso de exceder los 0.75A por canal el módulo podría dañarse. La diferencia entre una salida digital y una salida digital industrial está en la tensión, de manera que en lugar de tener un uno lógico de 5V como es el caso de una señal digital tipo TTL, ahora el uno tendrá una tensión de 24V. Esto permite activar y controlar actuadores, como relés, más fácilmente sin recurrir a etapas de potencia extra. [16]

NI 9215

Módulo de 4 entradas analógicas con un rango de $\pm 10V$. Este además permite la adquisición simultánea de las cuatro entradas, con una tasa de muestreo máxima de 100KS/s.[13]

NI cDAQ-9174

Carcaza de comunicación USB de 4 ranuras, este dispositivo permite disponer de los módulos que requiera la aplicación, ya sean analógicos, digitales, de uso general o específico, manteniendo un dispositivo pequeño, portable y el cual se puede conectar fácilmente a una computadora por medio de un cable USB. Manejando en la computadora el control y adquisición de datos de la aplicación. Para utilizar este dispositivo se debe contar con los drivers de DAQmx (Data acquisition) de National Instruments.[18, 21]

Variador de frecuencia Yaskawa V1000 CIMR-VU2A0004

El variador de frecuencia utilizado es de la familia V1000 modelo CIMR-VU2A0004, el cual es capaz de generar una salida trifásica a partir de una entrada monofásica o trifásica, con una potencia de tres cuartos de caballo de fuerza (3/4HP), una corriente máxima RMA de 3.5A a carga normal. Este además permite la conexión de resistencia de frenado, inductancia DC line choke. Este Variador de frecuencia puede ser controlado de manera manual, por medio de su panel de control integrado o conexión de un panel de botones externo, además de manera analógica o digital por distintos medios.

En la figura 3.7 se puede ver el diagrama total del variador de frecuencia con todas las terminales, conexiones y opciones de equipo.

Para implementar un control de la frecuencia de trabajo se puede realizar por medio de una entrada de tensión analógica la cual puede tener distintas escalas de tensión hasta un máximo de -10 a 10V, donde esta tensión es directamente proporcional a la frecuencia de trabajo.

Otra manera de controlar la frecuencia de trabajo del variador de frecuencia es mediante una señal de digital de tren de pulsos y por último por medio del puerto serial RS-422/485 utilizando el protocolo de comunicación Modbus.

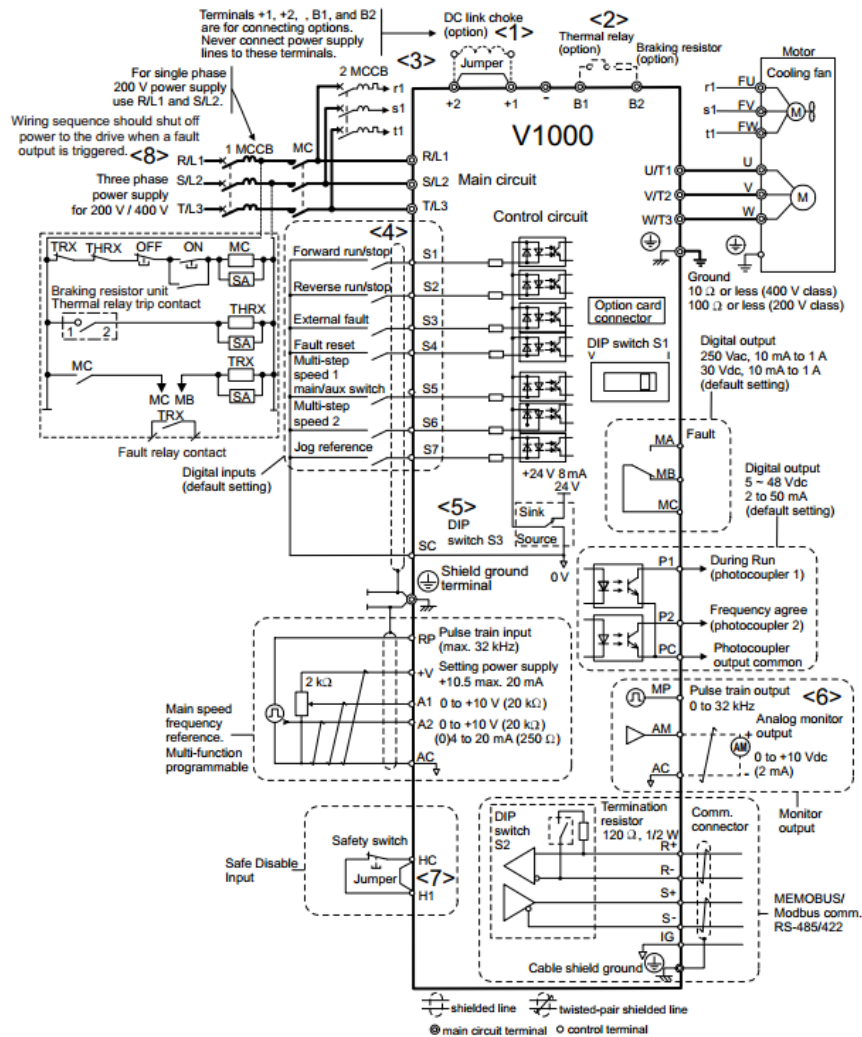


Figura 3.7: Diagrama de entradas, salidas y conexiones del variador de frecuencia.

