



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR CON
MICROCONTROLADOR PARA LA DETECCIÓN DE
OSCILACIONES DE BAJA FRECUENCIA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA**

PRESENTA:

SALVADOR DAVID GARCÍA VEGA



Ciudad de México

2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de MÉXICO D. F. siendo las 17:00 horas del día 7 del mes de Diciembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E. S. I. M. E. ZAC. para examinar la tesis titulada:

“IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR CON MICROCONTROLADOR PARA DETECCIÓN DE OSCILACIONES DE BAJA FRECUENCIA”

Presentada por el alumno:

GARCÍA	VEGA	SALVADOR DAVID
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)

Con registro:

B	0	9	1	6	1	4
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

DR. DAVID ROMERO ROMERO

DR. RAÚL ÁNGEL CORTÉS MATEOS

DR. DAVID SEBASTIÁN BALTAZAR
Presidente

DR. DANIEL RUIZ VEGA
Secretario

DR. GERMÁN ROSAS ORTIZ
Tercer vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. JAIME ROBLES GARCÍA





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 7 del mes de Diciembre del año 2011, el (la) que suscribe **Salvador David García Vega** alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con número de registro B091614, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. **David Romero Romero** y del Dr. **Raúl Ángel Cortés Mateos** y cede los derechos del trabajo intitulado **“Implementación de un medidor con microcontrolador para detección de oscilaciones de baja frecuencia”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección davor_sd@hotmail.com, rcortes@ipn.mx y/o da_romero@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Salvador David García Vega

RESUMEN

Las oscilaciones están vinculadas a los sistemas eléctricos de potencia (SEP), por lo tanto no pueden ser eliminadas del comportamiento dinámico del SEP sino que en el caso de tener oscilaciones mal amortiguadas se diseñan procedimientos para que estas trabajen dentro de valores aceptables.

En el presente trabajo se analiza uno de los casos de oscilaciones mal amortiguadas y es el caso de las oscilaciones de baja frecuencia, las cuales pueden ser detectadas por medio de diferentes técnicas de análisis, de entre las cuales el método de Prony es el método de identificación modal más aceptado en el análisis de sistemas eléctricos de potencia.

Se realiza una evaluación al método de Prony utilizando señales ideales ante diferentes tipos de eigenvalores en el rango de las oscilaciones de baja frecuencia (0.5 a 3.5 Hz) y después utilizando datos obtenidos de un sistema de potencia se realiza la validación de los resultados obtenidos, que fueron validados con los resultados disponibles en la literatura especializada, así como con los resultados de programas de simulación comerciales.

Una vez validado el método de Prony se realiza la implementación utilizando un microcontrolador que nos permite obtener mediciones de potencia activa, potencia reactiva y magnitud de voltaje que serán la entrada para el método de Prony implementado y así comparar con los resultados obtenidos de las simulaciones.

Se realizaron los siguientes programas en computadora digital en distintos lenguajes de programación:

- Programa de medición de fasores sincronizados, con almacenamiento de variables en una memoria USB (lenguaje C en CodeWarrior 7.2).
- Programa de medición de fasores sincronizados, con envío de datos vía RS-232 al servidor. (lenguaje C en CodeWarrior 7.2).
- Programa del algoritmo Prony de detección de oscilaciones de baja frecuencia y recepción de datos vía un microcontrolador.(lenguaje MATLAB).

Para la prueba final se utilizó un simulador de sistemas eléctricos de potencia utilizando un sistema de medición implementado en un microcontrolador que a su vez envía la información obtenida mediante un cable RS-232 a un centro de detección de oscilaciones de baja frecuencia que muestra datos al usuario del sistema, los resultados obtenidos fueron comprobados con la simulación al sistema de potencia.

ABSTRACT

The oscillations are related to electric power systems (EPS) therefore can not be eliminated from the dynamic behavior of the SEP but in the case of poorly damped oscillations have procedures are designed so that they work within acceptable values.

This paper examines one case of poorly damped oscillations that is the case of low frequency oscillations, which can be detected by different analysis techniques, among which the Prony method is the method of modal identification accepted in the analysis of power systems.

An evaluation was made using the method of Prony ideal signals to different kinds of eigenvalues in the range of low-frequency oscillations (0.5 to 3.5 Hz) and then using data obtained from a power system performs validation of the results obtained, that were validated with results available in the literature and the results of commercial simulation software.

Once validated the Prony method is performed using a microcontroller implementation allows us to obtain measurements of active power, reactive power and voltage at the input terminals are for the Prony method and implemented and compared with the results of the simulations.

Were performed following digital computer programs in various programming languages:

- Programme for synchronized phasor measurement with variable storage on a USB stick (C language in Code Warrior 7.2).
- Programme for synchronized phasor measurement, with data sent via RS-232 to the server. (C language in Code Warrior 7.2).
- Program Prony algorithm for detecting low-frequency oscillations and receiving data via a microcontroller. (MATLAB language).

For the final test used a simulator electric power systems using a measurement system implemented in a microcontroller which in turn sends the information obtained through an RS-232 to a detection center of low-frequency oscillations of the data shows system user, the results were tested with the power system simulation.

CONTENIDO

Página

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS	XI
NOMENCLATURA	XIII
ABREVIATURAS	XIV
<i>CAPITULO 1.- INTRODUCCIÓN</i>	1
1.1 OBJETIVO	1
1.2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
1.3.- JUSTIFICACION	2
1.4.- ALCANCES Y LIMITACIONES	3
1.5.- ESTADO DEL ARTE	3
1.5.1.- Trabajos relevantes acerca del método de Prony	3
1.5.2. –Libros	5
1.5.3.- Tesis desarrolladas internacionalmente	5
1.5.3.- Tesis desarrolladas en SEPI ESIME	5
1.6.-ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE TESIS	6
<i>CAPITULO 2 OSCILACIONES DE BAJA FRECUENCIA EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA</i>	7
2.1 Introducción	7
2.2 Modos de oscilación en baja frecuencia	10
2.2.1 Oscilaciones modo local	10
2.2.2 Oscilaciones modo interárea	11
2.2.3 Oscilaciones de modos de control o inter- unidad	12
2.3.- Métodos de análisis de oscilaciones de baja frecuencia	13

	Página
2.3.1 Métodos de análisis modal	13
2.3.2 Métodos de identificación modal	17
CAPITULO 3.- EL MÉTODO DE PRONY	18
3.1.-Introducción al análisis de Prony	18
3.2.-Descripción del método de Prony	19
3.3.- Algoritmo de Prony	22
3.4.- Observaciones acerca del método de Prony.	23
CAPITULO 4.- DISEÑO DE SOFTWARE	25
4.1.- Requerimientos generales para el software implementado	25
4.2 Programación en tiempo real	27
4.2.1.- Tarea Sincroniza	30
4.2.2.- Tarea ADC	31
4.2.3.- Tarea Calcula	33
4.2.3.1.- Transformada discreta de Fourier	33
4.2.3.2.- Cálculo de Potencia activa y Potencia reactiva	36
4.2.4.- Tarea USB	36
4.3 Comunicación utilizando RS-232	37
4.4 Programación del método de Prony	39
CAPITULO 5.- PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
5.1 Pruebas a señales ideales sin ruido	43
5.1.1.- Condiciones previas	43
5.1.2.-Fase 1 (movimiento de eigenvalores en baja frecuencia)	44
5.1.2.1 Descripción de la prueba	44
5.1.2.2 Resultados de la prueba	45
5.1.2.3.-Análisis de la prueba	47

	Página
5.1.3.-Fase 2 (Comparación moviendo el orden del polinomio de aproximación)	48
5.1.3.1 Descripción de la prueba	48
5.1.3.2 Resultados de la prueba	48
5.1.3.3 Análisis de la prueba	51
5.1.4.-Fase 3 (Análisis de tiempo de muestreo)	51
5.1.4.1 Descripción de la prueba	51
5.1.4.2 Resultados de la prueba	52
5.1.4.3 Análisis de la prueba	52
5.2.- Prueba con sistema de potencia de dos áreas	54
5.2.1.- Descripción de la prueba	54
5.2.2 Resultados de la prueba	57
5.2.3 Análisis de la prueba	58
5.3 Implementación utilizando simulador de sistemas de potencia en tiempo real	60
5.3.2 Prueba en línea	60
5.3.2.1.- Descripción de la prueba	60
5.3.2.2. Resultados de la prueba	61
5.3.2.3 Análisis de la prueba	63
CAPITULO 6.- CONCLUSIONES	64
6.1 Conclusiones	64
6.1.1 Algoritmo de medición de fasores utilizando programación en tiempo real.	64
6.1.2 Algoritmo de detección de oscilaciones de baja frecuencia.	64
6.2 Aportaciones	66
6.3 Recomendaciones para trabajos futuros	66
REFERENCIAS	67
APENDICE A.- DATOS SISTEMA DE POTENCIA DE DOS ÁREAS	71

