Instalación de un sistema de monitoreo sincrofasorial en una red de pruebas de laboratorio del instituto de ingeniería UNAM



UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

Presentado por: Octavio Andrés Mosquera Arévalo Código: 20102007024 Juan Sebastián Rocha Doria Código: 20102007007

> PROYECTO DE GRADO Modalidad Monografía

Director: I.E. Ph. D. Álvaro Espinel Ortega

Co-Director: I.E. Ph. D. Cesar Ángeles Camacho

Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad de Ingeniería Proyecto Curricular Ingeniería Eléctrica Bogotá D.C., Colombia 2016

© 2016 Octavio Mosquera y Juan Rocha.

Notas de Aceptación

Firma Jurado

Bogotá D.C., febrero de 2016

La ciencia no sabe de países, porque el conocimiento le pertenece a la humanidad y es la antorcha que ilumina el mundo. La ciencia es el alma de la prosperidad de las naciones y la fuente de todo progreso.

Luis Pasteur

### Dedicatoria

A mi madre Arcelia Rosa Doria A mi padre Roberto Rocha A mi hermano Camilo Enrique Sierra A mi colega y amigo Miguel David Díaz

#### Juan Sebastián

A mi madre Gilma Inés Arévalo A mi hermana Luisa Fernanda Mosquera A mi sobrina Valeria Guatibonza

**Octavio Andrés** 

### Agradecimientos

A nuestra alma mater la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por ser ese entorno académico que nos ha permitido crecer a nivel personal y profesional, convirtiéndonos en actores en la construcción de un mejor país.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirnos sus puertas como estudiantes de intercambio y posteriormente permitirnos realizar esta investigación a través de su Instituto de Ingeniería.

Al Doctor César Ángeles Camacho, por su incondicional apoyo en la realización del presente proyecto y darnos la oportunidad de hacer parte de una cooperación interinstitucional para el fomento de la investigación entre México y Colombia.

Al Doctor Álvaro Espinel Ortega por hacer parte de nuestra formación académica y sus importantes aportes a este proyecto de grado.

A la Comisión Federal de Energías (CFE) de México, quienes fueron esenciales para poder incursionar en este campo de la investigación, a través de sus equipos e interés.

A nuestras familias por el inmenso apoyo que nos dieron durante nuestra formación y la paciencia en la realización de este proyecto de grado, los amamos y recuerden que son el motor principal en la búsqueda de nuestros ideales.

A nuestros compañeros y colegas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas con los que compartimos aulas en nuestra formación y nos convertimos en personas persistentes frente al deseo de cumplir cada meta y anhelo.

### Resumen

El crecimiento de la infraestructura de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) como respuesta al desarrollo de los diferentes sectores económicos (industria, transporte, comercio, entre otros), trae consigo la necesidad de garantizar la continuidad de operación de las redes de energía ante fenómenos naturales o problemas técnico-operativos, evitando cortes y apagones de cobertura amplia, conocidos como *Blackouts*, los cuales podrían provocar un fuerte impacto a la economía de un país o una región.

Por lo tanto se han enfocado grandes esfuerzos en el desarrollo de tecnologías y sistemas eficientes que permitan un monitoreo en tiempo real de las redes eléctricas, ofreciendo ventajas en confiabilidad y calidad de energía. Una de las soluciones propuestas en la actualidad son los sistemas de medición sincrofasorial, el cual consiste en: unidades de medición fasorial (PMUs) distribuidas en los SEP proporcionando las medidas de voltaje, corriente, frecuencia y derivada de la frecuencia, entre otras; concentradores de datos fasoriales (PDCs), utilizados para correlacionar las medidas mediante una estampa de tiempo, posteriormente almacenarlas y ejecutar aplicaciones en línea o fuera de línea.

La presente investigación propone la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real en una red de pruebas de laboratorio basado en medidas sincrofasoriales. Dicho sistema consiste en la instalación de PMUs de diferentes modelos, las cuales transmiten información a un equipo PDC denominado PDC UD-UNAM, por medio de una red de área local bajo el protocolo TCP/IP. Con la información centralizada en el PDC se diseñó una aplicación a través del software LabVIEW® para visualizar el estado de la red de pruebas de laboratorio de forma versátil. La información procesada en la aplicación es registrada en un sistema de almacenamiento, el cual permite realizar consultas históricas de las variables eléctricas de la red.

La validación del sistema de monitoreo para la red de pruebas de laboratorio, se realizó en el laboratorio de electrónica de potencia del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM), en donde se desarrollaron pruebas experimentales de variación de carga, sistemas trifásicos desbalanceados, conexión y desconexión secuencial de cargas, proceso de encendido de un ordenador de escritorio, y comportamiento de la red frente a fenómenos externos de impacto de la red de pruebas de laboratorio, y una colaboración investigativa donde se realizó la estimación de estado de la red con ayuda de la bases de datos del PDC UD-UNAM y un algoritmo desarrollado en una investigación doctoral del (II-UNAM). Adicionalmente, se diseñaron dos guías de laboratorio usando equipo y el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con el fin incentivar el uso y futuras aplicaciones de la tecnología sincrofasorial en las investigaciones de la misma universidad.

### Abstract

The constantly growing of the power system's infrastructure as a response to the development of different economics sectors (industry, transport, trading, among others), implying the necessity of guaranty the reliability in operation of power system in the face of natural phenomenoms or technical – operatives, avoiding outages and blackouts. Due to the fact that these can cause a hard impact to the economy of a country.

For this reason, the industrial sector has focused hard efforts in the development of technology and systems more efficient, which allow a real time monitoring of power systems, giving advantages in reliability and energy quality. One of the available solutions proposed currently are the systems of synchrophasors measurement systems, composed by Phasorial Unit Systems (PMUs) distributed throughout of power systems supplying the measurements of voltage, current, frequency and the frequency's derivative, among others; Phasorial Data concentrators (PDCs) used to correlate the measurements through a time stamp to accumulate and implement applications online or offline afterwards.

The present investigation proposes the implementation of a monitoring system in real time in a grid of test of laboratory based in synchrophasorial measurements. This system consists in the installation of different kinds of PMUs, these transmit information to a PDC equipment denominated PDC UD-UNAM, through a Local Area Network (LAN) under TCP/IP protocol. With all the information centralized was developed an application in LabVIEW® to visualize the network test's state. The processed information is registered in a storage system, which allows consult historic dates of electrical variables.

On one hand, the validation of this monitoring system was realized in the grid of test of the electronic of power laboratory of Engineering Institute of National Autonomous University of Mexico (II-UNAM). On the other hand, was developed a state estimation using the PDC UD-UNAM database through a cooperation with a doctoral thesis in the II-UNAM. Finally, were designed two guides of laboratory using equipment and the laboratory of electric machines of the District University Francisco Jose de Caldas, in order to promote the using and future applications of synchrophasor technology in the investigations of the same university.

### Índice general

ResumenV				
Abstract				
Lista de t	Lista de tablas10			
Lista de figuras11				
Capítulo 1 - Introducción			13	
1.1. Planteamiento del problema			13	
1.2.	Obje	etivos	14	
1.2.2	1.	Objetivo general	14	
1.2.2	2.	Objetivos específicos	14	
1.3.	Justi	ificación	15	
1.4.	Infra	aestructura	15	
1.5.	Orga	anización del documento	16	
1.6.	Publ	licaciones	16	
1.7.	Esta	do del arte	17	
1.7.2	1.7.1. Evolución de los sistemas de monitoreo17			
1.7.2	2.	Medición sincrofasorial en el contexto mundial	19	
1.7.3	3.	Experiencias WAM en el Mundo	20	
Capítulo	2 – C	onceptos Básicos y Tecnología Sincrofasorial	25	
2.1.	Faso	Dr	25	
2.2.	Algo	pritmos para el cálculo de fasores	25	
2.2.2	1.	Algoritmos no recursivos	26	
2.2.2	2.	Algoritmos recursivos	26	
2.3.	Algo	pritmos para el cálculo de la frecuencia	27	
2.4.	Sinc	rofasor	27	
2.5.	Siste	ema de Medición Sincrofasorial	28	
2.6.	Está	ndares de Sincrofasores	30	
2.7.	Tran	nsmisión de datos en tiempo real (estándar IEEE C37.118)	31	
Capítulo 3 – Red Eléctrica de Pruebas				
3.1.	Dim	ensionamiento de conductores	34	
3.2.	Prot	ecciones	34	
3.3.	Prue	ebas de funcionalidad de la red	35	
3.3.2	3.3.1. Pruebas previas			

	3.3.2	2.	Energización	36
Capí	tulo 4	1 – Di	iseño e Implementación del Sistema de Medición Sincrofasorial	38
4.	1.	Desc	ripción de equipos	38
	4.1.1	L.	Sistema de Protección 351-A	38
	4.1.2	2.	Sistema de Protección 487-E	42
	4.1.3	8.	Fuente de Corriente Directa	46
	4.1.4	ŀ.	Sistema de posicionamiento global	47
	4.1.5	5.	Reloj de sincronización satelital	48
4.	2.	Prue	bas de funcionalidad de equipos	52
	4.2.1	L.	Resultados Pruebas de funcionalidad	54
4.	3.	Dise	ño PDC	58
4.4	4.	Red	de comunicaciones	60
4.	5.	Desa	arrollo de aplicación gráfica	61
	4.5.1	L.	Entorno de programación LabVIEW	61
	4.5.2	2.	Diagrama de flujo	61
	4.5.3	8.	Establecimiento de comunicaciones	62
	4.5.4	ŀ.	Descomposición tramas	65
	4.5.5	5.	Ejemplo de mensajes	68
	4.5.6	5.	Interfaz final	69
	4.5.7	7.	Tiempo Real	71
	4.5.8	3.	Fasores	73
	4.5.9	).	Potencias instantáneas	74
	4.5.1	.0.	Tensiones y Corrientes de Secuencia	75
4.	6.	Siste	ema de almacenamiento	75
	4.6.1	L.	Instalación de unidad de almacenamiento	76
	4.6.2	2.	Módulo de almacenamiento LabVIEW	80
	4.6.3	8.	Base de datos y sistema de consulta	81
4.	7.	Prot	otipo final	83
Capí	tulo 5	5 — Pr	ruebas y Resultados	84
5.	1.	Expe	erimento 1 – Carga trifásica desbalanceada	85
5.	2.	Expe	erimento 2 – Conexión secuencial de cargas	88
5.	3.	Expe	erimento 3 – Desconexión secuencial de cargas	92
5.4	4.	Ехре	erimento 4 – Conexión de ordenador de escritorio	97

5.5.	Experimento 5 - Fenómenos externos a la red de pruebas	105		
5.6.	Experimento 6 – Estimación de estado	106		
Capítulo 6 – Conclusiones				
6.1 Re	comendaciones	112		
6.2 Pr	opuestas de trabajos futuros	112		
Bibliogra	ıfía	114		
Anexo A	: IRIG B	118		
4.8.	Formatos disponibles	118		
4.9.	Atributos de código de tiempo	118		
4.10.	Designación de código de tiempo IRIG	119		
4.11.	Extensión IEEE-1344	119		
4.12.	Implementación IRIG-B	120		
Anexo B	: Equipos de sincronización	121		
4.13.	Reloj Sincronizado por Satélite SEL 2401	121		
4.14.	Fuente de poder para baja tensión SEL 9321	122		
Anexo C: Guía de Laboratorio 1				
Anexo D	Anexo D: Guía de Laboratorio 2139			
Anexo E:	: Artículo de investigación			

# Lista de tablas

Tabla 1.1 Principales avances en la evolución de los sistemas de monitoreo	.17
Tabla 3.1 Parámetros iniciales de diseño de red de pruebas	.32
Tabla 4.1 Característica de tensión nominal de SEL 351A [26]	.40
Tabla 4.2 Características de corriente de entrada de fase y de neutro de SEL 351A [26]	.41
Tabla 4.3 Características de alimentación de SEL 351A [26]	.41
Tabla 4.4 Características de frecuencia y secuencia de tensiones medidas SEL 351A [26]	.41
Tabla 4.5 Otras características 351A [26]	.42
Tabla 4.6 Característica de tensión nominal de SEL 487E [6]	.45
Tabla 4.7 Características de corriente de entrada de fase y de neutro de SEL 487E [6]	.45
Tabla 4.8 Características de alimentación de SEL 487E [6]	.45
Tabla 4.9 Características de frecuencia y secuencia de tensiones medidas SEL 487E [6]	.45
Tabla 4.10 Principales características de comunicación del SEL 487E [6]	.46
Tabla 4.11 LEDs indicadores de estado [30]	.50
Tabla 4.12 Configuración del control DIP [30]	.51
Tabla 4.13 Tabla de enrutamiento	.60
Tabla 4.14 Palabras comunes en todas las tramas [17]	.65
Tabla 4.15 Mensajes de datos [17]	.66
Tabla 4.16 Mensaje de configuración [17]	.67
Tabla 4.17 Mensajes de comando [17]	.68
Tabla 4.18 Unidades de las variables medidas	.71
Tabla 4.19 Velocidades de transferencia de datos externa de interfaces de almacenamiento.	. 77
Tabla 4.20 Características generales disco duro	.79
Tabla 4.21 Características técnicas disco duro	.79
Tabla 5.1 Descripción de cargas del experimento 2	.88
Tabla 5.2 Descripción de cargas del experimento 3	.92
Tabla 5.3 Valores máximos y mínimos de tensión en nodo 3	109
Tabla 5.4 Comparación de valores de dispersión y promedio del error porcentual	110

# Lista de figuras

Fig. 1.1 Mapa de contorno del ángulo de fase.	
Fig. 1.2 Sistema de monitoreo sincrofasorial del IIT	
Fig. 1.3 SIMEFAS México [10].	
Fig. 1.4 Distribución de PMUs en sistema de transmisión nacional.	
Fig. 1.5 Interfaz gráfica de PMU en Rijeka, Croacia	
Fig. 2.1 Representación fasorial [16].	
Fig. 2.2 Modelo de sistema de medición sincrofasorial [16]	
Fig. 2.3 Arquitectura de una PMU.	
Fig. 2.4 Jerarquización de PDC según su nivel de control [10]	
Fig. 2.5 Bytes comunes para los diferentes mensajes sincrofasoriales [17]	
Fig. 3.1 Topología trifásica simple.	
Fig. 3.2 Topología en anillo de tipo monofásica.	
Fig. 3.3 Topología monofásica radial de tres nodos de carga	
Fig. 3.4 Topología monofásica de dos nodos de carga	
Fig. 3.5 Tablero de distribución con tres interruptores termomagnéticos.	
Fig. 3.6 Conjunto de conductores de la red de pruebas.	
Fig. 3.7 Marcas de la tabla de terminales.	
Fig. 3.8 Toma de tensión	
Fig. 3.9 Cargas conectadas a la red.	
Fig. 4.1 Sistema de protección SEL-351A [27]	
Fig. 4.2 Sistema de protección SEL-487E [6].	
Fig. 4.3 Diagrama de conexión en baja y alta tensión de un transformador	
Fig. 4.4 Salidas de SEL 9321 [28]	
Fig. 4.5 Sistema de sincronización de tiempo [30].	
Fig. 4.6 Vista del Reloj de sincronización satelital SEL 2401	
Fig. 4.7 Configuración utilizada en control DIP	
Fig. 4.8 Conector Tipo T BNC 1 Macho y 2 Hembras [31].	
Fig. 4.9 Pantalla de inicio AcSELerator Quickset [27]	
Fig. 4.10 Pantalla de inicio HyperTerminal [32]	
Fig. 4.11 Pantalla de inicio PMU Tester [33]	
Fig. 4.12 Resumen de las medidas eléctricas SEL 351A	
Fig. 4.13 Resumen de las medidas eléctricas SEL 487E	
Fig. 4.14 Visualización de información de las tramas sincrofasoriales	
Fig. 4.15 Consultas de HyperTerminal	
Fig. 4.16 Metodología de diseño	
Fig. 4.17 Enlaces de comunicación	
Fig. 4.18 Diagrama de flujo de funcionamiento	
Fig. 4.19 Ni-VISA [39]	
Fig. 4.20 VISA Open Function [39]	
Fig. 4.21 VISA Write Function [39]	
Fig. 4.22 VISA Read Function [39].	
Fig. 4.23 VISA Clear Function [39].	
Fig. 4.24 Acceso de escritorio interfaz PDC-UNAM	
Fig. 4.25 Interfaz gráfica PDC UD-UNAM	
Fig. 4.26 Botones interfaz	
Fig. 4.27 Variables mostradas en la pantalla principal.	71

Fig. 4.28 Inicio de funcionamiento de la aplicación PDC-UNAM	72
Fig. 4.29 Aplicación PDC UD-UNAM en funcionamiento 1	72
Fig. 4.30 Aplicación PDC UD-UNAM en funcionamiento 2	73
Fig. 4.31 Pestaña para representación fasorial sin encendido	73
Fig. 4.32 Pestaña para representación fasorial en funcionamiento	74
Fig. 4.33 Calculo de potencia activa, reactiva y aparente del PDC UD-UNAM.	74
Fig. 4.34 Calculo de voltajes y corrientes de secuencia del PDC UD-UNAM.	75
Fig. 4.35 Crecimiento del tamaño de la base de datos	78
Fig. 4.36 Puertos de conexión de disco duro.	79
Fig. 4.37 Configuración del disco duro instalado	80
Fig. 4.38 Lógica de enlace de LabVIEW a Access.	81
Fig. 4.39 Tabla de almacenamiento de software PDC UD-UNAM	82
Fig. 4.40 Formulario de consulta de históricos del software PDC UD-UNAM	82
Fig. 4.41 Arquitectura sistema de monitoreo	83
Fig. 5.1 Topología de pruebas inicial.	84
Fig. 5.2 Diagrama de conexiones de experimento 1	85
Fig. 5.3 Gráficas en tiempo real experimento 1	86
Fig. 5.4 Diagramas fasoriales experimento 1.	86
Fig. 5.5 Resumen de las potencias instantáneas del experimento 1	87
Fig. 5.6 Reconstrucción de corriente de línea experimento 1	88
Fig. 5.7 Diagrama de conexiones para el experimento 2	89
Fig. 5.8 Gráficas en tiempo real experimento 2	90
Fig. 5.9 Diagramas fasoriales experimento 2.	90
Fig. 5.10 Resumen de las potencias instantáneas del experimento 2	91
Fig. 5.11 Reconstrucción corriente de línea fase C y neutro experimento 2	92
Fig. 5.12 Diagrama de conexión experimento 3.	93
Fig. 5.13 Gráficas en tiempo real experimento 3.	94
Fig. 5.14 Diagramas fasoriales experimento 3	94
Fig. 5.15 Resumen de las potencias instantáneas del experimento 3	95
Fig. 5.16 Reconstrucción corriente de línea fase C y neutro experimento 3	96
Fig. 5.17 Estado inicial del experimento 4	97
Fig. 5.18 Estado inicial de los perfiles experimento 4.	98
Fig. 5.19 Comportamiento perfiles al cerrar el interruptor S experimento 4	99
Fig. 5.20 Comportamiento de los perfiles al encender el PC experimento 4	.100
Fig. 5.21 Comportamiento de los perfiles experimento 4	. 101
Fig. 5.22 Comportamiento de los perfiles experimento 4	. 101
Fig. 5.23 Perfil histórico de tensiones del nodo de generación experimento 4	.103
Fig. 5.24 Perfil histórico de tensiones del nodo de carga experimento 4	.103
Fig. 5.25 Histórico de corrientes fase C en los nodos de generación y carga experimento 4.	.104
Fig. 5.26 Histórico de frecuencias en los nodos de generación y carga experimento 4	104
Fig. 5.27 Fenómeno externo 1 experimento 5	105
Fig. 5.28 Fenómeno externo 2 experimento 5	106
Fig. 5.29 Red de pruebas en topología de anillo monofásica experimento 6	107
Fig. 5.30 Estimación de la tensión del nodo 3 y su valor real	109
Fig. 5.31 Error porcentual entre estimación y medición de tensión del nodo 3	110
······································	

# Capítulo 1 - Introducción

Las redes de energía eléctrica están sufriendo un cambio de paradigma, debido al crecimiento del consumo, la integración de fuentes de energía renovable, la implementación de generación distribuida, el uso masificado de cargas no lineales, entre otros. En consecuencia, la saturación de las líneas de transmisión y los problemas en calidad de energía hacen más susceptibles a los SEP a disturbios que pueden desencadenar desde pequeños cortes del servicio hasta apagones regionales denominados *Blackouts*.

En consecuencia, diferentes organismos de tipo gubernamental, comercial y académico han promovido el desarrollo de tecnologías para la medición, control y protección, funciones que se han llevado a cabo por los sistemas SCADA. Este sistema concentra la información de la red con el fin de proporcionar una estimación del estado de esta misma, en lapsos de varios segundos. [1]

Con el fin de mejorar las propiedades de procesamiento y ampliar el campo de aplicaciones de los sistemas de monitoreo como es SCADA, se ha desarrollado la tecnología sincrofasorial. Esta tecnología consiste en la medición precisa de parámetros eléctricos de la red a través de unidades de medición fasorial (PMU), como son magnitud y ángulo de fasores de tensión y corriente, frecuencia, tasa de cambio de la frecuencia [2]. Cada medida cuenta con una referencia de tiempo proporcionada por un sistema de posicionamiento global (GPS) y son suministradas a tasas de reporte de 10 a 120 veces por segundo en un concentrador de datos fasorial (PDC).

El presente proyecto de grado plantea el desarrollo de una red de pruebas de laboratorio con un sistema de monitoreo basado en tecnología sincrofasorial, el cual permita la visualización y el almacenamiento de parámetros eléctricos establecidos por el estándar IEEE C37.118 – 2005/2011, y otros calculados de forma indirecta como potencias activas, reactivas y aparentes, y valores de componentes simétricas.

### 1.1. Planteamiento del problema

El crecimiento de la demanda de energía eléctrica ha llevado a las líneas de transmisión a trabajar más cerca de sus límites de cargabilidad, el cambio de los modelos de operación en generación con la integración de fuentes de energía renovables y la amplia penetración de patrones de carga menos predecibles, son algunos de los desafíos a los que hoy se enfrentan los sistemas eléctricos de potencia (SEP) [3]. Por ello la importancia de contar con una plataforma de monitoreo acorde a las exigencias que implican este cambio de paradigma en la cadena energética.

Durante muchos años, los sistemas SCADA han permitido la supervisión, control y adquisición de datos de la red de potencia, suministrando una fotografía del estado de

toda la red en lapsos de 5 a 10 segundos [4].Sin embargo, estas tasas de actualización son relativamente lentas para garantizar los índices de confiabilidad adecuados que conllevan los nuevos retos de la industria eléctrica [5]. Propiciando así la necesidad de herramientas para el monitoreo y almacenamiento de datos en tiempo real, las cuales permitan a los operarios de red una fácil y rápida interpretación del estado del sistema para tomar acciones correctivas y preventivas, al igual que manejo de una base datos para un análisis a la mayor brevedad de los eventos post-morten.

En respuesta a estas necesidades, y con la ayuda de los últimos avances en comunicaciones y procesamiento de datos, surgen los sistemas de medición sincrofasorial, dedicados a la obtención y manejo de los datos de condición del SEP en tiempo real. Esta tecnología consisten en unidades de medición fasorial (Phasorial Measurement Units, PMUs) ubicadas en varios nodos del SEP; las cuales transmiten datos de la condición de la red a altas tasas de reporte (10 a 120 tramas/segundo) [6]; cada medición cuenta con una referencia de tiempo global proporcionada por sistema de posicionamiento global (Global Positioning System, GPS) para fines de sincronización; las tramas de varias unidades son enviadas a un concentrador de datos, para la recepción y el almacenamiento de los datos de las múltiples PMUs.

En los últimos años, la investigación en este enfoque ha sido centro de atención en el ámbito industrial y académico, por ende se han emprendido proyectos para validar sus potenciales aplicaciones, como se observa en [4, 5, 1, 7, 8, 9]. De esta forma, se hace relevante plantear el siguiente interrogante ¿Cómo se puede diseñar e implementar un sistema de medición sincrofasorial a una red de pruebas de laboratorio?

### 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Diseñar y construir una red de pruebas de laboratorio con un sistema inteligente de monitoreo basado en una red de medición sincrofasorial.

#### 1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar y construir una red de pruebas de laboratorio en baja tensión considerando los parámetros acordes a los casos de estudios a realizar.
- > Diseñar e implementar una red de medición sincrofasorial.
- > Diseñar e implementar un sistema de almacenamiento de datos.
- Validar la funcionalidad de la red de pruebas de laboratorio y la red de medición sincrofasorial a través de la realización de casos de estudio.

Replicar la experiencia obtenida en el presente proyecto de investigación internacional, para la realización de guías de laboratorio que fomenten el uso de la tecnología sincrofasorial en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

### 1.3. Justificación

La tecnología sincrofasorial está madurando rápidamente, debido a las cuantiosas inversiones por entidades industriales, comerciales, académicas y gubernamentales [5] Esto con el objetivo, de complementar el paradigma del monitoreo basado en plataforma SCADA hacía un sistema de monitoreo en tiempo real y explotar su potenciales aplicaciones en la prevención de disturbios, respuestas inmediatas frente a emergencias, restauración inmediata de servicio después de colapsar el sistema, validación de modelos matemáticos de la red, control de fraccionamiento de red en un esquema de generación distribuida, entre otras.

Por otra parte, en el contexto latinoamericano es de interés la implementación de proyectos que promuevan el desarrollo de sistemas de monitoreo de área amplia y respuesta frente a eventos de gran magnitud basados en sincrofasores, como lo son el SIRENA de Colombia y SIMEFAS de México [10, 11]. Propuestas diseñadas para garantizar la integridad de la red y promover una base inicial para la generación de investigación en el área.

El producto proyectado en esta propuesta, consta del diseño y construcción de una red de pruebas de laboratorio en baja tensión en el laboratorio de electrónica de potencia del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM). Está red contará con un sistema de monitoreo en tiempo real basado en PMUs, con una aplicación gráfica diseñada con propiedades similares a los comercializados por fabricantes reconocidos. Adicionalmente se harán varios registros de eventos inducidos en la red, para validar la funcionalidad del sistema de comunicaciones y monitoreo.

### 1.4. Infraestructura

Este proyecto se desarrolló en las instalaciones del II-UNAM, con equipo del mismo instituto y de la Comisión Federal de Electricidad de México. A continuación se desglosa los recursos suministrados:

- Las equipos de protección SEL 351A y SEL 487E, los cuales tiene funciones de PMU.
- > Reloj sincronizado vía satélite SEL-2401.
- Fuente DC de bajo voltaje SEL 9321.
- ➢ Antena de GPS.
- Switch Steren 5 puertos.

- Software para adquisición de datos LabVIEW® de National Instruments, usado para la establecer comunicación entre ordenadores y PMUs, al igual que para el desarrollo de interfaces gráficas.
- > Ordenador de escritorio con unidad de almacenamiento de 1 Terabyte.

### 1.5. Organización del documento

En el **primer capítulo** se describen los objetivos del proyecto y el estado del arte, la cual contempla la evolución de los sistemas de monitoreo para SEP, la tecnología sincrofasorial en el contexto mundial y las experiencias de redes de monitoreo de área amplia (WAMS) en el mundo.

En el **segundo capítulo** se desglosan los conceptos elementales que permiten la comprensión del contenido de la información de la trama enviada por las PMUs a PDCs, los cuales están normalizados en los estándares IEEE C37.118.1 y C37.118.2 de 2011. Por otra parte, se introduce al concepto de red de medición sincrofasorial.

En el **tercer capítulo** se presentan los parámetros de diseño de la red de pruebas en cuanto a dimensionamiento de conductores y protecciones, y finalmente pruebas para validar que los parámetros operativos sean adecuados para los equipos PMUs.

En el **cuarto capítulo** se esbozan las características técnicas de los equipos que se utilizaran para la red de monitoreo, la instalación de estos en la red de pruebas, el diseño e implementación del equipo PDC en la red de comunicaciones del laboratorio, el desarrollo de la aplicación gráfica que permitirá visualizar el monitoreo en tiempo real al igual que el sistema de almacenamiento que servirá para reconstruir históricos del comportamiento de la red en tiempos específicos.

En el **quinto capítulo** se presenta los experimentos en la red de monitoreo donde se analizan eventos planeados y fenómenos externos al sistema eléctrico del laboratorio registrados por la aplicación, y finalmente un caso de estudio basado en estimación de estado en colaboración con una investigación de doctorado.

En el **sexto capítulo** se presentan las conclusiones generales así como recomendaciones y aportes del proyecto para trabajos futuros.

### 1.6. Publicaciones

#### Artículos aceptados

Juan S. Rocha, Octavio A. Mosquera, César Ángeles and Álvaro Espinel. "Desarrollo de una Aplicación Gráfica para un Sistema de monitoreo Basado en Tecnología Sincrofasorial". V Congreso Internacional de Gestión Energética y Energías Renovables (V CIUREE), Cartagena, Colombia, 2016.

#### Artículos en desarrollo

Juan S. Rocha, Octavio A. Mosquera, César Ángeles and Álvaro Espinel. "Development and Implementation of a System of Real Time Monitoring Based on Synchrophasor Technology".

Juan S. Rocha, Octavio A. Mosquera, Isaac Ortega and César Ángeles "State Estimation using WLS Algorithm based on Synchrophasor measurements".

Juan S. Rocha, Octavio A. Mosquera, César Ángeles and Álvaro Espinel. "Induction Machine Modelation Using Synchrophasor Measurements".

### 1.7. Estado del arte

En esta sección se realiza una breve descripción de la evolución de los sistemas de monitoreo, los principales avances en cuanto a monitoreo sincrofasorial en el contexto mundial y algunos proyectos que involucran redes WAM alrededor del mundo.

#### **1.7.1. Evolución de los sistemas de monitoreo**

En la tabla 1.1. Son relacionados cronológicamente los principales eventos que marcaron las tendencias de monitoreo a lo largo de las últimas décadas; partiendo desde la utilización de sistemas pilotos, cableados dedicados al monitoreo de subestaciones hasta la utilización de sistemas de monitoreo en tiempo real como son los equipos PMU.

Periodo	Avances
Años previos a 1940	<ul> <li>Sistemas cableados: surgieron gracias a la necesidad de supervisar remotamente el equipo localizado en las subestaciones.</li> <li>Sistemas de conmutación por pasos: a través de multiplexores se lograba controlar varios dispositivos con un par de conductores.</li> <li>Relés telefónicos: creaban pulsos que eran enviados a través de un canal de comunicación a un dispositivo remoto.</li> </ul>
Décadas de los 60´s y 70´s	<ul> <li>Westinghouse desarrollo su sistema de supervisión de estado sólido alrededor de 1960, este fue llamado (REDAC).</li> <li>Transductores utilizados para convertir las variables eléctricas de un sistema de potencia a voltajes o corrientes proporcionales.</li> </ul>

Tabla 1.1 Princi	pales avances en la evolución de lo	os sistemas de monitoreo
	pares avances en la cretación ao re	

Década de los 80's	<ul> <li>Telemetría: debido a la expansión y a la complejidad del sistema de potencia, se convirtió en una necesidad la obtención de variables de tensión, corriente, potencia, etc. Desde locaciones remotas.</li> <li>Variación de la frecuencia de transmisión: se desarrolló respondiendo a la necesidad de transmitir información en otro tipo de medios.</li> <li>Sistemas selectivos de telemetría: encargados de medir las variables de forma periódica, con el fin de reducir el número de canales de comunicación.</li> <li>Sistemas de monitoreo continuo: con la tecnología de estado sólido que redujo la necesidad de la utilización de partes mecánicas y la aparición del concepto de canales dedicados, surgió la posibilidad de escanear continuamente las variables.</li> <li>Registradores de datos automáticos: los encargados del despacho se liberaron de la responsabilidad de leer las variables cada intervalo de tiempo previamente establecido.</li> <li>Unidades de terminal remota (RTU): Utilizadas para respuesta rápida en el control de disturbios en el sistema, el protocolo de comunicación debía ser eficiente y muy seguro. Adicionalmente, se incursiono en la utilización de baterías de respaldo en caso de falla en la alimentación principal de las RTUs.</li> <li>Interfaz humano máquina (HMI): se reemplazaron los pulsadores y botones utilizados en el control de operaciones por pantallas digitales encargadas de mostrar los datos.</li> <li>Canales de comunicación: uso de frecuencia de radio, modulación en frecuencia, comunicación por onda portadora (PLC) y aparición de la tecnología microondas.</li> <li>Control automático de generación: incursión en nuevos sistemas encargados de mostrar los flujos y los valores de generación. Por otra parte, se diseñó el primer sistema encargado de tomar acciones de control sobre los generadores con el fin de aumentar o reducir la energía de generación.</li> <li>Predicción de la carga: se utilizaron los datos de varios años, para la creación de un algoritmo basado en cada día del año.</li> </ul>
	<ul> <li>Funciones de análisis de red: nació la necesidad contar con análisis de flujos de potencia rápidos, que permitiera el despeje de fallas y otros tipos de eventos intempestivos.</li> </ul>
1982-1992	Primer prototipo PMU Virginia Tech con sincronización vía GPS.
1991	Primera PMU comercial realizada por Macrodyne. [12]
1994	Implementación PMU Georgia System.
1995	Norma IEEE 1344.
2004	Iniciativa de Sincrofasores de Norteamérica NASPI y OpenPDC.
2005	Estándar IEEE C37.118-2005.

