



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA

“José María Morelos y Pavón”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA UNIDAD DE MEDICIÓN FASORIAL TRIFÁSICA”

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Maestra en Ciencias en Ingeniería Electrónica

PRESENTA:

Ing. Diana Celina Ramírez Torres

DIRECTOR:

Dr. Fernando Martínez Cárdenas

CODIRECTOR:

Dr. Arturo Méndez Patiño

MORELIA, MICHOACÁN

ENERO DEL 2014

RESUMEN

Uno de los dispositivos de medición más importantes en los sistemas de potencia modernos son las unidades de medición fasorial (PMU). La PMU es un dispositivo de medición, capaz de estimar fasores de corriente y voltaje de forma sincronizada. En este trabajo de tesis se presenta la implementación de una PMU, basada en la plataforma de tiempo real SbRIO-9632 de National Instruments®, cumpliendo con la norma IEEE C37.118 – 2005 para el envío de tramas con la información de las mediciones.

La PMU implementada realiza la estimación de fasores de corriente y voltaje de un sistema trifásico mediante el algoritmo de estimación de fasores no recursivo [1] e implementado en la plataforma en tiempo real SbRIO-9632, esto debido a que se requiere obtener la estimación de fasores en tiempo real. Esta plataforma incluye en su arquitectura un FPGA spartan 3 de 2M de compuertas, un procesador en tiempo real de 32 bits con un reloj de 400 MHz y un conjunto de entradas y salidas analógicas y digitales. Esta plataforma tiene la ventaja de programarse con un lenguaje de programación de ultra alto nivel (conocido como código G) llamado LabVIEW®. Son necesarios los módulos LabVIEW FPGA® y LabVIEW RT® para programar el FPGA y el procesador en tiempo real respectivamente.

Los fasores estimados, la estampa de tiempo dada por la tarjeta SbRIO – 9632 junto con los demás campos de la norma IEEE C37.118-2005 son enviadas hacia un software de conectividad, graficación y registro para la PMU desarrollado en LabVIEW® Windows el cual funciona a manera de concentrador de datos de fasores (del inglés: *Phasor Data Concentrator, PDC*).

En este trabajo de tesis se presentan los resultados obtenidos en tiempo real de las pruebas realizadas a la PMU. Usando diferentes tipos de cargas para observar el comportamiento de la PMU. Se muestran los resultados en el software de conectividad, graficación y registro, las tramas que se reciben así como el diagrama fasorial de corriente y voltaje, y la magnitud de dichos fasores.

ÍNDICE

ABSTRACT	ii
RESUMEN	iv
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTOS	viii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 SEMBLANZA DEL PROBLEMA.....	2
1.2 SOLUCIÓN PROPUESTA	2
1.3 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	2
1.4 OBJETIVOS.....	9
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	9
1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	9
1.5 METODOLOGÍA.....	9
1.6 HIPÓTESIS.....	10
1.7 JUSTIFICACIÓN.....	10
1.8 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DE LOS CAPÍTULOS	11
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PMU.....	14
2.1.1 RECEPTOR DE SEÑAL DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS).....	14
2.1.2 MÓDULO DE SENSORES DE VOLTAJE Y CORRIENTE.....	15
2.1.3 CONVERTIDOR ANALÓGICO - DIGITAL (ADC).....	15
2.1.4 UNIDAD DE PROCESAMIENTO DIGITAL.....	15
2.1.5 CANAL DE COMUNICACIÓN.....	15
2.2 APLICACIONES DE LAS PMUs.....	15

2.2.1	SUPERVISIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA.	16
2.2.2	PROTECCIÓN AVANZADA DE REDES ELÉCTRICAS.....	16
2.2.3	CONTROL AVANZADO DE REDES ELÉCTRICAS.....	16
2.3	SISTEMAS DE MEDICIÓN DE AREA AMPLIA (WAMS).....	17
2.4	ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE LOS WAMS.	18
2.4.1	APLICACIONES DE LAS WAMS.	19
2.5	ALGORITMO PARA LA ESTIMACIÓN DE FASORES DE CORRIENTE Y VOLTAJE.....	19
2.5.1	DFT Y REPRESENTACIÓN FASORIAL	19
2.5.2	FASORES DE SEÑALES A LA FRECUENCIA NOMINAL.....	21
2.5.3	MÉTODO NO RECURSIVO	22
2.6	ESTIMACIÓN FASORIAL CON FASORETAS.....	23
2.6.1	ESTIMACIÓN DEL FILTRO DE FOURIER DE UN CICLO.....	24
2.6.2	ESTIMACIÓN FASORIAL CON FASORETAS.	25
2.7	ESTÁNDAR IEEE C37.118-2005	26
2.7.1	DEFINICIÓN.....	26
2.7.2	DEFINICIÓN CLÁSICA DE FASOR	27
2.7.3	CONCEPTOS DE MEDICIÓN DE FASORES	28
2.7.4	SINCROFASOR	29
2.7.5	ETIQUETA DE TIEMPO PARA SINCROFASORES.....	30
2.7.6	SINCRONIZACIÓN DEL SISTEMA DE TIEMPO.....	31
2.7.7	LÍMITES DE PRECISIÓN	31
2.7.8	MENSAJE DE LA TRAMA	33
2.7.9	MENSAJE GLOBAL.	33
2.7.10	TIEMPO Y CALIDAD DE TIEMPO.....	35
2.7.11	TRAMA DE DATOS	36
2.7.12	CONFIGURACIÓN DE LA TRAMA.	39