	Página
APENDICE B.- HARDWARE	74
B.1 Introducción	74
B.2 Microcontrolador Coldfire version 2 MCF 52259	74
B.2.1 Diagrama a bloques	76
B.2.2 ADC	78
B.2.3 Temporizadores	79
B.2.4 Pines de entrada y salida de propósito general (GPIO)	79
B.2.5 Reloj de tiempo real.	80
B.2.6 Controlador USB On-The-Go	80
B.2.7 Interfaz de comunicación serial.	80
B.3 Interface adecuadora de señal	81
B.3.1 Acondicionamiento de señales de voltaje de CA.	82
B.3.1.1 Análisis en corriente alterna.	82
B.3.1.2 Análisis en corriente directa	83
APENDICE C.- LA PROGRAMACION EN TIEMPO REAL	84
C.1 Introducción	84
C.2 MQX	84
C.2.1 organización de MQX	84
C.2.2 inicialización	85
C.2.3 Administrador de tareas	85
C.2.4 Programación de tareas	86
C.2.5 Sincronización de tareas	86
C.2.5.1 Eventos ligeros	86
C.2.5.2 Eventos	86
C.2.5.3 Semáforos ligeros	87

	Página
C.2.5.5 Exclusiones mutuas	87
C.2.5.6 Mensajes	87
C.2.5.7 Fila de tareas	87
C.2.6. Elementos temporizadores.	88
C.2.6.1. introducción	88
C.2.6.2. Temporizadores ligeros	88
C.2.6.3. Temporizadores.	88
C.2.7. Plantillas de trabajo para tareas.	88
C.2.8. Asignación de la prioridad de tareas	89

LISTA DE FIGURAS

	Página
<i>Figura 2.1.- Diferentes modos de oscilación en un sistema de potencia interconectado (adaptado de [11]).</i>	12
<i>Figura 3.1.- Algoritmo general de Prony</i>	22
<i>Figura 4.1.- Esquema general de proyecto implementado</i>	26
<i>Figura 4.2.-Partes generales del proyecto desde el punto de vista del software</i>	26
<i>Figura 4.3 Sincronización de las tareas.</i>	28
<i>Figura 4.4 Diagrama de flujo de programa de medición de variables.</i>	29
<i>Figura 4.5.- Diagrama de secuencia de tareas.</i>	30
<i>Figura 4.6 Diagrama de estados tarea sincroniza.</i>	31
<i>Figura 4.7 Diagrama de estados de la tarea ADC.</i>	32
<i>Figura 4.8. Muestra de la señal de entrada medida por el ADC.</i>	34
<i>Figura 4.9. Componentes rectangulares de la señal de entrada.</i>	35
<i>Figura 4.10.Magnitud de la señal de entrada.</i>	35
<i>Figura 4.11.Angulo de la señal de entrada.</i>	35
<i>Figura 4.10 Diagrama de estados de la tarea USB.</i>	37

	Página
<i>Figura 4.11 Secuencia de la interface de comunicación.</i>	38
<i>Figura 4.12 Diagrama de flujo del programa de Prony.</i>	39
<i>Fig. 5.1. Comparación de los polinomios característicos de señales de entrada con los polinomios obtenidos del método de Prony de la fase 1</i>	46
<i>Figura. 5.2. Comparación de las señales de entrada caso inicial y caso crítico.</i>	47
<i>Figura. 5.3. Comparación de la señal de entrada caso crítico con el método de Prony a diferentes órdenes de aproximación.</i>	51
<i>Figura 5.4 Comparación de la señal de entrada para el caso especial contra el algoritmo de Prony a diferentes tiempos de muestreo con orden 12.</i>	53
<i>Figura 5.5 Comparación de la señal de entrada para el caso especial contra el algoritmo de Prony a diferentes tiempos de muestreo con orden 24.</i>	53
<i>Figura 5.6. Puntos a analizar del sistema de potencia de dos áreas.</i>	55
<i>Figura 5.7. Señal de entrada de la potencia activa especificando el área de análisis</i>	55
<i>Figura 5.8. Señal de entrada para la potencia reactiva especificando el área de análisis.</i>	56
<i>Figura 5.9. Señal de entrada para el voltaje especificando el área de análisis.</i>	56
<i>Fig. 5.10. Sistema de potencia de dos áreas pre cargado en el simulador de sistemas de potencia en tiempo real</i>	60
<i>Figura A.1 Diagrama unifilar del sistema de dos áreas de [10]</i>	71
<i>Figura A.2.- Sistema de excitación DC1</i>	73

	Página
<i>Figura B.1 Tarjeta de desarrollo MCF 52259</i>	74
<i>Figura B.2 Microprocesador de 100 pines</i>	76
<i>Figura B.3 Diagrama a bloques de MCF 5225x</i>	76
<i>Figura B.4 Diagrama a bloques de alto nivel del dispositivo</i>	77
<i>Figura B.5 Configuración de puertos del conector J1</i>	79
<i>Figura B.6 Circuito acondicionador de señal de VAC</i>	81
<i>Figura B.7.- Circuito resultante con fuente de CA en corto</i>	82
<i>Figura C.1.- Organización de MQX</i>	85

LISTA DE TABLAS

	Página
<i>Tabla 4.1 Características de programación de uno de los canales del ADC utilizado</i>	32
<i>Tabla 5.1. Comparación método de Prony señal ideal utilizando diferentes valores de muestras para el análisis en el polinomio de aproximación</i>	44
<i>Tabla 5.2. Comportamiento de método de Prony ante diferentes entradas ideales</i>	45
<i>Tabla 5.3. Comparación variando el orden en el algoritmo de Prony ante una señal de entrada con eigenvalores $-2 + 12i$, $-2 - 12i$, $-3 + 3i$, $-3 + 3i$</i>	48
<i>Tabla 5.4. Comparación variando el orden en el algoritmo de Prony ante una señal de entrada con eigenvalores $-2 + 10i$, $-2 - 10i$, $-3 + 3i$, $-3 + 3i$</i>	49
<i>Tabla 5.5. Comparación variando el orden en el algoritmo de Prony ante una señal de entrada con eigenvalores $-2 + 8i$, $-2 - 8i$, $-3 + 3i$, $-3 + 3i$</i>	49
<i>Tabla 5.6. Comparación variando el orden en el algoritmo de Prony ante una señal de entrada con eigenvalores $-2 + 6i$, $-2 - 6i$, $-3 + 3i$, $-3 + 3i$</i>	50
<i>Tabla 5.7. Comparación variando el orden en el algoritmo de Prony ante una señal de entrada con eigenvalores $-2 + 4i$, $-2 - 4i$, $-3 + 3i$, $-3 + 3i$</i>	50
<i>Tabla 5.8 Comparación de diferentes tiempos de muestreo para caso especial</i>	52
<i>Tabla 5.9. Análisis de resultados obtenidos con el algoritmo de Prony y el programa PSAT prueba con potencia activa y potencia reactiva</i>	57

	Página
<i>Tabla 5.10. Análisis de resultados obtenidos con el algoritmo de Prony y el programa PSAT prueba con la variable voltaje en terminales</i>	58
<i>Tabla 5.11. Comparación de los eigenvalores de oscilaciones de baja frecuencia utilizando el método de Prony con algunas paqueterías comerciales (Adaptado de [4])</i>	59
<i>Tabla 5.12. Resultados obtenidos de la implementación del algoritmo de Prony y el programa PSAT prueba utilizando la magnitud de voltaje.</i>	61
<i>Tabla 5.13. Resultados obtenidos de la implementación del algoritmo de Prony y el programa PSAT prueba utilizando la Potencia Activa.</i>	62
<i>Tabla 5.14. Resultados obtenidos de la implementación del algoritmo de Prony y el programa PSAT prueba utilizando la magnitud de voltaje.</i>	63
<i>Tabla A.1.- Datos de la red de transmisión</i>	71
<i>Tabla A.2.- Datos de los buses</i>	72
<i>Tabla A.3.- Parámetros de la maquina síncrona del sistema</i>	72
<i>Tabla A.4.- Parámetros para el sistema de excitación tipo DC1</i>	73