2007	Sistema de Respaldo Nacional ante Eventos de Gran Magnitud (SIRENA Colombia).
2011	Estándar 2011 IEEE C37.118-2011.

#### 1.7.2. Medición sincrofasorial en el contexto mundial

**Estados Unidos de América:** Bajo la iniciativa de sincrofasores en Norteamérica conocida como NASPI por sus siglas en inglés, se busca mejorar los índices de confiabilidad y visibilidad a través de la medición y el control de área amplia, fomentando así el uso de la tecnología sincrofasorial. Por esta razón, más de 200 PMUs han sido instaladas, con el fin de cumplir una serie de objetivos divididos en tres etapas en las cuales; En el corto plazo los objetivos están concentrados en el monitoreo de ángulos y frecuencia, Análisis post-mortem, estabilidad de voltaje, sobrecarga térmica, mejora en la estimación de estado, modelado de estado estable, aplicaciones de generación distribuida y restauración del sistema de potencia. En el mediano plazo se involucran el modelado dinámico y la planeación de la separación del sistema de potencia. Y por último, en el largo plazo se planea llevar a cabo la estimación de estado usando solo las medidas de las PMUs, control en tiempo real, protecciones adaptativas y mejoramiento en el análisis de datos en tiempo real.

**Europa:** Varias WAMs se encuentran en operación en el centro y el occidente de Europa. Los países en el centro de Europa se encuentran usando PMUs e intercambiando medidas para un mejor monitoreo de los SEP, dentro de los ejes claves de investigación se encuentran:

- Análisis post-disturbio
- Mejoramiento del modelamiento del sistema
- Amortiguación de oscilaciones inter-área
- Control de enlaces HVDC y compensadores reactivos
- Monitoreo del ángulo de estabilidad
- Estimación en línea.

**China:** Más de 700 PMUs se encuentran en operación, de acuerdo con el onceavo plan anual para la red eléctrica, todas las subestaciones arriba de 500 [kV] y 300 [MW] en la red de potencia contaran con PMUs para el 2015. Entre las aplicaciones que se ejecutar se encuentran:

- Visualización del comportamiento dinámico del sistema.
- Capacidad de transmisión.
- Monitoreo de oscilaciones de baja frecuencia.
- Mejoramiento de la estimación de estado.
- Protección adaptativa.

• Control de emergencia.

**India:** Se planea la instalación de 20 a 25 PMUs en los nodos críticos del sistema, las medidas sincronizadas serán usadas para validación del modelo del sistema y el desarrollo de un estimador de estado común combinando el estimador de estado regional. Basados en el éxito de este programa se planea la ampliación de esta iniciativa.

**Brasil:** En el año 2000 el operador independiente dio inicio a un proyecto dirigido al registro de disturbios y la aplicación de la medición sincronizada para el mejoramiento de control y monitoreo del sistema. Algunos proyectos pilotos de pruebas y validación han sido llevados a cabo.

**Rusia:** Más de 25 PMUs se encuentran en operación en sistema de potencia de 14 países incluyendo el oriente de Europa, Rusia, Asia Central y Siberia. Las mayores aplicaciones se encuentran enfocadas a validación de modelos dinámicos y monitoreo de oscilaciones inter-área.

#### 1.7.3. Experiencias WAM en el Mundo

**FNET/GridEye** [13]: FNET/GridEye es un sistema de medida de área amplia de bajo costo, usando como principio los Registradores de Disturbios de Frecuencia (FDRs), desarrollado en Virgnia Tech encargados de la medición de frecuencia, ángulo y voltaje de la señal de comercial de 120 [V]. Los datos medidos son continuamente transmitidos por internet hasta FNET/GridEye server instalado en la Universidad de Tennessee, en la Fig. 1.1 se puede observar la interfaz del programa donde a través de un gráfico de contorno se detalla las variaciones de ángulo de fase se las diferentes áreas geográficas del este de Estados Unidos y parte del sureste de Canadá.

Estas son algunas de las aplicaciones que han sido desarrolladas usando datos FNET/GridEye:

- Detección y localización de eventos.
- Detección de oscilaciones.
- Perturbaciones de ángulo y frecuencia.
- Integración de energías renovables al sistema de potencia.
- Predicción de inestabilidad y reducción de apagones.



FNET/GridEye Web Display.

**Sistema de monitoreo del Illinois Institute of technology (IIT)** [14]: Se llevó a cabo la instalación de 12 PMUs en el Campus del instituto de Tecnología de la Universidad Illinois (IIT), la cual se puede apreciar en la Fig. 1.2, con el fin de desarrollar una aplicación para el monitoreo de la red de potencia basada en el estándar IEC 61850.

La red de monitoreo está compuesta por:

- a) Servidor de base de datos
- b) PDC
- c) PMUs
- d) Programa de monitoreo (KERI)

El PDC está conectado a las PMUs a través de Ethernet usando el protocolo IEEE C37.118. Los datos recolectados son enviados al servidor y guardados para análisis futuros y procesamiento.

Entre las aplicaciones se encuentran:

- Análisis de calidad de potencia.
- Modelamiento de carga.
- Estimación de estado.
- Consumos de potencia.





**SIMEFAS** [10]: La Comisión Federal de Electricidad de México (CFE) a través de su proyecto SIMEFAS, propone el despliegue de un sistema de medición sincrofasorial, con el fin de facilitar el análisis de contingencias y la visualización de estado operacional del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). La etapa inicial de esta iniciativa consistió en la instalación de 15 PMUs en dos de cuatro subsistemas que comprenden el SEN. Dentro de la instalación de las PMUs se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- a. Puntos de mayor complejidad en la generación
- b. Los mayores puntos de carga
- c. Los enlaces críticos de transferencia



Adicionalmente, dentro de los alcances de la primera etapa del proyecto se pretendía el mejoramiento del análisis post-falla y la validación del simulador de modelos de potencia. Por otra parte, en la segunda etapa del proceso SIMEFAS incluye la visualización y aplicaciones de decisión en tiempo real que garantizan la confiabilidad y seguridad del SEN. Por último, SIMEFAS promueve la participación internacional a través de la integración de las medidas sincrofasoriales entre Canadá, USA y México, dentro del esquema del proyecto NASPI.

**SIRENA** [11]: Como respuesta al apagón total que sufrió el Sistema Interconectado Nacional Colombiano, nace el proyecto Sistema de Respaldo Nacional ante Eventos de Gran Magnitud (SIRENA). Esta propuesta busca responder ante eventos de rara ocurrencia pero de gran magnitud. Dentro de los aspectos claves de SIRENA se encuentran:

- a. Uso de última tecnología en monitoreo de sistemas de potencia.
- b. Uso intensivo de telecomunicaciones.
- c. Explotar capacidades de computación distribuida.
- d. Uso de nuevos métodos de análisis y simulación de sistemas de potencia.
- e. Implementara un sistema WAM.
- f. Iniciar la aproximación a tecnologías de Smart Grids en Sistema Interconectado Nacional.



**Fig. 1.4 Distribución de PMUs en sistema de transmisión nacional.** *XM S.A. E.S.P.* 

**WAMSTER** [15]: El proyecto WAMSTER empezó al final del año 2009 como un trabajo coordinado con el Departamento de Sistemas de Potencia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Rijeka. El proyecto nació como respuesta a las necesidades incrementales para la adquisición remota de datos. El sistema está basado en dos principales características: simplicidad en el despliegue de PMUs a través del uso de equipos ligeros de mano e infraestructura de comunicación independiente.

Este proyecto puede ser considerado como un concentrador de datos global inalámbrico, usando la red móvil GPRS e internet como concentrador de datos fasoriales. Por otra parte, actualmente cuenta con presencia los Emiratos Árabes Unidos, Nigeria, Kenia, Croacia, entra otros. En la Fig. 1.5 se aprecia la georreferencia, diagrama y valores fasoriales de tensión y corriente y características operativas de una PMU en Rijeka Croacia.



Fig. 1.5 Interfaz gráfica de PMU en Rijeka, Croacia. WAMSTER.

### Capítulo 2 – Conceptos Básicos y Tecnología Sincrofasorial

#### 2.1. Fasor

Un fasor es un número complejo que representa la amplitud y fase de una señal senoidal. Por lo que resulta una herramienta sencilla y eficaz en el análisis de circuitos lineales excitados por fuentes senoidales, ya que la solución a través de los diferenciales dificultaría el análisis de circuitos en corriente alterna. [16, 17]

Teniendo en cuenta una señal senoidal descrita por la ecuación 4.1:

$$X(t) = X_m \cos(\omega t + \Phi) \tag{4.1}$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia de la señal en radianes por segundo,  $\Phi$  el ángulo de fase en radianes. Y  $X_m$  es la amplitud pico de la señal, y su valor RMS está definido como  $X_m/\sqrt{2}$ . Por lo que podemos describir a la señal por medio de su representación fasorial en la ecuación 4.2 y la figura 4.1:

$$\boldsymbol{X} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} (\cos \phi + j \sin \phi) = X_r + j X_i$$
(4.2)



Fig. 2.1 Representación fasorial [16].

#### 2.2. Algoritmos para el cálculo de fasores

Los principales métodos para el cálculo de fasores pueden ser clasificados en dos grandes grupos como; algoritmos no recursivos y algoritmos recursivos.

#### 2.2.1. Algoritmos no recursivos

Se definen algoritmos no recursivos a aquellos en los cuales la solución del problema no está expresada en función de si misma. Entre los principales algoritmos se encuentran:

#### i. Algoritmos trigonométricos

El proceso de estimación fasorial de los algoritmos trigonométricos se hace a partir de señales con duración de fracciones de ciclo, solo capturan de 2 a 3 muestras por ciclo. Por otra parte, se debe considerar que la señal de entrada debe ser de tipo sinusoidal a una frecuencia fundamental y no debe existir variación. [18]

Los algoritmos trigonométricos presentan las siguientes características:

- a. Ventanas cortas de muestreo.
- b. Respuestas transitorias rápidas.
- c. Mínimo número de cálculos.

Entre los algoritmos trigonométricos más usados se encuentran:

- *Miki & Mikano*: 2 muestras de la señal de entrada y tiempo de muestreo constante.
- *Mann & Morrison*: 3 muestras de la señal de entrada.
- *Rockefeller & Udren*: 3 muestras de la señal de entrada.
- *Gilbert & Shovlin*: 3 muestras de la señal de entrada.

#### ii. Algoritmos de mínimos cuadrados

Mínimos cuadrados es una técnica de optimización matemática, que dada una serie de mediciones encuentra una señal que se aproxime a los datos.

- a. Rápida respuesta ante transitorios.
- b. Menor cantidad de cálculos.
- c. Problemas con armónicos.
- d. Precisión dependiente del número de muestras.

#### 2.2.2. Algoritmos recursivos

Se consideran algoritmos recursivos a aquellos que están basados directa o indirectamente en ellos mismos.

### i. Transformada discreta de Fourier (DFT)

La DFT era conocida en teoría desde hace muchos años, pero solamente con la llegada de la computadora digital fue llevada a la práctica. [19] Ni la serie de Fourier, ni la transformada de Fourier se prestan fácilmente para cálculos en computadoras digitales, para vencer este impedimento se desarrolló la Transformada Discreta de Fourier. [20] Todos los medidores fasoriales en servicio utilizan el algoritmo recursivo de la DFT para el cálculo del fasor, no se utiliza el algoritmo FFT ya que este requiere 2<sup>n</sup> muestras de la ventana de datos, donde n es un entero positivo, además de que se requieren todas las muestras antes de hacer los cálculos, mientras que con el algoritmo DFT se puede utilizar cualquier número de muestras (no necesariamente potencias de 2 como en el caso de la FFT). Con la DFT se pueden hacer los cálculos de forma recursiva es decir que en cada adquisición se puede calculo el fasor. [21]

En la práctica se ha encontrado que con un muestreo de 12 adquisiciones por periodo se puede calcular el fasor con la exactitud requerida en las diversas aplicaciones, los relevadores de protección digitales utilizan periodos de muestreo de entre 4fo y 40fo.

### 2.3. Algoritmos para el cálculo de la frecuencia

Existen diferentes métodos para calcular la frecuencia de un sistema, en este apartado se abordaran los principales.

- *i. Algoritmo DFT para cálculo de la frecuencia:* Con la DFT se obtienen los valores reales e imaginarios del fasor resultante, se puede calcular la frecuencia realizando unas iteraciones con diferentes factores.
- *ii. Transformada rápida de Fourier para el cálculo de la frecuencia:* Explota las propiedades de simetría de la exponencial compleja discreta en el tiempo para reducir el número de multiplicaciones. Para evaluar una transformada discreta de Fourier con N muestras el algoritmo de la FFT encuentra su eficiencia cuando N es una potencia de 2 [18]. Sin embargo, presenta problemas con el tiempo de ejecución.
- *iii. Cálculo de la frecuencia por cruce por cero:* Consiste en detectar un cruce por cero con pendiente negativa y a partir de ese instante contar el número de muestras enteras que se obtengan hasta el próximo cruce por cero.

### 2.4. Sincrofasor

Un sincrofasor es un fasor que representa la señal senoidal modelada matemáticamente por las ecuaciones 4.1 y 4.2, con una estampa de tiempo proporcionada por el *Universal* 

*Time Coordinated* (UTC), donde  $\Phi$ es el ángulo de fase instantáneo relativo a la función coseno y la frecuencia nominal del sistema. El tiempo de reporte del fasor es conocido como el instante en el cual la estimación fasorial es realizada. [16, 22]

Mediante la utilización de medidas sincrofasoriales se facilita el análisis y procesamiento de señales eléctricas, esto debido a que independientemente de la ubicación de donde son realizadas las medidas pueden ser procesadas y comparadas entre sí, gracias a la referencial temporal común, es decir estas son etiquetadas con el mismo instante de tiempo.

### 2.5. Sistema de Medición Sincrofasorial

Un sistema de medición sincrofasorial tiene como propósito la medición de fasores de tensión y corriente acompañados de una referencia de tiempo. Adicionalmente, el sistema de medición sincrofasorial busca la disponibilidad de las mediciones para el visualizar en tiempo real las condiciones operativas de un SEP desde los centros de control. Esto permite realizar análisis en tiempo real, además como se cuenta con almacenamiento de datos también es posible análisis post-morten. Como se puede observar de la Fig. 2.2 un sistema de medición sincrofasorial es compuesto por: PMU, PDC local, PDC corporativo, PDC regional y los sistemas de almacenamiento de datos.



Fig. 2.2 Modelo de sistema de medición sincrofasorial [16].

A. Unidades de medición fasorial (PMUs) [5]: calculan los fasores de corriente y tensión basados en un muestreo digital. Estas mediciones son acompañadas de una referencia de tiempo proporcionada por un GPS. Una PMU provee la salida de datos en un protocolo previamente establecido a una tasa de envío del orden de 20 a 120 tramas por segundo, las cuales proporcionan: magnitudes y ángulos de tensiones y corriente, frecuencia, tasa de variación de frecuencia, y salidas digitales y análogas. La arquitectura básica de una PMU es mostrada en la Fig. 2.3 y se desglosa a continuación:

- a. *Filtro anti-aliasing:* atenúa el ruido de alta frecuencia antes de llevar a cabo el muestreo.
- b. *Conversor A/D:* es el encargado de convertir una señal analógica en una señal digital con un valor binario.
- c. *Microprocesador:* a partir de las señales resultantes del A/D calcula los valores predefinidos en los estándares, a través de la aplicación de algoritmos digitales.
- d. *Oscilador de bloqueo de fase:* Mantiene la señal de salida bloqueada con respecto a una señal de referencia.
- e. *Receptor GPS:* Proporciona la referencia de tiempo.
- f. *Interface de comunicaciones:* se encarga de la transmisión de las tramas al correspondiente PDC.



Fig. 2.3 Arquitectura de una PMU.

- B. **Comunicaciones:** Es el mecanismo encargado del transporte de la información digital entre las PMUs y los PDCs. La comunicación normalmente es brindada a través de una Red de Área Amplia (WAM) usando fibra óptica, Ethernet, radio frecuencia, onda portadora, entre otros.
- C. Concentrador de Datos Fasoriales (PDC): Recibe y organiza los datos procedentes de varias PMUs, con el fin de generar una trama de salida alineada por estampa de tiempo. Los PDCs puede intercambiar datos fasoriales con otros PDCs, los cuales están organizados en capas y ubicados en diferente localización. [23]

La Fig. 2.4 muestra las tres capas en las que pueden ser jerarquizados los PDCs de acuerdo al número de PMUs y el nivel de control del sistema eléctrico de potencia.



Fig. 2.4 Jerarquización de PDC según su nivel de control [10].

D. **Almacenamiento de datos:** Encargado de almacenar información, con el fin de la reconstrucción de históricos y su posterior análisis.

### 2.6. Estándares de Sincrofasores

El concepto de sincrofasor fue introducido en 1980 y estandarizado por primera vez en el estándar 1344-1995, este concepto fue desarrollado más a fondo en el estándar C37.118 el cual fue completado en el 2005 y posteriormente actualizado en 2011.

En esta sección se describen las principales características y aportes de cada una de las publicaciones.

*IEEE 1344-1995* [24]: El primer estándar para sincrofasores publicado en 1995. El cual consistía en establecer conceptos básicos para las mediciones y métodos para el manejo de datos. También exploró las medidas sincronizadas usando fuentes precisas de tiempo y formalizando el uso de IRIG-B en el sector industrial.

*IEEE C37.118-2005* [25]: Incluyó requerimientos de las medidas y para la transferencia en tiempo real, facilitando la adopción de la tecnología de medición sincrofasorial y el uso de diferentes protocolos de comunicación para transmisión de datos. El estándar IEEE C37.118 de 2005 fue dividido en dos estándares, uno con los requerimientos de las medidas y otros con los requerimientos para la transferencia de datos.

*IEEE C37.118.1-2011* [16]: Actualización de la norma del 2005, donde se define sincrofasores; la frecuencia y la tasa de variación de la frecuencia; se especifica los métodos de evaluación; los requisitos para el cumplimiento de la norma tanto en estado estable y dinámico dando el concepto *Total Vector Error* TVE.

*IEEE C37.118.2-2011* [17]: Se especializa en los parámetros y propiedades sistema de comunicación de datos en una red de medición sincrofasorial. Adicionalmente, se propone una nueva trama de configuración (Configuration frame 3) donde se presentan bytes reservados para la ubicación geográfica.

Además, en la literatura se encuentran otro tipo de estándares como: el IEC 61850, el IEC 1588, el mensaje rápido de Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), entre otros. Sin embargo, en este documento se hace énfasis en el estándar C37.118 debido a que es el utilizado para el envío de tramas entre los equipos que conforman el sistema de medición sincrofasorial.

### 2.7. Transmisión de datos en tiempo real (estándar IEEE C37.118)

Existen cuatro mensajes transmitidos entre las PMUs y los PDCs los cuales son descritos en el estándar C37.118-2 de 2011 y son descritos a continuación:

- a. **Mensaje de encabezado**: Contiene los datos relacionados con la ubicación, algoritmos, filtros y otra información relacionada. (enviado por la PMU al PDC).
- b. **Mensaje de configuración**: Contiene los datos de la configuración actual de la PMU. (enviado por la PMU al PDC).
- c. **Mensaje de datos**: Contiene todos los datos medidos, es posible que esta trama cuente con valores adicionales de valores análogos y digitales. (enviado por la PMU al PDC).
- d. **Mensaje de comandos**: Instrucciones enviadas por el PDC a la PMU para la realización de una acción determinada.

Cada uno de estos mensajes tiene una función específica y debe ser interpretado de manera adecuada para poder procesar la información correctamente. Cada mensaje comparte ciertas bytes de datos. En la Fig. 2.5 se detalla las posiciones que ocupan cada función en el datagrama sincrofasorial.

- a. SYNC: palabra de sincronización.
- b. FRAMESIZE: número total de bytes en la trama (incluye CHK).
- c. IDCODE: Número ID de la PMU, usado para identificar el destino de los datos.
- d. SOC: estampa de tiempo. Es el número de segundos transcurridos desde 01enero-1970.
- e. FRACSEC: Fracción de segundo, también incluye bytes dedicados para la calidad del tiempo.
- f. CHK: confirmación de la trama.



Fig. 2.5 Bytes comunes para los diferentes mensajes sincrofasoriales [17].

# Capítulo 3 - Red Eléctrica de Pruebas

En este capítulo se tratara la etapa de diseño y construcción de una red eléctrica de pruebas, para ello se establecen los parámetros iniciales de diseño en la tabla 3.1. La red de pruebas opera en baja tensión y sus valores de corriente están limitados por las especificaciones técnicas de las PMUs empleadas en la red de monitoreo. Para mayor información de las características de las PMUs dirigirse a la sección 4.1 referente descripción de equipos.

Característica	Valor
Número de conductores	3F + 1N
Tensión nominal	120 ± 10% [Vac]
Frecuencia	60 [Hz]
Corriente nominal	5 [A]
Máxima corriente continua	15 [A]
Máxima corriente térmica	100 [A]
Longitud de líneas	100 [m]

#### Tabla 3.1 Parámetros iniciales de diseño de red de pruebas.

Uno de los aspectos de mayor relevancia en la red planteada, es su flexibilidad para cambios en la configuración de sus topologías. Inicialmente la red se instala para cumplir con una topología simple de dos nodos de tipo trifásica como se observa en la fig. 3.1. Por otra parte, esta red también puede cambiar su topología a otras tres opciones como se observa en las Fig. 3.2, 3.3 y 3.4 simplemente cambiando sus líneas de tipo trifásico a líneas de tipo monofásico.



Fig. 3.1 Topología trifásica simple.



Fig. 3.2 Topología en anillo de tipo monofásica.



Fig. 3.4 Topología monofásica de dos nodos de carga.

#### 3.1. Dimensionamiento de conductores

Teniendo en cuenta el nivel de tensión y los valores nominales de corriente que se usaran en la red de pruebas se dimensionó el calibre adecuado, detallados en la Tabla 3.1. Para ello se consultó la ampacidad de conductores diseñados para baja tensión THHW-LS<sup>1</sup>, para un nivel de tensión de 5 [A] nominales.

Inicialmente se seleccionó un conductor de calibre No 14 AWG por su capacidad de corriente de 25 [A] a temperatura de 75 [°C], lo cual es suficiente para las aplicaciones previstas con las PMUs sin necesidad de instrumentación externa. Sin embargo, con el fin de no limitar las pruebas de experimentación en la red a pruebas con la conexión de cargas de mayor demanda, se dimensionó el conductor para soportar cargas trifásica con una potencia de 10 [kVA], alimentados a una tensión nominal de línea de 208 [V], una frecuencia nominal de 60 [HZ]. Es decir, pequeñas máquinas de inducción o síncronas, banco de reactivos, cargas resistivas, entre otras. Por lo cual, se calculó la corriente nominal a partir de la ecuación 3.1, con la cual se obtuvo como resultado 27.75 [A]. Para finalmente seleccionar un cable de calibre 10 AWG.

$$I_l = \frac{S_{3\emptyset}}{\sqrt{3} * V_l} \tag{3.1}$$

No obstante, para conectar una carga de estas dimensiones se debe adicionar un transformador de corriente de una relación de transformación de 50 [A] a 5 [A] o superior para garantizar la seguridad de las PMUs. Posteriormente se debe ajustar con el software del fabricante las opciones para que la PMU calcule la corriente, teniendo en cuenta la instrumentación adicionada.

#### 3.2. Protecciones

Con el fin de proteger la red de pruebas contra sobre-corrientes que puedan afectar la instrumentación interna de las PMUs, se instaló un tablero de distribución con tres interruptores termomagnéticos, como se observa en la Fig. 3.5, dimensionados acordes a las especificaciones técnicas de cada PMU detalladas en la sección 4.1 referente a la descripción de equipos.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> THHW-LS: Alambre o cable de cobre suave, con aislamiento termoplástico de policloruro de vinilo (PVC-LS) no propagador de incendios.



Fig. 3.5 Tablero de distribución con tres interruptores termomagnéticos.

### 3.3. Pruebas de funcionalidad de la red

### 3.3.1. Pruebas previas

Antes de iniciar la ejecución de pruebas para la puesta en operación es necesario llevar a cabo algunas actividades previas, con el objeto de garantizar el mínimo riesgo durante la energización de la red. Por ello se llevaron a cabo cinco actividades, las cuales se mencionan a continuación:

- a. Realizar pruebas de continuidad de los conductores que se utilizaran, para descartar cualquier problema de la red.
- b. Verificación visual del aislamiento de los conductores de la red, los cuales se detallan en la Fig. 3.6.



Fig. 3.6 Conjunto de conductores de la red de pruebas.

- c. Comprobar el buen estado de cada componente, sobre todo del tablero de distribución.
- d. Marcación apropiada del tablero de terminales donde se conectan la alimentación, cargas y las PMUs, como se aprecia en la Fig. 3.7.



Fig. 3.7 Marcas de la tabla de terminales.

e. Apretar bien la conexión y revisar que cada una se encuentre completamente firme en el tablero de distribución, la tabla de terminales, los bornes de las PMUs y en las cargas.

#### 3.3.2. Energización

Comprende el procedimiento que se realiza para la toma de tensión de los equipos, sistemas de la red de pruebas y sus componentes asociados, para disponer en operación la instalación. En la Fig. 3.8 (a) y (b) se puede observar las tensiones de fase y línea que se tomaron de la línea antes de conectar a los equipos PMUs.



(a)


**Fig. 3.8 Toma de tensión** (a) fase-neutro y (b) fase-fase.

Con la toma de tensión de la red, se procede a conectar las PMUs y las cargas limitadas como se indicó anteriormente. Por tanto, se aprecia en la Fig. 3.9 (a) y (b), el adecuado funcionamiento.



(a)



(b) Fig. 3.9 Cargas conectadas a la red. (a) Trifásica y (b) Monofásica.

# Capítulo 4 – Diseño e Implementación del Sistema de Medición Sincrofasorial

# 4.1. Descripción de equipos

En esta sección se describen los principales componente usados en la construcción del sistema de monitoreo sincrofasorial, los cuales son relacionados a continuación:

- a. Sistema de protección 351A.
- b. Sistema de protección 487E.
- c. Fuente de Corriente Directa 9321.
- d. Kit de sincronización 2401.

La información presentada referente a características técnicas fue tomada de cada uno de los catálogos de los equipos, suministrados por la compañía Schweitzer Engineering Laboratories (SEL).

# 4.1.1. Sistema de Protección 351-A

El sistema de protección SEL-351A cuenta con Ethernet y tecnología sincrofasorial IEEE C37.118, siendo una solución económica para la protección de sobrecorriente. [26]



Fig. 4.1 Sistema de protección SEL-351A [27].

Las principales características de compatibilidad, comunicación, protección interna y funciones especiales son desglosadas a continuación:

**Protocolo de comunicaciones IEC 61850**: combina la tecnología IEC 61850, la red de Ethernet y el sistema de protección SEL-351 para obtener el desempeño más rápido de los relés IEC 61850 para la automatización y el control de la subestación.

**Servidor de red integrado**: permite acceder a la información básica del relé en una red Ethernet estándar con el servidor de red integrado. Posibilita visualizar el estado del relé, el grabador de eventos secuenciales (SER), la información de medición y las configuraciones para acceso sencillo dentro de una red local.

**Protocolo simple de tiempo de red**: simplifica el cableado y la instalación con la recepción de la señal de hora sobre redes Ethernet existentes. SNTP es un buen respaldo para una sincronización de hora IRIG-B más precisa. La precisión de 5 [mS] es ideal para la sincronización básica de la hora en toda la subestación.

**Ethernet robusto de subestación**: un puerto Ethernet está incluido en cada relé SEL-351A. Múltiples opciones Ethernet simplifican la integración en redes Ethernet nuevas o existentes.

**Sincrofasores con IEEE C37.118 integrados:** apropiado para supervisar las redes de distribución y transmisión para detectar un colapso potencial en cascada del voltaje antes de que suceda. Los sincrofasores IEEE C37.118, con hasta 60 mensajes por segundo, permiten el acceso a valores del sistema para supervisión y control de área amplia. La norma IEEE C37.118 simplifica las comunicaciones y la coordinación de datos entre unidades de medición de sincrofasor. El SEL-351A-1 también está disponible como unidad dedicada de medición de fasor (PMU).

**Polarización de elemento direccional**: el elemento direccional de fase de voltaje polarizado y secuencia positiva con memoria, proporciona estabilidad direccional durante fallas de fase.

**Protocolos Modbus®, DNP3 y ASCII**: el SEL-351A se integra con facilidad en redes nuevas o existentes por medio de estos protocolos. Los enlaces SCADA, HMI local, y módems de discado pueden acceder a datos del relé.

**Protección confiable de sobrecorriente**: seis clases de elementos de protección de sobrecorriente de fase, secuencia negativa, neutral y residual dan una protección coordinada, y los elementos de fase y secuencia de bajo y sobre voltaje maximizan la flexibilidad del esquema de control.

**Seguridad**: El control de voltaje o de la carga invasiva de los cuatro elementos de protección frente a sobrecorriente temporizados proporcionan seguridad de carga.

**Protección de baja/sobre corriente:** hasta seis pasos de elementos de protección de frecuencia proporcionan disparos y control en niveles múltiples de baja y sobre frecuencia.

**Control de recierre:** el recierre programable de cuatro disparos con revisión opcional de sincronismo se adapta a una variedad de prácticas de recierre.

**Medición, supervisión de calidad de la energía (PQ):** una medición exacta elimina la necesidad de medidores externos (MW, MVAR, MWh, MVARh, PF, RMS y demandas en pico e instantánea). La medición de armónicos hasta la decimos sexta componente.

**Configuraciones de voltaje de entrada: s**eleccione conexiones de entrada de voltaje alterno línea-neutro (estrella) o línea a línea (delta) usando una programación del software.

Algunas de las aplicaciones de protecciones eléctricas que suministra el fabricante se proporcionan a continuación:

- a. Integración y automatización de los equipos de la subestación, incluso dispositivos de múltiples proveedores, con el protocolo de comunicaciones IEC 61850.
- b. Proporción de una protección de sobrecorriente primaria o de respaldo en sistemas de distribución con los elementos de protección de sobrecorriente de fase sensible, secuencia negativa, residual y neutral.
- c. Utilización de configuraciones terminales tipo cable para aprovechar las ventajas de la avanzada tecnología, para mejorar del desempeño de la protección del sistema y reducir los costos totales.
- d. Permite la programación de fase sensible y los elementos direccionales a tierra para obtener una exacta y segura detección de fallas.
- e. Mejora la sensibilidad con dos elementos independientes de sobrecorriente en el tiempo residual a tierra.
- f. Medición y grabación en la memoria no volátil MW, MVAR, MVAR, MWh, MVARh, PF y la demanda pico e instantánea, eliminando la necesidad de medidores externos.
- g. Proporciona esquemas de corte de carga usando elementos de baja y sobre frecuencia.
- h. Permite la utilización del software asistente de relé SEL-5010 para administrar las configuraciones de su relé.

Las características técnicas y operativas del equipo SEL 351-A se presentan a continuación:

Tensión	Valor
Línea a neutro	67-130 [Vrms].
Línea a Línea (delta abierta)	115-260 [Vrms].
Continua	300 [Vrms].
Sobre-tensión a corto	600 [Vac] por 10 segundos.
Carga	0.03 [VA] a 67 [V]; 0.06 [VA] a 120 [V;] 0.8 [VA] a 300 [V].

#### Tabla 4.1 Característica de tensión nominal de SEL 351A [26].

Tabla 4.2 Características de corriente de entrada de fase y de neutro de SEL
351A [26].