Motor trifásico Nord SK1SI31-IEC63-63L4

El motor reductor trifásico utilizado se puede ver en la figura 3.8, el cual es de la marca Nord SK1SI31-IEC63-63L4, el cual tiene como valores nominales en su placa de especificaciones una tensión de 220- 380V, una corriente de 0.88-0.51A, de un cuarto de caballo de fuerza (1/4HP), con un factor de potencia de 0.82, a una frecuencia nominal de 60Hz y con una velocidad de 1590 revoluciones por minuto.[36]

A este motor se le acopla una caja reductora con un índice de reducción de 60, con lo cual la velocidad de salida nominal sería de 23 revoluciones por minuto. [36, 35]

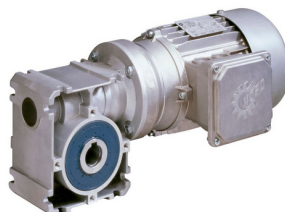


Figura 3.8: Motor trifásico Nord SK1SI31-IEC63-63L4.[37]

Relé de 3 contactos 24V T3RC3

Para las interconexiones de cargas en serie tanto resistivas como inductivas se utilizó relés de 3 contactos con su respectiva base para riel tipo DIN como se puede ver en la figura 3.9. Para poder conectar los elementos prácticamente al mismo tiempo en las tres fases, este relé soporta hasta un máximo de 250V en y 10 A en corriente alterna. Por otro lado en lo que respecta a la señal digital que lo controla este tiene una tensión nominal de 24V y 56mA en corriente directa. El tiempo de accionamiento es de 20 -30ms de acuerdo a los valores nominales de las hojas de especificaciones. [34]



Figura 3.9: Relé de 3 contactos 24V T3RC3[28]

Interruptor termo magnético Multi 9 C60N 2P 10A

Interruptor termo magnético o más conocido por su nombre en inglés “Circuit Breaker”. Este está diseñado para usarse en sistemas con dos polos y con una corriente máxima de 10A, al superar esta corriente este abre interrumpiendo el paso de la corriente. En la figura 3.10 se puede ver de manera ilustrativa como se ve uno de estos relés para montar en el riel tipo DIN. [29]



Figura 3.10: Interruptor termo magnético Multi 9 C60N 2P 10A[29]

Inductancia de línea RLW-02P103

En la figura 3.11 se puede ver la inductancia de línea RLW-02P103 que se utilizó en el sistema, la cual esta diseñada para trabajar a 240V en corriente alterna, con una corriente nominal de 2A, a una frecuencia de 60Hz y con una impedancia de 11mH. [6]



Figura 3.11: Inductancia de línea RLW-02P103.[6]

Resistencia de potencia de 100

Se utilizó resistencias de 100 con una disipación de potencia de 50W, como las que se puede ver en la figura 3.12



Figura 3.12: Resistencia de potencia de 100 y 50W.[30]

3.3.2 Programas para la implementación del sistema bajo medición

Los programas utilizados para la implementación del sistema bajo medición ya fueron mencionados y detallados anteriormente en la sub-estación como lo son:

- LabVIEW
- LabVIEW Datalogging and Supervisory Control (LabVIEW DSC)

3.3.3 Implementación del sistema bajo medición

Se configuró el variador de frecuencia con las especificaciones del motor trifásico, como potencia, velocidad máxima, tensión, corriente y frecuencia nominal. Además se habilitó el control por medio del puerto MODBUS para poder escribir comandos desde LabVIEW a registros del variador de frecuencia para cambiar la frecuencia de trabajo, sentido de giro, encendido o apagado del motor.

EL VF también cuenta con registros los cuales pueden ser leídos para monitorizar la frecuencia de trabajo y obtener un valor aproximado de la velocidad de motor a partir de las especificaciones del motor, la tensión y la corriente del sistema.

En la figura 3.13 se puede ver el circuito utilizado para el sistema bajo medición, a la entrada tenemos una tensión de 208V en corriente alterna, seguidamente está el interruptor termo magnético, como protección a la red y al sistema en caso de un accidente como lo es un corto circuito o una sobrecarga en el sistema. Después está el variador de frecuencia y después las inductancias y las resistencias las cuales son desconectadas o conectadas a la red entre el variador de frecuencia y el motor trifásico mediante los relés trifásicos. Lo cual permitió variar los valores de tensión y corrientes que son medidos antes del motor trifásico, es decir después de todas la cargas que estuvieran conectadas para distorsionar la calidad de la energía.

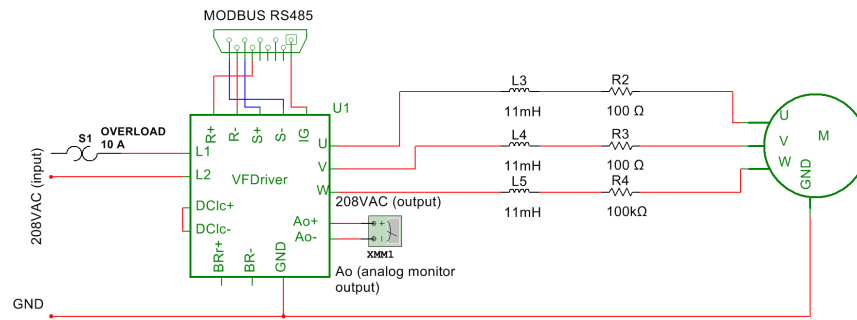


Figura 3.13: Circuito del sistema bajo medición.

La salida de tensión $Ao+$ y $Ao-$ del VF se configuró para trabajar de 0V hasta 10V, esta salida de tensión es directamente proporcional a la frecuencia de trabajo del VF, es decir cuando el variador este en la máxima frecuencia (60Hz) la salida de tensión será de 10V.

En la figura 3.14 se puede observar la interfaz de usuario del sistema bajo medición, en el cual se puede notar que la mayoría de los comandos dependerán del usuario, ya sea para encender o apagar el motor, modificar la velocidad del motor, cambiar la dirección de giro, activar la rampa de arranque del motor o activar las salidas digitales que controlan los relés trifásicos que conectan o desconectan las resistencias y/o inductancias en la red.