NOMENCLATURA

λ_i	i-ésimo eigenvalor
ζ	relación de amortiguamiento
σ	Factor de amortiguamiento
h_k	Amplitud compleja
z_k	Exponencial compleja
A_k	Amplitud de la exponencial compleja
p	Numero de exponenciales complejas
θ_k	Fase relativa
f_k	Frecuencia de oscilación
T	Periodo
$\varphi(z)$	Polinomio de aproximación
$a(m)$	Coefficientes constantes del polinomio de aproximación
$x(n)$	Muestra
$\hat{x}(n)$	Aproximación de la señal de entrada del método de Prony
R_i	i-ésima matriz residual
A	Matriz de estado de dimensión n x n
V	Magnitud de voltaje
δ	Angulo del fasor de voltaje
P_G	Potencia activa de generación
Q_G	Potencia Reactiva de generación
P_d	Potencia activa demandada
Q_d	Potencia reactiva demanda
H	Constante de inercia.
D	Coefficiente de amortiguamiento
R_a	Resistencia del estator
X_l	Reactancia de fuga
X_d	Reactancia síncrona en el eje directo
X_q	Reactancia síncrona en el eje en cuadratura
X'_d	Reactancia transitoria en el eje directo.
X'_q	Reactancia transitoria en el eje en cuadratura.
T'_{d0}	Constante de tiempo transitoria de circuito abierto en el eje directo.
T'_{q0}	Constante de tiempo transitoria de circuito abierto en el eje en cuadratura.
X''_d	Reactancia subtransitoria en el eje directo.
X''_q	Reactancia subtransitoria en el eje en cuadratura.
T''_{d0}	Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto en el eje directo
T''_{q0}	Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto en el eje en cuadratura
ReX	Parte real de vector de X
ImX	Parte imaginaria del vector X

ABREVIATURAS

ADC	"Analog-to-Digital Converter" por sus siglas en inglés
AVR	"Automatic Voltage Regulator" por sus siglas en Inglés
CA	Corriente Alterna
CAN	"Controller Area Network" por sus siglas en Inglés
CD	Corriente Directa
CAU	"Cryptography Acceleration Unit" por sus siglas en Inglés
CEV	Compensador Estático de Vars
CFM	"Coldfire Flash Module" por sus siglas en Inglés
CIGRE	"Conseil International des Grandes Reseaux Électriques" en francés
DFT	"Discrete Fourier Transform" por sus siglas en Inglés
DMA	"Direct Memory Access" por sus siglas en Inglés
DSAT	"Dynamic Security Assessment Tools" por sus siglas en inglés.
FEC	"Fast Ethernet controller" por sus siglas en Inglés
FIFO	"First in, first out" en Inglés
GPIO	"General Purpose I/O Timing" por sus siglas en Inglés
GPS	"Global Positioning System" por sus siglas en Inglés
HVDC	"High Voltage Direct Current" por sus siglas en inglés
NVM	"Non-Volatile Memory" por sus siglas en Inglés
PMU	"Phasor Measurement Unit" por sus siglas en ingles
PSAT	"Power System Analysis Toolbox" en Inglés
PSS	"Power system Stabilizers" por sus siglas en Inglés
PSS/E	"Power System Simulator" por sus siglas en Inglés
PWM	"Pulse Width Modulation" por sus siglas en Inglés
QSPI	"Queued serial peripheral interface" por sus siglas en Inglés
RMS	"Root Mean Square" por sus siglas en Inglés
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
SNR	"Signal to noise ratio" por sus siglas en inglés.
SSAT	"Small Signal Analysis Tool" por sus siglas en Inglés
UART	"Universal Asynchronous/synchronous Receiver Transmit" en Inglés
USB	"Universal Serial Bus" por sus siglas en Inglés
WSCC.	"Western Electricity Coordinating Council" por sus siglas en inglés

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de Potencia (SEP) son sistemas complejos, no lineales y en el cual se presentan oscilaciones, las cuales no pueden ser eliminadas del comportamiento dinámico del SEP, para enfrentar esta problemática se llevan a cabo técnicas para amortiguar las oscilaciones ubicándolas en valores que no representen problemas más severos en el comportamiento y para los diferentes equipos conectados a la red.

Por esta razón el detectar las oscilaciones mal amortiguadas toma una especial valía ya que el determinar la naturaleza de las oscilaciones nos permitirá encontrar las soluciones disponibles para el problema planteado, con este propósito se utilizan diversas técnicas de análisis modal para determinar los valores propios que dan origen a estas oscilaciones mal amortiguadas.

Por otro lado en la actualidad se cuenta con un mayor monitoreo del comportamiento de los sistemas eléctricos de potencia utilizando equipos sofisticados de medición, en este trabajo se utilizan mediciones de una red de la cual se monitorean variables indirectas y con las cuales se realiza una detección de oscilaciones de baja frecuencia utilizando una herramienta muy utilizada para la identificación de modos de un SEP que es el método de Prony y que se desarrolla utilizando la técnica para trabajar en análisis de un sistema de potencia en tiempo real.

Se desarrolló un sistema de detección de oscilaciones de baja frecuencia en línea lo que nos permite monitorear el comportamiento modal de un nodo de la red de potencia implementado. Logrando así una mayor capacidad de respuesta ante un problema de oscilaciones de baja frecuencia ya que se identifican los valores propios oscilatorios en la red y así se puede determinar la estrategia de control de manera más rápida para el sistema de potencia analizado.

1.1 OBJETIVO.

Realizar la detección de oscilaciones de baja frecuencia en un sistema de potencia en línea utilizando mediciones sincronizadas de fasores mediante un microcontrolador.

1.2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- *Calcular mediante los fasores medidos el voltaje, las potencias activa y reactiva de la señal obtenida de los buses de un simulador de sistemas de potencias con el sistema de dos áreas cargado.*
- *Analizar el comportamiento del método de Prony ante diferentes tipos de señales con oscilaciones de baja frecuencia.*
- *Detectar las oscilaciones de baja frecuencia de la red utilizando el algoritmo de Prony.*

1.3.- JUSTIFICACIÓN

Las oscilaciones mal amortiguadas de frecuencia en sistemas eléctricos de potencia representan un problema latente para las compañías encargadas del suministro de energía, estas oscilaciones son provocadas actualmente debido a las operaciones de los SEP's más cercanas a los límites físicos, el uso de sistemas de excitación con respuesta más rápida, se pueden mencionar entre las causas más importantes.

Es indispensable en nuestros días tener en cuenta estudios que se encarguen del monitoreo de las oscilaciones de baja frecuencia y así determinar si el SEP de interés tiende a tener problemas de estabilidad ante pequeños disturbios, una vez detectado los valores que caracterizan a la oscilación detectada será de mayor facilidad encontrar la solución posible al problema.

En la actualidad se cuenta con sistemas de monitoreo de diferentes variables en el SEP, en el presente trabajo se utilizan variables medidas en los nodos de un SEP para la detección de oscilaciones lo que permite una detección de oscilaciones de baja frecuencia a partir de mediciones realizadas al SEP en tiempo real. El utilizar mediciones en tiempo real re potencializa la capacidad de respuesta del sistema ante posibles disturbios.

Adicionalmente a las justificaciones ya presentadas, se brinda a los trabajos futuros una herramienta de medición, almacenamiento de variables y comunicación utilizando microcontroladores programados con un sistema operativo en tiempo real, utilizando mediciones en un simulador de SEP, así como una herramienta para la medición de oscilaciones de baja frecuencia como lo es método de Prony realizando una evaluación en diferentes casos del método.

1.4.- ALCANCES Y LIMITACIONES

Se presenta un desarrollo del algoritmo de Prony para detectar oscilaciones de baja frecuencia, con una implementación del método probando su eficacia ante diferentes señales de entrada validando los resultados en cada fase de análisis al método.

El algoritmo de detección presentado en este trabajo utiliza el método de Prony que realiza una aproximación de un sistema lineal, lo que nos permite utilizar un análisis de SEPs ante pequeños disturbios, los eigenvalores encontrados con el método representan solo aquellos con comportamiento oscilatorio en baja frecuencia.