2.8	PMUs COMERCIALES.....	41
2.8.1	ABB	41
2.8.2	SIEMENS	42
2.8.3	AREVA.....	43
2.8.4	SEL.	44
2.8.5	ERL.....	46
2.8.6	Macrodyne	47
CAPÍTULO 3. HARDWARE DE LA PMU		47
3.1	MÓDULO TRIFÁSICO DE SENSORES DE VOLTAJE Y CORRIENTE.	50
3.1.1	SENSORES DE VOLTAJE.....	50
3.1.2	SENSORES DE CORRIENTE.....	53
3.1.3	ASPECTO FÍSICO DEL MÓDULO TRIFÁSICO.	59
3.1.4	CONEXIONES DE ENTRADAS DE VOLTAJE Y CORRIENTE	60
3.1.5	DISTRIBUCIONES DE SALIDAS ESCALADAS EN EL CONECTOR DB25-1. ...	62
3.2	MÓDULO DE PROCESAMIENTO DIGITAL EN TIEMPO REAL.....	63
3.2.1	CARACTERISTICAS GENERALES DE LA SBRIO-9632	63
3.2.1.1	Módulo LabVIEW RT.	64
3.2.1.2	Módulo LabVIEW FPGA.....	65
3.2.1.3	Especificaciones y periféricos de la tarjeta SbRIO – 9632.....	65
3.2.1.4	Entradas y Salidas de la tarjeta SbRIO-9632.....	66
3.2.1.5	Puertos analógicos.	66
3.2.1.6	Puertos Digitales.	66
3.2.1.7	Entradas Analógicas.....	67
3.2.2	DISTRIBUCIÓN DE TERMINALES EN CONECTORES DE ENTRADAS ANALOGICAS	67
3.2.3	DISTRIBUCIÓN DE TERMINALES EN CONECTORES DE ENTRADAS Y SALIDAS DIGITALES.	70

3.2.4	ASPECTO FÍSICO DEL MÓDULO DE PROCESAMIENTO DIGITAL EN TIEMPO REAL.....	72
3.2.5	TIPOS DE CONEXIONES PARA ENTRADAS ANALÓGICAS.....	73
3.2.5.1	Configuración para Medición diferencial	73
3.2.5.2	Medición Single – Ended (RSE).....	74
3.2.5.3	Medición no referenciada, Single – Ended (NRSE)	74
3.3	DIAGRAMA DE CONEXIONES ENTRE EL MÓDULO DE SENSORES Y EL MÓDULO DE PROCESAMIENTO DIGITAL EN TIEMPO REAL	75
CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE LA PMU.....		57
4.1	PROGRAMACIÓN DE ALGORITMOS PARA LA ESTIMACIÓN DE FASORES EN LabVIEW RT y LabVIEW FPGA.....	78
4.1.1	PROGRAMACIÓN EN LabVIEW FPGA	84
4.1.2	PROGRAMACIÓN EN LabVIEW RT	86
4.1.2.1	Configuración	89
4.1.2.2	Sub VI del Método NO Recursivo.....	90
4.1.2.3	Componente de Secuencia Positiva	94
4.1.2.4	Estándar IEEE C37.118- 2005	95
4.1.2.5	Comunicación TCP/IP	98
4.2	DESARROLLO DE SOFTWARE DE CONECTIVIDAD, GRAFICACIÓN Y REGISTRO PARA LA PMU BASADO EN LA NORMA IEEE C37.118 – 2005.....	99
4.2.1	Sub Vi PMU.....	105
CAPÍTULO 5. PRUEBAS Y RESULTADOS.....		85
5.1	PRUEBAS DE LA PMU CON CARGA RESISTIVA	111
5.1.1	EVALUACIÓN DE LOS SENSORES DE VOLTAJE Y CORRIENTE	111
5.1.2	MEDICIONES CON CARGA RESISTIVA.	115
5.2	PRUEBAS DE LA PMU USANDO LÁMPARAS INCANDESCENTES COMO CARGA	119

5.2.1	EVALUACIÓN DE LOS SENSORES DE CORRIENTE Y VOLTAJE.	119
5.2.2	MEDICIONES USANDO LÁMPARAS INCANDESCENTES COMO CARGA. ...	123
5.3	PRUEBAS DE LA PMU USANDO UNA CARGA RL.	127
5.3.1	EVALUACIÓN DE LOS SENSORES DE VOLTAJE Y CORRIENTE.	127
5.3.2	MEDICIONES USANDO UNA CARGA RL.	131
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....		107
6.1	CONCLUSIONES.....	135
6.2	TRABAJOS FUTUROS.....	136
REFERENCIAS.		137
Apéndice A. LabVIEW.....		145
A.1	Partes de un Instrumento Virtual.	145
A.2	LabVIEW RT	148
A.3	LabVIEW FPGA	150

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1	La primer unidad de medición fasorial (PMU) construida en el laboratorio de investigación de sistemas de potencia del <i>Virginia Institute of Technology</i> [1]	3
Figura 1.2	Línea de Tiempo de una PMU [31]	7
Figura 2.1.	Diagrama de bloques de una PMU de medición de fasores	14
Figura 2.2.	Arquitectura de los WAMS [42]	18
Figura 2.3	Actualización de la estimación fasorial con N muestras en la ventana. El fasor 1 es calculado con muestras $n=0, \dots, N-1$, mientras que el fasor 2 es calculado con las muestras $n=1, 2, \dots, N$. θ es el ángulo entre las muestras sucesivas basado en el período de la frecuencia fundamental.....	23