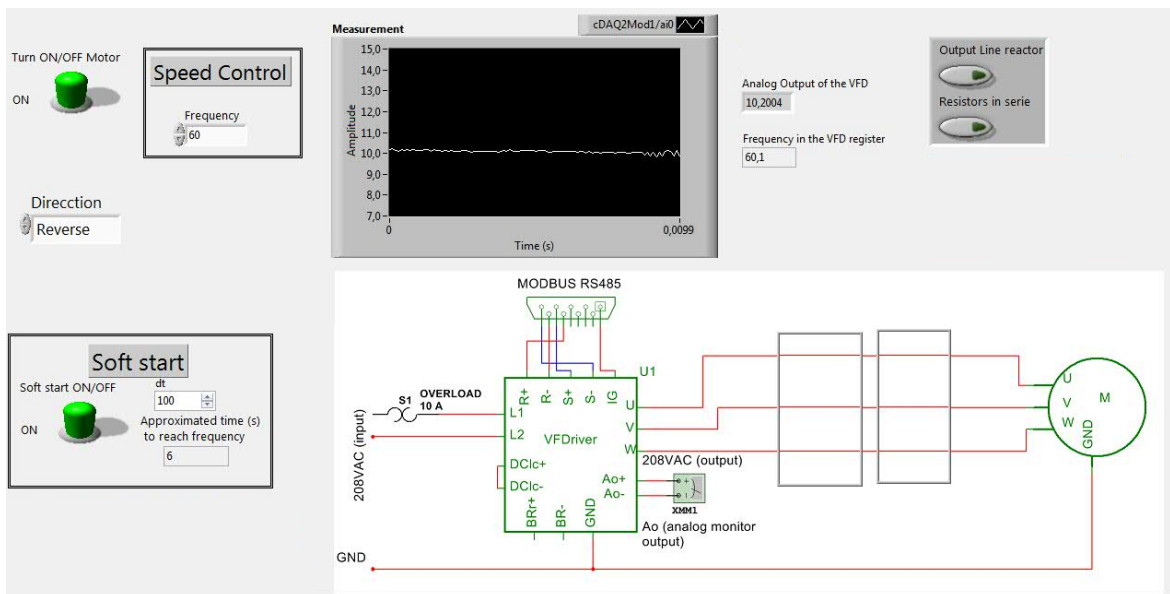


Figura 3.14: Interfaz de usuario del sistema bajo medición.

Al depender de los comando de usuario se optó por un sistema que dependa y detecte los eventos generados por el usuario en la interfaz humano máquina, en la figura 3.15 se encuentra el diagrama de flujo que resume de manera general los eventos que se detectan y las acciones o procesos que se realizan al darse dicho evento.

Los principales eventos son el interruptor de encendido o apagado del motor, la activación de la rampa de arranque, la frecuencia de trabajo del variador de frecuencia que controlará la velocidad del motor, la dirección de giro del motor y por ultimo el control de los relés que conectan o desconectan las resistencias o inductancias de la red.

En paralelo a este sistema de control, se monitoriza de manera constante la frecuencia de trabajo del VF mediante la salida de tensión Ao+ y Ao- y también de manera digital mediante la comunicación con el VF por el puerto serial, mediante el protocolo MODBUS.

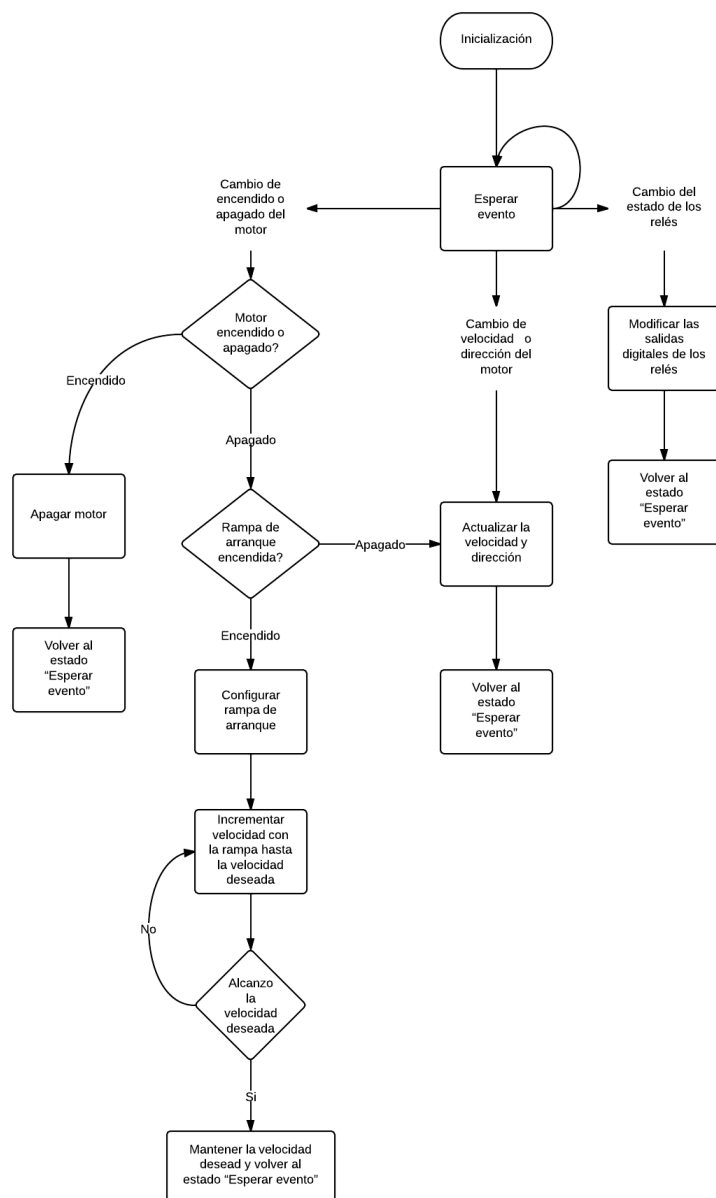


Figura 3.15: Diagrama de flujo del control del sistema bajo medición .