En la implementación con el microcontrolador se realizan mediciones de 30 fasores por segundo que representa la velocidad más rápida obtenida con la programación y equipo utilizado en el presente trabajo.

1.5.- ESTADO DEL ARTE

1.5.1.- Trabajos relevantes acerca del método de Prony.

Los métodos de identificación modal consisten en métodos matemáticos que extraen los diferentes modos de oscilación presentes en el sistema a partir de simulaciones en el dominio del tiempo o mediciones reales del SEP de interés. Estos métodos son más experimentales en comparación con los métodos de análisis modal y la tendencia de éstos apunta al desarrollo de herramientas que les permitan obtener características adicionales del sistema que se esté analizando como funciones de transferencia, análisis de sensibilidad, entre otros.

En Hauer *et al.* (1990) [1], en este trabajo se hace un breve resumen matemático del método de Prony, algunas características importantes acerca del uso del método de Prony en estudios de estabilidad transitoria. Los resultados que se presentan para el análisis modal y la construcción de modelos detallados son basados en datos de la respuesta obtenida a través de pruebas de gran escala del WSCC.

En Grund *et al.* (1993) [2], se hace una comparación entre el análisis de eigenvalores y el análisis de Prony tanto para la estimación del amortiguamiento de las oscilaciones presentes en un SEP, como para la generación de datos en el dominio de la frecuencia a ser usados en el diseño de controles para SEP's. Además este trabajo hace una corrección a la formulación de la relación señal ruido hecha en [1].

En Hauer *et al.* (1997) [3], se expone que debido a que la simulación en línea no ha alcanzado ni la velocidad ni el detalle de modelado necesarios para la seguridad dinámica en línea una solución intermedia es aplicar un monitoreo continuo y más riguroso del comportamiento dinámico del SEP con el objetivo de poder detectar problemas y poder tomar medidas correctivas en forma oportuna.

En Kaberere et al. (2005) [4], se presenta la experiencia adquirida en la comparación de una serie de grado industrial de herramientas de simulación del sistema eléctrico. Se llevó a cabo un análisis de eigenvalores del sistema de potencia de dos áreas de cuatro generadores con PSS / E, DigSILENT, EUROSTAG y PST.

En Trudnowski (1997) [5], se hace una comparación de la forma en que afectan las no linealidades presentes en el sistema a los resultados obtenidos a partir del análisis modal y el análisis de Prony. Se encontró que existen diferencias significativas entre ambos métodos cuando se utilizan límites muy estrictos en el sistema de excitación en el momento que ocurren las oscilaciones.

En Trudnowski (1999) [6], se hace un análisis de varias señales en forma simultánea como extensión al método de Prony resultando mejor precisión en las estimaciones modales y la simplificación de los pasos del análisis. Se analiza la forma en que el ruido presente en una señal analizada afecta el proceso de identificación modal haciendo difícil el comparar los resultados obtenidos a partir de diferentes señales correspondientes a un mismo sistema. Para superar este problema en este trabajo se propone extender el método de Prony para analizar varias señales al mismo tiempo

En Ding *et al.* (2010) [7], se propone un método de identificación modal basado en el análisis de Prony, en donde se realiza el pre procesamiento del resultado del análisis de Prony, la identificación de modo predominante y la agrupación de los generadores, se proponen tres índices para detectar el modo dominante El primero es la relación entre la amplitud y coeficiente de amortiguamiento, el segundo es el modo de energía y la tercera es la amplitud de modo de decaimiento sinusoidal después de un período de oscilación. Los resultados de la simulación en un sistema de dos área cuatro máquinas, y el sistema de treinta y nueve nodos, diez generadores de Nueva Inglaterra en el programa DSAtools [36] con la validación del método propuesto.

En Zhou et al. (2010) [8], se hace un estudio de oscilaciones electromecánicas utilizando el método de Prony usando datos de una unidad medidora fasorial (PMU en inglés), lleva a cabo una aplicación en línea para realizar las estimaciones modales del sistema de 17 nodos validando con simulaciones, demuestra que es capaz de realizar una detección de oscilaciones en línea utilizando el método de Prony.

En Liang *et al.* (2010) [9], se hace una modificación al método de Prony realizando ventanas de análisis recursivos para realizar la detección de eigenvalores oscilatorios se hace un estudio de la propuesta con señales ideales sin ruido, se utiliza en este trabajo el estudio con valores singulares del método de Prony.

1.5.2.-Libros

En el libro de Kundur (1994) [10], se obtuvieron conceptos relacionados con la estabilidad ante pequeños disturbios de un SEP; se obtienen de este libro la clasificación de las oscilaciones de baja frecuencia, la descripción de análisis de eigenvalores y resultados, y los datos para la simulación del sistema de dos áreas

En el libro de Pai *et al.* (2005) [11], se realiza un estudio histórico importante de las oscilaciones de baja frecuencia en sistemas de potencia, también se hace una descripción de estabilidad a pequeños disturbios y la clasificación de los métodos de detección.

En el libro de Rogers (2000) [12], se obtuvieron conceptos relacionados a las oscilaciones de baja frecuencia, su clasificación y la forma en que es afectado el cálculo de éstas conforme el modelado del SEP es más detallado. Al mismo tiempo aborda conceptos teóricos acerca del análisis modal en lo concerniente a los eigenvalores.

En libro de Scharf (1991) [13], se obtiene de este trabajo la descripción original del método de Prony y las mejoras realizadas al método por otros autores, también se hacen descripciones del análisis de series de tiempo, utilización del método de detección y la estimación modal. En este libro se hace una descripción de las técnicas de análisis modal más utilizadas con su formulación matemática.

1.5.3.- Tesis desarrolladas internacionalmente

En Wee. Tan (2003) [14], Este proyecto describe el análisis de Prony y su aplicación a la evaluación de la estabilidad del sistema de potencia. Se utiliza el análisis de Prony para determinar el modo peculiar del modelo del sistema linealizado alrededor de un punto específico de operación.

1.5.4.- Tesis desarrolladas en la SEPI-ESIME

En Cuvas (2006) [15], se presenta la implementación de un medidor fasorial, sincronizado vía satélite mediante un módulo receptor GPS, se realizan mediciones de fasores de voltaje y corriente de un sistema trifásico a 60 HZ, los fasores calculados y el estampado de tiempo, son enviados mediante un puerto de comunicación serial RS-232 a una PC. De esta tesis es importante destacar los algoritmos para la medición de fasores.

En Hernández-Gómez (2009) [16], se analizan diferentes algoritmos para el cálculo de fasores a partir de una señal discreta, se describen los algoritmos matemáticos y se justifica la utilización de la transformada Discreta de Fourier para la estimación de fasores en el PMU estandarizado.

En Villarreal (2008) [17], se presentan los conceptos básicos del análisis de oscilaciones y del de análisis modal por el método QR. Adicionalmente, los resultados del análisis modal se compararon con los de programas de simulación en el tiempo que emplean al modelo no-lineal del sistema por medio del análisis de Prony.

En Reyes, 2005 [18] se presenta una alternativa para analizar la estabilidad del sistema eléctrico de potencia ante disturbios pequeños, el sistema de prueba es el sistema máquina síncrona bus-infinito y su estabilidad se determina utilizando una red neuronal. En este trabajo la determinación de la estabilidad se realiza como un reconocimiento de patrones. De esta manera la identificación de la estabilidad se puede realizar más fácil y eficientemente que mediante el cálculo y análisis de eigenvalores.

1.6.- ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE TESIS

En el capítulo 1 se describen los objetivos, la justificación, el alcance y las limitaciones, el estado del arte y la estructura de la tesis.

En el capítulo 2 se aborda de manera general el fenómeno de las oscilaciones de baja frecuencia en los sistemas de potencia, la clasificación de estas y los métodos que se utilizan para la detección, describiendo los métodos de análisis modal y métodos de identificación modal, sirviendo como preámbulo a la utilización del método de Prony.

En el capítulo 3 se realiza la formulación matemática del algoritmo de Prony, dando los conceptos generales que se utilizaron para la programación del mismo. También en esta parte se agregan algunas consideraciones que se han realizado acerca del método.