Corriente	Característica	Valor
Fase	Corriente nominal a	15 A continuamente, 500 A por 1 segundo, lineal hasta 100
	5 [A]	A simétrica y 1250 A por un ciclo.
	Carga	0.27 VA a 5A y 2.51 VA a 15 A.
	Corriente nominal a	3 A continuamente, 100 A por 1 segundo, lineal hasta 20 A
	1 [A]	simétrica y 250 A para un ciclo.
	Carga	0.13 VA a 1A y 1.31 VA a 3 A.
Neutro	Corriente nominal a	15 A continuos, 500 A por 1 segundo, lineal hasta 6.4 A
	0.2 [A]	simétrica, 1250 A por ciclo.
	Carga	0.00009 VA a 0.2 A y 0.54 VA a 15 A.
	Corriente nominal a	15 A continuos, 500 A por 1 segundo, lineal hasta 6.4 A
	0.05 [A]	simétrica y 1250 A por ciclo.
	Carga	0.000005 VA a 0.05 A y 0.0054 VA a 1.5 A.

# Tabla 4.3 Características de alimentación de SEL 351A [26].

Tasa	Característica	Valor
125/250 Vdc nominal o 120/230 Vac nominal	Rango	85-350Vdc nominal o 85/264 Vac nominal
	Carga	<25 W
48/125 Vdc nominal o 120 Vac nominal	Rango	38-200 Vdc nominal o 85/140 Vac nominal
	Carga	<25 W
24/48 Vdc nominal	Rango	15-60 Vdc depende de la polaridad
	Carga	<25 W

# Tabla 4.4 Características de frecuencia y secuencia de tensiones medidas SEL351A [26].

Característica	Valor
Rotación	ABC o ACB
Frecuencia	40.1 - 65 Hz ( VA o V1 de secuencia positiva requeridos para el cálculo)

Característica	Valor
Reloj interno	±1 [μs]
Reporte del sincrofasor (MET PM, EVE P, CEV P)	± 10 [µs]
Otros reportes	± 5 [ms]
Máxima tasa de reporte	60 mensajes por segundo
Tasa de muestreo	7.68 [kHz]
Estándar	C37.118 de 2005
Puertos EIA- 232	1 delantero y 2 traseros
Puerto EIA- 485	1 trasero con 2100 VDC de aislamiento
Tasas de Baudios disponibles	300, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400 y 57600
Ethernet	2 puertos traseros de 10/100 Base-t, conector RJ-45

Tabla 4.5 Otras características 351A [26]

# 4.1.2. Sistema de Protección 487-E

Sistema ideal para la protección y supervisión de la mayoría de las aplicaciones de protección de un transformador con el poderoso relé de SEL-487E. Apto hasta para cinco entradas de trifásica, tres elementos de protección de falla de tierra restringida independientes y dos entradas de tensión trifásico con funcionalidad de lectura sincrofasorial.



Fig. 4.2 Sistema de protección SEL-487E [6].

Las principales características de compatibilidad y puertos de comunicación, protección del equipo y funciones especiales son desglosadas a continuación:

**Sincrofasores:** envía mensajes de sincrofasores IEEE C37.118 a través de comunicaciones seriales o Ethernet para detectar flujos de rizo reactivo, cambia la estimación de estado a medición de estado y proporcionar una advertencia temprana de inestabilidad potencial en el sistema. Aplica funciones de control basadas en ángulos de fase, corrientes y voltajes para aplicaciones básicas o avanzadas. Para aplicaciones que requieran una unidad dedicada de medición de sincrofasorial (PMU), elija la unidad de medición sincrofasorial de la estación SEL-487E-4.

**Protección de diferencial de corriente con dos o cinco restricciones:** ideal para aplicaciones en donde se busca una protección diferencial rápida, sensible, confiable y segura.

**Protección adicional:** permite la aplicación de dos entradas de voltaje trifásico para protección de sobre y bajo voltaje, frecuencia y la tasa de variación de la relación tensión respecto la frecuencia.

**Seguridad y confianza:** Proporciona seguridad máxima durante fallas externas y condiciones de afluencia magnetizadora del transformador. Detecta fallas internas con rapidez, durante condiciones de energización o de operación normal, con el uso de elementos combinados de bloqueo armónico y diferencial de restricción.

**Supervisión y administración de activos:** es posible la supervisión de los activos críticos de una subestación con el modelo térmico IEEE C57.91.

**Medición y reporte:** Elimina los requerimientos de registros y medidores externos con los reportes de eventos oscilográficos, el registro secuencial de eventos y mediciones de energía trifásica. Lo cual posibilita el uso de estas herramientas para simplificar el análisis post-falla y el mejoramiento de comprensión de las operaciones de los esquemas de protección.

**Comunicaciones flexibles:** Una opción de tarjeta Ethernet proporciona dos puertos de cobre o fibra para redundancia de falla. Entre los protocolos de comunicaciones Ethernet disponibles se incluyen FTP, Telnet, DNP3 LAN/WAN, SNTP, IEC 61850 y sincrofasores IEEE C37.118. Los cuatro puertos seriales independientes EIA-232 soportan Fast Message de SEL, ASCII de SEL, ASCII comprimido, Fast Operate de SEL, Fast Meter de SEL, Fast SER de SEL, comunicaciones mejoradas Mirrored Bits®, DNP3 nivel 2 Outstation más marcado, Virtual Terminal y comunicaciones con los módulos RTD de la serie SEL-2600.

**Control y supervisión de diagramas de una línea del tablero frontal:** Seleccione su propia configuración de bahía y controle hasta cinco interruptores y ocho interruptores de desconexión con los diagramas integrados, mismos que incluyen hasta seis cantidades análogas programables para lecturas, según se muestra en los diagramas de alta y baja tensión en la Fig. 4.3.

	HU BUS 1
	HU BUS 2
H1 SD	EHO / SH
	I: 2158
BH1	U: 115 kU
NH4 S	PF: 0.85
	P: 24,125 MM
	Q:15.323 MURR
	F: 50.000 Hz
	ET BTI
	TRU AL AND

Fig. 4.3 Diagrama de conexión en baja y alta tensión de un transformador.

**Automatización y control:** permite implementar las ecuaciones de control SELOGIC con variables, temporizadores, bits de enclavamiento y elementos de control remoto SELOGIC para personalizar esquemas de protección y control avanzados.

Algunas de las aplicaciones de protecciones eléctricas que suministra el fabricante se proporcionan a continuación:

- a. Protección para transformadores grandes con conexiones del lado de alta y baja tensión de una configuración interruptor y medio.
- b. Utilizado en aplicaciones típicas de transformadores de dos devanados y utiliza las entradas de corriente trifásica racks para protección de respaldo de la alimentación.
- c. Protección step-up de generador y aplicación de elementos térmicos integrados para supervisar las temperaturas de devanado tanto del generador como del transformador al mismo tiempo.
- d. Ahorro de tiempo y dinero, mejorando la calidad del sistema de energía con los sincrofasores SEL (IEEE C37.118) desde los 24 canales análogos de manera simultánea (6 fuentes de voltaje y 18 de corriente). Con sincrofasores sobre comunicaciones seriales o Ethernet, usted detectará con facilidad flujos de rizo reactivo, cambiará la estimación de estado a medición de estado y proporcionará una advertencia temprana de inestabilidad potencial en el sistema.
- e. Implementación de comunicaciones Mirrored Bits® y de esta forma obtener teleprotección y control remoto mejorados.
- f. Protección diferencial del transformador en aplicaciones de transformador con el uso de hasta cinco corrientes restringidas. Esto incluye transformadores unitarios con devanados terciarios.
- g. Protección de respaldo con elementos de sobrecorriente de secuencia de fase, negativa y cero. Configure protección contra falla del interruptor con detección de disminución para detectar con rapidez las fallas del interruptor y minimizar los tiempos de coordinación del sistema.
- h. Aplicación de elementos de sobre/baja tensión y de frecuencia, junto con elementos de medición de la tasa de variación de tensión respecto a frecuencia.

i. El software asistente analítico SEL-5601 permite mostrar oscilogramas y diagramas vectoriales para analizar los reportes de eventos.

Las características técnicas del equipo SEL 487E se presentan a continuación:

# Tabla 4.6 Característica de tensión nominal de SEL 487E [6].

Tensión	Valor
Continua	300 Vrms.
Sobre-tensión a corto	600 Vac por 10 segundos.
Carga	<0.5 VA a 67 V

# Tabla 4.7 Características de corriente de entrada de fase y de neutro de SEL487E [6].

Corriente	Característica	Valor
Fase y	Corriente nominal a	15 A continuamente, 500 A por 1 segundo, lineal hasta 100
neutro	5 [A]	A simétrica y 1250 A por un ciclo
	Carga	<0.5 VA a 5A y 2.51 VA a 15 A
	Corriente nominal a	3 A continuamente, 100 A por 1 segundo, lineal hasta 20 A
	1 [A]	simétrica y 250 A para un ciclo
	Carga	<0.1 VA a 1A y 1.31 VA a 3 A

#### Tabla 4.8 Características de alimentación de SEL 487E [6].

Tasa	Característica	Valor
125/250 Vdc nominal o 120/240 Vac nominal	Rango	85-300Vdc nominal o 85/264 Vac nominal
,	Carga	<35 W
48/125 Vdc nominal o 120 Vac nominal	Rango	38-140 Vdc nominal o 85/140 Vac nominal
	Carga	<35 W
24/48 Vdc nominal	Rango	18-60 Vdc depende de la polaridad
	Carga	<25 W

# Tabla 4.9 Características de frecuencia y secuencia de tensiones medidas SEL487E [6].

Característica	Valor
Rotación	ABC o ACB
Frecuencia	50/60 Hz (VA o V1 de secuencia positiva requeridos para el cálculo)

Característica	Valor
Reloj interno	± 1 [µs]
Reporte del sincrofasor (MET PM, EVE P, CEV P)	± 10 [μs]
Otros reportes	± 5 [ms]
Máxima tasa de reporte	60 mensajes por segundo
Tasa de muestreo	8.00 [kHz]
Estándar	C37.118 de 2005
Puertos EIA- 232	1 delantero y 2 traseros
Tasas de Baudios disponibles	300, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200,
Tasas de Daddios disponibles	38400 y 57600
Ethernet	2 puertos traseros de 10/100 Base-t, conector RJ-45

Tabla 4.10 Principales características de comunicación del SEL 487E [6].

# 4.1.3. Fuente de Corriente Directa

Como fuente de alimentación para el sistema de sincronización de medidas a través del GPS se utilizó el equipo SEL 9321. El cual es un equipo de alimentación de energía de baja tensión en DC, con una gran robustez para su uso en dispositivos de comunicación e instrumentación. El dispositivo cuenta con salidas de + 5 Vdc y  $\pm$  10 Vdc como se aprecia en la Fig. 4.4.



Fig. 4.4 Salidas de SEL 9321 [28].

Este dispositivo presenta las siguientes propiedades que garantizan un buen desempeño para el uso del sistema sincronización por GPS, presentas a continuación:

• **Confiabilidad y Robustez** certificado por los estándares IEEE C37.90, IEC 60255 y IEEE 1613, los cuales garantizan soporte a sobrecarga, transitorios

rápidos y requerimientos de inmunidad frente a interferencias de radio frecuencia en subestaciones eléctricas de potencia.

- **Flexibilidad** para elegir tres entradas de tensión: 24 Vdc, 48/125 Vdc o 125 Vac y 125/250 Vac.
- **Fácil montaje** para placas planas o carriles DIN. Adicionalmente, cuenta con cables opcionales disponibles para usos específicos de equipos SEL como fibra óptica entre otros.

# 4.1.4. Sistema de posicionamiento global

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un servicio propiedad de los EE.UU. que proporciona a los usuarios información sobre posicionamiento, navegación y cronometría. Este sistema está constituido por tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento del usuario. La Fuerza Aérea de los Estados Unidos desarrolla, mantiene y opera los segmentos espacial y de control. [29]

El rol de los relojes sincronizados satelitalmente ha crecido para aplicaciones de eventos de secuencia básica y tiempo de referencia para registradores de falla, los cuales tienen funciones especiales con medidas sincronizadas y análisis detallados de eventos. Estas nuevas aplicaciones requieren relojes satelitales que reúnan los estándares ambientales adecuados y sean confiables para los relés de protección y otros dispositivos.

Las principales características con las que cuenta este sistema son:

- a. *Confiabilidad:* Aplica en ambientes agresivos, incluyendo gabinetes de control para exteriores. Cumple con las normas de protecciones IEEE C37.90 e IEC 60255 para robustez. Operación precisa a temperaturas de -40 [°C] a +80 [°C].
- b. *Precisión:* Aplica para sincrofasores, correlaciona eventos de relés y otras necesidades de temporización (sincronización) de alta precisión. Salidas de IRIG-B demodulada con precisión de ± 100 [nS] cumplen con los requerimientos para aplicaciones de temporización (sincronización) existentes y futuras.
- c. *Bajo Costo-Alto Desempeño:* Ideal para subestaciones pequeñas o situaciones donde se requiere una señal de tiempo de alta calidad.
- d. *Aplicaciones de control:* Usa el contacto de salida como un arranque de precisión para prueba coordinada en tiempo, iniciación de eventos u otras funciones de control.

El GPS esta proporcionado por el sistema de sincronización de reloj satelitalmente aplicada por el kit SEL 2401, el cual puede ser aplicado como un:

- GPS de fuente de tiempo bloqueada para control de re cierre
- Solución efectiva para control/monitoreo remoto.

• Fuente de tiempo para pequeñas subestaciones (vista de tiempo en un relé conectado/registrador digital de fallas).

Este kit cuenta con los siguientes componentes, que se detalla en la Fig. 4.5:



Fig. 4.5 Sistema de sincronización de tiempo [30].

- 1. *Antena GPS*: Es el sistema de recepción de información satelital, esta debe estar instalada en un lugar abierto de preferencia 360°. Esta antena cuenta con un empaque a prueba de agua, golpes, vibraciones excesivas, temperaturas extremas, lluvia, nieve entre otros. Es recomendable ser colocada bajo y cerca del techo del lugar donde se instale el reloj.
- 2. *Cable RG6 con terminales TNC:* Es el medio de transmisión de la información suministrada por la antena del GPS hacia el reloj de sincronización. Este tipo de cable es usado ampliamente en aplicaciones a nivel residencial y a nivel comercialmente, este cable es popularmente conocido como cable de televisión (CATV).
- 3. *Reloj SEL 2401:* Receptor de la señal satelital para funciones de sincronización de tiempo y localización global por medio del protocolo IRIG-B.

# 4.1.5. Reloj de sincronización satelital

Este equipo de la compañía SEL es el encargado de utilizar la información suministrada por el GPS para mantener sincronizada la información del tiempo y ubicación geográfica la cual transmite a través de las diferentes opciones de puerto que ofrece como se especifica en el Anexo B. Para mayor información respecto a las características generales de equipo consulte el Anexo B. En la Fig. 4.6 se aprecia la vista desde varios perfiles del Reloj SEL 2401.



Para la instalación del reloj de sincronización satelital se deben considerar los siguientes aspectos, descritos en [30]:

- a. Antena: Con la correcta instalación y puesta en funcionamiento del reloj de sincronización satelital, se procede al conexionamiento de este sistema con las PMUs instaladas de en la red de pruebas. Para ello se utilizó el puerto BNC que utiliza el protocolo IRIG-B para la sincronización de las medidas obtenidas.
- b. IRIG-B: Es un formato de datos seriales de tiempo que consiste de un segundo marco el cual contiene 100 pulsos divididos en campos. Los dispositivos de sincronización de tiempo decodifica los campos de segundo, minuto, hora y día, ajustando el reloj interno del dispositivo al detectar datos de tiempo válidos en el modo de tiempo IRIG. El reloj SEL 2401 provee solamente una salida de IRIG-B no-modulada IRIG-B00x, donde el ultimo digito puede ser 2 o 0, indicando el código de expresiones. En el Anexo A se amplía el funcionamiento del protocolo IRIG y los formatos que proporciona respecto a su nomenclatura.
- c. Protección puesta a tierra: Se debe instalar la antena en el techo del equipo y con una superficie que se encuentre aterrizada al sistema de puesta a tierra del edificio esto para limitar el crecimiento de potencial. Entre mayor tamaño de la antena mayor es la probabilidad de sufrir un daño frente a descargas eléctricas.
- d. Conexiones de alimentación: Se procede a conectar la fuente SEL 9321 con sus salidas de tensión de 10 Vdc a las entradas especificadas en el reloj SEL 2401 como se observa en la Fig. 4.6 (a). Para esta operación el fabricante sugiere usar cables de calibre desde el 12 AWG al 16 AWG. Por otra parte, es importante conectar la alimentación de acuerdo a la polarización demarcada.

Al suministrarle energía al dispositivo SEL 2401 el cual ya tiene instalada su correspondiente antena de recepción, se podrá observar que se encienden por un periodo corto los LEDs SATELLITE LOCK y OUTPUT, seguido del LED ENABLE. Estos indicadores se pueden observar en la Fig. 4.6 (c) y se describe que información del reloj suministran según su estado en la tabla 4.11:

Etiqueta	Color	Descripción		
Enable	Verde	El proceso de auto-verificación indica que todo está en orden.		
Satellite Verde El reloj ha rastreado cuatro o más satélites y está actua		El reloj ha rastreado cuatro o más satélites y está actualmente		
Lock		rastreando 1 o más satélites.		
Output	Verde	El reloj está dando una precisión de tiempo (±100 nS promedio)		

Tabla 4.11LEDs indicadores de estado	[30].
--------------------------------------	-------

e. Configuración de control DIP: Una de las formas de configurar el reloj SEL 2401 es a través del control DIP (Dual In-line Package). Este control es accionado por la conmutación del conjunto de switches que se encuentran en la parte superior final del dispositivo el cual se aprecia en la Fig. 4.6 (c). Los switches son etiquetados como SW1 - SW10 de izquierda a derecha. La función que cumple cada para la configuración es desglosada en la tabla 4.2 a continuación:

Switch		Función				
1	ON	Deshabilitar contraseña de protección				
	OFF		Habilitar contraseña de protección			
2	ON	I	ALARMA no incluida para perdida de satélites asegurados			
	OFF		Agregar ALARMA por perdida de satélite.			
3	IRIG-B		Formato de salida			
	ON		Formato extendido IRIG-B000			
	OFF	Formato estándar IRIG-B002				
4-9			Tiempo local de desfase			
	4	ON	Agregar a UTC			
		OFF	Substraer a UTC			
	5	ON	8 horas en incremento			
	6	ON	4 horas en incremento			
	7	ON 2 horas en incremento				
	8	ON	ON 1 horas en incremento			
	9	ON	ON 1/2 horas en incremento			
10	ON/	OFF	Horario de verano DST (Daylight Saving Time)			

# Tabla 4.12 Configuración del control DIP [30].

Para la ubicación en que se encuentra el dispositivo y la temporada del año, México D.F. y en horario de verano se estableció una configuración como la se muestra a continuación:



Fig. 4.7 Configuración utilizada en control DIP.

Lo que se traduce en que el reloj no tiene habilitada la contraseña de protección ni las opciones de alarma, está usando el formato extendido IRIG-B000, le sustrae 5 horas al tiempo UTC y no tiene habilitada la opción de horario de verano DST.

f. Conexionamiento a las PMUs: Cabe aclarar que con un solo reloj de sincronización SEL 2401 se puede conectar dos PMUS, esto debido a que la distancia entre estos es corta y la conexión simultánea al mismo reloj no altera

el funcionamiento adecuado del sistema de sincronización. Por tanto se realizó una derivación de la salida BNC del reloj SEL 2401 para conectar las dos PMUs a sus respectivos puertos de entrada BNC para sincronización por IRIG-B con el conector tipo T BNC 1 Macho y 2 Hembras, el cual se aprecia en la Fig. 4.8.



Fig. 4.8 Conector Tipo T BNC 1 Macho y 2 Hembras [31].

# 4.2. Pruebas de funcionalidad de equipos

Las pruebas de funcionalidad de las PMUs, se llevaron acabo a través tres programas diferentes: AcSELerator QuickSet, Hyperterminal y PMU tester. Mediante los cuales se comprobaron los ajustes y las carácteristicas funcionales de las unidades. En este indice se hace una descripción de las principales carácteristicas de los softwares mencionados.

**AcSELerator QuickSet:** el software AcSELerator QuickSet es una herramienta para ingenieros y tecnicos, la cual permite acelerar y facilitar la configuración de dispositivos de protección, control, medición y monitoreo de sistemas eléctricos de potencia de la compañía SEL. En la Fig. 4.9 se puede apreciar la pantalla inicial de su interfaz.



Fig. 4.9 Pantalla de inicio AcSELerator Quickset [27].

**HyperTerminal**: es un programa que se puede utilizar para conectar con otros equipos, sitios Telnet, sistemas de boletines electrónicos (BBS), servicios en línea y equipos host, mediante un módem, un cable de módem nulo o Ethernet.

Una de sus funciones es el registro de mensajes enviados o recibidos por servicios o equipos situados al otro extremo de la conexión. Por esta razón, puede actuar como una valiosa herramienta para solucionar problemas de configuración y uso del módem. Para confirmar que el módem está bien conectado o ver su configuración, es posible enviar comandos a través de HyperTerminal y ver los resultados. En la Fig. 4.10 se aprecia la pantalla inicial para generar una conexión.

Connection Description ? ×
New Connection
Enter a name and choose an icon for the connection:
Name:
1
Icon:
🎽 🖏 🖏 🖏 🚳 😺 🎗
OK Canad

Fig. 4.10 Pantalla de inicio HyperTerminal [32]

**PMU tester:** es un software administrado por la aliancia de protección de red (Grid Protection Alliance, GPA), verifica que el flujo de datos desde el dispositivo de medición sincrofasorial sea recibido satisfactoriamente por el servidos. PMU tester soporta los siguientes protocolos de datos: IEEE C37.118 (Version 1/Draft 7, Draft 6), IEEE 1344, BPA PDCstream, SEL Fast Message, UTK FNET protocolo de flujo de datos, IEC 61850-90-5 y Macrodyne.

	File Help					
1	- Sconnection Parameters					
ſ	Tcp Udp Serial File Default System IP Stack: IPv6	Protocol				
	Hast IP: Establish Tap Sanar	IEEE C37.118.2:2011 V	Connect			
		Device ID Code: 1	Version 4.5.5			
	Port:	Command:	Configure Alternate Command Channel			
II L	Network Interface	Disable Real-time Data v Send	Not Defined			
- + E Configuration Frame			1 D'hoder Frans			
	180		Phasor 1			
	90					
	0					
	-90					
	-180					
	A Grah Stitus 18 Message A Protocol Second					
	T Br. Hon and Land Octa					
То	Total frames: 0 Frameslee: 00000 Total bytes: 0 Bit rate (mbps): 00000 Queued buffers: 0					

Fig. 4.11 Pantalla de inicio PMU Tester [33].

# 4.2.1. Resultados Pruebas de funcionalidad

En esta sección se describirán los resultados obtenidos a través de los tres softwares mencionados anteriormente, los cuales fueron utilizados para la validación del correcto establecimiento del enlace de comunicación Ethernet entre los equipos PMU y el ordenador de escritorio.

# A. Resultados AcSELerator QuickSet

A través del software AcSELerator QuickSet se realizaron las pruebas para verificar el correcto funcionamiento de los equipos y los ajustes necesarios en cuanto a tasa de reporte, carácteristicas de la trama sincrofasorial, relación de transformación de los equipos de instrumentos, entre otros ajustes de importancia de cada una de las PMUs. En la Fig 4.12 (a) donde se observa el estado de las variables eléctricas y los contactos de los reles de protección del equipo SEL 351A, por otro lado en la Fig. 4.12 (b) se obtuvo una muestra del contenido de un mesaje sincrofasorial. Similarmente se presenta la misma información en la Fig. 4.13 (a) del resumen de estado de los contactos de protección del equipo SEL 487E y en la Fig 4.13 (b) una muestra del contenido de un mesaje sicrofasorial.

Device	Over	view					
Metering	ļ						
I MAG A 70,94 B 71,30 C 286,18 N 214,48 G 214,78	A A A E A C A N A O	ANG 0,25° 3-119,33° 2-116,77° N-64,26° 3-115,62°	VI A B C	MAG 22,340 22,309 22,109	V/ kV A kV B- kV C	ANG 0,00° -120,31° 119,50°	
FREQ (Hz	:) 60,01						
Contact	I/O						
IN101	IN102	IN103	IN104	IN105	IN106	52A	
OUT101	OUT102	OUT103	OUT104	OUT105	OUT106	OUT107	ALARM
User-De	fined T	argets					
SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6	50BC4	50CA4
50A	50B	50C	51P	51PT	51PR	51N	51NT
Front-Pa	Front-Panel Display						
	) TRIP		СОММ	SOTF	50 〇	51 🥘	81 〇
Ô	B	C Ø AULT TYP	G () E	Ň		CYCLE LO O LOSING ST/	OCKOUT
			(	(a)			

Capítulo 4. Diseño e Implementación del Sistema de Medición Sincrofasorial

FEEDER 1 Date: 08/27/15 Time: 16:06:13.000 STATION A PMDOK = 1 Maximum time synchronization error: 0.000 (ms) TSOK = 1 Time Quality Synchrophasors Phase Voltages Synch Voltage Pos.-Seq. Voltage VA VB vc vs V1 MAG (kV) 22.363 22.239 21.920 0.070 22.173 -33.475 -154.298 85.971 ANG (DEG) 52.324 -33.933Phase Currents Neutral Current Pos.-Seq. Current TC тъ TB TN т1 MAG (A) 70.981 71.199 282.398 211.278 141.476 -33.223 -153.360 ANG (DEG) 83.487 -97.436 -35.435 FREQ (Hz) 59.991 Rate-of-change of FREQ (Hz/s) 0.00 Digitals sv1 sv3 **8**75 SV2 SV4 SV6 SV7 SV8 1 0 0 0 0 0 0 0 sv9 SV12 SV13 SV16 SV10 sv11 sv14 sv15 0 0 0 0 0 0 0 0 (b)



#### **Device Overview**

Main Board I/O User-Defined Targets (Double-Click on Target Label)



Synchrophasor Metering Values

Rela Stat	Relay 1         Date: 08/27/2015         Time: 16:16:11.000           Station A         Serial Number: 1122680390							
Time Seri	Quality	Maximum ( figuratio	time synchr on Error: N	onization	error:	0.00 PMU	00 (ms) in TESI	TSOK = 1 MODE = N
Sync	hrophasors							
		vv	Phase Volt	ages	vv	Pos. Se	equence	Voltage
		VA	VB	VC		VI VI	1	
MAG	(kV)	0.127	0.122	0.122		(	0.124	
ANG	(DEG)	-91.233	149.328	25.363		-92	2.163	
		vz	Phase Volt	ages	vz	Pos. Se	equence	Voltage
		VA	VB	VC		V1	1	
MAG	(kV)	0.011	0.002	0.015		0	0.009	
ANG	(DEG)	128.011	44.790	-134.363		117	7.982	
		IS	Phase Curr	ents	IS	Pos. Se	equence	Current
		IA	IB	IC		1	115	
MAG	(A)	0.000	0.000	0.000		(	0.000	
ANG	(DEG)	0.000	0.000	0.000		0	0.000	
		IT	Phase Curr	ents	IT	Pos. Se	equence	Current
		IA	IB	IC		1	[1 <b>T</b>	
MAG	(A)	0.001	0.001	1.801		0	0.601	
ANG	(DEG)	116.993	82.939	-155.444		84	1.590	
		IU	Phase Curr	ents	IU	Pos. Se	equence	Current
		IA	IB	IC		1	110	
MAG	(A)	0.592	0.594	2.401		1	1.195	
ANG	(DEG)	-90.691	149.788	25.741		-93	3.002	
				(b)				

### Fig. 4.13 Resumen de las medidas eléctricas SEL 487E

(a) I/0 de los contactos de protección, (b) y un mensaje sincrofasorial

B. Resultados PMU Tester

Con el software PMU Tester se realizaron las pruebas de funcionalidad, lectura de las tramas de datos y configuración de cada uno de los equipos. Adicionalmente, PMU tester brinda la posibilidad de conocer la cantidad de bytes de cada uno de los mensajes relacionados en el estandar C37.118-2005 y C37.118-2011. En las Fig. 4. 14 (a) y (b) se detallan la información suministrada por PMU Tester al establecer la conexión con los equipos PMU utilizados.



# Capítulo 4. Diseño e Implementación del Sistema de Medición Sincrofasorial

(b)



# C. Resultados HyperTerminal

Por medio del software HyperTerminal se realizaron las pruebas que permitieron verificar el envio y respuesta de comandos de configuración y consulta. En la Fig. 4.15. (a) se consultó el nivel de armónicos de las corrientes y voltajes de fase del equipo SEL 351A, por otra parte en la Fig. 4.15 (b) se consultó una muestra de un mensaje sincrofasorial del equipo SEL 487E.

THD (%) RMS Fund.	Currents IA 2 71.19 71.17	(A pri IB 2 71.57 71.55	) IC 25 299.21 290.31	IN 33 229.54 218.19	Voltages VA 0 22.47 22.47	s (kV pr: VB 22.47 22.47 22.47	i) VC 22.23 22.23 22.23
Harmonic 2 (%) 3 (%) 4 (%) 5 (%) 6 (%) 7 (%) 8 (%) 10 (%) 11 (%) 12 (%) 13 (%) 14 (%) 15 (%)	0 1 0 2 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0	0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 21 0 12 0 4 0 1 0 2 0 1 0 0 0	0 27 0 16 0 5 0 2 0 2 0 1 0 1 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Relay 1			(a)	Date: 08	/27/2015	Time: 19:	:25:02.000
Station A Time Quality	Havimum tim	e sunchr	onization	Serial No	umber: 112 a aaa (	2680390 mc) TSO	( = 1
Serial Port Con	figuration	Error: N	01120110	rerror.	PMU in	TEST MODE	È = Ñ
MAG (kV) ANG (DEG)	VV Ph VA 0.127 -56.158 -	ase Volt VB 0.123 175.429	ages VC 0.122 60.357	VV 1	Pos. Seque V1 0.12 -57.05	nce Volta 4	age
MAG (kV) ANG (DEG)	VZ Ph VA 0.014 170.694	ase Volt VB 0.005 33.838	ages VC 0.012 -99.275	VZ I	Pos. Seque V1 0.01 156.66	nce Volta 0 6	age
MAG (A) ANG (DEG)	IS Ph IA 0.000 0.000	ase Curr IB 0.000 0.000	ents IC 0.000 0.000	ISI	Pos. Seque I1S 0.00 0.00	nce Curre 0	ent
MAG (A) ANG (DEG)	IT Ph IA 0.000 -162.126	ase Curr IB 0.001 135.494	ents IC 1.815 -120.770	IT I	Pos. Seque IIT 0.60 119.27	nce Curre 5 5	ent
MAG (A) ANG (DEG)	IU Ph IA 0.593 -55.687 -	ase Curr IB 0.596 175.031	ents IC 2.416 60.474	IUI	Pos. Seque I1U 1.20 -58.14	nce Curre 11 14	ent
	I₩ Ph	ase Curr	ents (b)	IA I	Pos. Seque	nce Curre	ent

Fig. 4.15 Consultas de HyperTerminal

En: (a) equipo SEL 351A y (b) equipo SEL 487E.

# 4.3. Diseño PDC

Una vez realizada las pruebas de funcionalidad de equipos, se realizó el diseño del PDC UD-UNAM según la metodología descrita en la fig. 4.16 y los trabajos realizados en [34, 35, 36, 7, 37, 38] donde se llevaron a cabo proyectos de diseño e implementación de sistemas sincrofasoriales enfatizando el desarrollo de PDC y tecnologías libres como OpenPDC. El diseño presenta tres etapas principales: red de comunicación, desarrollo de la aplicación gráfica y sistema almacenamiento. Adicionalmente, una vez desarrollada cada una de las etapas se procede a la aplicación de pruebas y depuración de la aplicación gráfica, para por último validar y presentar un prototipo final. Cada una de las etapas que componen este diagrama de flujo se describe a continuación:



Fig. 4.16 Metodología de diseño

- **Red de comunicaciones**: comprende la determinación del protocolo de comunicaciones, asignación de puertos, puertas de entrada y mascara de red.
- **Desarrollo de la aplicación gráfica:** se describe la herramienta computacional empleada para la elaboración de la aplicación, el diagrama de flujo que presenta el plano estructural de la aplicación, el establecimiento de conexión entre LabVIEW a equipos PMU y la lógica para descomposición de tramas sincrofasoriales.
- **Sistema de almacenamiento:** comprende los pasos desarrollados para la correcta instalación de la unidad de almacenamiento y la reconstrucción de históricos de periodos específicos con ayuda del programa Access.
- **Pruebas y depuración:** se valida el correcto funcionamiento del PDC UD-UNAM a través de pruebas experimentales, y se realiza la corrección respectiva de errores y mejoras a la aplicación.
- **Prototipo final:** una vez desarrollada las pruebas se presenta el prototipo final.