Capítulo 4

Resultados y Análisis

4.1 Frecuencia de portadora del variador de frecuencia

La primera parte a destacar es la generación de la red trifásica mediante el VF, el VF se puede configurar con diferentes frecuencias de portadora para generar la modulación de ancho de pulso (PWM), entre mayor sea la frecuencia de la portadora, mayor será la cantidad de pulsos por semiperiodo y por ende del periodo. Esto permite que la tensión de salida se aproxime mas a los valores nominales deseados. En la tabla 4.1 se pueden ver las principales frecuencias de portadora que permite utilizar el VF .

	Numero de opción en el VF	Frecuencia
Frecuencia de la portadora	1	2kHz
	2	5kHz
	3	8kHz
	4	10kHz
	5	12.5kHz
	6	215kHz

Tabla 4.1: Frecuencias de la portadora disponibles en el VF.[43]

La mayoría de las cargas que se conectan a los VF son de naturaleza inductiva, aunque los cambios de tensión sean abruptos por el PWM los cambios en la corriente no serán abruptos ya que las cargas inductivas no permiten cambios bruscos de corriente. Razón por la cual aunque la tensión de salida sea un PWM la forma de onda de la corriente no tendrá cambios bruscos de corriente y su forma de onda se asemejara más a una onda senoidal con ruido o rizo.

En la figura 4.1 se puede ver la forma de onda con una frecuencia de portadora de 2kHz, con un re-muestreo de 300, más adelante se discutirá con más detalle el re-muestreo. Como se puede notar en la tensión su forma de onda tiene un patrón senoidal distorsionado, con ruido y recortada aproximadamente a 280V. Esta se debe al re-muestreo que se estar realizando ya que si este no estuviera presente se podría apreciar de mejor manera el PWM en la tensión de salida del VF. Por otro lado la forma de corriente se asemeja más la señal senoidal pero presenta un rizo o ruido.

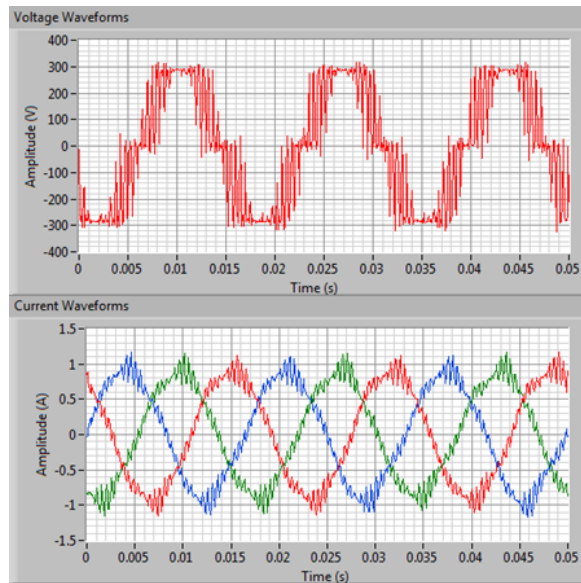


Figura 4.1: Forma de onda de la corriente y la tensión, con una frecuencia de portadora de 2kHz..

En la figura 4.2 se puede ver la forma de onda con una frecuencia de portadora de 15kHz, con un re-muestreo de 300, en esta figura se puede notar como a el re-muestreo implementado además de una frecuencia de portadora de 15kHz permite que la salida de tensión del VF se asemeje mucho a una señal senoidal, como se puede notar ya no se presenta el ruido o rizo que se presentaba con una frecuencia de portadora menor. El utilizar una frecuencia de portadora mayor va a reducir el tiempo de vida de los transistores de potencia del VF, pero tomando en cuenta que este es un prototipo para demostraciones que no es utilizado durante largos periodos de tiempo, se deicidio utilizar esta frecuencia de portadora.

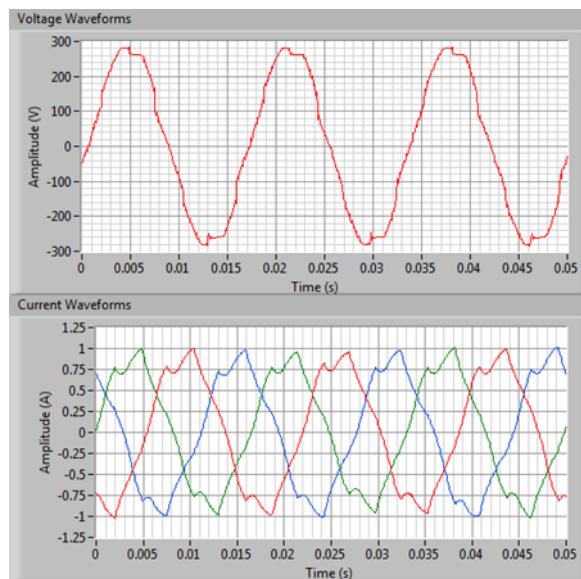


Figura 4.2: Forma de onda de la corriente y la tensión, con una frecuencia de portadora de 15kHz..