En el capítulo 4 se muestran las descripciones de los programas utilizados para la realización del proyecto, en este capítulo es posible tener un mejor panorama de cómo son sincronizadas las tareas, los tiempos que lleva cada tarea y la relación existente entre el programa en el microcontrolador y el método de Prony, haciendo el seguimiento de cada programa mediante distintos tipos de diagramas.

En el capítulo 5 se recopilan todas las pruebas realizadas al método de Prony partiendo de pruebas a señales ideales, pasando por una simulación a un sistema de potencia y llegando a la ejecución de la prueba final, se muestran los resultados y el análisis de cada uno de ellos.

En el capítulo 6 se enlistan las conclusiones a las que se llega con la realización de este trabajo, también se mencionan las aportaciones y se hacen algunas observaciones para realizar trabajos futuros

CAPÍTULO 2:

OSCILACIONES DE BAJA FRECUENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

En este capítulo se realiza una breve descripción del fenómeno de las oscilaciones de baja frecuencia en los sistemas de potencia, una clasificación de los modos oscilatorios y los métodos analíticos utilizados para detectar las oscilaciones

2.1 introducción

En la primera parte del siglo XX el fenómeno de las oscilaciones de baja frecuencia empezó a convertirse en un problema para los ingenieros de sistemas de potencia, en esta etapa el fenómeno de las oscilaciones de baja frecuencia fue conocido como una variación periódica de la velocidad [11]. El fenómeno hizo su aparición con la interconexión de generadores a los sistemas de potencia a través de líneas largas de transmisión.

Algunos de los problemas encontrados en esa etapa del siglo fueron que los generadores que alimentan pequeñas cargas eran susceptibles a sufrir las llamadas variaciones periódicas, y por otro lado cuando los generadores síncronos eran sobrecargados tendían a perder sincronismo en una inestabilidad monótona o no oscilatoria, estos dos fenómenos fueron definidos con el nombre de "*Estabilidad en estado estacionario*". Las oscilaciones de baja frecuencia eran debidas a un inadecuado par de amortiguamiento y la inestabilidad no oscilatoria era provocada por un inadecuado par de sincronización [11].

Después de investigaciones y el estudio de métodos analíticos para predecir la estabilidad de los sistemas de potencia, se introdujeron devanados de amortiguamiento y demostraron ser eficaces en la prevención de las oscilaciones de baja frecuencia, también se discutieron los problemas provocados por las líneas largas de transmisión en la estabilidad y en las oscilaciones y el efecto que provocarían los reguladores de voltajes en estos dos aspectos [11].

En los años 1960 el problema de las pequeñas oscilaciones en sistemas potencia presentó problemas para la operación del sistema, estas oscilaciones que aparecieron en los sesentas fueron descritas como inestabilidad dinámica, pequeñas oscilaciones u oscilaciones de baja frecuencia en sistemas de potencia.

La confiabilidad en los sistemas de potencia se convirtió cada más importante, los requerimientos para que el sistema fuera capaz de recuperarse ante fallas por la acción de un relevador se añadió a las especificaciones del diseño del sistema.

El rápido control automático de voltaje se utiliza para prevenir a los generadores del sistema perdiendo sincronismo después de una falla. Los rápidos sistemas de excitación, tienden a disminuir el amortiguamiento del sistema ante oscilaciones, originalmente las oscilaciones que más afectaban eran las provocadas en generadores estrechamente unidos, para amortiguar estas oscilaciones fueron introducidos los estabilizadores de sistemas de potencia (PSS en inglés) [12].

En los años 1950 y 1960, las compañías de suministro eléctrico encontraron que podían lograr mayor confiabilidad y mejorar la economía mediante la interconexión con otras compañías, a menudo estas interconexiones era mediante líneas de transmisión muy largas, con las cuales las oscilaciones de baja frecuencia fueron aumentando. En algunas ocasiones el bajar la ganancia de los convertidores automáticos de voltaje fue suficiente para realizar una interconexión exitosa [12].

Desde el punto de vista de la operación del sistema, las oscilaciones son aceptables a medida que estas decaigan. Sin embargo, las oscilaciones son una característica del sistema, estas inician con pequeños cambios de carga normales en los sistemas de potencia, una operación no alarmante para el operador se considera cuando en una nueva condición de operación la oscilación decrece en magnitud [12].

Un aumento en el flujo de la línea de unión de tan solo 10 MW puede hacer la diferencia entre las oscilaciones en descomposición que son aceptables y aquellas oscilaciones en aumento que son capaces provocar el colapso del sistema. Por supuesto, una gran perturbación puede dar lugar a oscilaciones en crecimiento que también pueden colapsar el sistema.

Existen muchas razones para la reaparición de las oscilaciones de baja frecuencia algunas de las más importantes son [19]:

- *Para oscilaciones entre sistemas, los devanados de amortiguamiento ya no son efectivos, ya que la amortiguación producida se reduce en proporción aproximadamente inversa al cuadrado de la eficacia de la impedancia externa más la impedancia del estator, y por lo tanto va desapareciendo.*
- *La proliferación de controles automáticos ha incrementado la probabilidad de interacciones adversas entre sistemas interconectados.(incluso sin tales interacciones, los dos controles básicos del sistema como el regulador de velocidad y regulador automático de voltaje(AVR en inglés), casi siempre produce amortiguamiento negativo en el rango de frecuencias de oscilación de los sistemas de potencia, muy pequeño en los efectos del gobernador y muy grande en los AVR)*

- *A pesar de que los controles automáticos son prácticamente los únicos dispositivos que pueden producir amortiguamiento negativo, el amortiguamiento del sistema sin control en sí es muy pequeño y fácilmente podría ser provocado por los continuos cambios de carga y generación del sistema y daría como resultado oscilaciones de potencia en los lazos de interconexión.*
- *Una pequeña oscilación en cada generador, puede sumar a una oscilación en las líneas de enlace y provocar un problema significativo en relación con su clasificación.*
- *El aumento de líneas de enlace incrementa la tendencia a oscilar del sistema*

Para calcular el efecto del amortiguamiento del sistema, el detalle de la representación del sistema tiene que ser ampliado considerablemente. El resto de parámetros requeridos para un estudio ampliado son mucho menos conocidos que las inercias del generador y las impedancias de la red necesarios para los estudios clásicos [19]. Además, el total de amortiguamiento de un sistema de potencia suele ser muy pequeño y está conformado de componentes positivos y negativos. Por lo tanto, si se desea obtener resultados reales, se deben incluir todas las fuentes conocidas. Estas fuentes incluyen: impulsores, reguladores de velocidad, cargas eléctricas, la resistencia del circuito, devanados de amortiguamiento, la excitación del generador y, de hecho, todos los controles que pueden añadirse para fines especiales. En las grandes redes, y en particular en lo que se refiere a las oscilaciones, se depende de dos elementos para producir la amortiguación positiva son las cargas eléctricas (al menos para generadores accionados por las turbinas de vapor) y la fuerza motriz [19].

Mayor amortiguamiento reduciría la tendencia a oscilar y la magnitud de las oscilaciones. Las razones por las cuales los sistemas de potencia a menudo son problemáticos son distintas, dependiendo de la naturaleza del sistema y las condiciones de operación.

Además de la pequeña reseña aquí realizada acerca de cómo las oscilaciones han crecido en importancia a medida que las interconexiones crecieron en extensión, existe un caso específico que parece haber precipitado la idea general de brindarle mayor importancia y mejorar el amortiguamiento del sistema, así como el reconocimiento general del regulador de voltaje como el mayor culpable en la generación de amortiguamiento negativo, esta fue la serie de estudios de la estabilidad transitoria de la interconexión del pacifico con la costa oeste de los Estados Unidos de América, en estos estudios, se notó que para fallas trifásicas, la inestabilidad fue determinada no por los primeros cambios en los generadores si no por la inestabilidad oscilatoria del sistema de post falla, que no tenía una de dos secciones de líneas de corriente alterna y así se incrementó la impedancia. Esto demostró que el amortiguamiento es importante para estudios transitorios como para condiciones en estado estable y ha contribuido al incremento en el uso de los estabilizadores de

sistemas de potencia en los reguladores de voltaje del generador como la solución para todos los males oscilatorios [19].

Pero el incremento de las redes eléctricas y el incremento de las cargas han mostrado que no es suficiente solo con el uso de PSS. Cuando se añade soporte de voltaje en puntos adecuados de la red, no solo aumenta su fuerza (es decir, el aumento de potencia de sincronización o menor transferencia de impedancia), sino también mejora el amortiguamiento para aliviar los generadores de buena parte de la regulación de voltaje y también reducir la ganancia del regulador, sea o no el objetivo reducir el amortiguamiento.