# 4.4. Red de comunicaciones

La red de comunicaciones fue establecida a través del protocolo TCP/IP debido a sus potencialidades en cuanto a:

- a. División de mensajes en paquetes.
- b. Uso de un sistema de direcciones.
- c. Enrutamiento datos por la red.
- d. Detectar errores en la transmisión de datos.
- e. Aseguramiento de entrega de paquetes en el mismo orden de envió.

Se configuraron los puertos Ethernet de cada uno de los equipos como se puede observar en la tabla 4.13.

EQUIPO	IP	PUERTA DE ENLACE PREDETERMINADA	MÁSCARA
PMU 1	192.168.1.2	192.168.1.62	255.255.255.0
PMU 2	10.42.45.103	10.42.45.1	255.255.255.0
Ordenador de	192.168.1.5	192.168.1.62	255.255.255.0
Escritorio	10.42.45.2	10.42.45.1	

#### Tabla 4.13 Tabla de enrutamiento

Fuente: Autores

La fig. 4.17 muestra las conexiones físicas establecidas a través de cable Ethernet, entre las PMUs, el equipo de enlace entre los equipos de medición y el ordenador de escritorio.



------ Cable Ethernet

#### Fig. 4.17 Enlaces de comunicación

# 4.5. Desarrollo de aplicación gráfica

# 4.5.1. Entorno de programación LabVIEW

La aplicación gráfica fue desarrollada en el entorno de programación LabVIEW, ya que constituye un revolucionario sistema de programación gráfica para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos [39]. Las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW se resumen en las siguientes:

- a. Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- b. Cuenta con gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- c. Permite a los usuarios crear soluciones completas y complejas.
- d. Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- e. El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- f. Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

LabVIEW es un entorno de programación destinado al desarrollo de aplicaciones, similar a los sistemas de desarrollo comerciales que utilizan el lenguaje C o BASIC. Sin embargo, LabVIEW se diferencia de dichos programas en un importante aspecto: los citados lenguajes de programación se basan en líneas de texto para crear el código fuente del programa, mientras que LabVIEW emplea la programación gráfica o lenguaje G para crear programas basados en diagramas de bloques.

LabVIEW posee extensas librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, LabVIEW incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB y comunicación serie, análisis, presentación y guardado de datos.

# 4.5.2. Diagrama de flujo

La figura 4.18 muestra la lógica de funcionamiento de la aplicación gráfica PDC UD-UNAM:



Fig. 4.18 Diagrama de flujo de funcionamiento

# 4.5.3. Establecimiento de comunicaciones

Las comunicaciones entre las PMUs y LabVIEW se desarrollaron a través de un protocolo Ethernet de comunicaciones, el software utilizado para el establecimiento del enlace Ethernet es la interfaz de S/E universal NI-VISA de LabVIEW. NI-VISA es un estándar para la configuración, programación y la solución de programas de sistemas que comprenden GPIB, VXI, Serial, Ethernet, y/o Interfaces USB. VISA provee la interfaz de programación entre el hardware y el desarrollo de ambientes tales como LabVIEW,

Labwindows/CVI y Measurement Studio for Microsoft Visual Studio. NI-VISA es una implementación de National Instruments del estándar de VISA I/O, incluye librerías de software, utilidades interactivas tales como rastro NI I/O y el control interactivo de VISA, y la configuración de programas a través del explorador de medidas y automatización para todos los desarrollos necesarios. Ni-VISA es estándar a lo largo de la línea de productos de National Instruments. [39]



Fig. 4.19 Ni-VISA [39].

Dentro de NI-VISA se usaron 4 módulos los cuales son descritos a continuación:

**a.** *VISA Open Function*: Abre una sesión con dispositivo especificado por VISA resource name y retorna una sesión que puede ser usada para llamar otra operación del dispositivo.



Fig. 4.20 VISA Open Function [39].

b. *VISA Write Function*: Escribe el dato desde write buffer al dispositivo o interfaz especificada por VISA resource name.



Fig. 4.21 VISA Write Function [39].

c. VISA *Read Function:* Lee el numero especificado de bytes desde el dispositivo o interfaz especificado por VISA resource name y retorna el dato en read buffer.



d. *VISA Clear Function:* Borra la entrada y salida del buffer del dispositivo.

VISA resource name WSA error in (no error)

Fig. 4.23 VISA Clear Function [39].

# 4.5.4. Descomposición tramas

En esta sección se describen a fondo los mensajes estandarizadas en la norma C37.118, vale resaltar que cada uno de estos mensajes tiene una función específica y debe ser interpretado de manera adecuada para poder procesar la información correctamente. Adicionalmente, cada uno de los mensajes comparten un cierto de números de bytes en común, los cuales son descritos en la tabla 4.4.

Campo	Tamaño (bytes)	Descripción
SYNC	2	Palabra reservada para la sincronización. El primer Byte se reserva para el valor AA Hex. Los Bits-4-6 indican el tipo de mensaje de acuerdo a lo siguiente: 000: Data Frame 001: Header Frame 1 010: Configuration Frame 1 011: Configuration Frame 2 100: Command Frame Bit 7: Reservado para futuras definiciones
FRAMESIZE	2	Total número de bytes en el frame.
IDCODE	2	Número PMU/DC ID, entero de 16 bits, asignado por el usuario. Identifica el dispositivo de envío y recepción de mensajes.
SOC	4	Segundos de siglo: conteo en segundos a partir de la media noche del primero de enero de 1970 hasta el segundo actual.
FRACSEC	4	Los 32 [Bits] (4 [Bytes]) se dividen en dos componentes: Un entero determinado por los primeros 24 [Bits] que indica la actual fracción de segundos y 8 [Bits] contienen un indicador de calidad temporal.
СНК	2	CRC-CCITT, 16 [Bit] enteros.

# Tabla 4.14 Palabras comunes en todas las tramas [17].

*Mensaje de datos*: contiene todos los datos de las mediciones, es posible que esta trama cuente con valores adicionales análogos y digitales (enviado por la PMU al PDC).

Campo	Tamaño (bytes)	Descripción
STAT	2	Mapa de bits indicando las Banderas de condiciones del mensaje.
PHASORS	4 o 8	Valores enteros de 16-bit: Formato Rectangular: -Real e imaginario, el valor real es el primero. -16-bit enteros signados, rango -32767 a +32767. Formato Polar: -Magnitud y ángulo, la magnitud es primero. -Magnitud 16-bit enteros no signados con rango de 0 a 65 535Ángulo 16-bit entero signado, en radianes × 104, rango -31416 a +31416. Valores en 32-bit en formato IEEE punto flotante: Formato Rectangular: -Real e imaginario, en unidades de ingeniería, valor real primero. Formato Polar: -Magnitud y ángulo, magnitud primero y en unidades de ingenieríaÁngulo en radianes.
FREQ	2 o 4	Frecuencia (entero o punto flotante)
DFREQ	2 o 4	Tasa de cambio de la frecuencia (entero o punto flotante)
ANALOG	2 o 4	Palabra Análoga. 16-bit entero. Puede ser dato muestreado tal como señal de control o valor de transductor. Valores y rangos definidos por usuario. Puede ser 16-bit entero o IEEE punto flotante.
DIGITAL	2	Palabra Digital de estados. Puede ser de un mapa de bits o de banderas. Valores y rangos definidos por el usuario.

# Tabla 4.15 Mensajes de datos [17].

*Mensaje de configuración*: contiene los datos de la configuración actual de la PMUenviado por la PMU al PDC.

Campo	Tamaño (bytes)	Descripción
TIME_BASE	2	Mapa de bits indicando las Banderas de condiciones del mensaje.
NUM_PMU	4 o 8	<ul> <li>Valores enteros de 16-bit:</li> <li>Formato Rectangular: <ul> <li>Real e imaginario, el valor real es el primero.</li> <li>-16-bit enteros signados, rango -32767 a +32767.</li> </ul> </li> <li>Formato Polar: <ul> <li>Magnitud y ángulo, la magnitud es primero.</li> <li>Magnitud 16-bit enteros no signados con rango de 0 a 65 535.</li> <li>-Ángulo 16-bit entero signado, en radianes × 104, rango</li> <li>-31416 a +31416.</li> </ul> </li> <li>Valores en 32-bit en formato IEEE punto flotante.</li> <li>Formato Rectangular: <ul> <li>Real e imaginario, en unidades de ingeniería, valor real primero.</li> </ul> </li> <li>Formato Polar: <ul> <li>Magnitud y ángulo, magnitud primero y en unidades de ingeniería.</li> </ul> </li> </ul>
FREQ	2 o 4	Frecuencia (entero o punto flotante)
DFREQ	2 o 4	Tasa de cambio de la frecuencia (entero o punto flotante)
ANALOG	2 o 4	Palabra Análoga. 16-bit entero. Puede ser dato muestreado tal como señal de control o valor de transductor. Valores y rangos definidos por usuario. Puede ser 16-bit entero o IEEE punto flotante.
DIGITAL	2	Palabra Digital de estados. Puede ser de un mapa de bits o de banderas. Valores y rangos definidos por el usuario.

Tabla 4.16 Mensaje de configuración [17].

*Mensaje de comando:* instrucciones enviadas por el PDC a la PMU para la realización de una acción determinada.

Campo	Tamaño (bytes)	Descripción
CMD	2	Comandos enviados entre las PMUs y los PDCs
EXTFRAME	0-65518	Trama de datos extendida, palabra de 16 bits, 0 a 65518 bytes indicando tamaño de la trama

Tabla 4.17 Mensajes de comando [17].

# 4.5.5. Ejemplo de mensajes

En este numeral se muestran algunos ejemplos de mensajes recibidos y enviados por la PMU SEL 487E. Vale resaltar que cada uno de estos mensajes debe ser descompuesto con base en la información establecida en el estándar IEEE C37.118 y resumida en el numeral 4.5.4.

#### a. Mensaje de datos

#### b. Mensaje de configuración

AA 31 03 6A 00 01 55 BD 44 10 00 00 00 00 00 FF FF FF 00 01 53 54 41 54 49 4F 4E 5F 41 20 20 20 20 20 20 20 00 01 00 04 00 1C 00 00 20 20 20 20 20 20 56 43 56 50 4D 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 56 31 5A 50 4D 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 56 41 5A 50 4D 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 56 42 5A 50 4D 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 56 43 5A 50 4D 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 49 31 20 20 20 20 20 20 20 49 42 55 50 4D 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 49 43 55 50 4D 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 49 31 57 50 4D 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 49 41 57 50 4D 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 49 42 57 50 4D 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 49 43 20 20 20 20 20 20 50 53 56 35 37 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 50 53 56 35 38 20 20 20 20 20 20 20 20 20 50 53 56 35 39 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 50 53 56 36 30 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 50 53 56 36 31 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 50 53 20 20 00 00 01 C9 00 00 01 C9 00 00 01 C9 00 00 01 C9 00 00 1 C9 00 0D F8 47 00 0D F8 47 00 0D F8 47 00 0D F8 47 01 00 00 6A 01 00 00 6A 01 00 29 B9 00 00 FF FF 00 00 00 07 00 3C 6B A9

#### c. Mensaje de comando

AA 41 00 12 00 01 55 BD 44 0D 00 00 EA 26 00 01 5F 83

# 4.5.6. Interfaz final

El PDC UD-UNAM cuenta con una aplicación gráfica desarrollada en la entorno de programación LabVIEW, en donde es posible la visualización de:

- a. Tensiones instantáneas
- b. Corrientes instantáneas
- c. Frecuencia
- d. Derivada de la frecuencia
- e. Fasores de tensión
- f. Fasores de corriente
- g. Voltajes y corrientes de secuencia
- h. Potencias activas, reactivas y aparentes.

El icono se encuentra en el escritorio como acceso directo, con el nombre de PDC UD-UNAM



Fig. 4.24 Acceso de escritorio interfaz PDC-UNAM

Al dar clic en el botón *conectar* se direccionara a la pantalla principal de la aplicación.



En la pantalla principal de la aplicación se encuentran tres botones que permiten:

Fig. 4.25 Interfaz gráfica PDC UD-UNAM

- ✓ Activar: Envía la orden a las PMUs para encender el envío de datos.
- ✓ **Apagar**: Desactiva la lectura de datos por parte de la aplicación.
- ✓ **Desconectar**: Envía la orden a las PMUs para desactivar el envío de datos.



Fig. 4.26 Botones interfaz

Adicionalmente, en la pantalla principal es posible la visualización de valores instantáneos de voltajes, corrientes, frecuencias y derivada de la frecuencia donde sus unidades son mencionadas en la tabla 4.8, medidas por cada una de las PMUs instaladas en la red en la Fig. 4.27.



Fig. 4.27 Variables mostradas en la pantalla principal.

Tabla 4.18 Unidades de las variables medidas

Variable	Unidad
Voltaje	Voltios [V]
Corriente	Amperios [A]
Frecuencia	Hertz [Hz]
Derivada de la frecuencia	Hertz/Segundo [Hz/s]

Dentro de la pantalla principal a través de una sub-pantalla, se observar las siguientes pestañas:

- a. **Tiempo real**: Muestra las gráficas de las magnitudes de voltaje, corriente y frecuencia medidas por cada una de las PMUs.
- b. **Fasores**: Grafica los diagramas de fasores de corriente y tensión. Adicionalmente, se presenta la ubicación geográfica de las PMUs.
- c. **Potencias:** Se despliegan las potencias activa, reactiva y aparente de cada una de las fases monitoreadas.
- d. **Voltajes y corrientes de secuencia**: Se realiza el cálculo de las componentes de secuencia de tensiones y corrientes de cada PMU.

#### 4.5.7. Tiempo Real

Permite la visualización de los valores instantáneos de la señales de tensión, corriente y frecuencia, adicionalmente, se cuenta con una paleta gráfica que permite realizar acciones de: zoom y desplazarse a través de toda la gráfica. En la Fig. 4.28 se aprecia el inicio de funcionamiento de la aplicación por tanto no se ha llenado el buffer de las gráficas, y en la Fig. 4.29 se detalla la aplicación en funcionamiento con la selección de

la tensión de la fase A, la corriente de línea de la fase B y las frecuencias medidas por las dos PMUs. De la misma forma en la Fig. 4.30 se grafica las mismas variables de tensión y corriente, pero en frecuencia solo se seleccionó la proporcionada por la PMU 1.



Fig. 4.28 Inicio de funcionamiento de la aplicación PDC-UNAM.



Fig. 4.29 Aplicación PDC UD-UNAM en funcionamiento 1.


Capítulo 4. Diseño e Implementación del Sistema de Medición Sincrofasorial

Fig. 4.30 Aplicación PDC UD-UNAM en funcionamiento 2.

#### 4.5.8. Fasores

En esta opción de la aplicación se puede observar las representaciones fasoriales de corriente y tensión medidos por cada una de las PMUs, esta herramienta se diseñó de tal forma que pueda activarse independiente de encendido del aplicación, lo cual se realiza a través del botón "calcular fasores" visto en las Fig. 4.31 y 4.32. En la Fig. 4.31 se observar la ventana que permite esta función de visualizar las representaciones fasoriales de las PMUs y en la Fig. 4.32 se aprecia las representaciones fasoriales al encender el programa.



Fig. 4.31 Pestaña para representación fasorial sin encendido



Fig. 4.32 Pestaña para representación fasorial en funcionamiento.

#### 4.5.9. Potencias instantáneas

En esta función se visualiza los valores instantáneos de potencia activa, reactiva y aparente, por fase y trifásica de cada PMU, como se observa en la Fig. 4.33. Es debido resaltar que estos valores no son proporcionados por las PMUS sino que son calculados a partir de los valores fasoriales de tensión y corriente por la aplicación computacional. Las unidades de los valores proporcionados en esta función son:

- a. Potencia activa [W].
- b. Potencia reactiva [VAR].
- c. Potencia aparente [VA].



Fig. 4.33 Calculo de potencia activa, reactiva y aparente del PDC UD-UNAM.

#### 4.5.10. Tensiones y Corrientes de Secuencia

En esta pestaña es posible visualizar los voltajes de secuencia cero, positiva y negativa referenciados a la fase A, como se observa en la Fig. 4.34. Es debido resaltar que estos valores, al igual que en la función de potencias del anterior índice, no son proporcionados por las PMUs, sino son calculados con base a las medidas disponibles a través del desarrollo teorema matemático de Fortescue.

	PDC UD-UNAM									
07:51:49.20 p.m.	Activar	A	oagar	Desconectar	Tiempo Rea	I Fasores	Potencias Tensiones	y Corrientes de Secu	Jencia	_
21/08/2015	VA	°VA	IA 0.594452	°IA			PN	IU 1		
	VB 124.837	°VB -80.7391	0.584452 IB 0.598567	°IB -80.832	Sec 0	Te Magnitud [V]	Angulo [Grados]	Corrie Magnitud [A]	Ángulo [Grados]	Unidad de Medición Fasorial SEL 351A
INSTITUTO	VC 124.525	159.111	IC 0.623723 IN 0.0359215	°IC 156.125 °IN -51.3402	Sec 1	124.6557149	40.13930819	0.6016916369	39.15524529	6 mm mm
	Frecu 59.9	encia 954 n voltios, corrient	Di	/Dt ) recuencia en Hertz	Sec 2	0.3511194087	150.8722138	0.01680884591	-139.5331334	
	PMU 2						PI	/U 2		
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	VA 124.402 VB 124.586	°VA 39.41 °VB -80.7737	IA 0.587121 IB 0.602259	°IA 39.7261 °IB -80.2724	Sec 0	Te Magnitud [V] 0.1844240221	Angulo [Grados] 88.10661415	Corrie Magnitud [A] 0.0107694238	Angulo [Grados]	Unidad de Medición Fasorial SEL 487E
	VC 124.255	°VC 158.945	IC 0.64387	°IC 156.727	Sec 1	124.4217241	40.04195462	0.6045060186	39.66537407	
		Frecuencia 59.954	IN 0.0525529 Di	°IN -41.7295 /Dt 0	Sec 2	0.3677226491	158.0954405	0.01650948303	-136.6904669	
"Voltajes en voltios, corrientes en amperios y frecuencia en Hertz							*Compo	nentes simétricas referenciadas a fase A		

Fig. 4.34 Calculo de voltajes y corrientes de secuencia del PDC UD-UNAM.

# 4.6. Sistema de almacenamiento

Con la llegada de los sistemas de medición fasorial se debe hacer frente a uno de los aspectos más relevantes, el manejo de la enorme cantidad de datos del SEP almacenados en los PDCs los cuales se proporciona a tasas del orden de las 120 a 10 datos por segundo. El almacenamiento adecuado de esta información permitirá tener acceso a un conocimiento detallado del SEP con el fin de aplicar nuevas técnicas que permitirán la implementación de evaluaciones periódicas de seguridad, estudio de post-falla, controles adaptativos, optimización de despachos económicos, entre otros. [40]

Para el presente proyecto se implementó una función del software PDC UD-UNAM para realizar almacenamiento de los datos de forma automática en el gestor de bases de datos *Access*, en el cual es posible realizar consultas sencillas en lapsos de tiempo específicos previamente definidos. Por tanto, a continuación se desarrolla el proceso de instalación del hardware en el ordenador que cumple la función de PDC y el posterior desarrollo del sistema de almacenamiento a través de *LabVIEW* y *Access*.

#### 4.6.1. Instalación de unidad de almacenamiento

Para la instalación de un sistema de almacenamiento adecuado a las necesidades del sistema de medición sincrofasorial desarrollado se plantean los siguientes requerimientos:

- a. Suficiente capacidad de almacenamiento, acorde a la tasa de medidas entregadas por las PMUs.
- b. Velocidad de transferencia de datos.
- c. Rendimiento debido a la memoria de paginación de la unidad de almacenamiento.
- d. Confiabilidad de almacenamiento de la información en caso de que se afecte la unidad de almacenamiento local.

Debido a que el ordenador de escritorio solo contaba con un solo disco duro o unidad de almacenamiento, se decidió instalar una unidad adicional para su dedicación enfocada a los datos ingresados a la base de datos. Existen varias tecnologías a considerar a la hora de añadir almacenamiento extra, entre ellas está el almacenamiento interno mediante conexión IDE<sup>2</sup> o SATA<sup>3</sup> (discos duros internos), y almacenamiento externo mediante conexión USB (discos duros externos, memorias USB, memorias SD, entre otras).

Una breve descripción de las tecnologías de interfaces consideradas para el almacenamiento se desglosa en [41] y se resumen a continuación:

**Interfaz ATA/IDE**: La tecnología más utilizada en la historia para ordenadores de escritorios. Las siglas ATA/IDE hacen referencia a una de las características más relevantes de esta tecnología, gran parte de la circuitería lógica de control del disco en el propio disco, haciendo que la compatibilidad sea garantizada. Su interfaz de comunicación es de tipo paralelo y hasta el 2004, aproximadamente, fue el estándar principal por su versatilidad y asequibilidad. Cuenta con sistema de asignación de configuración (maestro/esclavo) el cual se designa manualmente a la hora de conexión física con la tarjeta madres del ordenador.

**Interfaz Serial ATA (SATA)**: Debido a la necesidad de codificar los datos para evitar pérdidas de información en la tecnología ATA/IDE, se sacó al mercado una interfaz más novedosa, la cual utiliza un bus serie para la transmisión de datos. Este sistema es notablemente más rápido y eficiente que IDE. Su conector a la placa madre es más pequeño y cómodo que los conectores para IDE, además de permitir conexión en caliente y torso los discos duros se comportan siempre como maestros. Existen tres versiones: SATA 1, SATA 2 y SATA 3.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> IDE: Integrated Drive Electronics.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> SATA: Serial Advanced Technology Attachment.

**Interfaces para la conexión externa de discos duros**: dada la capacidad, velocidad, el tamaño y el bajo coste de los discos duros en la actualidad resulta muy útil emplearlos de forma portátil, conectados al ordenador mediante un sistema rápido y sencillo:

- a. **USB 2.0**: aparece en cualquier ordenador de la actualidad que cuente con puertos USB y tiene un rendimiento más que razonable para la mayoría de los discos duros con una velocidad de transferencia de 60 MB/s.
- b. **USB 3.0**: en 2009 aparece este estándar aumenta la velocidad de transferencia a más de 6 veces de USB 2.0, pero su uso se ha extendido poco debido a la falta de ordenadores y otros equipos que cuenten con esta tecnología en su hardware.
- c. **Serial ATA externa (eSATA)**: evita las conversiones entre las interfaces que no son nativas (Ej: USB, FireWire, entre otras) y tiene una buena velocidad en comparación a las demás tecnologías, su inconveniencia es que está muy poco extendida.

Por lo cual, para su selección se tomó en cuenta la tabla 4.19 donde se muestra un parámetro de selección, la velocidad de transferencia de datos.

Tecnología de conexión de datos	Velocidad de transferencia de datos [MB/s]
USB 2.0	60
USB 3.0	400
ATA/IDE	133
SATA 1.0	150
SATA 2.0	300
SATA 3.0	600
eSATA	300
Fue	ente: [42].

# Tabla 4.19 Velocidades de transferencia de datos externa de interfaces de<br/>almacenamiento.

En este orden de ideas, se descarta el uso de un sistema de almacenamiento externo puesto que no es necesario un uso portátil de la información y debido a que el sistema se encuentra en permanente funcionamiento no se debe interrumpir la conexión del sistema de almacenamiento o de lo contrario la aplicación entraría en conflicto con el sistema deteniendo su funcionamiento. No obstante, este tipo de tecnología es útil para la extracción de información de la base de datos por tanto desempeña una función relevante para la consulta de información.

Teniendo como opciones las tecnologías de almacenamiento interno, se sabe que la interfaz SATA 2.0 proporciona compatibilidad para funcionar en los puertos SATA 1.0 y a su vez SATA 3.0 proporciona compatibilidad con versiones anteriores para

funcionar en los puertos SATA 2.0 y 1.0, sin embargo, la velocidad máxima de la unidad será más lenta debido a las limitaciones de velocidad del puerto. Por ejemplo cuando un disco duro con interfaz SATA 3.0 está conectado a un puerto SATA 3.0 - 6 [GB/s], puede alcanzar hasta 550/520 MB/s de lectura y escritura secuencial, respectivamente. Por otro lado, cuando la unidad está conectada a un puesto SATA 2.0 - 3 [GB/s], puede alcanzar hasta 285/275 [MB/s] de lectura y escritura secuencialmente, respectivamente.

El ordenador de escritorio con que se contó para el desarrollo del PDC UD-UNAM, contaba con una placa madre con periféricos ATA/IDE y SATA 2.0 - 3 [GB/s], por ende el invertir en tecnología SATA 3.0 no proporcionaba ninguna ventaja relevante y por el contrario si significa una mayor inversión sin obtener un ventaja tecnológica comparativa considerable. Por tanto se invirtió en un disco duro con interfaz SATA 2.0. Finalmente, para la selección del tamaño, previo a la unidad adicional de almacenamiento se decidió analizar el comportamiento del crecimiento de datos almacenados en el disco duro local, el cual se detalla en la figura 4.35, donde se empezó a hacer el registro de datos proporcionados por el sistema de monitoreo sincrofasorial hacia la base de datos, esto durante un periodo de 96 horas. Como se detalla a las 96 horas el tamaño de la base de datos es de 3,479 [GB]. Con el fin de no tener problemas de almacenamiento a futuro si se desea ampliar la cantidad de unidades sincrofasoriales o hacer un almacenamiento para periodos superiores a una semana, se decidió invertir en un disco con una capacidad de 1 TB (1000 [GB]).



Fig. 4.35 Crecimiento del tamaño de la base de datos.

Para el sistema de almacenamiento se instaló un disco duro del fabricante *Seagate Technology* con las siguientes características generales y técnicas.

#### Tabla 4.20 Características generales disco duro.

Características generales			
Tipo de Producto	Disco Duro		
Número de Pieza de Fabricante	ST31000340NS		
Fabricante	Seagate Technology		
Nombre de Producto	Disco duro Barracuda ES		
Línea de Producto	Barracuda		

Fuente: [43].

#### Tabla 4.21 Características técnicas disco duro

Características técnicas				
Capacidad de Almacenamiento	1 [TB]			
Búfer	32MB			
Ratio de Transferencia de Datos	300 [MBps] (Externa máxima)			
Velocidad de Rotación	7200 rpm			
Interfaces/Puertos	1 x 7 clavijas Serial ATA/300 Serial ATA			
Fuont	Eventer [42]			

Fuente: [43].

La conexión de este tipo de interfaz está conformado por el cable de datos y el cable de alimentación. Estos cables se conectan en los puertos del disco duro indicados en la figura 5.3 y en dé mismo modo en los puertos designados en la placa madres del ordenador.



Una vez instalado el disco duro en la placa madre, se procede a la configuración para su uso desde el sistema operativo. Para ello el primer paso es corroborar desde el SETUP del ordenador, verificar que se encuentre reconocida la unidad de almacenamiento correspondiente al disco duro. En opciones avanzadas se puede ver el estado del disco conectado, en caso de que no se haya reconocido es debido a una mala conexión o defecto de disco. Una vez reconocido el disco se procede al inicio del sistema operativo. El siguiente paso es configurar el disco para su uso y darle formato con el sistema de archivos NTFS, a través del complemento de *Windows* llamado administrador de discos. Al configurar el disco duro con el nombre de PDC como se observa en la figura 5.3, en el cual se aprecia información de su capacidad de almacenamiento, su sistema de archivo de datos (NTFS), el estado de la configuración (correcto) y el tipo de partición.



Fig. 4.37 Configuración del disco duro instalado.

### 4.6.2. Módulo de almacenamiento LabVIEW

Con la correcta instalación del disco duro en el ordenador, se procedió a diseñar la base de datos y el sistema de consulta de información. Por ende se anexo al software del PDC, un módulo de almacenamiento de la información obtenida y calculada a partir de las PMUs.

El establecimiento de la conexión entre LabVIEW y Access se realizó a través de la utilización del *toolkit Database Connectivity*, ya que posee las siguientes características:

- > Completa funcionalidad de SQL.
- > Directa interacción con bases de datos locales y remotas.
- Funciones de alto nivel, fáciles de usar para operaciones comunes de bases de datos.
- Conexión a las bases de datos más populares a través de la tecnología Microsoft ADO.
- Soporte para Windows 8/7/Vista/XP.
- Incluido con el Sistema de Desarrollo Profesional de LabVIEW.

La Fig. 4.38 representa la lógica con la cual fue establecida la comunicación con Access, en donde se relacionan los diferentes pasos del proceso de la creación y el almacenamiento de las variables eléctricas en la base de datos.



Fig. 4.38 Lógica de enlace de LabVIEW a Access.

#### 4.6.3. Base de datos y sistema de consulta

Una vez diseñado el sistema de comunicación entre *LabVIEW* y *Access*, se procede al diseño de la base de datos en la herramienta *Access*. Este sistema de gestión de base de datos incluidos en el paquete de Microsoft Office 2013 [44], facilita la creación de aplicaciones de bases de datos provenientes de aplicaciones de LabVIEW para su posterior manejo a través de consultas e informes.

A través del *toolkit Database Conectivity* de LabVIEW, se procede a la creación del sistema de almacenamiento y consulta en Access. Para ello se creó un archivo para base de datos en la unidad de almacenamiento añadida al ordenador de escritorio nombrada PDC. En este inicialmente se creó una tabla la cual lleva como función almacenar cada variable que envía las dos PMUs a la aplicación PDC UD-UNAM. Las variables registradas son: magnitudes y ángulos de los fasores corriente y tensión, estampa de tiempo de la medida, frecuencia y ROCOF.

PDC						
TIEMPO	D 👻	VA	• AV°	VB 🗸	°VB -	VC -
08:38:18.30 p.m.	20/08/2015	124,8450239296	71 117,558472585679	125,209084734296	-2,70084494710586	124,497886327439
08:38:18.35 p.m.	20/08/2015	124,8386943219	13 117,373772800027	125,199616612832	-2,89348561017582	124,490074303135
08:38:18.40 p.m.	20/08/2015	124,8334206052	21 117,178793754833	125,191564012916	-3,08615323365746	124,461407673222
08:38:18.45 p.m.	20/08/2015	124,8206813793	29 116,985883265326	125,21430669057	-3,27348999152067	124,461824669254
08:38:18.50 p.m.	20/08/2015	124,8318088469	44 116,803157871535	125,209046398413	-3,46615306409963	124,480298842829
08:38:18.55 p.m.	20/08/2015	124,8307850652	23 116,618420210736	125,213906975224	-3,64940512870114	124,477927762315
08:38:18.60 p.m.	20/08/2015	124,8444652357	48 116,435747982445	125,229357979669	-3,82777023604103	124,479602345123
08:38:18.65 p.m.	20/08/2015	124,84159963	73 116,24691560274	125,236046727769	-4,00640922977063	124,482540542841
08:38:18.70 p.m.	20/08/2015	124,8444832581	72 116,062199464217	125,235440670762	-4,19448697457455	124,494994678501
08:38:18.75 p.m.	20/08/2015	124,8486643901	33 115,877493778176	125,236184068343	-4,38256451312179	124,497881909694
08:38:18.80 p.m.	20/08/2015	124,8498077691	75 115,688666930985	125,238276896482	-4,5706377923301	124,504636459852
08:38:18.85 p.m.	20/08/2015	124,8570286367	57 115,493728138274	125,23258361944	-4,76364169072618	124,501987534336
08:38:18.90 p.m.	20/08/2015	124,8433394298	63 115,298587370915	125,229175913603	-4,96121911206647	124,498308823855
08:38:18.95 p.m.	20/08/2015	124,8443967505	15 115,105614890654	125,246277789003	-5,15342614493127	124,482174225871
08:38:19.00 p.m.	20/08/2015	124,8433065886	99 114,898227515185	125,237718359925	-5,3605223749489	124,493086153409
08:38:19.05 p.m.	20/08/2015	124,8389442441	74 114,696926374534	125,22982552092	-5,56309054281681	124,493913505842

Fig. 4.39 Tabla de almacenamiento de software PDC UD-UNAM.

Posteriormente se crea un formulario en Access para poder ejecutar consultas predeterminadas y personalizadas, en la figura 4. 40. se puede apreciar el diseño. El formulario permite la consulta del registro de los datos almacenados en las últimas 24 horas, los últimos 7 días o de acuerdo a un intervalo de tiempo específico (el formato de este tiempo es detallado en la figura 4.40).



Fig. 4.40 Formulario de consulta de históricos del software PDC UD-UNAM.

Una vez ejecutadas las consultas en el formulario de la base datos, estas consultas pueden ser exportadas a otro tipo de herramientas que permiten un mejor manipulación de la información, como es el caso de Excel o Matlab, el cual nos ofrece diferentes herramientas para graficar los históricos consultados o para realizar un estudio estadístico. En el capítulo 5 se presentaran resultados de históricos reconstruidos a partir de la base de datos con Excel, al igual en los anexos B y C se utiliza el software de Matlab para la reconstrucción de los datos registrados en las pruebas.