4.2 Muestras por ciclo

La adquisición de la tensión y la corriente se realizan mediante los módulos NI 9225 y NI 9227 estos tienen una tasa de muestreo máxima de 50KS/s. Debido a que el objetivo del prototipo es simular una red trifásica pura senoidal para demostrar las herramientas que tiene NI para el estudio de CE, ya que realmente no interesa el estudio de calidad de energía de una salida de tensión tipo PWM como lo es la salida de tensión del VF, se realizó un re-muestreo de los datos adquiridos en el FPGA con el fin de suavizar la forma de onda de manera que la tensión y la corriente se asemejen más a la forma de onda de una señal senoidal

Tomando en cuenta que el periodo de una señal de 60Hz es de aproximadamente 16.67ms, con la tasa máxima de muestreo de estos módulos se puede llegar a obtener 833 muestras en un periodo. Para esta cantidad de muestras se necesitaría más procesamiento y recursos para manejar este volumen de datos por ciclo y realizar los cálculos, por esta razón es recomendado utilizar un número de muestras por ciclo desde 128 hasta 512. [9]

En el caso de que se utilizara un número de muestra igual o menor 128 muestras por ciclo se puede correr el riesgo de que la información adquirida no sea suficiente para detectar los fenómenos y distorsiones que se den en la red, además de no poder calcular de manera precisa muchos de los parámetros. Pero el incrementar mucho el número de muestras por ciclo dará como resultado que la forma de tensión adquirida se asemeje y vea como una señal de PWM, tal y como se puede ver en la figura 500 muestras.

En el caso de que se utilizara un número de muestra igual o menor a 128 muestras por ciclo se puede correr el riesgo de que la información adquirida no sea suficiente para detectar los fenómenos y distorsiones que se den en la red, además de no poder calcular de manera precisa muchos de los parámetros. Pero el incrementar mucho el número de muestras por ciclo dará como resultado de que se requiera muchísimos más recursos tanto del FPGA o como del controlador. En el caso del FPGA para realizar el re-muestreo y la comunicación con el controlador, por otro lado los recursos del controlador también se ven afectados al tener que procesar y enviar más información.

En la figura 4.3 se puede ver la forma de onda de la corriente y de la tensión con una frecuencia de portadora de 15kHz en el VF y con un re-muestreo de 192 muestras por ciclo. El resultado obtenido es una onda de tensión y de corriente que se asemeja mucho a una onda senoidal con un número de muestras razonables para ser manejado por el controlador cRIO-9024 y la carcasa NI-9111. El cual en comparación a la figura 4.2 se puede notar que la forma de onda es muy similar a pesar de tener 192 muestras por ciclo, es decir 108 muestras menos por ciclo.

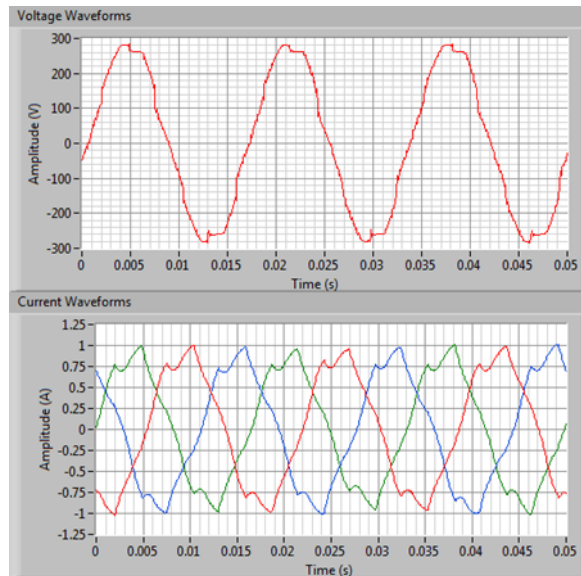


Figura 4.3: Forma de onda de la corriente y la tensión, con una frecuencia de portadora de 15kHz..

4.3 Parámetros de calidad de energía obtenidos en la sub-estación

4.3.1 Valores RMS, potencias y factor de potencia

Como punto de referencia y de partida se realizó la monitorización de calidad de energía de la red generada por el VF a la frecuencia nominal del motor 60Hz, con una tensión de salida del VF de 198Vrms, con una frecuencia de portadora de 15kHz, sin el reductor de velocidad y sin ninguna carga a la salida del motor.

El valor promedio de 300 muestras obtenidas de los siguientes parámetros: potencia reactiva, real, aparente, factor de potencia, tensión RMS y corriente RMS para cada una de las fases se encuentran resumidas en la tabla 4.2.

Fase	A	B	C
Potencia activa (W)	80.027	79.881	81.069
Potencia reactiva (VAR)	93.098	94.664	94.879
Potencia aparente (VA)	122.771	123.867	124.800
Factor de potencia	0.652	0.645	0.650
Tensión RMS (Vrms)	197.144	197.338	197.268
Corriente RMS (Arms)	0.623	0.628	0.633

Tabla 4.2: Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las tres líneas sin ninguna carga.

Potencia activa Total (W)	240.978
Potencia reactiva Total(VAR)	282.641
Potencia aparente Total(VA)	371.438
Factor de potencia Total	0.649

Tabla 4.3: Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las potencias totales y el factor de potencia sin ninguna carga.

Las cargas resistivas e inductivas se conectaron en serie entre el VF y el motor trifásico, esto permitió monitorizar la calidad de energía que le llega al motor, si se hubiera monitorizado la calidad de energía a la salida del VF no se hubiera detectado los eventos de corta y larga duración, los cuales se discutirán más adelante.

En las tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 se puede ver los resultados de los mismos parámetros mencionados anteriormente en las tablas no load y no load total con la carga inductiva, carga resistiva y ambas cargas conectadas en serie entre el VF y el motor trifásico, en la figura 4.4 se puede ver el circuito utilizado.

El sistema implementado permitirá que el usuario visualice variaciones grandes de tensión, corriente, potencia y factor de potencia, como se puede ver en las tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9. Sin embargo, el sistema implementado dejará de lado la parte de la potencia reactiva, real y aparente que consuman o disipen estas cargas conectadas, es decir no se está tomando en cuenta la tensión en la carga resistiva y/o inductiva según sea el caso. Pero el efecto de estas cargas si se ve reflejado en la corriente tanto en magnitud como en fase.