Las oscilaciones en sistemas de potencia en su conjunto todavía pueden ocurrir en un sistema aislado, debido al gobernador de banda muerta o la interacción con el sistema de control de frecuencia, pero no es probable que estos problemas ocurran entre grandes sistemas interconectados. Estas oscilaciones ocurren más en las interconexiones en una red a través de la constitución de subsistemas, especialmente a través de enlaces débiles o líneas altamente cargadas, en nuestros días para un adecuado plan de enlace de interconexión las líneas tienden a ser altamente cargadas, así en el comportamiento dinámico la línea es débil en cuanto a oscilaciones se refiere, Ahora también existen líneas de acceso abierto que puede obligar a una compañía al uso de casi de todas las líneas para la transmisión de energía, esto sin duda disminuye la fiabilidad y el amortiguamiento, dependiendo de la ubicación de la generación agregada.

2.2.- Modos de oscilación en baja frecuencia

Para identificar el tipo de oscilación que está ocurriendo en el sistema la mejor indicación es la frecuencia de oscilación. Entonces es importante clasificar los modos existentes en los sistemas de potencia para identificar el tipo de problemática a la cual se está enfrentando el sistema de potencia.

En lo que se refiere a oscilaciones de baja frecuencia los SEP's han experimentado problemas con los siguientes tipos de oscilaciones de frecuencia [10].

- *Oscilaciones de modo local.*
- *Oscilaciones de modo interárea.*
- *Oscilaciones de modo de control.*

2.2.1.-Oscilaciones de modo local

El término local es usado por que las oscilaciones son localizadas en una estación o una parte pequeña del sistema. Estas oscilaciones son problemáticas en particular cuando la planta está altamente cargada y tiene una gran reactancia equivalente de transmisión.

El modo local o modo de planta es uno de los más comunes en los sistemas de potencia y están asociados con unidades en una estación de generación oscilando con respecto al resto del sistema de potencia [12].

Tales problemas son usualmente provocados por la acción de los AVR de las unidades de generación operando con una salida alta y que alimentan a redes de transmisión débiles. El problema es mayor con sistemas excitación de respuesta rápida.

El modo local presenta frecuencia típicas de 0.7 a 2 HZ. Para preservar un coeficiente de par de sincronización alto y restaurar el par de amortiguamiento, deben ser instalados PSS's. En general cuando un PSS no es aplicado, un sistema de excitación de banda ancha y actuación rápida tiene un gran potencial de desestabilizar las oscilaciones de modo local. La aplicación de un PSS sintonizado adecuadamente en los sistemas de excitación de alta respuesta contribuye a que las oscilaciones de baja frecuencia tengan un amortiguamiento positivo [10].

2.2.2.-Oscilaciones de modo interárea

Las oscilaciones interárea están asociadas con máquinas en una parte del sistema oscilando con máquinas otra parte. Estas oscilaciones son causadas por dos o más grupos de máquinas fuertemente acoplados, interconectados con líneas débiles. Las frecuencias con las cuales se identifica a este modo de oscilación van de 0.1 a 0.7 Hz.

Los grandes sistemas interconectados existentes presentan dos formas distintas de modo interárea:

- 1. Modos de frecuencia muy bajos, los cuales involucran a todos los generadores del sistema. El sistema es básicamente dividido en dos partes, con los generadores de una parte oscilando en contra de las máquinas de la otra parte. El rango de frecuencia en el que se encuentra este tipo de oscilaciones de modo interárea es de 0.1 a 0.3 Hz [10].*
- 2. Oscilaciones de modo interárea con una frecuencia un poco mayor a las anteriores, las cuales involucran subgrupos de generados oscilando en contra de los otros. La frecuencia de estas oscilaciones esta típicamente en el rango de 0.4 a 0.7 Hz [10].*

Las características de los modos interárea de oscilación son muy complejas y tienen algunas diferencias significativas con el modo local, las características de la carga, en particular, tienen mayor influencia en la estabilidad de los modos interárea.

La manera en como los sistemas de excitación afectan a los modos de oscilación interárea depende del tipo y la localización de los excitadores, y las características de la carga.

Los gobernadores de velocidad por lo regular no tienen un efecto significativo en las oscilaciones interárea. Sin embargo, si los gobernadores no son sintonizados adecuadamente, pueden provocar una ligera pérdida de amortiguamiento.

Debido a que estas oscilaciones involucran muchas máquinas, un amortiguamiento exitoso de tales modos quizás requiera la aplicación de PSS's en los sistemas de excitación de un gran número de máquinas [10].

Otros medios para lograr una estabilización efectiva de este tipo de oscilaciones incluyen la modulación de los controles de un enlace de corriente directa en alta tensión ("HVDC" en inglés) y los controles de un Compensador Estático de Vars (CEV) [10].

El análisis de este tipo de oscilaciones requiere por lo tanto de una representación detallada del SEP entero. En particular el modelado de los sistemas de excitación y de las cargas debe ser lo más detallado posible.

2.2.3.-Oscilaciones de modos de control o inter-unidad

Estas oscilaciones involucran dos o más máquinas síncronas en una estación o en estaciones cercanas cuyos rotores estén oscilando uno en contra del otro, generalmente a una frecuencia de entre 1.5 a 3 Hz [10].

Las oscilaciones de modo de control están asociadas con los controles de las unidades de generación entre otros. Las causas de la inestabilidad de modos de control son una pésima sintonización de controles de sistemas excitación, primo-motores, CEV's, convertidores de HVDC y PSS's. Algunas veces es difícil la sintonización de los controles para asegurar un amortiguamiento adecuado de todos los modos.

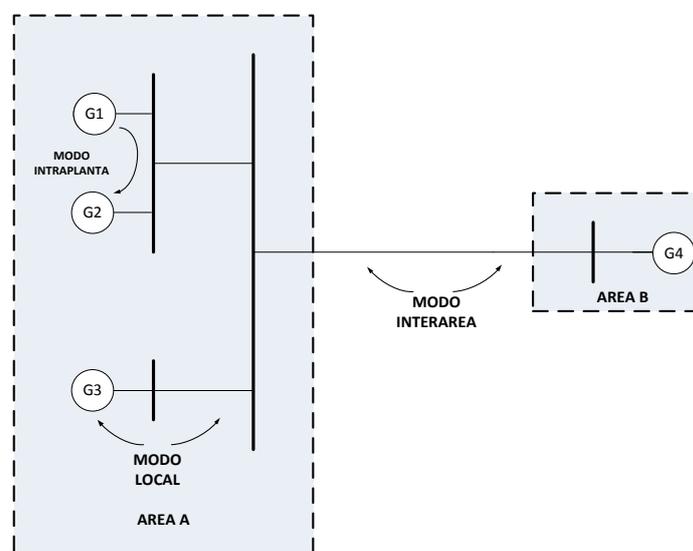


Figura 2.1.- Diferentes modos de oscilación en un sistema de potencia interconectado (adaptado de [11])

2.3.- Métodos de análisis de oscilaciones de baja frecuencia

Para entender realmente la estabilidad del sistema eléctrico, se debe entender la oscilación del SEP, que por lo general requiere una combinación de herramientas analíticas. En la mayoría de los casos, los operadores prestan mucha atención a los disturbios y cuando los límites de estabilidad del sistema han sido excedidos.

Por lo tanto las herramientas especializadas de análisis son necesarias para que la naturaleza de las oscilación pueda ser entendida, también es importante hacer uso de todas las herramientas de análisis para comprender todos los aspectos del rendimiento del sistema dinámico.

Una vez descrito el problema de las oscilaciones de baja frecuencia en los sistemas de potencia es importante realizar la detección de estas en la red, para este propósito se han desarrollado distintas técnicas con las cuales es posible encontrar los modos que provocan las oscilaciones de baja frecuencia en el sistema, la mayoría de estas técnicas pueden ser clasificadas en dos grupos básicos:

- *El análisis modal*
- *La identificación modal*

2.3.1 Métodos de análisis modal.

Los métodos de análisis modal involucran la determinación de los modos característicos de oscilación a partir de un modelo lineal del sistema alrededor de un punto de operación específico. Este tipo de análisis es usado para determinar la naturaleza de las oscilaciones y suministrar información requerida para diseñar un sistema de control suplementario a los ya existentes o determinar la sintonización adecuada para un control existente.