# 4.7. Prototipo final

A continuación se presenta el esquema final que fue implementado, para el monitoreo en tiempo real de la red eléctrica de pruebas del laboratorio de electrónica de potencia del Instituto Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Fig. 4.41 Arquitectura sistema de monitoreo

- 1. Antena GPS.
- 2. Cable RG6.
- 3. Reloj de sincronización SEL 2410.
- 4. Sistema de protección SEL 351A.
- 5. Sistema de protección SEL 487E.
- 6. Switch STEREN 5 puertos.
- 7. Ordenador de escritorio.

# Capítulo 5 - Pruebas y Resultados

La siguiente sección describe las pruebas realizadas a la red de laboratorio a través del sistema de monitoreo sincrofasorial, para esto fueron llevados a cabo varios estudios de eventos registrados producidos por fenómenos eléctricos externos al laboratorio, y otros en los cuales se modificó la topología de red y los tipos de carga del sistema. No obstante, en el presente capítulo se presentan seis de los resultados obtenidos donde se utilizaran principalmente las herramientas proporcionadas por la aplicación PDC UD-UNAM, las cuales son descritas en el capítulo 4. En el experimento 6, se contó con una cooperación investigativa entre el presente proyecto y una investigación doctoral, utilizando la información del sistema de almacenamiento del PDC UD-UNAM para aplicar un algoritmo de estimación de estado.

La Fig. 5.1 describe la topología de red usada para la realización de los experimentos 1, 2, 3, 4 y 5. Para el experimento 6 se describirá la topología de la red utilizada en el correspondiente subíndice.



Fig. 5.1 Topología de pruebas inicial.

# 5.1. Experimento 1 – Carga trifásica desbalanceada

Para el primer experimento se establece en el nodo de carga, una serie de bombillas incandescentes equivalentes a un sistema desbalanceado de cargas como se aprecia en la Fig. 5.2, las bombillas utilizadas son de una potencia de 70 [W] a 120 [V].



Fig. 5.2 Diagrama de conexiones de experimento 1.

En la Fig. 5.3 se puede observar el comportamiento de las tensiones, corrientes y frecuencias monitoreadas por el sistema de monitoreo sincrofasorial, en la Fig. 5.3 (b) se puede evidenciar el desbalance de corriente en la fase C desde la gráfica de tiempo real tiene una diferencia máxima de 1.179 [A] con respecto a las corrientes de línea A y C. Similarmente, en la Fig. 5.4 en la representación fasorial, donde adicionalmente al presentarse el fasor de corriente de línea C de mayor magnitud también se puede apreciar que la diferencia angular entre fasor de tensión de fase y las corrientes de línea es de 0.059°, es decir aproximado a 0°, debido al comportamiento resistivo de las bombillas.







En Fig. 5.5 se presentan un resumen de las potencias instantáneas monitoreadas por los PMUs, donde se aprecia los consumos de potencia activa los cuales son de aproximadamente del triple en la fase C. Por otra parte, el leve comportamiento capacitivo de los bombillos a través de las medidas de la PMU 2.

	Potencia Activa P [W]	Potencia Reactiva Q [VAR]	Potencia Aparente S [VA]
Fase A	73.6885	-0.634921	73.6885
Fase B	74.5745	-0.741362	74.5745
Fase C	219.6	7.17796	219.6
Total	367.863	5.80167	367.863

#### PMU 1

### PMU 2

Potencia Activa P [W]	Potencia Reactiva Q [VAR]	Potencia Aparente S [VA]
74.9365	-0.6828	74.9365
73.9484	-0.641479	73.9484
218.37	-1.4389	218.37
367.255	-2.76318	367.255
	Potencia Activa P [W] 74.9365 73.9484 218.37 367.255	Potencia Activa P [W] Potencia Reactiva Q [VAR]   74.9365 -0.6828   73.9484 -0.641479   218.37 -1.4389   367.255 -2.76318

#### Fig. 5.5 Resumen de las potencias instantáneas del experimento 1

En las Fig. 5.6 (a) y (b) se aprecia la reconstrucción del evento a través del sistema de almacenamiento, el cual ocurrió entre las 04:50:32.00 pm y las 04:50:35.00 pm del 21 agosto de 2015. Al igual que en la Fig. 5.3 (b), se detalla el mismo desbalance de la corriente de la fase C por tres veces el valor de las demás fases aproximadamente como se mostró en la ventana de tiempo real.





En (a) el nodo 1 y (b) el nodos 2.

# 5.2. Experimento 2 – Conexión secuencial de cargas

En el siguiente experimento se parte de las condiciones de carga del experimento 1 donde se tienen una bombilla incandescente en las fases A y B, y tres bombillas en la fase C. Adicionalmente se agregan un motor monofásico a la fase C y tres interruptores para poder conectar tres de las cargas conectadas en la fase C de forma secuencial, como se aprecia en el diagrama de conexiones de la Fig. 5.7. En este experimento se pudo visualizar en tiempo real las variaciones de corrientes y tensiones que implica la conexión de bombillas y el arranque de un motor monofásico.

Tabla 5.1	l Descripció	n de carg	as del exr	perimento 2
	•••• p •••			

Elemento	Descripción
<i>B0, B1, B2, B3, B4</i>	Bombilla incandescente de 70 [W]
МО	Motor monofásico de 110 [W]
S0, S1 y S2	Interruptores monofásicos 10 [A]



Fig. 5.7 Diagrama de conexiones para el experimento 2.

La red parte de un sistema balanceado con una carga trifásica compuesta de tres bombillas, posteriormente los interruptores son accionados secuencialmente en el siguiente orden S0, S1 y S2, los cuales permitieron la adición de dos bombillas y el motor monofásico a la fase C. En la Fig. 5.8 (a) se puede observar como las variaciones de carga en la fase C no solo afecta con caídas tensión de la fase C del nodo 2 sino también genera un aumento de la tensión de la fase A en el nodo 2 proporcional a las caídas de tensión de la fase C. Por otra parte en la Fig. 5.8 (b) se puede visualizar cómo se comporta la corriente de línea de la fase C, presenta pequeños picos de corrientes cuando se adiciona bombillas en valores que oscilan en los 0.57 [A] a 0.60 [A] y un pico de 5.14 [A] aproximadamente debido al encendido del motor monofásico. En la Fig. 5.8 (c) se observa el comportamiento de la frecuencia durante el experimento.





(a) Tensión, (b) Corrientes y (c) Frecuencia.

Los diagramas fasoriales mostrados en la Fig. 5.9 fueron capturados después de que el último interruptor fue accionado, por la naturaleza y el valor de la carga, la cual es inductiva, se puede notar un pequeño desfase angular entre los voltajes en la fase C de cada nodo, donde el fasor de tensión del nodo 1 adelanta al fasor de tensión del nodo 2 por un valor máximo de 9.405°, el cual se alcanza justo cuando el motor está en su valor máximo de corriente de arranque. Por otro lado, se observa en la Fig. 5.10 en el resumen de las mediadas de potencia instantánea ratifica la naturaleza inductiva presentada en la fase C, tanto en el nodo 1 como en el nodo 2, debido a la conexión del motor monofásico.



	Potencia Activa P [W]	Potencia Reactiva Q [VAR]	Potencia Aparente S [VA]
Fase A	74.046	-0.422022	74.046
Fase B	74.0257	-1.43867	74.0257
Fase C	327.555	42.2876	327.555
Total	475.626	40.4269	475.626
		PMU 2	
	Potencia Activa P [W]	Potencia Reactiva Q [VAR]	Potencia Aparente S [VA]
Fase A	76.1425	-0.482279	76.1425
Fase B	73.0035	-0.391886	73.0035
Fase C	323.693	22.9693	323.693
Total	472.839	22.0951	472.839

# **PMU 1**

Fig. 5.10 Resumen de las potencias instantáneas del experimento 2.

Aplicando la reconstrucción del evento referente a la conexión secuencial de las cargas que se observa en la Fig. 5.11 (a) y (b), donde se reconstruye la corriente de fase C y neutro, en los dos nodos de la red. El evento fue registrado entre las 05:00:58.00 p.m. y 05:01:05.00 p.m. del 21de agosto de 2015.





**Fig. 5.11 Reconstrucción corriente de línea fase C y neutro experimento 2.** En (a) el nodo 1 y (b) el nodo 2.

# 5.3. Experimento 3 – Desconexión secuencial de cargas

En el siguiente experimento se realizó una desconexión secuencial de cargas, en la cual se partió de un sistema desbalanceado con cargas compuesta por bombillas incandescentes y lámparas compactas, las cuales se describen en la tabla 5.2. Inicialmente se estableció en las fases A y B una bombilla incandescente, y en la fase C se conectaron tres bombillas incandescentes y tres lámparas compactas fluorescentes. A través de los cuatros interruptores se desconectó secuencialmente cargas de la fase C, como se aprecia en el diagrama de conexiones de la Fig. 5.12. En este experimento se pudo apreciar en tiempo real, las variaciones de corrientes y tensiones que implica la desconexión de bombillas y lámparas compactas.

Elemento	Descripción
<i>B0, B1, B2, B4, B5</i>	Bombilla incandescente de 70 [W]
<i>B3, B6, B7</i>	Lámpara compacta de 54 [W]
S0, S1 S2 Y S3	Interruptores monofásicos

Tabla 5.2 Descripción de cargas del experimento 3.



Fig. 5.12 Diagrama de conexión experimento 3.

La red parte de un sistema desbalanceado como se describió anteriormente, posteriormente los interruptores son accionados secuencialmente en el siguiente orden S0, S1, S2 y S3, los cuales permitieron la adición de: una lámpara compacta, una bombilla incandescente, una bombilla incandescente y dos lámparas compactas. En la Fig. 5.13 (a) se puede observar como las variaciones de carga en la fase C afectan con caídas tensión de la fase C y B, y un aumento de la tensión de la fase A en el nodo 2. Por otra parte en la Fig. 5.13 (b) se puede observar cómo se comporta la corriente de línea de la fase C, presenta caídas de corriente proporcionalmente a la cantidad de luminarias desconectadas de los siguientes valores 0.724 [A], 0.669 [A] y 0.331 [A]. En la Fig. 5.8 (c) se observa el comportamiento de la frecuencia, la cual no presenta cambios relevantes relacionados al experimento.





(a) Tensión, (b) Corrientes y (c) Frecuencia.

Los diagramas fasoriales mostrados en la Fig. 5.14 fueren tomadas después de que el último interruptor fue desconectado, por la naturaleza y el valor de la carga, la cual es resistiva, se puede notar que la diferencia angular entre tensiones es prácticamente cero. Por otro lado, se observa en la Fig. 5.15 en el resumen de las mediadas de potencia instantánea ratifica la naturaleza resistiva, tanto en el nodo 1 como en el nodo 2, la potencia reactiva no es significativa pero debido a las disposiciones de los elementos del experimento se presentan efectos capacitivos en el nodo 2, el cual no es significativo en comparación con respecto a la potencia activa.





#### PMU 1

Fig. 5.15 Resumen de las potencias instantáneas del experimento 3.

Aplicando la reconstrucción del evento referente a la conexión secuencial de las cargas que se observa en la Fig. 5.16 (a), (b) y (c), donde se reconstruye: las variaciones en tensiones del nodo 2, la cual presenta una reacción más significativamente que en el nodo 1, la corriente de la fase C y neutro, en los dos nodos de la red. El evento fue registrado entre las 04:57:01.00 p.m. y 04:57:08.00 p.m. del 21de agosto de 2015.





**Fig. 5.16 Reconstrucción corriente de línea fase C y neutro experimento 3.** En (a) el nodo 1 y (b) el nodo 2.



### 5.4. Experimento 4 – Conexión de ordenador de escritorio



Este experimento se realizó con el objeto de ver de forma detallada el comportamiento del perfil de tensión y corriente debido a la inyección de distorsión armónica que trae como consecuencia la conexión de este equipo. En este experimento se plantea el esquema de la Fig. 5.17, donde inicialmente el interruptor S0 se encuentra abierto mantenido aislado la entrada de un ordenador de escritorio en la fase C y en cada una de las fases se tienen una bombilla incandescente como cargas. En la Fig. 5.18 se puede detallar como es el perfil de tensión, corriente y frecuencia con tan solo un sistema de cargas de tres bombillas conectadas en estrella.





**Fig. 5.18 Estado inicial de los perfiles experimento 4.** *(a) Tensión, (b) Corrientes y (c) Frecuencia.* 

Posteriormente, se procedió a la conexión del ordenador de escritorio cerrando el interruptor S. Con lo cual se pudo observar en la Fig. 5.19 un pico de corriente en la fase C de 3.306 [A] para el nodo 1 y de 3.912 [A] para el nodo 2, generando así un desbalance en las tensiones de los nodos de carga y generación. Mientras la frecuencia del sistema medida en el nodo de carga sufre una fluctuación máxima de 0.055 Hz respecto a la fundamental.





**Fig. 5.19 Comportamiento perfiles al cerrar el interruptor S experimento 4.** (a) Tensión, (b) Corrientes y (c) Frecuencia.

Después de la conexión del ordenador de escritorio se procede a dar el encendido del equipo como se aprecia en la Fig. 5.20, donde se genera un aumento controlado de corriente debido a la fuente de poder del ordenador, en cuanto a las tensiones se puede observar como la tensión VC2, correspondiente a la tensión de la fase del ordenador, sufre la caída de tensión más baja respecto a las demás tensiones de carga con un valor máximo de 122.523 [V]. Y la tensión VA2 por efecto del desbalance sufre un aumento de tensión hasta un valor de 125.567[V]. En cuanto a la corriente IC2 se incrementa hasta un valor de 1.486 [A]. Por otra parte la frecuencia no sufre cambios drásticos, es decir es inherente al encendido del ordenador.





**Fig. 5.20 Comportamiento de los perfiles al encender el PC experimento 4.** (a) Tensión, (b) Corrientes y (c) Frecuencia.

En las siguientes figuras podemos apreciar el comportamiento de los perfiles de tensión y corriente para los instantes de tiempo posteriores al encendido del equipo. En la Fig. 5.21 se aprecia el comportamiento para los primeros segundos posteriores al encendido, el cual se caracteriza por cambios abruptos del nivel de corriente, donde se aprecia un incremento en la corriente IC2 de 1.409 [A], generando pequeñas caídas de tensión con una diferencia máxima de 1.301 [V].







**Fig. 5.21 Comportamiento de los perfiles experimento 4.** (a) Tensión y (b) Corrientes, después de los primeros 10 segundos posteriores al encendido del equipo.

Para un tiempo más prolongado posterior al encendido, después de dos minutos del encendido se puede apreciar en la Fig. 5.22, la estabilización del perfil de tensión y corriente, no obstante siguen presentándose unos pequeños picos del orden de los 100 [mA] a los 200 [mA] y a su vez se genera fluctuaciones en el perfil de tensión de valores cercanos a los 200 [mV].



(a)



**Fig. 5.22 Comportamiento de los perfiles experimento 4.** De: (a) Tensión y (b) Corrientes, después del primer minuto posteriores al encendido del equipo.

Finalmente, hacemos uso del sistema de almacenamiento para reconstruir el evento descrito anteriormente con el ordenador de escritorio. El evento se desglosa en cuatro etapas:

- 1. Estado inicial de la red con el ordenador de escritorio aislado por un interruptor y conexión del equipo a la red.
- 2. Encendido del ordenador del escritorio.
- 3. Puesta en marcha del ordenador de escritorio durante el intervalo de unos minutos.
- 4. Apagado del ordenador de escritorio.

Para la reconstrucción del evento se utilizó un intervalo de tiempo comprendido entre las 05:11:04.20 pm y las 05:18:30.40 pm del día 21 de Agosto de 2015. En la Fig. 5.23 se puede observar como las tensiones del nodo de generación no son afectadas por las fluctuaciones en corriente producidas. Mientras tanto, en la Fig. 5.24 donde se detalla el perfil de tensiones del nodo de carga se aprecia las fluctuaciones correspondientes a las cuatro etapas mencionadas anteriormente y detalladas en las figuras Fig. 5.19 (a), Fig. 5.20 (a) y Fig. 5.21 (a).

Por otra parte, en la Fig. 5.25 se aprecia las fluctuaciones en el perfil de corriente correspondientes a la los cuatro eventos mencionados y detallados en las figuras Fig. 5.19 (b), 5.20 (b) y 5.21 (b). Y en la 5.26 se observa el comportamiento de la frecuencia durante todo el evento.





Fig. 5.25 Histórico de corrientes fase C en los nodos de generación y carga experimento 4.



Fig. 5.26 Histórico de frecuencias en los nodos de generación y carga experimento 4.

# 5.5. Experimento 5 - Fenómenos externos a la red de pruebas

En el siguiente evento se registraron fluctuaciones en la tensión y frecuencias, independientes al comportamiento de la carga. En las cercanías al laboratorio del II-UNAM se encontraban en trabajos de remodelación y construcción, donde se utilizaron equipos de soldadura eléctrica. Los cuales generaron las fluctuaciones en tensión en las instalaciones observadas en la Fig. 5.27 (a) y de frecuencia en la Fig. 5.27 (c), en consecuencia se comprobó que estas fluctuaciones son debidas a netamente fenómenos externos a la red de pruebas, debido a que en la Fig. 5.27 (b) se puede observar un perfil de corriente independiente al comportamiento presentado en las tensiones de fase para cada una de las fases.



(a) Tensión, (b) Corrientes y (c) Frecuencia.

Por otro lado, en las Fig. 5.28 (a) y 5.28 (b) se observa claramente que las fluctuaciones en tensión debidas a fenómenos externos como el de la soldadura, se generan picos de

variación de la frecuencia correspondientes a los pequeños cambios de tensión que oscilan entre 1 [V] a 2 [V], permitiendo comprobar la calidad del monitoreo sincrofasorial en frecuencia.



(a) Tensión, (b) Corrientes y (c) Frecuencia.

# 5.6. Experimento 6 – Estimación de estado

El siguiente experimento fue resultado de una variación de la configuración de la red, obteniendo una topología de anillo de tres nodos monofásica como se observa en la Fig. 5.29. En primera instancia se registraron los fasores de tensión, las entradas y salidas de corriente en cada uno de los tres nodos. Con el objetivo de aplicar un algoritmo de estimación de estado utilizando Mínimos Cuadrados Ponderados (WLS) [45],

implementado en la investigación doctoral del Instituto de Ingeniería UNAM a cargo del ingeniero Isaac Levi Ortega Rivera, se tomaron los fasores de tensión y corriente de los nodos 1 y 2, para la posterior estimación de la magnitud de tensión del nodo 3, y a su vez validar la exactitud del algoritmo a través del cálculo del error porcentual entre los valores estimados y los reales (el cual fue tomado en el experimento en uno de los puertos de medición de la unidad SEL 487).

Para el experimento se utilizaron 3 entradas de tensión y 6 de corriente de la PMUs SEL 487E. La red contaba con una bombilla incandescente como carga en el nodo 2 y una carga variable en el nodo 3 compuesta de bombillas incandescentes y fluorescentes. Después de un periodo aproximado de 8 minutos y 19 segundos, se realizó una consulta específica de las variables eléctricas al sistema de almacenamiento en el día 02 de agosto de 2015 desde las 12:30:05 PM hasta las 12:38:24 PM.



Fig. 5.29 Red de pruebas en topología de anillo monofásica experimento 6.

Los resultados de la Estimación de Estado en el nodo 3 utilizando el algoritmo de Mínimos Cuadrados Ponderados (WLS) para cada instante de tiempo se pueden observar en la Fig. 5.30, y en la tabla 5.3 se puede observar los valores maximos y minimos que se presentan en cada una de las curvas presentadas en la Fig. 5.30. Indicando un comportamiento acorde al margen de tensión quedebe garantizarse en redes residenciales, 120 [V]  $\pm 10\%$ .

Magnitud de tensión	Valor Máximo	Valor Mínimo
Medido	124.06777	123.23134
Estimado	124.12608	123.28915

<b>Tabla 5.3 Valores</b>	; máximos y	v mínimos de	tensión en	nodo 3.

El valor estimado corresponde a la etiquta WLS y el valor medido en el nodo corresponde a la etiqueta V3. Para ver la exactitud de la estimación, se puede detallar el error porcentual en magnitud en la Fig. 5.31 entre los valores medidos y estimados de la Fig. 5.32 en cada instante de tiempo. El error porcentual máximo registrado fue de 0.08938% con una desviación estandar de 0.00491%, el cual se comparó en los resultados obtenidos en el artículo [42] donde se presentas resultados de error porcentual para la estimación de estado en un sistema sin disturbuios, a través de una simulación en un sistema de potencia con 32 nodos de transmisión, 20 nodos de generación y 80 ramas linea/transformador. En un la tabla 5.4 se puede observar que los valores los obtenidos en el presente experimento respecto a de la simulación no exceden los margenes de error promedio y dispersión de los datos, validando la presción para la estimación de estado de este algoritmo con medidas reales.

# Tabla 5.4 Comparación de valores de dispersión y promedio del errorporcentual.

Caso	Error porcentual promedio (%)	Desviación estándar (%)	
Simulación	0.057854	0.0077606	
Experimental	0.049340	0.0049166	






Fig. 5.31 Error porcentual entre estimación y medición de tensión del nodo 3 Fuente: Instituto de Ingeniería UNAM.

# **Capítulo 6 – Conclusiones**

Los sistemas de medición sincrofasorial, permiten un minucioso análisis de las variables eléctricas de una red en tiempo real, la ejecución de aplicaciones en línea de control y post-morten de protección. Sin embargo, la implementación de un sistema de almacenamiento para el uso de mediciones sincrofasoriales es uno de los aspectos más limitantes, debido a la carga que representan las altas tasas de reporte de los equipos PMUs.

Las interfaces desarrolladas proporcionan una herramienta de utilidad para el estudio referente a fenómenos transitorios, caracterización de cargas o líneas eléctricas, fallas debido a deslastres de carga, entre otros, por parte de las universidades vinculadas en el proyecto de investigación. Con el fin de promover el uso de las medidas sincrofasoriales, siguiendo con el proceso de ampliación y mejoras de las funcionalidades del sistema de monitoreo sincrofasorial presentado.

Las medidas sincrofasoriales permiten el monitoreo rápido y preciso de los parámetros eléctricos de un SEP. Por tanto es posible generar reportes que indiquen el estado y desempeño de los elementos de un SEP en tiempo real, de esta forma contribuir con la prevención de fallas y accidentes a través de mantenimientos preventivos, maniobras de despeje u otras acciones.

En el presente proyecto se plasmaron las bases para el diseño e implementación de sistemas de medición sincrofasorial personalizados, los cuales permiten visualización en tiempo real de los eventos transitorios de un SEP (conexión de cargas, deslastres de carga, maniobras, descargas eléctricas atmosféricas, entre otros) . Sin embargo, se deben desarrollar aplicaciones online paralelas enfocadas al control a través de actuadores sobre los elementos del SEP, con el fin de minimizar los efectos de estos eventos en la red.

A través de una cooperación investigativa se logró validar la precisión de un algoritmo de estimación de estado usando el algoritmo de mínimos cuadrados, para esto fue implementada una configuración monofásica de 3 nodos, la cual fue monitoreada por el sistema de medición sincrofasorial desarrollado, dicho algoritmo proporcionado por una investigación doctoral de la Universidad Autónoma de México. En el proceso de validación del estimador de estado se encontraron errores máximos acordes a los obtenidos en simulaciones, lo cual garantiza la precisión del método y su potencial aplicación en sistemas más complejos.

Se debe verificar la configuración del formato del tiempo al momento del ajuste de los equipos PMU, debido a que estos deben estar referenciados al horario local del lugar

donde se encuentren instalados los equipos y una configuración errónea afectaría la referencia común de todas las medidas fasoriales y por ende el análisis histórico.

Los estándares IEEE C37.118.1 y IEEE C37.118.2, permiten el enlace de comunicación universal entre equipos comerciales PMU de diferentes fabricantes con equipos PDC personalizados para cumplir con las necesidades de una red de monitoreo en tiempo real.

El entorno de programación LabVIEW representa una herramienta muy amigable para la creación de enlaces de comunicación bajo el protocolo TCP/IP, debido a que través de los módulos NI-VISA se puede establecer enlace TCP/IP contando solo con la información de dirección IP y puerto de entrada. Adicionalmente, A través de NI-MAX es posible realizar pruebas rápidas de funcionamiento del canal de comunicaciones.

La metodología de desarrollo del presente proyecto permite replicar la implementación de aplicativos PDC personalizados para la integración de PMUs de diferentes modelos y fabricantes, lo cual se ratificó con el trabajo realizado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en el cual a través la realización de dos guías de laboratorio se promueve el uso de la tecnología sincrofasorial en las futuras investigaciones de la misma universidad.

# **6.1 Recomendaciones**

- Configurar previamente a 60 muestras por segundo la tasa de reporte de las PMUs.
- Verificar la relación de transformación de los equipos PMU, con el fin de evitar el reporte de medidas erróneas.
- Implementar la base de datos en una plataforma más adecuada, ya que Access no es recomendable para almacenamiento de una gran cantidad de datos, sin embargo presenta una gran facilidad en el enlace con LabVIEW.
- Verificar la conexión de la señal GPS, ya que en algunos equipos PMU el mensaje de datos no es enviado cuando no se cuenta con sincronización.
- Utilizar protecciones eléctricas en cada uno de los esquemas conexión, con el fin de evitar el daño de equipos y afectaciones sobre el personal operativo.

# 6.2 Propuestas de trabajos futuros

 Construir una red de comunicaciones sincrofasorial con mayor número de unidades terminales (PMUs) y PDC de mayor jerarquía en una microrred de energía. Adicionando el uso de fibra óptica para la comunicación y la implementación del protocolo IEC 61850.

- Incorporar al software PDC UD-UNAM una plataforma de base de datos con mayor robustez como SQL y hacer uso de servidores dedicados a la aplicación.
- Investigar sobre el uso de técnicas de minería de datos para proponer aplicaciones post-mortem.
- Analizar el fenómeno de perdida de datos entre PMUs y PDC para proponer alternativas de recuperación de la información y evitar acciones incorrectas de protección.
- Desarrollar aplicaciones de control y protección de área amplia, generación de modelos dinámicos para localización de fallas y monitoreo de sobrecargas a nivel de distribución y transmisión.

# Bibliografía

- [1] E. Litvinov, X. Luo, M. Lelic, Y. Hu, B. Avramovic y D. Novosel, «Developing Technology Road Maps: A Case Study for Synchophasor Deployment,» *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 12, nº 2, pp. 97-106, 2014.
- [2] A. Phadke y J. Thorp, Synchronized Phasor Measurement and their aplications, New York: Springer, 2008.
- [3] D. Novosel, V. Madani, B. Bhargava, K. Vu y J. Cole, «Dawn of the Grid Synchronization,» *Power and Energy Magazine*, pp. 49-60, 2008.
- [4] D. Elizondo, M. R. Gardner y R. León, «Synchrophasor Technology : The Boom of Investments and Information Flow from North America to Latin America,» de *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, 2012.
- [5] S. A. Nexans y E. A. Nerc, «Real-Time Application of Synchrophasors for Improving Reliability,» NERC, 2010.
- [6] SEL Inc, «SEL-487E Relay Current Differential and Voltage Protection,» SEL Inc, 2008.
- [7] P. M. Ashton y P. Gareth, Exploiting Phasor Measurement Units For Enhanced Transmission Network Operation And Control, Brunel: Brunel University, UK, 2013.
- [8] O. A. Camacho Morales y J. C. Cubides Dominguez, Evaluación del uso de sincrofasores para el calculo de distancia a fallas en lineas radiales de transmisión de energía eléctrica, Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2013.
- [9] A. A. Zambrano y M. A. León, Implementación de un sistema de medición fasorial (PMU) para una maquina sincrona, Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2013.
- [10] T. E. Velasco, Análisis de oscilaciones en el sistema interconectado México-Centroamérica fuera de linea, Ciudad de México: UNAM, 2014.
- [11] Xm, filial de ISA, «Proyecto SIRENA/iSAAC,» ISA, 2007.
- [12] Macrodyne Inc., «MacrodyneUSA.com,» [En línea]. Available: http://www.macrodyneusa.com/. [Último acceso: 21 09 2015].
- [13] The Power Information Technology Laboratory at the University of Tennessee, «FNET/GridEye Web Display,» [En línea]. Available: http://fnetpublic.utk.edu/. [Último acceso: 21 11 2015].
- [14] Illinois Institute of Technology, «Local area monitoring system for microgrid,» [En línea]. Available: http://www.iitmicrogrid.net/microgrid/pdf/PMU/IIT\_presentation120306.pdf ?iframe=true&width=980&height=780. [Último acceso: 21 11 2015].

- [15] Studio Elektronike Rijeka, «WAMSTER AD HOC PHASOR MEASUREMENT NETWORK,» 2010. [En línea]. Available: http://www.wamster.net/.
- [16] P. S. R. Committee, *IEEE Std C37.118.1™*, New York: IEEE, 2011.
- [17] P. S. R. Committee, *IEEE Std. C37.118.2™*, New York: IEEE, 2011.
- [18] D. S. Baltazar, «Algoritmos no recursivos, algoritmos trigonométricos».
- [19] C. Castillo, Implementación de un medidor fasorial, México D.F.: Instituto Politecnico Nacional, 2006.
- [20] W. S. Steven, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California Technical Publishing, 1997.
- [21] A. R. San Vicente Cisneros, Desarrollo de un sincrofasor en tiempo real para líneas de transmisión eléctrica (Doctoral dissertation), México D.F.: Universidad Politecnico Nacional, 2011.
- [22] K. E. Martin, «Synchrophasor standards development IEEE C37.118 & IEC 61850,» de Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2011.
- [23] V. Ceteno, Evaluation and Standardizing of Phasor Data Concentrator, Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institut and State University, 2013.
- [24] IEEE Power System Engineering Society, «IEEE 1344 Standard for Synchrophasors,» USA, 1995.
- [25] Committee, Power System Relaying, «IEEE Std C37.118™,» New York, 2005.
- [26] S. E. Laboratories, «SEL-351A, -1 Protection System,» SEL Inc., 2009.
- [27] Laboratories, Schweitzer Engineering, «Laboratories, Schweitzer Engineering,» [En línea]. Available: https://www.selinc.com/. [Último acceso: 21 11 2015].
- [28] S. E. Laboratories, «SEL-9321 Low-Voltage DC Power Supply,» SEL Inc., 2004.
- [29] The U.S. government, «GPS.gov,» 29 05 2015. [En línea]. Available: http://www.gps.gov/systems/gps/spanish.php. [Último acceso: 21 10 2015].
- [30] Laboratories, Schweitzer Engineering, «SEL-2401 Satellite-Synchronized Clock Instruction Manua,» SEL Inc., 2006.
- [31] Steren , «Steren Soluciones en Electrónica,» [En línea]. Available: http://www.steren.com.mx/. [Último acceso: 15 09 2015].
- [32] Hilgrave, «HYPERTERMINAL PRIVATE EDITION,» [En línea]. Available: https://www.hilgraeve.com/hyperterminal/. [Último acceso: 21 11 2015].
- [33] The Grid Protection Alliance, «PMU Connection Tester,» 16 07 2013. [En línea]. Available: https://pmuconnectiontester.codeplex.com/. [Último acceso: 21 11 2015].
- [34] R. Best, P. Brogan, I. Al Khatib, L. Vanfretti y D. Morrow, «The OpenPMU Platform for Open-Source Phasor Measurements,» *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 62, nº 4, pp. 701 - 709, 2013.
- [35] D. Shi, D. J. Tylavsky y N. Logic, «An Adaptive Method for Detection and Correction of Errors in PMU Measurements,» *Smart Grid, IEEE Transactions*, vol. 3, nº 4, pp. 1575 - 1583, 2012.