Tomando de ejemplo el caso más sencillo que es el de la carga resistiva, en las tablas 4.6 y 4.7, se puede ver que la corriente en la fase A es de 0.461Arms, conociendo el valor de la resistencia y de la corriente fácilmente se puede conocer el valor de la tensión rms en la resistencia, la cual dará como resultado una tensión de 46.1Vrms. De manera que la tensión de salida del VF será la suma de la tensión de la resistencia y el motor que se encuentran conectados en la red. En la tabla 4.6 se puede ver que la tensión para la fase A medida es de 128.402Vrms si a esta tensión le sumamos la tensión de la resistencia tendremos como resultado que la tensión de salida del VF es de 174.502Vrms.

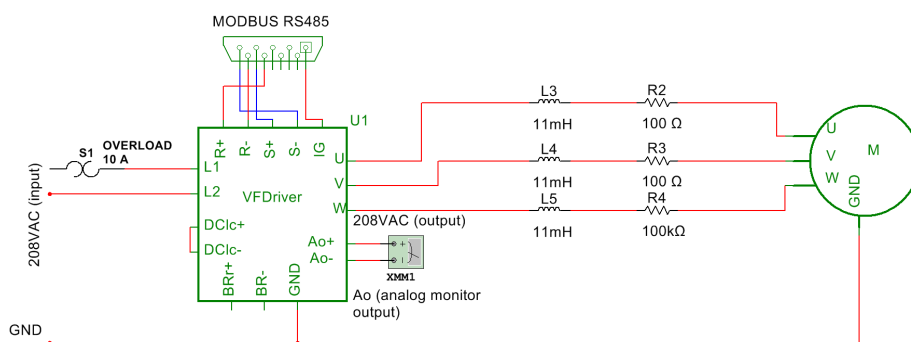


Figura 4.4: Circuito del sistema bajo medición.

Fase	A	B	C
Potencia activa (W)	75.380	75.615	79.001
Potencia reactiva (VAR)	54.691	58.786	57.701
Potencia aparente (VA)	93.140	95.787	97.840
Factor de potencia	0.809	0.789	0.807
Tensión RMS (Vrms)	171.440	172.526	172.338
Corriente RMS (Arms)	0.543	0.555	0.568

Tabla 4.4: Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las tres líneas con carga L.

Potencia activa Total (W)	229.996
Potencia reactiva Total(VAR)	171.178
Potencia aparente Total(VA)	286.767
Factor de potencia Total	0.802

Tabla 4.5: Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las potencias totales y el factor de potencia con carga L.

Fase	A	B	C
Potencia activa (W)	54.484	54.712	54.922
Potencia reactiva (VAR)	23.204	23.572	23.291
Potencia aparente (VA)	59.233	59.583	59.665
Factor de potencia	0.920	0.918	0.921
Tensión RMS (Vrms)	128.402	128.362	128.248
Corriente RMS (Arms)	0.461	0.464	0.465

Tabla 4.6: Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las tres líneas con carga R.

Potencia activa Total (W)	164.118
Potencia reactiva Total(VAR)	70.067
Potencia aparente Total(VA)	178.480
Factor de potencia Total	0.920

Tabla 4.7: Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las potencias totales y el factor de potencia con carga R.

Fase	A	B	C
Potencia activa (W)	45.263	45.847	46.740
Potencia reactiva (VAR)	13.975	15.367	14.517
Potencia aparente (VA)	47.376	48.359	48.949
Factor de potencia	0.955	0.948	0.955
Tensión RMS (Vrms)	111.594	112.135	111.807
Corriente RMS (Arms)	0.425	0.431	0.438

Tabla 4.8: Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las tres líneas con carga RL.

Potencia activa Total (W)	137.850
Potencia reactiva Total(VAR)	43.859
Potencia aparente Total(VA)	144.684
Factor de potencia Total	0.953

Tabla 4.9: Promedio de parámetros de calidad de energía de 300 muestras para las potencias totales y el factor de potencia con carga RL.

4.3.2 Distorsión armónica total

En la tabla 4.10 se puede ver los valores obtenidos de distorsión armónica total en el sistema sin ninguna carga, a pesar de usarse el re-muestreo se puede calcular el la distorsión armónica total del sistema. En la tabla 4.11 se pueden ver los valores de distorsión armónica total con una frecuencia de portadora en el VF de 2kHz. Es notable la diferencia del cambio de portadora y el re-muestreo que se realizo. Se presenta una mejora en el porcentaje de la distorsión armónica total de la tensión, pero a pesar de que la corriente presentaba un ruido o rizo la distorsión armónica total de la corriente empeora debido a la deformación que presenta la forma de onda en la figura 4.2.

Fase	A	B	C
THD Tensión %	8.150	8.065	8.06
THD Corriente %	11.474	11.289	11.625

Tabla 4.10: Distorsión armónica total sin carga con el re-muestreo y una frecuencia portadora de 15Khz.

Fase	A	B	C
THD Tensión %	14.738	14.481	13.397
THD Corriente %	7.709	8.493	7.657

Tabla 4.11: Distorsión armónica total sin carga con el re-muestreo y una frecuencia portadora de 2Khz..

4.3.3 Variación de la frecuencia

La frecuencia es una de las distorsiones más sencilla de modificar en este sistema, ya que al trabajar con un VF, este permitió cambiar la frecuencia de trabajo con el motor en funcionamiento, estos cambios generan alertas en los valores promedios de la frecuencia tanto a los 3 segundo como a los 10 segundos.

La medición de la frecuencia para la tensión se realiza de manera constante y por esta razón se pudo notar variaciones de 0.5Hz a pesar de mantener el VF trabajando a la frecuencia nominal de 60Hz, es decir se notaba variaciones en los decimales los cuales llevaban a dar mediciones de 60.5Hz y 59.5 Hz. La frecuencia promedio para 300 muestras dio como resultado 60.25Hz.