El análisis modal utiliza técnicas de eigenvalores para determinar la estabilidad ante pequeños disturbios. Este método forma la matriz de estado del sistema y entonces usa una subrutina para el cálculo de los eigenvalores de la matriz.

El análisis modal está basado en el análisis de estabilidad por el primer método de Lyapunov, el cual establece que la estabilidad ante pequeños disturbios de un sistema no lineal está determinada por los eigenvalores de la matriz de estado (las raíces de la ecuación característica del sistema lineal de primeras aproximaciones) [10]:

1. *Cuando los eigenvalores tienen parte real negativa, el sistema original es asintóticamente estable.*
2. *Cuando al menos uno de los eigenvalores tiene una parte real positiva, el sistema original es inestable.*

3. Cuando los eigenvalores tienen parte real igual a cero no es posible concluir nada en base a la primera aproximación.

Análisis modal básico y formulación

La simulación de un SEP es ahora un procedimiento rutinario en la planeación y operación de este mismo. Es importante que la simulación del sistema de potencia contenga ecuaciones para representar la red de transmisión y los dispositivos dinámicos del sistema, tal es el caso de generadores y sus sistemas de control. Las ecuaciones del modelo del sistema están en la forma general [10]:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, v, d) \quad (2.1)$$

$$0 = g(x, v) \quad (2.2)$$

$$y = h(x, v) \quad (2.3)$$

Dónde:

x : Es un vector de variables de estado.

v : Vector de voltajes de red.

d : Vector de disturbios o entradas de control.

y : Vector de salidas monitoreadas de control o información.

f : Representa las características dinámicas no lineales de los componentes de la dinámica del sistema.

g : Representa las ecuaciones de la red no lineales.

h : Representa la ecuación de salida no lineal.

En el análisis modal, el conjunto anterior de ecuaciones es linealizado alrededor de un punto de operación por medio del método de las series de Taylor que expanden a f y g , para el primer término, por lo tanto, en el estado estacionario, el punto de operación es definido por x_0 y v_0 , entonces $f(x_0, v_0)$ y $g(x_0, v_0)$ son cero.

Entonces las ecuaciones linealizadas son:

$$\frac{d\Delta x}{dt} = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial f}{\partial d} \Delta d \quad (2.4)$$

$$0 = \frac{\partial g}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial g}{\partial v} \Delta v \quad (2.5)$$

$$\Delta y = \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial h}{\partial v} \Delta v \quad (2.6)$$

O bien,

$$\frac{d\Delta x}{dt} = A_d \Delta x + b_{dv} \Delta v + b_{dd} \Delta d \quad (2.7)$$

$$0 = C_d \Delta x + Y_n \Delta v \quad (2.8)$$

$$0 = C_0 \Delta x + K_n \Delta v \quad (2.9)$$

Estos son los puntos de partida del análisis modal, aunque la forma en cómo se representan por lo general depende del tamaño del modelo del sistema de potencia que está siendo analizado, puesto que las ecuaciones incluyen gobernadores, dispositivos dinámicos y las ecuaciones estáticas de la red de transmisión

Eigenvalores

Los valores característicos o eigenvalores son las n soluciones no triviales de la ecuación característica correspondiente a la ecuación de estado:

$$\det(A - \lambda_i I) = 0 \quad (2.10)$$

Entonces $e^{\lambda_i t}$ satisface las ecuaciones de estado, con la entrada de disturbio cero. Tomando en cuenta que la matriz A siempre será real para el tipo de análisis que se llevará a cabo, los eigenvalores de ésta pueden ser reales o complejos conjugados.

Para que el sistema sea estable, las partes reales de los eigenvalores deben ser negativas. Esto implica que después de un pequeño disturbio, los modos decaerán con el tiempo y el sistema alcanzará el estado permanente, ya sea el original o algún nuevo punto de equilibrio. Si cualquiera de ellos tiene parte real positiva, después de un pequeño disturbio, la amplitud del modo se incrementará exponencialmente hasta el punto que este dominará la dinámica del sistema, en cuyo caso, el sistema es inestable [20].

En el caso de obtener eigenvalores reales puros, estos indicarán modos aperiódicos. Si por el contrario, tenemos modos complejos de la forma $\sigma \pm j\omega$, la amplitud del modo variará de la forma $e^{\sigma t}$ y la frecuencia de oscilación será $\omega/2\pi$. Un parámetro de

interés que se tiene para los modos complejos es la relación de amortiguamiento ζ , misma que determina la relación de decaimiento de la amplitud de oscilación.

En términos de los eigenvalores, la relación de amortiguamiento es definida como [10]:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.11)$$

Otro parámetro relacionado a los eigenvalores es la constante de tiempo de decaimiento, la cual es descrita por $1/|\sigma|$ e indica que la amplitud decae a $1/e$ ó 37% de la amplitud inicial en $1/|\sigma|$ segundos o en $1/(2\pi\zeta)$ ciclos de oscilación. No obstante y debido a que se estará tratando con modos oscilatorios los cuales estarán ubicados en un amplio rango de frecuencias, se considera más adecuado expresar el grado de amortiguamiento por medio de la relación de amortiguamiento en por ciento.

Ventajas y desventajas del análisis modal

El análisis modal es ideal para la investigación de problemas asociados con oscilaciones. La estabilidad de cada modo está claramente identificada y separada por los eigenvalores correspondientes. Así también, la forma del modo y las relaciones entre diferentes modos y variables del sistema o parámetros son identificadas sin ambigüedades [21].

Un problema en particular para el que el análisis modal es ideal, es el relacionado con la estabilidad de los controles asociados a los generadores y otros dispositivos dinámicos. Tal problema es usualmente local al dispositivo de control, y no puede ser observado en resultados de simulaciones de estabilidad transitoria, y aun cuando fuese observado en este tipo de estudios, no se tendría la capacidad de localizar la fuente del problema, y tampoco se podrían diseñar medidas de corrección a diferencia del análisis modal [21].

Otro problema que se puede resolver utilizando el análisis modal tiene que ver con la capacidad de distinguir entre oscilaciones cuya magnitud decae con el tiempo y aquellas cuya magnitud se mantendrá constante o incluso crecerá [21].

La obtención de los eigenvalores es hecha con una alta precisión por medio del método QR; sin embargo este método limita el estudio a sistemas de hasta 800 variables de estado. Esto último es debido a que el método QR requiere de grandes cantidades de almacenamiento de memoria, ya que está es proporcional al cuadrado del número de generadores y a la dimensión del espacio de estado matricial, a la vez el tiempo de cálculo es proporcional al cubo de esta misma variable [21].

Otra desventaja consiste en que la técnica de análisis modal convencional obtiene los eigenvalores a partir de una matriz de estado que no tiene una estructura especial que pueda ser explotada de tal forma que sea posible analizar sistemas muy grandes [21].

2.3.1.-Métodos de identificación modal

En los SEP's actuales existe la posibilidad de que al suceder algún disturbio, se pueda almacenar la medición del comportamiento transitorio del sistema. Para extraer los diferentes modos de oscilación presentes en estas mediciones, es necesario usar herramientas especiales de identificación modal [19].

Debido a que tales herramientas pueden ser usadas tanto para mediciones o simulaciones de algún SEP, también son muy útiles en el proceso de validación de modelos lineales y no lineales contra el comportamiento observado en el sistema [19].

En comparación con los métodos de análisis modal, los métodos de identificación modal son técnicas más experimentales, por lo que no existe una guía estándar que muestre para qué casos esta clase de métodos tengan mejores resultados [19].

Un aspecto interesante acerca de los métodos de identificación modal es que también permiten la determinación de modelos estructurados de SEP's y dispositivos de control. Esto último puede ser necesario en el caso de que un dispositivo tenga no linealidades inherentes o características que no puedan ser completamente resueltas mediante un análisis convencional. Un ejemplo de esto es la identificación de modelos de parámetros concentrados para un generador de CA a partir de mediciones de la respuesta de la frecuencia en línea [19].