- [36] G. López, C. Arbelaéz y A. F. Eusse, «Desarrollo de una Aplicación en Silverlight para Visualización de Sincrofasores Entregados por un PMU,» Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2011.
- [37] M. Golshani, G. Taylor, I. Pisica y P. Ashton, « Laboratory-based deployment and investigation of PMU and openPDC capabilities,» de *AC and DC Power Transmission (ACDC 2012), 10th IET International Conference on*, 2012.
- [38] M. Kanabar, J. Rodriquez y M. Zadeh, «Design and implementation of a synchrophasor data concentrator,» *Innovative Smart Grid Technologies Middle East (ISGT Middle East), 2011 IEEE PES Conference on*, pp. 1 5, 2011.
- [39] National Instruments, «Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW,» [En línea]. Available: http://www.ni.com/labview/esa/. [Último acceso: 21 11 2015].
- [40] S. Solanki, J. Solanki y T. Menzies, «Power System State Recognition Using Data Mining Algorithms,» North American Power Symposium (NAPS), 2013, pp. 1-6, 2013.
- [41] J. E. Herrerias Rey, Hardware y componentes, Anaya Multimedia, 2006.
- [42] NorfiPC, «Como conectar y agregar otro disco duro interno a la PC, tutorial,» [En línea]. Available: https://norfipc.com/articulos/como-conectar-instalar-otrodisco-duro-interno-pc.html. [Último acceso: 21 11 2015].
- [43] Seagate, «Seagate Storing the world's digital content,» 2015. [En línea]. Available: http://www.seagate.com/la/es/. [Último acceso: 21 11 2015].
- [44] Microsoft Office, «ACCESS,» [En línea]. Available: https://products.office.com/es/access. [Último acceso: 21 11 2015].
- [45] D. Belega y D. Petri, «Performance of synchrophasor measurements provided by the Weighted Least Squares approach,» *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International,* pp. 946-951, 2013.
- [46] N. Abbasy y H. Mahmound, «A Unified Approach for the Optimal PMU Location for Power System State Estimation,» *IEEE Transactions on Power Systems*, p. 8, 2009.
- [47] M. A. Riffo, Vulnerabilidades de las Redes TCP/IP y Principales Mecanismos de Seguridad, Santiago de Chile: Universidad Austral de Chile, 2008.
- [48] A. S. Deese, T. Nugent y S. Coppi, «A Comparative Study of Optimal PMU Placement,» *PES General Meeting*, pp. 1 5, 2014.
- [49] M. Li, P. Ashton, G. Taylor y J. Liu, «Big Data Analytics on PMU Measurements,» Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2014 11th International Conference on, pp. 715 - 719, 2014.
- [50] H. Rey y J. Enrique, «Hardware y Componentes,» 2006. [En línea]. Available: http://www.infor.uva.es/~cevp/FI\_II/fichs\_pdf\_teo/Trabajos\_Ampliacion/Disc os\_Duros.pdf. [Último acceso: 25 10 2015].
- [51] C. F. Ramirez, Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión, Mejia y Villegas, 2003.

- [52] Working Group C-14 of the System Protection Subcommittee , Use of synchrophasor measurements in protective relaying applications, Power System Relaying Committee , 2013.
- [53] Cyber Sciences, Inc., «Overview of IRIG-B Time Code Standard,» 2014.
- [54] R. Vallakati, V. Lachenaud y P. Ranganathan, «Using phasor data for visualization and data mining in smart-grid applications,» *DC Microgrids (ICDCM), 2015 IEEE First International Conference on ,* pp. 13-18, 2015.
- [55] Arbiter Systems, Inc., «Model 1133A Power Sentinel,» 2006.
- [56] S. J. Chapman, Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, 2005.

# Anexo A: IRIG B

El código de tiempo IRIG fue originalmente desarrollado por el grupo de instrumentación de inter-rango (IRIG por sus siglas en inglés) el cual hace parte del ejército de los Estados Unidos. El estándar fue publicado en 1960 y ha sido revisado varias veces por el grupo de telecomunicaciones y coordinación de tiempo (TTG por sus siglas en inglés). Su última versión es el estándar IRIG 200-04, "Formato de código de tiempo serial IRIG", actualizada en 2004. [46]

# 4.8. Formatos disponibles

Aunque IRIG-B es el más conocido, actualmente el estándar define una familia de escalas de tasas de código de tiempo serial. Los seis formatos de código usan diferente tasas de pulsos, o tasas de bits, como se muestra en la siguiente tabla:

rubiu miti i ormatos de courgo de tiempo mud [10].								
Formato	Tasa de pulso (o Tasa de Bit)	Intervalo de cuenta de						
		índice						
IRIG-A	1000 PPS (Pulse per second)	1 [ms]						
IRIG-B	100 PPS	10 [ms]						
IRIG-D	1 PPM (pulse per minute)	1 minuto						
IRIG-E	10 PPS	100 [ms]						
IRIG-G	10000 PPS	0.1 [ms]						
IRIG-H	1PPS	1 [s]						

Tabla A.1. Formatos de código de tiempo IRIG [46].

# 4.9. Atributos de código de tiempo

Todo formato de código de tiempo usa un ancho de pulso codificada. Un pulso 1 binario tiene una duración del 50% del intervalo de índice de cuenta y un pulso 0 binario tiene una duración de 20% del intervalo de índice de cuenta. Adicionalmente los identificadores de posición tienen una duración de 80% y son usados como marcas de referencia.

La señal de código de tiempo IRIG puede ser:

- Demodulada (Cambio de nivel DC, sin señal portadora)
- Modulada (modulada en amplitud, onda portadora seno)
- Manchester modificada (modulada en amplitud, onda portadora cuadrada)

Tres tipos de expresiones codificadas son usadas en el estándar IRIG:

- Código binario decimal de tiempo de año (BCD<sub>TOY</sub>) y año (BCD<sub>YEAR</sub>).
- Funciones de control (CF), conjunto de bits reservados para usar aplicaciones.
- Segundos en binarios directos (SBS), tiempo de día (o a 86400 segundos).

# 4.10. Designación de código de tiempo IRIG

En adición a la letra usada para designar una de los seis formatos de IRIG, números de identificación señalan características específicas. Estas consisten de tres dígitos como se muestra en la siguiente figura:



Fig. A.1. Convención de caracteres en el código de tiempo IRIG [46].

# 4.11. Extensión IEEE-1344

La información del año no fue especificada en el estándar IRIG en antes de su revisión del 2004. Antes de 2004, el IEEE adaptó un estándar (1344) el cual incluida datos de año como parte de la señal del IRIG-B. Esta variación vino a ser conocida como la extensión IEEE1344. [46]

Esta extensión usa bits extra de las porciones de funciones de control del código de tiempo IRIG-B. Con esta porción de código de tiempo, unos bits están designados para características adicionales, incluidas:

- Año de calendario (denominado BCD<sub>YEAR</sub>).
- Segundo de salto y segundo de salto pendientes.
- Desfase local de tiempo.
- Calidad de tiempo.
- Paridad

• Identificador de posición.

Ser capaz de usar estos bits extras de información, dispositivos de sistemas de potencia y otro equipo recibiendo el código de tiempo debe ser capaz de decodificarlo. Desde la información de año está ahora considerada parte de BCD, que fue formalmente considerado B002 y B122 (con la extensión IEEE encendido), podría ser designado como B006 y B126.

# 4.12. Implementación IRIG-B

El estándar IRIG 200-04 no define una señal específica de nivel para IRIG-B.

- Técnicas típicas para transmisión de la no modulada IRIG-B incluido:
- Típicamente para señal lleva:
- Señal de nivel TTL sobre un cable coaxial o escudo para par trenzado.
- Múltiple punto de distribución usando 24 Vdc para señales y control de potencia.
- Señal RS-485 diferente sobre el blindaje de cable de par trenzado.
- Señal RS-232 sobre el escudo del cable.
- Fibra óptica.

Técnicas típicas para transmisión de IRIG-B modulada incluida:

- Cable coaxial, terminado en 50 [Ω] o más por el momento.
- Escudo par de enamorados.

# Anexo B: Equipos de sincronización

# 4.13. Reloj Sincronizado por Satélite SEL 2401

## **Especificaciones generales**

## Puerto de tiempo

Puerto serial EIA-232 Una salida IRIG-B demodulada Salida típica 120 mA, 3.5 Vcd, a 25 Ω

#### Ambiental

Temperatura de operación -40°C a +80°C Cumple con IEEE C37.90 Cumple con IEC 60255

#### Contacto de alarma

Tipo A, 0.1 A

# Fuente de poder

Voltaje	9-30 Vcd o regulado 5 Vcd
Burden	<2 W

#### Exactitud

IRIG-B demodulada ±

±100 ns promedio ±500 ns promedio

## Dimensiones

Altura (sin montaje DIN)	25.4 mm (1.0 pulgadas)
Ancho	93.35 mm (3.675 pulgadas)
Profundidad	121.9 mm (4.8 pulgadas)

## Requerimientos de antena

5 V, <80 mA 25 dB pre amplificación, min. Ganancia LNA

Tomado de el catalogo del SEL 2401. [30]

# 4.14. Fuente de poder para baja tensión SEL 9321

## **Especificaciones generales**

## Voltaje de entrada

16-36 Vdc
<13 W
<50%
36-200 Vdc, 85-140 Vac (47-63 Hz)
<11 W
85-350 Vdc, 85-264 Vac (47-63 Hz)
<11 W

## Voltaje de salida

±5 Vdc	4.75-5.25 Vdc, 100 mA a 1.0 A
±10 Vdc	8.75-11.5 Vdc, 10 mA a 100 mA
5 W total	

## Ambiente de operación

Grado de contaminación 2 Categoría de sobretensión II

#### Ensayos de tipo (por IEEE 1613-2003)

Ambiente	
Temperatura de operación	-40° a 85°C (-40 a 185°F)
Humedad	5 a 95% no condensada
Altitud máxima	2000 m (6562 ft)
Presión Atmosférica	80-110 kPa

Tomado de el catalogo del SEL 9321. [28]

# Anexo C: Guía de Laboratorio 1

# Análisis del comportamiento de un circuito RL usando medidas proporcionadas por una PMU

## 1. Introducción

Los circuitos R-L por su facilidad de análisis son ampliamente utilizados en prácticas de laboratorio básicos de circuitos. Adicionalmente, a través de arreglos RL es modelado el comportamiento de varias de las máquinas eléctricas usadas en el sector industrial. Por esta razón, en la presente práctica se propone el monitoreo de un circuito eléctrico trifásico serie, compuesto por cargas resistivas (reóstatos) en serie con cargas inductiva, a través de una unidad de medición fasorial (PMU) Arbiter 1133 A, con el fin de visualizar y analizar su comportamiento.

#### 2. Objetivos

#### 2.1. Objetivo General

Implementar un circuito RL con el propósito de visualizar su comportamiento frente a variaciones de carga usando medidas suministradas por una PMU Arbiter 1133A.

#### 2.2. Objetivos Específicos

- Trazar un diagrama de conexiones eléctricas para implementar un circuito RL en serie trifásico.
- Realizar las correspondientes conexiones de las décadas de inductancia, los reóstatos y la PMU de acuerdo al diagrama eléctrico.
- Establecer las conexiones de comunicación vía Ethernet con el PDC UD.
- Registrar tablas de datos y gráficos de tensión, corriente y frecuencia frente a variaciones de la impedancia de carga.
- Analizar resultados obtenidos del comportamiento de los parámetros eléctricos mencionados.

## 3. Metodología

Las pruebas al circuito RL fueron realizadas en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, para cumplir con los objetivos se realizó el proceso metodológico explicado a continuación

#### • Reconocimiento de equipos

Se procede a la revisión de las especificaciones técnicas brindadas por el fabricante de cada uno de los equipos. También, se realizan pruebas de funcionamiento de cada uno de los equipos teniendo en cuenta las normas de seguridad del laboratorio mencionas más adelante.

#### • Conexión eléctrica entre la PMU Arbiter 1133A y el circuito RL

Se procede a la realización de la conexión eléctrica entre el equipo de monitoreo y el circuito RL serie.

#### • Realización de pruebas al circuito RL

En esta etapa se realiza las pruebas correspondientes para la recolección de los parámetros eléctricos al realizar variaciones de impedancia en el circuito.

#### • Cálculo de impedancia a partir de las medidas de la PMU

Con los datos obtenidos de la experimentación se realizara el cálculo de la impedancia del circuito para comparar con los datos teóricos.

#### • Análisis de resultados y conclusiones

Aborda la interpretación y el análisis de los resultados obtenidos.

#### 4. Normas de Seguridad en el Laboratorio



El laboratorio debe ser un lugar seguro para trabajar. Para ello se tendrán siempre presentes los posibles peligros asociados al trabajo con componentes electrónicos de alto voltaje. Nunca hay excusa para los accidentes en un laboratorio bien equipado en el cual trabaja personal bien informado. A continuación se exponen una serie de normas que deben conocerse y seguirse en el laboratorio:

- 1. Está prohibido beber, fumar o comer en el laboratorio, así como el hablar por celular dentro del laboratorio.
- 2. No utilizar un equipo o aparato sin estar familiarizado con su funcionamiento. Cuando se tenga dudas sobre las precauciones de manipulación de algún equipo electrónico debe consultarse al docente o monitor antes de proceder a su uso.
- 3. No debe dejar equipos conectados equipos de medición o cautines por períodos de tiempo mayores a los necesarios. (Ver manual de instrucciones de cada uno de los equipos a operar).
- 4. Considerar que todos los circuitos y partes componentes están bajo tensión hasta que se demuestre lo contrario.
- 5. El área de trabajo debe mantenerse limpia y ordenada, sin útiles escolares, mochilas, etc.

- 6. Antes de energizar el circuito, revisar previamente sus conexiones.
- 7. Utilizar las escalas apropiadas de medición en los instrumentos de trabajo, para evitar su daño.
- 8. Al terminar la práctica realizada dejar el área limpia y ordenada, así como desenergizar los circuitos y los instrumentos, para hacer entrega al monitor de turno.
- 9. El laboratorio y sus equipos están disponibles para docencia y/o investigación, no para otro tipo de actividades.

## 5. Descripción de equipos

Para le realización de la prueba experimental es necesario contar con los siguientes equipos y componentes:

#### a. Alimentación trifásica



Fig. C.1. Alimentación trifásica

*b. Tres décadas de inductancia*: Cada una con una carga variable de hasta 1.110 [H] con tres perillas de variación con múltiplos de 100 [mH], 10 [mH] y 1 [mH].



Fig. C.2. Década de inductancia.

*c. Tres reóstatos:* Resistencias variables con un valor máximo de 100 [ $\Omega$ ] adecuadas para soportar una corriente de 1.8 [A] por 15 minutos.



Fig. C.3. Reóstatos.

#### d. PMU Arbiter 1133A

- Voltaje de entrada máximo: 600 [Vrms]
- Corriente de entrada máxima: 20 [Arms]
- 4 entradas de eventos externo
- Puertos de comunicación RS-232, RS-485 y puerto Ethernet.
- 3 salidas con contacto
- Código de tiempo IRIG B
- Compatible con el estándar IEEE C37.118



**Fig. C.4. PMU Arbiter 1133A.** Fonkel Mexicana.

e. Doce conectores



Fig. C.5. Caimanes bananas.

*f. Computador:* Computador con los siguientes requisitos mínimos:

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Dresseder	Pentium 4M (o equivalente) o posterior (32 bits)
Procesador	Pentium 4 G1 (o equivalente) o posterior (64 bits)
RAM	1Gb
Resolución de pantalla	1024*768 pixeles
	Windows 8.1/8/7/Vista (32 bits y 64 bits)
	Windows XP SP3 (32 bits)
SO	Windows Server 2012 R2 (64 bits)
	Windows Server 2008 R2 (64 bits)
	Windows Server 2003 R2 (32 bits)
Espacio en disco	1.5 Gb.
Puertos de comunicación	Puerto Ethernet
Programas instalados	LabVIEW 2013

## Tabla C.1. Requisitos mínimos computador.

#### g. Cable Ethernet cruzado

#### 6. Introducción a PDC UD

El PDC UD es una herramienta que permite la adquisición y almacenamiento a partir de una PMU, para este caso en particular una PMU 1133A, para su posterior visualización de los parámetros eléctricos mencionados en el estándar IEEE C37.118 de 2011: fasores de tensión, fasores de corriente, frecuencia, derivada de la frecuencia respecto al tiempo y estampa de tiempo.

En este espacio se describirán las especificaciones técnicas de hardware y software que se deben tener en cuenta para hacer uso de la aplicación PDC UD, adjuntando también información del manejo de la interfaz gráfica y operación del sistema de almacenamiento.

Para hacer uso de la aplicación PDC UD se requiere contar con un ordenador con las características mínimas mostradas en la tabla C.1.

#### Instrucciones de uso

Para empezar a hacer uso de la herramienta PDC UD se de proceder a realizar la siguiente serie de actividades:

- a. Conexión vía Ethernet entre el ordenador de escritorio y la PMU 1133A, como se indica en la Fig. C.9.
- b. Encendido de PMU 1133A, la cual debe contar con la previo conexión entre montaje de pruebas y su antena GPS.
- c. Una vez encendido el ordenador se procede a abrir el aplicativo PDC UD a través de la plataforma LabVIEW.

- d. Oprimir el botón de correr en la plataforma LabVIEW.
- e. Para detener el funcionamiento de la aplicación se debe oprimir el botón Stop.

#### Descripción de la aplicación PDC UD

El software de visualización PDC UD utiliza la plataforma de programación LabVIEW y cuenta con los siguientes componentes:

- 1. Fecha, hora, minutos, segundos y centésimas de segundo del instante de la medición.
- 2. Valores de fasores de tensión y corriente, frecuencia y derivada de la frecuencia en el tiempo en formato decimal.
- 3. Valores de fasores de tensión de fase y corriente de línea, frecuencia y derivada de la frecuencia en el tiempo en formato hexadecimal.
- 4. Gráfico de la magnitud de tensiones de fase.
- 5. Gráfico de la magnitud de corriente de línea.
- 6. Gráfico de la frecuencia del sistema.
- 7. Botón para detener el programa.



Fig. C.6. Interfaz PDC UD

#### Acerca de PDC UD

Producto elaborado por los estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas: Octavio Andrés Mosquera Arévalo y Juan Sebastián Rocha Doria. Sus derechos de propiedad corresponden a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

#### 7. Prueba de variación de impedancia

Para el siguiente laboratorio se conectó una carga trifásica compuesta de décadas de inductancia y reóstatos en serie como se muestra en el siguiente la Fig. C.12. Para la realización de esta experimentación se planteó el siguiente orden para la variación del valor de la impedancia en la fase A, tomando como valor inicial 100 [ $\Omega$ ] y 1.110 [H] en todas las fases, como es indicado en la Tabla C.2. Adicionalmente, se deben tener en cuenta las normas de seguridad en el laboratorio, como también las amplitudes de corriente y tensión máximas admisibles por la PMU. Por otra parte, se deben revisar previamente los catálogos y manuales de cada uno de los equipos y cumplir los siguientes pasos:

1. Ubicación de la antena GPS en un lugar despejado donde se facilite la recepción de las señales satelitales.



Fig. C.7. Ubicación de la antena GPS

- 2. Conexión del cable RG6 a la antena GPS y a la PMU.
- 3. Energización de la PMU con base a las especificaciones mostradas en la fig. C.8.



**Fig. C.8 Regleta de energización PMU Arbiter 1133A.** Manual PMU Arbiter 1133A.

- 4. Conexión del cable cruzado de Ethernet entre el computador y la PMU.
- 5. Configuración de los propiedades del protocolo TCP/IP del computador, con base a la información mostrada en la fig. C.9.



Fig. C.9 TCP/IP (a) estructura y (b) configuración.

- 6. Realización de la conexión eléctrica entre la PMU y la carga RL como es esquematizado en la fig. C.12.
- 7. Aislamiento de las partes metálicas energizadas.



Fig. C.10. Aislamiento temporal.

- 8. Encendido de la alimentación trifásica y medida de voltajes de fase y línea.
- 9. Energización del circuito RL.
- 10. Encendido del software PDC UD para realizar el monitoreo de las variables eléctricas.

J				118,6-
VA	°VA	VA	°VA	118,4-
117,544	20,6459	55EF	2061	S 118,2-
VB	°VB	VB	°VB	<sup>5</sup> 117,8− 117 −
117,657	-99,6413	F09A	A560	117,4-
VC	°VC	VC	°VC	11202 Tiempo
118,562	140,412	B89D	3B07	
IA	°IA	IA	°IA	€ 0,74
0,70293	-60,1904	0266	0414	ič 0,72-
IB	°IB	IB	°IB	0,68-
0,742076	176,242	0222	FC46	Tiempo
IC	°IC	IC	°IC	60.02- 60.015-
0,775149	59,5393	FB7A	004C	E 60,01-
Frecuencia	Df/Dt	Frecuencia	Df/Dt	
60.018	0	0012	0000	59.995-

Fig. C.11. Interfaz gráfica PDC UD.

- 11. Realizar las variaciones de carga con base a la tabla C.3.
- 12. Desenergización del circuito eléctrico.
- 13. Desconexión de conductores eléctricos.



Fig. C.12. Diagrama de conexión de laboratorio 2.

No Variación	Fase A		Fas	se B	Fase B		
NO. Variacion	R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]	
1	100	1.110	100	1.110	100	1.110	
2	100	1.060	100	1.110	100	1.110	
3	0	1.060	100	1.110	100	1.110	
4	100	0	100	1.110	100	1.110	

Tabla	<b>C.3</b> .	Varia	ciones	de	impe	edanc	ia en	circui	to RL.

## 8. Resultados

Posteriormente a la verificación de las conexiones del montaje, el cual se observa en la Fig. C.12, se procede a realizar la energización del circuito y las variaciones de impedancia como se estableció en la tabla C.3. Con el fin de registrar a través del software PDC-UD, los valores de los parámetros eléctricos como son fasores de tensiones y corrientes, frecuencia, Df/Dt y el tiempo UTC.



Fig. C.13. Montaje del experimento 2.

Con la adquisición de esta información se construyeron las siguientes graficas presentadas a continuación en las Fig. C.14, C.15, C.16, C.17 y C.18. En las Fig. C.14 y Fig. C.15 se obtuvo los valores del fasor de las tensiones de fase los cuales se comportó estable mientras se mantuvo energizado el circuito, sin embargo en dos instantes se presentaron dos caídas de tensión de cuyos valores mínimos llegan hasta los 44.304 [V] en el primer instante y 52.765 [V] y en el segundo instante, las cuales son consecuencia de efectos externos al circuito.

Por otra parte, en las Fig. C.16 y C.17 se puede ver las variaciones de los valores del fasor de corriente de línea. En este registro se presentó un pico de corriente de 3.171 [A], debido a la transición para cambiar el valor de impedancia entre las variaciones 3 y 4.

Finalmente, se describe el comportamiento de la frecuencia, la cual en los lapsos de periodo en que el circuito se encuentra des-energizado fluctúa entre valores desde los

69.623 [Hz] y 50.995 [Hz]. Este fenómeno se explica debido a que las PMU calculan la frecuencia con base en una de las señales de tensión de entrada del circuito y al estar desenergizado el circuito no tiene una referencia para calcular esta. Por otro lado, durante la etapa de energización la frecuencia oscila entre 60.689 [Hz] y 59.232 [Hz], lo cual es lo esperado por alimentación de la red la cual no debe estar fuera del ±3%, no obstante debido a uno de los fenómenos mencionados en las gráficas de los fasores de tensión, se presentó dos picos de frecuencia los cuales son de 62.613 [Hz] y 57.583 [Hz].



Fig. C.14. Tensión de fase de circuito RL.



Fig. C.15. Ángulos de las tensiones de fase de circuito RL.



Fig. C.16. Corriente de línea de circuito RL.



Fig. C.17. Ángulo de corriente de línea circuito RL.



Fig. C.18. Frecuencia de circuito RL.

Para finalizar se realizó el cálculo de impedancia en las cuatro etapas de variación mencionadas en la tabla C.1, contrastando valores teóricos y los obtenidos en la práctica con la PMU. Cabe resaltar que se midió la resistencia de las décadas de la inductancia, debido que es un parámetro relevante para la estimación impedancia teórica del circuito y se adicionó a los valores de resistencia de los reóstatos. Los valores estimados de impedancia son tomados como la media aritmética de 100 de los valores calculados a partir de los parámetros registrados por la PMU en cada variación, algunos de estos valores pueden ser consultados en las tablas C.5, C.6, C.7 y C.8, donde se presentan 10 muestras de cada una de las variaciones.

En resumen, en la tabla C.4 se puede ver que la relación entre los valores presenta un error máximo del 9.189%. Sin embargo, todos los valores se encuentran en un grado de error admisible, puesto que no superan más del 10% en error.

No.	Valor	Fase A		Fase B		Fase B	
Variación		R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]
1	Teórico	542.000	1.110	549.000	1.110	542.000	1.110
	Practico	549.250	1.119	564.100	1.005	551.159	1.133
	Error	1.338%	0.811%	2.750%	9.459%	1.690%	2.072%
2	Teórico	394.000	0.610	549.000	1.110	542.000	1.110
	Practico	400.031	0.615	560.779	1.023	549.762	1.114
	Error	1.531%	0.820%	2.146%	7.838%	1.432%	0.360%
3	Teórico	294.000	0.610	549.000	1.110	542.000	1.110
	Practico	303.731	0.619	562.521	1.008	559.368	1.122
	Error	3.310%	1.475%	2.463%	9.189%	3.204%	1.081%
4	Teórico	100.000	0.000	549.000	1.110	542.000	1.110
	Practico	95.712	0.002	564.273	1.013	560.868	1.116
	Error	4.288%	0.000%	2.782%	8.739%	3.481%	0.541%

Tabla C.4. Resultados de variación de impedancia.

Fase	e A	Fase	Fase B		ase B
R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]
549.347	1.117	561.617	1.004	552.924	1.134
548.902	1.117	563.390	0.998	553.975	1.136
548.946	1.116	563.982	1.002	551.514	1.142
549.055	1.114	564.031	1.004	549.984	1.140
548.227	1.121	563.279	1.001	551.994	1.141
550.236	1.114	563.225	1.003	550.057	1.137
549.883	1.124	563.295	1.005	551.058	1.138
549.362	1.119	562.137	1.002	550.533	1.136
547.005	1.122	564.880	1.001	551.341	1.135
548.654	1.126	564.938	1.004	552.475	1.136

Tabla C.5. Valores estimados de impedancia para primera variación.

Tabla C.6. Valores estimados de impedancia para segunda variación.

Fase A		Fase B		Fase B	
R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]
400.285	0.616	560.037	1.023	554.001	1.105
399.816	0.615	558.755	1.027	554.331	1.104
400.014	0.616	560.390	1.025	554.703	1.102
399.274	0.620	559.391	1.023	551.276	1.103
398.538	0.617	559.881	1.025	550.411	1.107
398.771	0.618	558.951	1.023	552.508	1.099
399.313	0.615	560.648	1.020	553.357	1.108
399.937	0.616	558.220	1.021	550.903	1.116
399.614	0.615	560.128	1.026	551.483	1.115
399.886	0.616	558.892	1.023	549.760	1.108

Fase A		Fase B		Fase B	
R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]
304.024	0.616	561.760	1.008	558.447	1.117
304.325	0.617	562.252	1.013	557.370	1.122
304.660	0.617	561.910	1.010	556.940	1.120
304.638	0.619	561.719	1.011	556.349	1.116
303.482	0.618	561.748	1.015	558.616	1.116
304.428	0.617	563.781	1.010	560.044	1.124
303.973	0.619	562.709	1.010	558.688	1.118
304.046	0.618	560.217	1.015	557.333	1.123
304.112	0.618	561.843	1.010	556.559	1.121
304.171	0.618	561.465	1.013	558.715	1.121

Tabla C.7. Valores estimados de impedancia para tercera variación.

#### Tabla C.8. Valores estimados de impedancia para cuarta variación.

Fase A		Fase B		Fase B	
R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]
95.570	0.002	565.497	1.016	562.118	1.123
95.511	0.002	564.185	1.011	563.042	1.118
95.589	0.002	564.600	1.009	565.085	1.121
95.574	0.002	565.172	1.007	565.119	1.117
95.535	0.002	562.276	1.010	564.801	1.124
95.543	0.002	565.456	1.007	562.506	1.122
95.543	0.002	565.254	1.013	562.134	1.117
95.522	0.002	564.970	1.010	561.963	1.114
95.550	0.002	564.413	1.014	561.246	1.120
95.563	0.002	564.524	1.012	562.666	1.121

#### 9. Conclusiones

Previo al manejo de este tipo de laboratorio se debe diseñar un diagrama de conexionamiento en el cual se especifique puntos referenciados de conexión y protecciones eléctricas pertinentes, con el fin de evitar daño de los equipos o un evento que atente contra los operarios. Paralelamente en el momento de realizar las conexiones es vital aplicar aislamiento temporal a los puntos energizados que queden expuestos en el montaje.

Las PMUs son equipos que calculan la frecuencia mientras se conecta a una red energizada, debido a que necesita una señal de referencia para hacer el procesamiento matemático. Por tanto es importante descartar los datos previos y posteriores a la energización del circuito para el análisis de la información y aplicaciones de protección.

Para que cualquier software que establezca un canal de comunicación entre una PMU y una unidad terminal, es fundamental mantener el puerto de enlace, el cual es previamente ajustado en la configuración de la PMU, libre de enlace con cualquier otro tipo de software. Esto debido a que este puerto de enlace no permite comunicaciones simultaneas.

La variación de los resultados experimentales frente a los teóricos, se deben a que la inductancia de los arrollados de cada reóstato y la autoinductancia formada por la excitación (alimentación) es una señal variable en el tiempo. Por otra parte uno de los factores más considerables a la hora de trabajar circuitos RL, es tener en cuenta la resistencia de las bobinas que se trabajan como inductancia, puesto que en equipos como las décadas de inductancia pueden llegar a tener un valor de impedancia resistiva más alto que el de reactancia.

# Anexo D: Guía de Laboratorio 2

# Caracterización de una máquina de inducción a través de medidas suministradas por una PMU

## 1. Introducción

Los motores de inducción trifásicos son los principales consumidores de energía eléctrica en el mundo y desde hace algunos años en muchos países se llevan a cabo estudios para evaluar su eficiencia. El motor de inducción es una máquina que cuenta solo con los devanados de amortiguación debido a que el voltaje del rotor (que produce la corriente y campo magnético de rotor) es inducido en los devanados del rotor de inducción en lugar de estar físicamente conectados a través de alambres, adicionalmente cuenta con la ventaja de no necesitar corriente de campo DC para operar la máquina.

En este trabajo se pretende realizar la caracterización de un motor de inducción a través de medidas sincrofasoriales proporcionadas por una PMU.

#### 2. Objetivos

#### 2.1. Objetivo General

Implementar un escenario de pruebas que permita la caracterización de una máquina de inducción jaula de ardilla a través de medidas proporcionadas por una PMU.

#### 2.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un escenario de pruebas que permita la caracterización de una máquina de inducción.
- Realizar las conexiones eléctricas entra la máquina de inducción y la PMU Arbiter 1133A.
- Enlazar la PMU Arbiter 1133A con el software PDC UD haciendo uso del protocolo TCP.
- Realizar pruebas de vacío, rotor bloqueado y medida de la resistencia del devanado de la máquina de inducción.
- Determinar parámetros y obtener el modelo eléctrico de la máquina de inducción.
- Analizar resultados obtenidos del comportamiento eléctrico del motor de inducción.

## 3. Metodología

Las pruebas de caracterización de la máquina de inducción fueron realizadas en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, para cumplir con los objetivos se realizó el proceso metodológico explicado a continuación:

#### • Reconocimiento de equipos

Se procede a la revisión de las especificaciones técnicas brindadas por el fabricante de cada uno de los equipos. También, se realizan pruebas de funcionamiento de cada uno de los equipos.

#### • Conexión eléctrica entre la PMU Arbiter 1133A y la máquina de inducción

Se procede a la realización de la conexión eléctrica entre el equipo de monitoreo y la máquina de inducción jaula de ardilla.

#### • Realización de pruebas a la máquina de inducción

En esta etapa se realiza las pruebas correspondientes para la recolección de los diferentes datos necesarios utilizados en el proceso de caracterización.

#### • Caracterización de la máquina de inducción

Se realizan los procesos matemáticos necesarios para el cálculo del modelo eléctrico de la máquina de inducción.

#### • Análisis de resultados y conclusiones

Aborda la interpretación y el análisis de los resultados obtenidos en la caracterización de la máquina de inducción.

#### 4. Normas de Seguridad en el Laboratorio

El laboratorio debe ser un lugar seguro para trabajar. Para ello se tendrán siempre presentes los posibles peligros asociados al trabajo con componentes eléctricos y electrónicos. Nunca hay excusa para los accidentes en un laboratorio bien equipado en el cual trabaja personal bien informado. A continuación se exponen una serie de normas que deben conocerse y seguirse en el laboratorio:

- 1. Está prohibido beber, fumar o comer en el laboratorio, así como el hablar por celular dentro del laboratorio.
- **2.** No utilizar un equipo o aparato sin estar familiarizado con su funcionamiento. Cuando se tenga dudas sobre las precauciones de manipulación de algún equipo debe consultarse al antes de proceder a su uso.
- *3.* No debe dejar equipos conectados por períodos de tiempo mayores a los necesarios. (Ver manual de instrucciones de cada uno de los equipos a operar).
- **4.** Considerar que todos los circuitos y partes componentes están bajo tensión hasta que se demuestre lo contrario.