El modificar la frecuencia de trabajo además modifica la tensión rms de la salida y de esta manera generar sub-tensiones y sobre-tensiones de corta o larga duración dependiendo del tiempo que perdure la distorsión. El módulo de LabVIEW Electrical Power Suite está diseñado para trabajar a frecuencias de redes de 50Hz y 60Hz de

manera que no se puede asegurar que los parámetros calculados de calidad de energía sean validos para frecuencias diferentes. Por esta razón las variaciones de frecuencia se realizaron siempre en el rango de 50Hz hasta 60Hz.

4.3.4 Eventos

Mediante la conexión de las resistencias y/o inductancias en la red se logró insertar variaciones de sub-tensión. En el caso de que supere el minuto la sub-tensión será considerada como de larga duración caso contrario será considerada de corta duración. Debido a ambos elementos reducían la tensión del sistema, el único evento que se pudo generar fue la sub-tensión de corta duración (sag-dips) y de larga duración (undervoltage).

Por otro lado el apagar el VF por intervalos de tiempo permite generar interrupciones en el sistema tanto de corta duración como de larga duración. Ya que en el momento que el sistema este apagado la tensión en el sistema es de 0Vrms.

Es importante destacar que al generarse un evento fuese este una interrupción o una sub-tensión se registrara el valor de tensión mínimo del evento, su duración y además el tiempo de inicio de este evento. Como se puede ver en la figura evento.

El volumen de trabajo o de información máximo es de 20MB/s[7], pero debido al tiempo de adquisición de datos, ejecución y procesamiento nunca se llevo a necesitar esa tasa de transferencia, ya que la máxima transferencia de datos fue menor a 500KB/s, aproximadamente 491.28KB/s.

Para el caso de la comunicación por medio del protocolo DNP3 las herramientas de NI permiten tasas de transferencia más rápidas pero el software de Keepware permite actualizar los datos cada segundo, de manera que este fue una limitante para actualizar los datos a la estación maestra, tomando en cuenta que la estación maestra debería de tener los datos lo más pronto posible para poder tomar decisiones y controlar el sistema.

Capítulo 5

Conclusiones

- Se logró diseñar un prototipo que puede simular un sistema industrial trifásico, haciendo uso de un VF de entrada monofásica, este permitió generar la red que se utiliza para energizar el motor trifásico.
- Mediante un incremento de la frecuencia portadora del VF, en conjunto con un re-muestreo de los datos que fueron adquiridos a 50KS/s, se logró obtener una forma de onda tanto de tensión como de corriente que se aproxime más a una onda senoidal en lugar de la salida de tensión tipo PWM que genera el variador de frecuencia.
- La introducción de cargas inductivas y resistivas permite al usuario distorsionar los valores de potencia real, reactiva, aparente, factor de potencia, tensión RMS y corriente RMS.
- Al variar la frecuencia del VF fuera del rango nominal de trabajo del sistema, 60Hz, el prototipo permite generar alertas de que hay variaciones en la frecuencia.
- La introducción de cargas inductivas y resistivas crea una caída de tensión la cual permite generar eventos de sub-tensión
- El apagar el VF crea eventos llamados interrupciones de tensión en la red eléctrica.

Recomendaciones

- Reducir el cálculo de parámetros y procesamiento en el cRIO o utilizar un cRIO con dos procesadores para dividir las tareas y que se mejore el rendimiento de la conexión
- Diseñar un sistema de frenado para el motor, de manera que este sea una carga mecánica y permita distorsionar la calidad de energía al demandar más corriente.
- Mejorar la comunicación de la sub-estación y la estación maestra para evitar que una desconexión genere errores en la adquisición y procesamiento de los datos.
- Generar una base de datos de los eventos localmente en la sub-estación.
- Implementar la estación maestra de DNP3, con el módulo LabVIEW Driver for DNP3 Outstations support versión 2, el cual ya permite crear sub-estaciones y estaciones maestras. De esta manera prescindir del software de Kepware.

Bibliografía

- [1] Especificaciones del protocolo industrial modbus. Internet, Enero 2013. ([document](#)), [2.3.1](#), [2.2](#)
- [2] AllAboutCircuits.com. Wiring color codes. Internet, Enero 2013. [3.1.3](#)
- [3] Dr. Juan Carlos Campos Avella. Calidad de la energía eléctrica. Universidad Del Atlántico, Universidad Autónoma De Occidente. ([document](#)), [2.4.2.1](#), [2.3](#), [2.4.2.5](#), [2.4.2.6](#), [2.4.2.6](#), [2.4.2.6](#), [2.4.2.8](#)
- [4] CableOrganizer.com. Three-phase electric power. Internet, Enero 2013. [3.1.3](#)
- [5] Paul Avery Christopher Amick. The abcs (and 1-2-3s) of variable frequency drivers. Internet, Enero 2010. ([document](#)), [2.5](#), [2.5](#), [2.6](#), [2.5](#)
- [6] MTE AN SL INDUSTRIES COMPANY. Rlw reactors selection table, technical details and product application guide. Internet, Enero 2013. ([document](#)), [3.3.1](#), [3.11](#)
- [7] National Instruments Corporation. Lossless communication with network streams: Components, architecture, and performance. Internet, Mayo 2012. [4.3.4](#)
- [8] National Instruments Corporation. Company, Enero 2013. [1.1](#)
- [9] National Instruments Corporation. Fpga resampling vi, Enero 2013. [4.2](#)
- [10] National Instruments Corporation. Introduction to dnp3. Internet, Enero 2013. [3.1.2](#)
- [11] National Instruments Corporation. Labview system design software. Internet, Enero 2013. [3.2.1](#)
- [12] National Instruments Corporation. National instruments visa. Internet, Enero 2013. [3.3.1](#)
- [13] National Instruments Corporation. Ni 9215 4-channel, 100 ks/s/ch, 16-bit, +-10 v analog input module. Internet, Enero 2013. [3.3.1](#)
- [14] National Instruments Corporation. Ni 9225 3-channel, 300 vrms analog input module. Internet, Enero 2013. [3.1.1](#)
- [15] National Instruments Corporation. Ni 9227 4-channel current input c series module. Internet, Enero 2013. [3.1.1](#)
- [16] National Instruments Corporation. Ni 9472 8-channel 24 v logic, 100 us, sourcing digital output module. Internet, Enero 2013. [3.3.1](#)

- [17] National Instruments Corporation. Ni 9977 c series slot filler module. Internet, Enero 2013. [3.1.1](#)
- [18] National Instruments Corporation. Ni cdaq-9174 ni compactdaq 4-slot usb chassis. Internet, Enero 2013. [3.3.1](#)
- [19] National Instruments Corporation. Ni crio-9024 real-time controller: 800 mhz, 512 mb dram, 4 gb storage. Internet, Enero 2013. [3.1.1](#)
- [20] National Instruments Corporation. Ni crio-9111 4-slot, virtex-5 lx30 compactrio reconfigurable chassis. Internet, Enero 2013. [3.1.1](#)
- [21] National Instruments Corporation. Ni-daqmx software. Internet, Enero 2013. [3.3.1](#)
- [22] National Instruments Corporation. Ni labview datalogging and supervisory control (dsc) module. Internet, Enero 2013. [3.2.1](#)
- [23] National Instruments Corporation. Ni labview electrical power suite overview. Internet, Enero 2013. [3.1.2](#)
- [24] National Instruments Corporation. Ni labview fpga module. Internet, Enero 2013. [3.1.2](#)
- [25] National Instruments Corporation. Ni labview real-time module. Internet, Enero 2013. [3.1.2](#)
- [26] National Instruments Corporation. Ni ps-15 power supply 5 a, 24 vdc. Internet, Enero 2013. [3.1.1](#)
- [27] National Instruments Corporation. Ni usb-485 1-port rs485/422 interface for usb. Internet, Enero 2013. [3.3.1](#)
- [28] 24 de maio. Rele t3rc3 24vdc 10a com 3 contatos rev. Internet, Enero 2013. [\(document\)](#), [3.9](#)
- [29] Schneider Electric. C60 - multi 9 miniature circuit-breakers up to 63a. Internet, Enero 2013. [\(document\)](#), [3.3.1](#), [3.10](#)
- [30] Rodar electronica industrial. Resistencias ceramicas con disipador al 1 Internet, Enero 2013. [\(document\)](#), [3.12](#)
- [31] Mohammad A. S. Masoum Ewald Fuchs. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Academic Press, 2008. [2.4](#)
- [32] Gregory Havel. Construction concerns: Electrical color codes. Internet, Enero 2013. [3.1.3](#)
- [33] IRENE YU-HUA GU MATH H. J. BOLLEN. *Signal processing of power quality disturbances*. IEEE PRESS, 2006. [\(document\)](#), [2.4](#), [2.4.1](#), [2.2](#), [2.4.1](#), [2.3](#)
- [34] Metaltex. Metaltex plug-in relay. Internet, Enero 2013. [3.3.1](#)
- [35] Nord. G1035 universal worm gear units si and smi nord drive system. Internet, Enero 2013. [3.3.1](#)
- [36] Nord. Standard design sk 1si 31-iec ...1-stage. Internet, Enero 2013. [3.3.1](#)

- [37] Nord. Universal schneckengetriebe (si + sm) - 102 seiten. Internet, Enero 2013. [\(document\)](#), [3.8](#)
- [38] Muhammad H. Rashid. *Electronica de Potencia. Circuitos Dispositivos y Aplicaciones*. Pearson Education, 3/ed edition, 2004. [\(document\)](#), [2.7](#)
- [39] Mark F McGranaghan Roger C. Dugan, Surya Santoso. *Electrical Power Systems Quality*. McGraw Hill, 2nd edition, 2003. [\(document\)](#), [2.4.1](#), [2.4.2.1](#), [2.4.2.2](#), [2.4.2.3](#), [2.4.2.3](#), [2.4](#), [2.4.2.3](#), [2.5](#), [2.4.2.4](#), [2.4.2.5](#), [2.4.2.6](#), [2.4.2.7](#)
- [40] The 3 Phase Power Resource Site. 3 phase wiring. Internet, Enero 2013. [3.1.3](#)
- [41] DeonReynders John Park SteveMackay, Edwin Wright. *Practical Industrial Data Networks*. Elsevier, 1st edition, 2004. [2.3](#)
- [42] Kepware Technologies. About kepware technologies. Internet, Enero 2013. [3.2.1](#)
- [43] Yaskawa. Yaskawa ac drive-v1000 compact vector control drive technical manual. Internet, Enero 2013. [\(document\)](#), [4.1](#)
- [44] Peng Zhang. *Advanced Industrial Control Technology*. William Andrew, 1st edition, 2010. [\(document\)](#), [2.1](#), [2.1.1](#), [2.1.2](#), [2.1](#), [2.2](#)

Índice alfabético

Armónicos, 13

Calidad de energía, 1, 8

cRIO, 6

Distorsión armónica total, 2

DNP3, 2, 7

Electrical Power Suite, 2

Eventos, 9

FPGA, 2

HMI: Human-Machine interface, 6

IGBT, 15

Interrupción, 9

Interrupciones sostenidas, 11

Modbus, 2, 7

modulación de ancho de pulso (PWM pulse width modulation), 15

Monitorización de calidad de energía, 1

National Instruments, 1

PLC, 6

Real-Time, 2

RMS, 10

sag, 12

SCADA, 5, 20

Sistemas autónomos (stand-alone), 6

Sobre-tensión, 11

Sub-estación, 3

Sub-tensión, 11

Variaciones, 9

variaciones de frecuencia, 15

Variador de frecuencia, 2, 15