- 5. El área de trabajo debe mantenerse limpia y ordenada, sin útiles, mochilas, etc.
- 6. Antes de energizar el circuito, revisar previamente sus conexiones.
- **7.** Utilizar las escalas apropiadas de medición en los instrumentos de trabajo, para evitar su daño.
- **8.** Al terminar la práctica realizada dejar el área limpia y ordenada, así como desenergizar los circuitos e instrumentos.
- **9.** El laboratorio y sus equipos están disponibles para docencia y/o investigación, no para otro tipo de actividades.

#### 5. Descripción de equipos

Para le realización de la prueba experimental es necesario contar con los siguientes equipos y componentes:

#### a. Alimentación trifásica



Fig. D. 1. Alimentación trifásica

#### b. Máquina de Inducción jaula de ardilla

- Potencia: 175 W
- Velocidad: 1670 rpm
- Tensión: 208 V
- Corriente: 1.2 A
- Frecuencia: 60 Hz



Fig. D. 2. Máquina de inducción del laboratorio de máquinas.

**b. Reóstato:** Resistencia variables con un valor máximo de 100 [Ω] adecuadas para soportar una corriente de 1.8 [A] por 15 minutos.



Fig. D.3. Reóstatos.

#### c. PMU Arbiter 1133A

- Voltaje de entrada máximo: 600 [Vrms]
- Corriente de entrada máxima: 20 [Arms]
- 4 entradas de eventos externo
- Puertos de comunicación RS-232, RS-485 y puerto Ethernet.
- 3 salidas con contacto
- Código de tiempo IRIG B
- Compatible con el estándar IEEE C37.118



**Fig. D.4. PMU Arbiter 1133A.** Fonkel Mexicana.

d. Quince conectores



Fig. D.5. Caimanes bananas.

e. *Computador:* ordenador con los siguientes requisitos mínimos:

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN		
Dresseder	Pentium 4M (o equivalente) o posterior (32 bits)		
Procesador	Pentium 4 G1 (o equivalente) o posterior (64 bits)		
RAM	1Gb		
Resolución de pantalla	1024*768 pixeles		
	Windows 8.1/8/7/Vista (32 bits y 64 bits)		
	Windows XP SP3 (32 bits)		
SO	Windows Server 2012 R2 (64 bits)		
	Windows Server 2008 R2 (64 bits)		
	Windows Server 2003 R2 (32 bits)		
Espacio en disco	1.5 Gb.		
Puertos de comunicación	Puerto Ethernet		
Programas instalados	LabVIEW 2013		

- f. Cable Ethernet cruzado.
- g. Fuente variable DC.
- h. Dos multímetros.

## 6. Introducción a PDC UD

El PDC UD es una herramienta que permite la adquisición y almacenamiento a partir de una PMU, para este caso en particular una PMU 1133A, para su posterior visualización de los parámetros eléctricos mencionados en el estándar IEEE C37.118 de 2011: fasores de tensión, fasores de corriente, frecuencia, derivada de la frecuencia respecto al tiempo y estampa de tiempo.

En este espacio se describirán las especificaciones técnicas de hardware y software que se deben tener en cuenta para hacer uso de la aplicación PDC UD, adjuntando también información del manejo de la interfaz gráfica y operación del sistema de almacenamiento.

Para hacer uso de la aplicación PDC UD se requiere contar con un ordenador con las características mínimas mostradas en la tabla D.1.

#### Instrucciones de uso

Para empezar a hacer uso de la herramienta PDC UD se de proceder a realizar la siguiente serie de actividades:

- a. Conexión vía Ethernet entre el ordenador de escritorio y la PMU 1133A, como se indica en la Fig. D.9.
- b. Encendido de PMU 1133A, la cual debe contar con la previo conexión entre montaje de pruebas y su antena GPS.
- c. Una vez encendido el ordenador se procede a abrir el aplicativo PDC UD a través de la plataforma LabVIEW.
- d. Oprimir el botón de correr en la plataforma LabVIEW.
- e. Para detener el funcionamiento de la aplicación se debe oprimir el botón Stop.

#### Descripción de la aplicación PDC UD

El software de visualización PDC UD utiliza la plataforma de programación LabVIEW y cuenta con los siguientes componentes:

- 1. Fecha, hora, minutos, segundos y centésimas de segundo del instante de la medición.
- 2. Valores de fasores de tensión y corriente, frecuencia y derivada de la frecuencia en el tiempo en formato decimal.
- 3. Valores de fasores de tensión de fase y corriente de línea, frecuencia y derivada de la frecuencia en el tiempo en formato hexadecimal.
- 4. Gráfico de la magnitud de tensiones de fase.
- 5. Gráfico de la magnitud de corriente de línea.
- 6. Gráfico de la frecuencia del sistema.
- 7. Botón para detener el programa.



Fig. D.6. Interfaz PDC UD

## Acerca de PDC UD

Producto elaborado por los estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas: Octavio Andrés Mosquera Arévalo y Juan Sebastián Rocha Doria. Sus derechos de propiedad corresponden a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## 7. Pruebas a la máquina de inducción

El circuito equivalente de una máquina de inducción contiene cinco componentes básicas que deben determinarse para describir completamente el comportamiento de una máquina de inducción real.

- Resistencia de dispersión del rotor (R2)
- Reactancia de dispersión del rotor (X2)
- Resistencia de dispersión del estator (R1)
- Reactancia de dispersión del estator (X1)
- Reactancia de magnetización (Xm)

Adicionalmente, para la realización de estas pruebas se deben contemplar las normas de seguridad en el laboratorio, como también las amplitudes de corriente y tensión máximas admisibles por la PMU. Por otra parte, se deben revisar previamente los catálogos y manuales de cada uno de los equipos y cumplir los siguientes pasos:

- 1. Realización de la conexión eléctrica para la medida de la resistencia del estator como es ilustrado en la figura D.12.
- 2. Realización de la prueba de medida de la resistencia del estator
- 3. Ubicación de la antena GPS en un lugar despejado donde se facilite la recepción de las señales satelitales.



Fig. D.7. Ubicación de la antena GPS

- 4. Conexión del cable RG6 a la antena GPS y a la PMU.
- 5. Energización de la PMU con base a las especificaciones mostradas en la fig. D.5.



**Fig. D.8. Regleta de energización PMU Arbiter 1133A.** Manual PMU Arbiter 1133A.

- 6. Conexión del cable cruzado de Ethernet entre el computador y la PMU.
- 7. Configuración de los propiedades del protocolo TCP/IP del computador, con base a la información mostrada en la fig. D.9.



Fig. D.9 TCP/IP (a) estructura y (b) configuración.

- 8. Realización de la conexión eléctrica entre la PMU y la máquina de inducción jaula de ardilla como es esquematizado en la fig. D.13.
- 9. Aislamiento de las partes metálicas energizadas.



Fig. D.10. Aislamiento temporal.

- 10. Encendido de la alimentación trifásica y medida de voltajes de fase y línea.
- 11. Energización del circuito del motor de inducción
- 12. Encendido del software PDC UD para realizar el monitoreo de las variables eléctricas.

VA	°VA	VA	°VA	
117,544	20,6459	55EF	2061	E 118,2-
VB	°VB	VB	°VB	S 117,8-
117,657	-99,6413	F09A	A560	117,6
VC	°VC	VC	°VC	Tiempo
118,562	140,412	B89D	3B07	0,78-
IA	۹IA	IA	۹IA	g 0,74-
0,70293	-60,1904	0266	0414	e 0,72-
IB	°IB	IB	°IB	0,68-
,742076	176,242	0222	FC46	11101 11202 Tiempo
IC	°IC	IC	°IC	60,02-
,775149	59,5393	FB7A	004C	
recuencia	Df/Dt	Frecuencia	Df/Dt	§ 60,005
60 018	0	0012	0000	

Fig. D.11. Interfaz gráfica PDC UD.

- 13. Realización de la prueba de vacío
- 14. Realización de la prueba de rotor bloqueado
- 15. Desenergización del circuito eléctrico.
- 16. Desconexión de conductores eléctricos

## Prueba de medida de resistencia del devanado



Fig. D.12. Esquemático prueba de medida de resistencia

Esta prueba es realizada con el fin de hallar la resistencia del devanado del estator, para esto se conecta un fuente DC en dos de las terminales y se medirá la corriente que circulara por el circuito, esta prueba se hará con la máquina fría, es decir, asegurar que cada parte esté a temperatura ambiente.

Resultados de la prueba:

$$I_{DC} = 0.2 [A]$$
  
 $V_{DC} = 6.85 [V]$ 

## Prueba de vacío

La prueba de vacío en motores de inducción es realizada con el fin de conocer el valor de las pérdidas rotacionales del motor y suministras información sobre su corriente de magnetización. Para esta prueba se cortocircuita el devanado del rotor y se deja girar libremente el rotor sin carga en su eje. Luego, se toma medidas de voltaje de línea, corriente de fase y potencia trifásica.

En la fig. D.13. se puede observar la conexión realizada en la prueba de vacío. Adicionalmente, en la tabla D.3. son mostrados ampliamente los resultados de la prueba de vacío.



Fig. D.13. Esquemático prueba de vacío

## Arranque

En la tabla. D1 son concentrados los datos medidos entre las 08:48:56,50 AM y 08:48:56,95 AM del 02/12/2015, tiempo en el cual fue almacenado el fenómeno transitorio del arranque del motor de inducción jaula de ardilla.

Hora	VA [V]	°VA	VB [V]	°VB	VC [V]	°VC	IA [A]	°IA	IB [A]	°IB	IC [A]	°IС	F [Hz]	Df/Dt [HZ/s]
08:48:56,50 AM	1,037	67,019	1,559	-71,681	1,190	148,046	0,027	58,570	0,048	-94,574	0,037	114,363	55,448	- 87,330
08:48:56,60 AM	69,776	55,277	73,239	-66,491	71,769	171,769	2,670	21,929	2,845	- 101,841	2,790	137,762	59,354	78,110
08:48:56,65 AM	112,128	54,219	113,378	-66,011	114,298	173,732	3,089	23,224	3,185	-98,029	3,240	142,465	59,968	-0,150
08:48:56,70 AM	113,497	53,645	114,492	-66,562	115,237	173,237	1,604	17,604	1,677	- 104,227	1,717	136,405	59,970	0,030
08:48:56,75 AM	114,629	53,232	115,343	-66,983	115,952	172,849	0,778	-12,641	0,830	- 135,562	0,860	106,115	59,978	0,170
08:48:56,80 AM	114,868	52,890	115,516	-67,329	116,096	172,509	0,693	-26,660	0,738	- 150,680	0,765	92,015	59,983	0,080
08:48:56,90 AM	114,861	52,549	115,501	-67,677	116,083	172,167	0,687	-28,022	0,730	- 152,267	0,757	90,630	59,983	0,000
08:48:56,95 AM	114,819	51,880	115,473	-68,354	116,054	171,487	0,684	-28,196	0,727	- 152,420	0,755	90,437	59,983	0,010

Tabla D.2. Datos de arranque motor de inducción

En la Fig. D.14. se puede observar que tanto el perfil de tensión como de corriente cambian su valor instantáneamente después de accionarse el interruptor S1. Por otra parte, la frecuencia antes de activarse el interruptor S1 presenta un reporte anormal, debido a la falta de una señal de referencia.

Adicionalmente, el pico de corriente se reporta a las 08:48:56,65 AM con un valor de 3,089, 3,185 y 3,24 para la fase A, B y C respectivamente.





**Fig. D.14. Arranque motor de inducción**. (a) Tensión, (b) Corriente (c) y frecuencia.

## Operación normal

Durante la fase de operación como se puede observar en la gráfica D.15. Se presenta un comportamiento normal en cada una de las variables eléctricas, manteniéndose casi constantes los valores de voltaje, corriente y frecuencia.



## Prueba de rotor bloqueado

Para la prueba de rotor bloqueado se debe enclavar el eje dela máquina de inducción de tal forma que no pueda moverse. Después de esto se energiza el motor de forma gradual hasta alcanzar la corriente nominal con el fin de tomar medidas de voltaje, corriente y potencia activa trifásica, este tipo de prueba nos permite encontrar el valor de la reactancia y resistencia de dispersión equivalentes para el modelo de la máquina de inducción.

En la fig. D.12. se puede observar la conexión realizada en la prueba de rotor bloqueado. Adicionalmente, en la tabla D.4. Son mostrados ampliamente los resultados de la prueba.



**Fig. D.16. Prueba de rotor bloqueado.** (a) Tensión, (b) Corriente y frecuencia.

#### Caracterización máquina de inducción jaula de ardilla

Los parámetros del modelo de motor de inducción indicados anteriormente se sintetizan en el diagrama de la Fig. D.17.



Fig. D.17. Modelo eléctrico máquina de inducción.

A través de la prueba de medida de resistencia del devanado es posible conocer el valor de  $R_1$ .

$$I_{DC} = 0.2 [A]$$
$$V_{DC} = 6.85 [V]$$
$$R_1 = \frac{6.85 [V]}{2 * (0.2) [A]} = 17.125 [\Omega]$$

Para el cálculo de los parámetros de vacío, se tomó como referencia los datos medidos por la PMU a las 08:49:01,75 AM del 02/12/2015

$$I_{Vacio} = \frac{0.681 [A] + 0.731 [A] + 0.756 [A]}{3} = 0.7226 [A]$$
$$V_{Vacio} = \frac{114.767 [V] + 115.390 [V] + 116.611 [V]}{3} = 115.589 [V]$$
$$|Z_{Vacio}| = \frac{115.589 [V]}{0.7226 [A]} = 159.963 [\Omega]$$

Para el cálculo de los parámetros de rotor bloqueado se tomó como referencia los datos medidos por la PMU a las 08:58:14,55 AM del 02/12/2015.

$$I_{RB} = \frac{1.2 [A] + 1.25 [A] + 1.277 [A]}{3} = 1.24 [A]$$
$$V_{RB\phi} = \frac{35.915 [V] + 36.193 [V] + 36.782 [V]}{3} = 36.297 [V]$$

$$|Z_{RB}| = \frac{36.297 [V]}{1.24 [A]} = 29.27 [\Omega]$$

 $\begin{aligned} Pin &= Re[(35.915 \angle -64.926^{\circ}) * (1.2 \angle -112.448^{\circ})] + Re[(36.193 * \angle 173.926^{\circ}) * \\ &(1.25 \angle 124.781^{\circ})] + Re[(36.782 * \angle 54.193^{\circ})^* (1.277 \angle 7.285^{\circ})] = 84.666 \ [W] \end{aligned}$ 

 $\phi = \cos^{-1} \frac{84.666 \ [W]}{\sqrt{3} * 62.868 \ [V] * 1.24 \ [A]}} = 51.16^{\circ}$   $R_{LR} = R_1 + R_2 = 29.27 * \cos 51.16^{\circ} = 18.35 \ [\Omega]$   $R_2 = 1.225 \ [\Omega]$   $X_{LR} = X_1 + X_2 = 29.27 * \sin 51.16^{\circ} = 22.79 \ [\Omega]$ 

Para motores de jaula de ardilla la contribución de reactancias es igual, por lo tanto:

$$X_1 = X_2 = 11.4 [\Omega]$$
  
 $X_M = 159.963[\Omega] - 11.4 [\Omega] = 148.563 [\Omega]$ 

#### 8. Reconstrucción de históricos de pruebas de vacío y rotor bloqueado

A continuación se presenta las tablas correspondientes a los registros de datos para las respectivas pruebas de prueba en vacío y rotor bloqueado. Las cuales fueron obtenidas del buffer de algunas herramientas de la aplicación PDC-UD, y posteriormente se exportó la información a el software Matlab para la generación de gráficos del comportamiento en tensión y corriente, durante el arranque y la prueba de vacío del motor.

Hora	Fecha	VA [V]	°VA	VB [V]	°VB	VC [V]	°VC	IA [A]	°IA	IB [A]	°IB	IC [A]	°IC	F [Hz]	Df/Dt [HZ/s]
08:48:55,55 AM	02/12/2015	0,010	180,000	0,007	135,000	0,007	135,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	60,188	-7,700
08:48:55,60 AM	02/12/2015	0,005	180,000	0,007	135,000	0,005	180,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	59,167	-20,440
08:48:55,70 AM	02/12/2015	0,010	180,000	0,007	135,000	0,010	180,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	60,375	24,200
08:48:55,75 AM	02/12/2015	0,005	180,000	0,007	135,000	0,010	180,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	60,378	23,180
08:48:55,80 AM	02/12/2015	0,007	135,000	0,000	0,000	0,005	180,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	59,561	-16,360
08:48:55,85 AM	02/12/2015	0,005	180,000	0,007	135,000	0,010	180,000	0,001	45,000	0,000	0,000	0,000	0,000	60,125	11,330
08:48:55,90 AM	02/12/2015	0,005	180,000	0,005	180,000	0,010	180,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	60,157	0,620
08:48:55,95 AM	02/12/2015	0,000	0,000	0,007	135,000	0,010	180,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	60,211	1,070
08:48:56,00 AM	02/12/2015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	90,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	65,315	102,080
08:48:56,05 AM	02/12/2015	0,000	0,000	0,005	90,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	57,420	-157,920
08:48:56,15 AM	02/12/2015	0,000	0,000	0,005	90,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	57,514	1,880
08:48:56,20 AM	02/12/2015	0,000	0,000	0,005	90,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	90,000	0,001	0,000	56,185	460,170
08:48:56,25 AM	02/12/2015	0,000	0,000	0,005	90,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	58,017	36,620
08:48:56,35 AM	02/12/2015	0,000	0,000	0,005	90,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	61,215	64,000
08:48:56,40 AM	02/12/2015	0,005	90,000	0,005	90,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	59,981	61,550
08:48:56,45 AM	02/12/2015	0,005	90,000	0,007	45,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	59,815	-3,290
08:48:56,50 AM	02/12/2015	1,037	67,019	1,559	-71,681	1,190	148,046	0,027	58,570	0,048	-94,574	0,037	114,363	55,448	-87,330
08:48:56,60 AM	02/12/2015	69,776	55,277	73,239	-66,491	71,769	171,769	2,670	21,929	2,845	-101,841	2,790	137,762	59,354	78,110
08:48:56,65 AM	02/12/2015	112,128	54,219	113,378	-66,011	114,298	173,732	3,089	23,224	3,185	-98,029	3,240	142,465	59,968	-0,150
08:48:56,70 AM	02/12/2015	113,497	53,645	114,492	-66,562	115,237	173,237	1,604	17,604	1,677	-104,227	1,717	136,405	59,970	0,030
08:48:56,75 AM	02/12/2015	114,629	53,232	115,343	-66,983	115,952	172,849	0,778	-12,641	0,830	-135,562	0,860	106,115	59,978	0,170
08:48:56,80 AM	02/12/2015	114,868	52,890	115,516	-67,329	116,096	172,509	0,693	-26,660	0,738	-150,680	0,765	92,015	59,983	0,080
08:48:56,90 AM	02/12/2015	114,861	52,549	115,501	-67,677	116,083	172,167	0,687	-28,022	0,730	-152,267	0,757	90,630	59,983	0,000
08:48:56,95 AM	02/12/2015	114,819	51,880	115,473	-68,354	116,054	171,487	0,684	-28,196	0,727	-152,420	0,755	90,437	59,983	0,010
08:48:57,00 AM	02/12/2015	114,823	51,547	115,474	-68,685	116,064	171,158	0,684	-28,628	0,727	-152,871	0,754	90,049	59,983	0,000

## Tabla D.3. Datos históricos prueba de vacío motor de inducción

08:48:57,05 AM	02/12/2015	114,825	51,206	115,470	-69,027	116,059	170,813	0,684	-28,893	0,727	-153,209	0,754	89,854	59,983	0,000
08:48:57,15 AM	02/12/2015	114,830	50,881	115,487	-69,354	116,067	170,483	0,683	-29,232	0,727	-153,503	0,754	89,514	59,983	0,010
08:48:57,20 AM	02/12/2015	114,831	50,209	115,500	-70,023	116,076	169,810	0,682	-29,932	0,727	-154,157	0,753	88,832	59,983	0,000
08:48:57,25 AM	02/12/2015	114,827	49,882	115,493	-70,354	116,065	169,483	0,682	-30,245	0,726	-154,474	0,753	88,490	59,983	0,000
08:48:57,35 AM	02/12/2015	114,828	49,546	115,490	-70,693	116,066	169,147	0,682	-30,558	0,726	-154,858	0,753	88,149	59,983	0,000
08:48:57,40 AM	02/12/2015	114,833	48,882	115,479	-71,357	116,066	168,485	0,682	-31,213	0,726	-155,514	0,753	87,515	59,983	0,000
08:48:57,45 AM	02/12/2015	114,843	48,558	115,496	-71,684	116,069	168,160	0,682	-31,572	0,726	-155,899	0,753	87,174	59,984	0,000
08:48:57,50 AM	02/12/2015	114,854	48,233	115,514	-72,008	116,085	167,829	0,682	-31,840	0,726	-156,191	0,753	86,831	59,983	0,000
08:48:57,60 AM	02/12/2015	114,870	47,918	115,517	-72,319	116,094	167,519	0,681	-32,182	0,726	-156,556	0,752	86,488	59,984	0,010
08:48:57,65 AM	02/12/2015	114,870	47,249	115,516	-72,986	116,103	166,854	0,682	-32,810	0,725	-157,213	0,753	85,904	59,983	0,000
08:48:57,70 AM	02/12/2015	114,866	46,910	115,520	-73,321	116,118	166,521	0,682	-33,198	0,725	-157,532	0,752	85,560	59,983	0,000
08:48:57,75 AM	02/12/2015	114,863	46,563	115,508	-73,674	116,109	166,175	0,681	-33,541	0,725	-157,851	0,752	85,216	59,982	0,000
08:48:57,80 AM	02/12/2015	114,857	46,222	115,508	-74,012	116,097	165,830	0,681	-33,854	0,725	-158,189	0,752	84,876	59,983	0,000
08:48:57,90 AM	02/12/2015	114,866	45,887	115,517	-74,351	116,106	165,495	0,681	-34,198	0,725	-158,509	0,752	84,527	59,983	0,000
08:48:57,95 AM	02/12/2015	114,856	45,180	115,499	-75,071	116,087	164,780	0,680	-34,886	0,725	-159,260	0,752	83,843	59,982	0,000
08:48:58,00 AM	02/12/2015	114,905	44,820	115,541	-75,420	116,144	164,427	0,681	-35,244	0,725	-159,645	0,752	83,450	59,981	0,000
08:48:58,05 AM	02/12/2015	114,914	44,452	115,540	-75,791	116,148	164,056	0,681	-35,663	0,725	-160,077	0,752	83,105	59,981	0,000
08:48:58,15 AM	02/12/2015	114,937	44,099	115,546	-76,147	116,156	163,706	0,681	-35,976	0,725	-160,397	0,752	82,766	59,982	0,010
08:48:58,20 AM	02/12/2015	114,926	43,380	115,542	-76,912	116,186	162,984	0,679	-36,719	0,727	-161,310	0,752	82,277	59,982	0,000
08:48:58,25 AM	02/12/2015	114,923	43,029	115,541	-77,257	116,192	162,642	0,678	-37,097	0,727	-161,629	0,752	81,932	59,982	0,000
08:48:58,30 AM	02/12/2015	114,916	42,658	115,526	-77,632	116,174	162,277	0,678	-37,562	0,727	-162,107	0,753	81,539	59,981	-0,010
08:48:58,40 AM	02/12/2015	114,920	42,295	115,520	-77,999	116,176	161,912	0,678	-37,866	0,726	-162,411	0,753	81,195	59,981	0,000
08:48:58,45 AM	02/12/2015	114,906	41,567	115,511	-78,720	116,185	161,183	0,678	-38,601	0,726	-163,146	0,752	80,450	59,981	0,000
08:48:58,50 AM	02/12/2015	114,909	41,211	115,523	-79,077	116,193	160,822	0,678	-38,947	0,727	-163,480	0,752	80,105	59,982	0,010
08:48:58,55 AM	02/12/2015	114,923	40,854	115,535	-79,432	116,208	160,467	0,678	-39,251	0,727	-163,847	0,753	79,769	59,982	0,000
08:48:58,65 AM	02/12/2015	114,912	40,481	115,523	-79,809	116,200	160,091	0,678	-39,674	0,726	-164,200	0,753	79,368	59,981	0,000
08:48:58,70 AM	02/12/2015	114,915	39,724	115,511	-80,570	116,185	159,336	0,678	-40,408	0,727	-164,997	0,753	78,575	59,980	-0,010
08:48:58,75 AM	02/12/2015	114,886	39,334	115,476	-80,955	116,155	158,945	0,678	-40,748	0,726	-165,400	0,753	78,222	59,980	0,000

08:48:58,80 AM	02/12/2015	114,868	38,940	115,459	-81,347	116,139	158,550	0,678	-41,171	0,726	-165,817	0,753	77,878	59,980	0,000
08:48:58,90 AM	02/12/2015	114,868	38,553	115,480	-81,733	116,142	158,158	0,677	-41,553	0,726	-166,184	0,753	77,429	59,980	0,000
08:48:58,95 AM	02/12/2015	114,879	37,778	115,500	-82,493	116,152	157,409	0,680	-42,481	0,727	-166,869	0,751	76,651	59,979	-0,010
08:48:59,00 AM	02/12/2015	114,878	37,388	115,505	-82,883	116,147	157,020	0,680	-42,825	0,727	-167,236	0,752	76,260	59,980	0,000
08:48:59,05 AM	02/12/2015	114,888	36,999	115,495	-83,273	116,137	156,631	0,679	-43,244	0,727	-167,602	0,752	75,857	59,980	0,000
08:48:59,15 AM	02/12/2015	114,875	36,599	115,492	-83,682	116,127	156,228	0,680	-43,588	0,727	-168,057	0,752	75,455	59,979	0,000
08:48:59,20 AM	02/12/2015	114,856	35,818	115,486	-84,452	116,137	155,452	0,679	-44,389	0,727	-168,829	0,752	74,698	59,980	0,000
08:48:59,25 AM	02/12/2015	114,858	35,434	115,484	-84,836	116,144	155,062	0,679	-44,809	0,727	-169,244	0,752	74,296	59,980	0,000
08:48:59,35 AM	02/12/2015	114,864	35,053	115,475	-85,231	116,139	154,672	0,679	-45,076	0,727	-169,659	0,753	73,954	59,980	0,000
08:48:59,40 AM	02/12/2015	114,871	34,313	115,466	-86,000	116,136	153,907	0,678	-45,765	0,728	-170,480	0,753	73,212	59,980	-0,020
08:48:59,45 AM	02/12/2015	114,866	33,936	115,451	-86,375	116,124	153,535	0,678	-46,147	0,727	-170,886	0,754	72,811	59,981	0,000
08:48:59,50 AM	02/12/2015	114,882	33,561	115,471	-86,748	116,134	153,168	0,679	-46,567	0,728	-171,250	0,754	72,504	59,981	0,000
08:48:59,60 AM	02/12/2015	114,877	33,187	115,466	-87,123	116,124	152,792	0,679	-46,949	0,727	-171,599	0,753	72,088	59,981	0,000
08:48:59,65 AM	02/12/2015	114,873	32,437	115,469	-87,876	116,118	152,041	0,679	-47,675	0,728	-172,369	0,753	71,365	59,981	0,000
08:48:59,70 AM	02/12/2015	114,858	32,038	115,453	-88,273	116,116	151,641	0,679	-48,057	0,728	-172,775	0,754	70,919	59,979	-0,010
08:48:59,75 AM	02/12/2015	114,869	31,650	115,462	-88,660	116,127	151,253	0,679	-48,438	0,728	-173,181	0,754	70,565	59,980	0,010
08:48:59,80 AM	02/12/2015	114,873	31,266	115,476	-89,045	116,135	150,864	0,679	-48,860	0,728	-173,588	0,754	70,150	59,980	0,000
08:48:59,90 AM	02/12/2015	114,864	30,867	115,466	-89,442	116,132	150,464	0,679	-49,282	0,728	-173,944	0,754	69,734	59,979	0,000
08:48:59,95 AM	02/12/2015	114,851	30,069	115,456	-90,233	116,119	149,669	0,679	-50,008	0,728	-174,705	0,754	69,011	59,979	-0,010
08:49:00,00 AM	02/12/2015	114,853	29,654	115,447	-90,648	116,119	149,256	0,680	-50,464	0,728	-175,161	0,754	68,551	59,978	0,000
08:49:00,05 AM	02/12/2015	114,877	29,255	115,449	-91,050	116,124	148,864	0,680	-50,885	0,728	-175,563	0,755	68,199	59,979	0,010
08:49:00,15 AM	02/12/2015	114,877	28,839	115,443	-91,472	116,114	148,445	0,679	-51,273	0,728	-175,968	0,754	67,765	59,978	0,000
08:49:00,20 AM	02/12/2015	114,873	28,023	115,437	-92,289	116,110	147,632	0,679	-52,040	0,729	-176,778	0,755	66,980	59,979	0,000
08:49:00,25 AM	02/12/2015	114,872	27,606	115,453	-92,693	116,127	147,216	0,679	-52,504	0,729	-177,231	0,755	66,521	59,978	0,000
08:49:00,30 AM	02/12/2015	114,860	27,199	115,444	-93,103	116,114	146,809	0,679	-52,925	0,729	-177,635	0,755	66,087	59,979	0,000
08:49:00,40 AM	02/12/2015	114,843	26,775	115,419	-93,527	116,098	146,387	0,679	-53,314	0,729	-178,037	0,755	65,717	59,978	0,000
08:49:00,45 AM	02/12/2015	114,851	25,968	115,436	-94,337	116,099	145,574	0,680	-54,155	0,729	-178,894	0,755	64,869	59,980	0,020
08:49:00,50 AM	02/12/2015	114,857	25,568	115,452	-94,750	116,100	145,161	0,681	-54,531	0,729	-179,296	0,755	64,455	59,979	0,000

08:49:00,55 AM	02/12/2015	114,861	25,158	115,453	-95,158	116,106	144,753	0,680	-54,920	0,730	-179,698	0,755	64,021	59,979	0,000
08:49:00,60 AM	02/12/2015	114,861	24,757	115,448	-95,557	116,104	144,350	0,680	-55,308	0,730	180,000	0,756	63,652	59,979	0,000
08:49:00,70 AM	02/12/2015	114,838	24,323	115,434	-95,985	116,086	143,920	0,680	-55,816	0,730	179,598	0,755	63,196	59,977	-0,020
08:49:00,75 AM	02/12/2015	114,843	23,504	115,438	-96,806	116,094	143,097	0,681	-56,624	0,730	178,794	0,756	62,415	59,979	0,000
08:49:00,80 AM	02/12/2015	114,833	23,082	115,436	-97,224	116,091	142,678	0,680	-57,058	0,730	178,342	0,756	61,959	59,978	0,000
08:49:00,85 AM	02/12/2015	114,822	22,665	115,418	-97,633	116,088	142,266	0,680	-57,446	0,730	177,990	0,756	61,548	59,978	0,000
08:49:00,90 AM	02/12/2015	114,823	22,241	115,420	-98,061	116,081	141,841	0,681	-57,909	0,730	177,539	0,756	61,134	59,978	0,000
08:49:00,95 AM	02/12/2015	114,835	21,824	115,423	-98,485	116,082	141,420	0,681	-58,297	0,731	177,088	0,756	60,700	59,978	0,000
08:49:01,00 AM	02/12/2015	114,835	21,410	115,429	-98,896	116,091	141,008	0,681	-58,685	0,730	176,684	0,756	60,333	59,979	0,000
08:49:01,10 AM	02/12/2015	114,839	20,995	115,432	-99,313	116,091	140,594	0,681	-59,119	0,730	176,280	0,756	59,943	59,978	0,000
08:49:01,15 AM	02/12/2015	114,845	20,144	115,425	-100,160	116,095	139,748	0,681	-59,988	0,731	175,428	0,756	59,028	59,978	0,010
08:49:01,20 AM	02/12/2015	114,856	19,720	115,442	-100,592	116,101	139,322	0,681	-60,375	0,731	175,028	0,756	58,637	59,978	0,000
08:49:01,30 AM	02/12/2015	114,853	19,297	115,454	-101,008	116,113	138,894	0,681	-60,883	0,731	174,574	0,757	58,205	59,978	0,000
08:49:01,35 AM	02/12/2015	114,838	18,459	115,445	-101,849	116,109	138,051	0,681	-61,725	0,731	173,721	0,757	57,291	59,978	-0,010
08:49:01,40 AM	02/12/2015	114,827	18,035	115,443	-102,273	116,108	137,621	0,681	-62,111	0,731	173,317	0,757	56,901	59,978	0,000
08:49:01,45 AM	02/12/2015	114,816	17,602	115,431	-102,704	116,089	137,191	0,681	-62,520	0,731	172,912	0,757	56,485	59,977	0,000
08:49:01,50 AM	02/12/2015	114,800	17,168	115,419	-103,143	116,062	136,753	0,681	-62,954	0,731	172,458	0,756	56,041	59,977	0,000
08:49:01,60 AM	02/12/2015	114,781	16,743	115,407	-103,571	116,050	136,325	0,681	-63,363	0,731	172,047	0,756	55,584	59,978	0,010
08:49:01,65 AM	02/12/2015	114,801	15,871	115,416	-104,440	116,065	135,459	0,681	-64,278	0,732	171,197	0,757	54,778	59,977	0,000
08:49:01,70 AM	02/12/2015	114,785	15,453	115,399	-104,868	116,026	135,040	0,681	-64,664	0,731	170,727	0,756	54,333	59,978	0,010
08:49:01,75 AM	02/12/2015	114,767	15,032	115,390	-105,291	116,014	134,611	0,681	-65,097	0,731	170,323	0,756	53,955	59,978	0,000
08:49:01,80 AM	02/12/2015	114,764	14,616	115,396	-105,702	116,026	134,197	0,681	-65,507	0,731	169,870	0,756	53,499	59,978	0,000
08:49:01,90 AM	02/12/2015	114,781	14,217	115,416	-106,099	116,041	133,795	0,681	-65,917	0,732	169,467	0,757	53,043	59,979	0,010
08:49:01,95 AM	02/12/2015	114,798	13,406	115,445	-106,908	116,076	132,984	0,681	-66,710	0,732	168,700	0,758	52,240	59,979	0,000
08:49:02,00 AM	02/12/2015	114,799	13,003	115,439	-107,311	116,076	132,581	0,681	-67,169	0,731	168,287	0,757	51,832	59,979	0,000
08:49:02,05 AM	02/12/2015	114,801	12,591	115,432	-107,721	116,075	132,173	0,681	-67,579	0,731	167,874	0,757	51,416	59,979	0,000
08:49:02,15 AM	02/12/2015	114,795	12,193	115,431	-108,123	116,065	131,769	0,681	-67,919	0,732	167,471	0,757	51,075	59,979	0,010
08:49:02,20 AM	02/12/2015	114,798	11,407	115,449	-108,915	116,091	131,015	0,680	-68,870	0,733	166,679	0,756	50,424	59,980	0,000

08:49:02,25 AM	02/12/2015	114,788	11,024	115,452	-109,298	116,096	130,641	0,680	-69,330	0,734	166,327	0,756	50,083	59,980	0,010
08:49:02,30 AM	02/12/2015	114,783	10,626	115,446	-109,691	116,096	130,245	0,680	-69,741	0,734	165,915	0,756	49,672	59,979	0,000
08:49:02,40 AM	02/12/2015	114,788	10,239	115,458	-110,080	116,094	129,856	0,680	-70,081	0,734	165,612	0,756	49,293	59,980	0,010
08:49:02,45 AM	02/12/2015	114,798	9,466	115,460	-110,856	116,103	129,085	0,680	-70,934	0,734	164,727	0,755	48,504	59,979	-0,020
08:49:02,50 AM	02/12/2015	114,803	9,094	115,461	-111,230	116,098	128,713	0,680	-71,275	0,734	164,412	0,755	48,161	59,981	0,030
08:49:02,55 AM	02/12/2015	114,807	8,720	115,465	-111,602	116,108	128,343	0,680	-71,684	0,734	164,000	0,755	47,782	59,981	0,000
08:49:02,60 AM	02/12/2015	114,799	8,322	115,453	-111,995	116,098	127,949	0,680	-72,077	0,734	163,636	0,755	47,370	59,980	-0,010
08:49:02,70 AM	02/12/2015	114,807	7,943	115,456	-112,380	116,106	127,571	0,680	-72,418	0,734	163,224	0,756	47,025	59,980	0,010
08:49:02,75 AM	02/12/2015	114,809	7,195	115,451	-113,118	116,124	126,824	0,680	-73,203	0,734	162,482	0,756	46,270	59,980	0,000
08:49:02,80 AM	02/12/2015	114,819	6,825	115,467	-113,488	116,131	126,453	0,680	-73,544	0,734	162,118	0,756	45,892	59,981	0,010
08:49:02,85 AM	02/12/2015	114,824	6,458	115,475	-113,849	116,144	126,090	0,680	-73,936	0,733	161,787	0,756	45,514	59,981	0,000
08:49:02,90 AM	02/12/2015	114,825	6,099	115,470	-114,209	116,133	125,738	0,680	-74,329	0,733	161,407	0,755	45,137	59,982	0,000

Tabla D.4. Datos históricos prueba de rotor bloqueado motor de inducción

Hora	Fecha	VA [V]	°VA	VB [V]	°VB	VC [V]	°VC	IA [A]	°IA	IB [A]	°IB	IC [A]	°IС	F [Hz]	Df/Dt [HZ/s]
08:58:13,80 AM	02/12/2015	35,924	-68,742	36,214	170,239	37,124	50,207	1,197	-116,113	1,251	120,974	1,295	3,515	60,010	-0,200
08:58:13,85 AM	02/12/2015	35,910	-68,536	36,213	170,439	37,126	50,410	1,196	-115,934	1,251	121,170	1,295	3,712	60,011	0,010
08:58:13,90 AM	02/12/2015	35,859	-68,246	36,221	170,650	37,132	50,617	1,193	-115,658	1,252	121,350	1,295	3,938	60,016	0,090
08:58:13,95 AM	02/12/2015	35,790	-67,918	36,224	170,867	37,132	50,837	1,189	-115,379	1,253	121,506	1,296	4,190	60,018	0,040
08:58:14,00 AM	02/12/2015	35,736	-67,579	36,234	171,069	37,136	51,050	1,185	-115,043	1,254	121,686	1,297	4,472	60,018	0,000
08:58:14,10 AM	02/12/2015	35,732	-67,325	36,233	171,285	37,130	51,281	1,184	-114,792	1,254	121,881	1,297	4,728	60,014	-0,070
08:58:14,15 AM	02/12/2015	35,729	-66,861	36,247	171,728	37,142	51,729	1,184	-114,334	1,255	122,312	1,298	5,179	60,011	-0,040
08:58:14,20 AM	02/12/2015	35,723	-66,621	36,246	171,967	37,139	51,961	1,184	-114,057	1,255	122,563	1,297	5,435	60,013	0,030
08:58:14,25 AM	02/12/2015	35,731	-66,391	36,241	172,190	37,142	52,180	1,185	-113,837	1,254	122,774	1,298	5,632	60,012	-0,010
08:58:14,35 AM	02/12/2015	35,748	-66,167	36,235	172,436	37,134	52,423	1,185	-113,589	1,253	123,017	1,298	5,832	60,012	0,000
08:58:14,40 AM	02/12/2015	35,787	-65,695	36,217	172,910	37,091	52,956	1,187	-113,109	1,253	123,520	1,295	6,356	60,013	0,000

08:58:14,45 AM	02/12/2015	35,857	-65,526	36,212	173,172	37,080	53,223	1,191	-112,899	1,251	123,820	1,294	6,562	60,009	-0,060
08:58:14,50 AM	02/12/2015	35,807	-65,181	36,130	173,532	36,995	53,607	1,190	-112,580	1,248	124,171	1,291	6,892	60,019	0,190
08:58:14,55 AM	02/12/2015	35,915	-64,926	36,193	173,926	36,782	54,193	1,200	-112,448	1,250	124,781	1,277	7,285	60,014	-0,090
08:58:14,65 AM	02/12/2015	35,896	-64,559	36,314	174,152	36,998	54,338	1,196	-112,006	1,257	124,944	1,288	7,623	60,020	0,120
08:58:14,70 AM	02/12/2015	36,176	-64,586	36,448	174,411	37,262	54,591	1,209	-111,948	1,262	125,335	1,298	7,962	60,005	0,270
08:58:14,75 AM	02/12/2015	36,195	-64,355	36,469	174,643	37,283	54,812	1,210	-111,706	1,262	125,592	1,300	8,182	60,012	0,130
08:58:14,80 AM	02/12/2015	36,194	-64,143	36,495	174,804	37,278	55,023	1,209	-111,514	1,264	125,750	1,299	8,414	60,011	-0,010
08:58:14,85 AM	02/12/2015	36,190	-63,902	36,525	174,990	37,288	55,257	1,209	-111,295	1,267	125,955	1,299	8,697	60,013	0,030
08:58:14,95 AM	02/12/2015	36,254	-63,750	36,537	175,219	37,299	55,503	1,213	-111,161	1,267	126,227	1,299	8,901	60,008	-0,080
08:58:15,00 AM	02/12/2015	36,354	-63,396	36,548	175,701	37,310	55,997	1,218	-110,767	1,267	126,766	1,297	9,369	60,009	0,000
08:58:15,05 AM	02/12/2015	36,377	-63,185	36,546	175,960	37,306	56,252	1,220	-110,546	1,266	127,050	1,298	9,625	60,011	0,050
08:58:15,15 AM	02/12/2015	36,393	-62,960	36,561	176,197	37,314	56,499	1,221	-110,278	1,265	127,293	1,299	9,848	60,012	0,010
08:58:15,20 AM	02/12/2015	36,400	-62,442	36,570	176,724	37,316	57,053	1,222	-109,678	1,264	127,862	1,301	10,287	60,015	0,030
08:58:15,25 AM	02/12/2015	36,394	-62,171	36,570	176,991	37,322	57,323	1,222	-109,365	1,264	128,130	1,301	10,542	60,015	0,000
08:58:15,30 AM	02/12/2015	36,385	-61,896	36,567	177,265	37,328	57,594	1,222	-109,071	1,264	128,460	1,302	10,769	60,015	0,000
08:58:15,40 AM	02/12/2015	36,399	-61,640	36,569	177,539	37,330	57,877	1,223	-108,833	1,263	128,769	1,302	11,056	60,014	-0,010
08:58:15,45 AM	02/12/2015	36,001	-60,441	36,497	178,249	37,319	58,427	1,199	-107,710	1,263	129,181	1,305	11,773	60,027	-0,230
08:58:15,50 AM	02/12/2015	36,053	-60,167	36,512	178,525	37,319	58,723	1,201	-107,421	1,263	129,449	1,305	12,059	60,015	-0,220
08:58:15,55 AM	02/12/2015	36,060	-59,844	36,508	178,792	37,310	59,011	1,202	-107,094	1,263	129,716	1,305	12,373	60,017	0,040
08:58:15,60 AM	02/12/2015	36,021	-59,495	36,484	179,128	37,286	59,329	1,199	-106,752	1,262	129,980	1,304	12,672	60,019	0,030
08:58:15,70 AM	02/12/2015	36,072	-59,201	36,391	179,591	37,133	59,869	1,204	-106,489	1,257	130,497	1,296	13,069	60,016	-0,050
08:58:15,75 AM	02/12/2015	36,280	-58,382	36,635	-179,734	37,221	60,639	1,214	-105,597	1,268	131,336	1,299	13,879	60,005	-0,670
08:58:15,80 AM	02/12/2015	36,486	-58,277	36,906	-179,542	37,302	60,937	1,226	-105,531	1,280	131,798	1,300	14,166	60,005	0,000
08:58:15,85 AM	02/12/2015	36,685	-58,294	37,052	-179,436	37,506	60,927	1,236	-105,411	1,285	132,032	1,309	14,179	60,000	-0,120
08:58:15,90 AM	02/12/2015	36,750	-58,072	37,099	-179,197	37,578	61,136	1,239	-105,156	1,287	132,258	1,312	14,402	60,012	0,260
08:58:15,95 AM	02/12/2015	36,810	-57,864	37,112	-178,904	37,612	61,408	1,242	-104,903	1,286	132,581	1,314	14,673	60,011	0,000
08:58:16,00 AM	02/12/2015	36,849	-57,636	37,106	-178,602	37,628	61,681	1,244	-104,630	1,285	132,901	1,314	14,903	60,012	0,020
08:58:16,05 AM	02/12/2015	36,828	-57,283	37,116	-178,317	37,639	61,975	1,242	-104,315	1,286	133,125	1,315	15,233	60,019	0,140

08:58:16,15 AM	02/12/2015	36,793	-56,923	37,137	-178,040	37,645	62,264	1,240	-103,979	1,288	133,369	1,316	15,578	60,019	0,000
08:58:16,20 AM	02/12/2015	36,603	-55,987	37,162	-177,432	37,657	62,857	1,227	-103,051	1,291	133,835	1,318	16,297	60,015	-0,410
08:58:16,25 AM	02/12/2015	36,676	-55,762	37,172	-177,132	37,667	63,163	1,231	-102,823	1,291	134,197	1,318	16,587	60,012	-0,050
08:58:16,30 AM	02/12/2015	36,722	-55,518	37,177	-176,824	37,669	63,479	1,234	-102,551	1,291	134,538	1,318	16,886	60,013	0,020
08:58:16,40 AM	02/12/2015	36,752	-55,257	37,183	-176,531	37,676	63,782	1,236	-102,288	1,291	134,839	1,317	17,185	60,014	0,020
08:58:16,45 AM	02/12/2015	36,732	-54,597	37,186	-175,890	37,672	64,421	1,235	-101,659	1,291	135,482	1,318	17,819	60,017	-0,040
08:58:16,50 AM	02/12/2015	36,788	-54,353	37,191	-175,566	37,681	64,748	1,239	-101,385	1,291	135,844	1,317	18,145	60,013	-0,050
08:58:16,55 AM	02/12/2015	36,771	-53,978	37,190	-175,203	37,667	65,132	1,238	-101,002	1,291	136,205	1,317	18,505	60,020	0,130
08:58:16,60 AM	02/12/2015	36,769	-53,638	37,189	-174,863	37,659	65,487	1,238	-100,700	1,292	136,546	1,316	18,867	60,018	-0,030
08:58:16,70 AM	02/12/2015	36,628	-53,085	37,190	-174,522	37,653	65,841	1,228	-100,203	1,293	136,826	1,317	19,298	60,030	0,230
08:58:16,75 AM	02/12/2015	36,642	-52,334	37,197	-173,804	37,662	66,563	1,229	-99,408	1,293	137,528	1,317	20,002	60,005	-0,620



**Fig. D.18. Comportamiento en arranque y operación.** (a) Corrientes de línea y (b) Frecuencia.



Fig. D.18. Comportamiento prueba de vacío.

Anexo D: Guía de Laboratorio 2.

### 9. Conclusiones

Para este tipo de laboratorio se debe diseñar un diagrama de conexionamiento en el cual se especifique etiquetas de conexión y las protecciones eléctricas pertinentes a la capacidad del motor de inducción, con el fin de evitar daño de los equipos o un evento que atente contra la integridad de los operarios. Paralelamente en el momento de realizar las conexiones es vital aplicar aislamiento temporal a los puntos energizados que queden expuestos en el montaje, puesto que se puede presentar un alto grado de electrocución.

Las PMUs representan una herramienta útil en el monitoreo de máquinas eléctricas, puesto que permiten el almacenamiento de un considerable número de muestras de medidas eléctricas, proporcionando una referencia de tiempo precisa, la cual facilita el estudio y visualización de los diferentes efectos transitorios bajo un marco de referencia global.

Las medidas sincrofasoriales permiten hacer un cálculo preciso y rápido de los parámetros eléctricos de una maquina eléctrica, una línea de transmisión o distribución, entre otros. Por tanto permite generar reportes que indiquen el estado y desempeño de estos elementos, para de esta forma contribuir con la prevención de fallas y accidentes a través de mantenimientos preventivos o maniobras de despeje.

Para un correcto cálculo de la frecuencia obtenida a partir de una PMU, se debe contar con un valor de entrada (tensión o corriente), debido que la estimación se realiza con base a las señales de entrada y en su ausencia lleva a la PMU a generar datos erróneos. Por lo cual, se debe tener selectividad de la información registrada para evitar errores en la manipulación de aplicaciones que impliquen un control sobre la frecuencia.





# Desarrollo de una Aplicación Gráfica para un Sistema de Monitoreo Basado en Tecnología Sincrofasorial

Juan S. Rocha Universidad Distrital Francisco José de Caldas Cra. 8 # 40 – 62 Bogotá, Colombia (+57) 3938400 Ext: 1540 jsrochad@correo.udistrital.edu.co

César Ángeles Universidad Nacional Autónoma de México cangelesc@ii.unam.mx Octavio A. Mosquera Universidad Distrital Francisco José de Caldas oamosqueraa@correo.udistrital.edu.co

Álvaro Espinel Universidad Distrital Francisco José de Caldas <u>aespinel@udistrital.edu.co</u>

#### RESUMEN

El crecimiento de la infraestructura de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) como respuesta al desarrollo de los diferentes sectores económicos (industria, transporte, comercio, entre otros), trae consigo la necesidad de garantizar la confiabilidad en operación de las redes de energía ante fenómenos naturales o problemas técnico-operativos, evitando cortes y apagones de cobertura amplia, conocidos como *Blackouts*, los cuales podrían provocar un fuerte impacto a la economía de un país.

Por lo tanto se han enfocado grandes esfuerzos en el desarrollo de tecnologías y sistemas eficientes que permitan un monitoreo en tiempo real de las redes eléctricas, ofreciendo ventajas en confiabilidad y calidad de energía. Una de las soluciones propuestas en la actualidad son los sistemas de medición sincrofasorial, el cual consiste en: unidades de medición fasorial (PMUs) distribuidas en los sistemas eléctricos de potencia (SEP) proporcionando las medidas de voltaje, corriente, frecuencia y derivada de la frecuencia, entre otras; concentradores de datos fasoriales (PDCs), utilizados para correlacionar las medidas mediante una estampa de tiempo y posteriormente almacenarlas y ejecutar aplicaciones en línea o fuera de línea.

El siguiente artículo condensa los resultados de la implementación de una aplicación gráfica, la cual permite la visualización de las variables eléctricas medidas por equipos PMU conectadas a un PDC local a través de una

red de área local bajo el protocolo TCP/IP. Las pruebas de funcionalidad de la interfaz fueron desarrolladas en la red de pruebas de laboratorio de electrónica de potencia del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y con equipo de la Comisión Federal de Electricidad de México.

#### PALABRAS CLAVE

Unidades de Medición Fasorial (PMU); Concentrador de Datos Fasoriales (PDC); Red inteligente; TCP/IP.

#### ABSTRACT

The constantly growing of the power system's infrastructure as a response to the development of different economics sectors (industry, transport, trading, among others) implying the necessity of guaranty the reliability in operation of power system in the face of natural phenomenoms or technical – operatives, avoiding outage and blackouts, due to the fact that these can cause a hard impact to the economy of a country.

For this reason, the industrial sector has focused big efforts in the development of technology and systems more efficient that allow a real time monitoring of power systems, giving advantages in reliability and energy quality. One of the available solutions proposed currently are the systems of synchrophasors measurement systems, composed by Phasorial Unit Systems (PMUs) distributed throughout of power systems supplying the measurements of voltage, current, frequency and the



frequency's derivative, among others; Phasorial Data concentrators (PDCs) used to correlate the measurements through a time stamp to accumulate and implement applications online or offline afterwards.

This paper condense the results of the implementation of an graphic application, it allows the visualization of electrical variables measured by PMU equipment connected to a local PDC through Local Area Network (LAN). The tests of functionality were developed in the grid of proofs of the laboratory of power electronic of National Autonomy University of Mexico using equipment of National Commission of Electricity of Mexico.

#### **KEYWORDS**

Phasorial Unit Measurement (PMU); Phasorial Data Concentrator (PDC); Smart Grid;TCP/IP.

### INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la demanda de energía eléctrica ha llevado a las líneas de transmisión a trabajar más cerca de sus límites de cargabilidad, el cambio de los modelos de operación en generación con la integración de fuentes de energía renovables y la amplia penetración de patrones de carga menos predecibles, son algunos de los desafíos a los que hoy se enfrentan los sistemas eléctricos de potencia (SEP). Por ello la importancia de contar con una plataforma de monitoreo acorde a las exigencias que implican este cambio de paradigma en la cadena energética.

Durante muchos años, los sistemas SCADA han permitido la supervisión, control y adquisición de datos de la red de potencia, suministrando una fotografía del estado de toda la red en lapsos de 5 a 10 segundos [1]. Sin embargo, estas tasas de actualización son relativamente lentas para garantizar los índices de confiabilidad adecuados que conllevan los nuevos retos de la industria eléctrica. Propiciando así la necesidad de herramientas para el monitoreo y almacenamiento de datos en tiempo real, las cuales permitan a los operarios de red una fácil y rápida interpretación del estado del sistema para tomar acciones correctivas y preventivas, al igual que manejo de bases datos para un análisis a la mayor brevedad de los eventos post-morten.

En respuesta a estas necesidades, y con la ayuda de los últimos avances en comunicaciones y procesamiento de información, surgen los sistemas de medición sincrofasorial, dedicados a la obtención y manejo de los



datos de condición del SEP en tiempo real. Esta tecnología consisten en unidades de medición fasorial (Phasorial Measurement Units, PMUs) ubicadas en varios nodos del SEP; las cuales transmiten datos de la condición de la red a altas tasas de envío (10 a 120 tramas/segundo) [2]; cada medición cuenta con una referencia de tiempo global proporcionada por sistema de posicionamiento global (Global Positioning System, GPS) para fines de sincronización; las tramas de varias unidades son enviadas a un concentrador de datos, para la recepción y él almacenamiento de los datos de las múltiples PMUs enlazadas. [3]

El concepto de sincrofasor fue introducido en 1980 y estandarizado por primera vez en el estándar 1344-1995 [4]. Este concepto fue desarrollado más a fondo en el estándar IEEE C37.118-1 [5] y IEEE C37.118-2 [6], el cual fue completado en el 2005 y posteriormente actualizado en 2011, en este estándar se incluyó requerimientos de las medidas y para la transferencia en tiempo real, facilitando la adopción de la tecnología de medición sincrofasorial y el uso de diferentes protocolos de comunicación para transmisión de datos. Hoy en día, la academia, industria y gobierno están avanzando en proyectos conjuntos de implementación de este tipo de tecnología como se demuestra en [7], [8], [9], [10] y [11].

## Sistemas de Medición Sincrofasorial

Un sistema de medición sincrofasorial tiene el propósito de obtener los fasores de tensión y corriente acompañadas de una referencia de tiempo. Por otra parte, busca la disponibilidad de las mediciones para visualizar en tiempo real las condiciones operativas de un SEP desde los centros de control, además con el almacenamiento de datos también es posible análisis post-morten. En la Figura 1 se puede observar un ejemplo de la estructura de un sistema de medición sincrofasorial, el cual está compuesto por:





Fuente: [5].



E. Unidades de medición fasorial (PMU): calculan los fasores de corriente y tensión basados en un digital. Estas mediciones muestreo son acompañadas de una referencia de tiempo proporcionada por un GPS. Una PMU provee la salida de datos en un protocolo previamente establecido a una tasa de envío del orden de 20 a 120 tramas por segundo, las cuales proporcionan: magnitudes y ángulos de tensiones y corriente, frecuencia, tasa de variación de frecuencia, salidas digitales y análogas. [3] La arquitectura básica de una PMU es mostrada en la Figura 2 y se desglosa a continuación:





Fuente: Elaboración propia.

- g. **Filtro anti-aliasing:** atenúa el ruido de alta frecuencia antes de llevar a cabo el muestreo.
- h. **Conversor A/D:** es el encargado de convertir una señal analógica en una señal digital con un valor binario.
- i. **Microprocesador:** a partir de las señales resultantes del A/D calcula los valores predefinidos en los estándares, a través de la aplicación de algoritmos digitales.
- j. **Oscilador de bloqueo de fase:** mantiene la señal de salida bloqueada con respecto a una señal de referencia.
- k. **Receptor GPS:** proporciona la referencia de tiempo.
- 1. **Interface de comunicaciones:** permite transmisión de las tramas al correspondiente PDC.
- F. Comunicaciones: Es el mecanismo encargado del transporte de la información digital desde la PMU, al lugar donde los datos van a ser usados. La comunicación normalmente es brindada a través de una Red de Área Amplia (WAM) usando de fibra



óptica, Ethernet, radio frecuencia, onda portadora, entre otros. [12]

- G. Concentrador de Datos Fasoriales (PDC): Recibe y organiza los datos procedentes de varias PMUs, con el fin de generar una trama de salida alineada por estampa de tiempo. Los PDCs puede intercambiar datos fasoriales con otros PDCs, los cuales están organizados en capas y ubicados en diferente localización. [12]
- H. *Almacenamiento de datos:* Encargado de almacenar información, con el fin consultar históricos y realizar análisis post-morten. [12]

## Aplicación Gráfica del PDC

La aplicación gráfica del PDC fue desarrollada en el entorno de desarrollo LabVIEW y enlazada a las PMUs bajo el estándar IEEE C37.118, en la interfaz gráfica es posible la visualización de:

- Tensiones instantáneas
- Corrientes instantáneas
- ➢ Frecuencia
- Derivada de la frecuencia
- Fasores de tensión
- Fasores de corriente
- Voltajes y corrientes de secuencia
- Potencias activas, reactivas y aparentes.

Adicionalmente, dentro de la pantalla principal a través de una sub-pantalla, se pueden observar las siguientes pestañas:

- ✓ Tiempo real: muestra las gráficas de las magnitudes de voltaje, corriente y frecuencia medidas por cada una de las PMUs.
- ✓ Fasores: en esta pestaña se muestran los fasores de corriente y tensión. Adicionalmente, se presenta la ubicación de las PMUs.
- ✓ Potencias: Se despliegan las potencias activa, reactiva y aparente de cada una de las fases monitoreadas.
- ✓ Voltajes y corrientes de secuencia: Se realiza el cálculo de las componentes de secuencia de tensiones y corrientes de cada PMU.

La figura 3 se desglosa la lógica de diseño utilizada en el desarrollo de la aplicación gráfica a través de un diagrama



de flujo que permite comprender de forma simple la estructura principal del programa desarrollado.

#### Figura 3. Diagrama de flujo PDC



Fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS

Para la validar el funcionamiento del PDC, se llevó a cabo la implementación de la red de eléctrica observada en la Figura 4, donde se utilizaron los equipos de protección SEL 351A y SEL 487E, los cuales cuentan con funciones de PMU. En este experimento se pudo visualizar en tiempo real las variaciones de corrientes y tensiones que implica la conexión secuencial de cargas como luminarias y un motor.





Fuente: Elaboración propia.

Las cargas implementadas al nodo 2 son luminarias, un motor monofásico a la fase C y tres interruptores para realizar una conexión secuencial de cargas a la fase C, como se aprecia en el diagrama de conexiones de la Figura 5. Adicionalmente, en la tabla 1 se presenta una breve descripción de las cargas utilizadas para las pruebas experimentales.

Figura 5. Conexión de cargas



Fuente: Elaboración propia.

m 1 1 1	·	• • •		• •	1
Tahla I	Descru	nción d	le cargas	implementa	dag
1 uoiu i	. Deserr	peron u	ie eurgus	implementa	uus

Descripción
Luminaria 70 [W]
Motor monofásico 110 [W]
Interruptores 10 [A]

Fuente: Elaboración propia.

La red parte de un sistema balanceado con una carga trifásica compuesta de tres luminarias, posteriormente los interruptores son accionados secuencialmente en el siguiente orden S0, S1 y S2, los cuales permitieron la adición de dos luminarias y el motor. En la Figura 6 (a) se observar como las variaciones de carga en la fase C no



solo implican caídas de tensión en la fase C del nodo 2 sino también genera un aumento de la tensión de la fase A en el nodo 2 proporcional a las caídas de tensión de la fase C. Por otra parte, en la Figura 6 (b) se puede visualizar cómo se comporta la corriente de la fase C, presentando pequeños picos de corrientes cuando se adiciona las luminarias en el orden de los miliamperios y un pico máximo de aproximadamente 3 [A] debido al encendido del motor monofásico. En la Figura 6 (c) se observa el comportamiento de la frecuencia durante el experimento, el cual no tuvo un efecto relevante.

Figura 6. Gráficas en tiempo real: (a) Tensión, (b) Corrientes y (c) Frecuencia de la prueba experimental.



Fuente: Elaboración propia.

Los diagramas fasoriales mostrados en la Figura 7, corresponde al instante de tiempo posterior a la apertura del ultimo interruptor. Por la naturaleza y el valor de la carga (inductiva) se puede notar un pequeño desfase angular entre los voltajes de la fase C de cada nodo, donde el fasor de tensión del nodo 1 adelanta al fasor de tensión del nodo 2. Por otro lado, se observa en la Figura 8 el resumen de las mediadas de potencia instantánea ratificando la naturaleza inductiva de la carga presentada en la fase C, tanto en el nodo 1 como en el nodo 2, debido a la conexión del motor monofásico.



Figura 7. Fasores: (a) Corrientes de línea y (b) Tensiones de fase.





Figura 8. Resumen de las potencias instantáneas del experimento 2.

experimento	<i>L</i> .		
	PMU 1		
	Potencia Activa P [W]	Potencia Reactiva Q [VAR]	Potencia Aparente S [VA]
Fase A	74.046	-0.422022	74.046
Fase B	74.0257	-1.43867	74.0257
Fase C	327.555	42.2876	327.555
Total	475.626	40.4269	475.626
		PMU 2	
	Potencia Activa P [W]	Potencia Reactiva Q [VAR]	Potencia Aparente S [VA]
Fase A	76.1425	-0.482279	76.1425
Fase B	73.0035	-0.391886	73.0035
Fase C	323.693	22.9693	323.693
Total	472.839	22.0951	472.839
Fuente: Elab	oración prop	oia.	

Aplicando la reconstrucción del evento realizado con ayuda de la base de datos del PDC, observa en la Figura 9 (a) y (b), donde se reconstruye la corriente de fase C y





neutro, en los dos nodos de la red. El evento fue registrado entre las 05:00:58.00 p.m. y 05:01:05.00 p.m. del 21de agosto de 2015.

Figura 9. Reconstrucción de corriente de línea de la fase C y neutro en (a) el nodo 1 y (b) el nodos 2 del experimento 2.



Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

- Los sistemas de medición sincrofasorial, permiten un minucioso análisis de las variables eléctricas de una red en tiempo real, la ejecución de aplicaciones en línea y post-morten de protección. Sin embargo, la implementación de un sistema de almacenamiento para uso de mediciones sincrofasoriales es uno de los aspectos más limitantes, debido a la carga que representa las altas tasas de reporte de los equipos PMUs.
- Los estándares IEEE C37.118.1 y IEEE C37.118.2, permiten el enlace de comunicación universal entre equipos comerciales PMU de diferentes fabricantes con equipos PDC personalizados para cumplir con las necesidades de una red de monitoreo en tiempo real.

## REFERENCIAS

- [1] D. Elizondo, M. R. Gardner y R. León, «Synchrophasor Technology : The Boom of Investments and Information Flow from North America to Latin America,» de *Power and Energy Society General Meeting*, 2012 IEEE, 2012.
- [2] E. Litvinov, X. Luo, M. Lelic, Y. Hu, B. Avramovic y D. Novosel, «Developing Technology Road Maps: A Case Study for Synchophasor Deployment,» *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 12, n° 2, pp. 97-106, 2014.
- [3] A. Phadke y J. Thorp, Synchronized Phasor Measurement and their aplications, New York: Springer, 2008.
- [4] IEEE Power System Engineering Society, «IEEE 1344 Standard for Synchrophasors,» USA, 1995.
- [5] P. S. R. Committee, *IEEE Std C37.118.1™*, New York: IEEE, 2011.
- [6] P. S. R. Committee, *IEEE Std. C37.118.2™*, New York: IEEE, 2011.
- [7] J. D. Lee, S. J. Lee y D. Y. Kwon, «The PMU Interface using IEC 61850,» de *ICT Convergence (ICTC), 2013 International Conference on*, 2013.
- [8] D. Novosel, V. Madani, B. Bhargava, K. Vu y J. Cole, «Dawn of the Grid Synchronization,» *Power and Energy Magazine*, pp. 49-60, 2008.
- [9] T. E. Velasco, Análisis de oscilaciones en el sistema interconectado México-Centroamérica fuera de linea, Ciudad de México: UNAM, 2014.
- [10] Studio Elektronike Rijeka, «WAMSTER AD HOC PHASOR MEASUREMENT NETWORK,» 2010. [En línea]. Available: http://www.wamster.net/.
- [11] G. López, C. Arbelaéz y A. F. Eusse, «Desarrollo de una Aplicación en Silverlight para Visualización de Sincrofasores Entregados por un PMU,» Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2011.
- [12] S. A. Nexans y E. A. Nerc, «Real-Time Application of Synchrophasors for Improving Reliability,» NERC, 2010.