Dentro de las muchas herramientas de análisis de señales disponibles como la correlación en el dominio del tiempo y el análisis del espectro paramétrico entre otras, tenemos al análisis de Fourier y el análisis de Prony [19], el cual será abordado en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3:

EL MÉTODO DE PRONY

3.1.-Introducción al análisis de Prony

Gaspard Richie, Baron de Prony en 1795 analizando los efectos de la presión del vapor del alcohol observó que las combinaciones lineales de exponenciales complejas obedecían a recursiones lineales homogéneas y que estas podían usarse para interpolar o ajustar datos [23]. El análisis de Prony, tuvo que esperar la aparición de la computadora digital y medios adecuados para tratar con problemas matemáticos inherentemente mal condicionados [1].

Fundamentalmente, el análisis de Prony es un método para ajustar de forma óptima un modelo lineal, consistente en una combinación lineal de términos exponenciales, a un número finito de muestras de una señal espaciada igualmente en el tiempo. Este análisis tiene la ventaja de que puede ser aplicado, ya sea al resultado de una simulación o a una medición de campo de la respuesta característica del sistema [6].

El análisis de Prony asume que el sistema es de salida simple y las señales individuales son analizadas independientemente, resultando casi siempre en estimaciones de frecuencia y amortiguamiento conflictivas. Para superar esta limitación, se han desarrollado extensiones del método de Prony, mismas que permiten que sean analizadas señales múltiples simultáneamente, resultando en un conjunto de modos estimados. Esta modificación mejora la precisión de los estimados modales y simplifica los pasos del análisis, al obligar a todas las señales a tener el mismo conjunto de modos, pero permitiéndoles tener diferentes residuos [5].

El análisis de Prony se relaciona con el de Fourier ya que los dos se pueden expresar como suma de exponenciales. El método de Prony es capaz de estimar directamente la frecuencia, también es posible conocer el amortiguamiento, la magnitud y la fase relativa de las componentes modales identificadas en una señal dada.

Como resultado de que la mayoría de las respuestas de un sistema tienen la forma de un transitorio debido a un disturbio o a una entrada tipo pulso, el análisis de Prony se ha convertido en una herramienta estándar para los ingenieros que trabajan con los sistemas de potencia [1].

3.2.- Descripción del método de Prony

Un sistema dinámico invariante en el tiempo y lineal con valores iniciales $x(t_0) = x_0$ en el tiempo t_0 , se comportará de acuerdo a la siguiente ecuación diferencial [13]:

$$\dot{x} = Ax \quad (3.1)$$

La cual tiene una solución en términos de sus matrices residuales:

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^n R_i x_0 e^{\lambda_i t} \quad (3.2)$$

Para N muestras complejas, el modelo exponencial propuesto es:

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^p A_k e^{[(\alpha_k + j2\pi f_k)nT + j\theta_k]}, \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (3.3)$$

O también:

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^p h_k z_k^n; \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (3.4)$$

Dónde:

$$h_k = A_k e^{j\theta_k} \text{ (amplitud compleja)} \quad (3.5)$$

$$z_k = e^{(\alpha_k + j2\pi f_k)T} \text{ (exponencial compleja)} \quad (3.6)$$

Donde p , es el número de exponenciales complejas, T es el periodo de muestreo en segundos, A_k es la amplitud de la exponencial compleja, α_k es el factor de amortiguamiento en segundos f_k es la frecuencia en Hz, y θ_k es la fase en radianes.

De acuerdo con la ecuación (3.4) existen $2p$ parámetros desconocidos, es decir, $h_1, h_2, \dots, h_p, z_1, z_2, \dots, z_p$. O sea que se requieren $N = 2p$ muestras $x(1), \dots, x(2p)$ para obtener las $2p$ incógnitas. La ecuación (3.4) puede expresarse en la siguiente forma matricial para $0 \leq n \leq p - 1$.

$$\begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_p^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

La contribución de Prony consistió en descubrir la forma de desacoplar h_k y z_k utilizando las p muestras restantes. La clave está en demostrar que la ecuación (3.8) es la solución de una ecuación diferencia $\varphi(z)$ de coeficientes constantes (ecuación (3.9)).

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^p h_k z_k^n; \quad p \leq n \leq p-1 \quad (3.8)$$

$$\varphi(z) = \prod_{k=1}^p (z - z_k) = z^p + a(1)z^{p-1} + a(2)z^{p-2} + \dots + a(p) = 0 \quad (3.9)$$

Si los productos de ecuación (3.9) se expanden en una serie de potencias, entonces el polinomio puede representarse como un polinomio de la forma:

$$\varphi(z) = \sum_{m=0}^p a(m)z^{p-m} = 0 \quad (a(0) = 1) \quad (3.10)$$

Multiplicando la ecuación (3.8) por $a(m)$, reemplazando n por $n - m$ y sumando para $m = 0, 1, 2, \dots, p$, se tiene:

$$\sum_{m=0}^p a(m)x(n-m) = \sum_{m=0}^p a(m) \sum_{k=1}^p h_k z_k^n \quad p \leq n \leq 2p-1 \quad (3.11)$$

Sustituyendo la ecuación (3.12) en la ecuación (3.11).

$$z_k^{n-m} = z_k^{n-p} z_k^{p-m} \quad (3.12)$$

$$\sum_{m=0}^p a(m)x(n-m) = \sum_{m=0}^p a(m)z_k^{p-m} \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-p} = 0 \quad (3.13)$$

De la ecuación (3.10) $\sum_{m=0}^p a(m)z_k^{p-m} = 0$ y desarrollando la parte izquierda de la ecuación (3.13) obtenemos:

$$x(n) + \sum_{m=1}^p a(m)x(n-m) = 0 \quad (3.14)$$

Entonces despejando de la ecuación (3.14):

$$x(n) = - \sum_{m=1}^p a(m)x(n-m) \quad p \leq n \leq 2p-1 \quad (3.15)$$

La ecuación (3.15) es la ecuación diferencia lineal cuya solución homogénea está dada por la ecuación (3.4) y puede expresarse en la siguiente forma matricial:

$$\begin{bmatrix} x(p) & x(p-1) & \dots & x(1) \\ x(p+1) & x(p) & \dots & x(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(2p-1) & x(2p-2) & \dots & x(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(1) \\ a(2) \\ \vdots \\ a(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(p+1) \\ x(p+2) \\ \vdots \\ x(2p) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

De esta ecuación se demuestra que con $2p$ muestras es posible desacoplar los parámetros h_k y z_k .

Calculo de la frecuencia de oscilación y factor de amortiguamiento.

Se calculan los eigenvalores a partir de las raíces del polinomio de la ecuación (3.9).

$$\lambda = \frac{1}{T} \ln(z_k) \quad (3.17)$$

$$a_k = \text{real}(\lambda) \text{ seg}^{-1} \text{ (factor de amortiguamiento)} \quad (3.18)$$

$$f_k = \frac{\omega}{2\pi} \text{ Hz (frecuencia de oscilacion)} \quad (3.19)$$

Calculo de la relación señal-ruido.

La señal reconstruida \hat{x} usualmente ajustará a $x(t)$ inexactamente. El parámetro que describe la calidad del ajuste de señales es denominado *SNR* ("signal to noise ratio", por sus siglas en inglés), y está definido como [2]:

$$SNR = 20 \log \text{ rms} \left(\frac{x(n)}{x(n) - \hat{x}(n)} \right) \dots \text{db} \quad (3.20)$$

Una buena precisión en la aplicación del Análisis de Prony es lograda para valores del SNR alrededor de 40 db; valores menores del SNR quizás resulten en errores en la solución de Prony y usualmente implican que el orden del modelo de predicción lineal es demasiado bajo. Para superar los inconvenientes que presenta esta situación se pueden aumentar el orden del polinomio de aproximación hasta que el SNR sea de al menos de 40 db [2].

3.3.-Algoritmo de Prony

El proceso para la obtención de las incógnitas requiere de tres pasos básicos adaptados de [6]:

PASO 1.- Determinar los parámetros de predicción lineal que se ajustan a los datos disponibles (formar y resolver ecuación (3.16)).

PASO 2.- Encontrar las raíces del polinomio de predicción del paso 1, encontrar los coeficientes de predicción que producirán las estimaciones de factor de amortiguamiento y frecuencia sinusoidal de cada termino exponencial (solución ecuación (3.9) y (3.17)).

PASO 3.- Con las raíces encontradas en el paso 2, obtenemos una segunda ecuación lineal, con la cual es posible estimar la amplitud de la exponencial y la fase inicial de la sinusoidal (formar y resolver ecuación (3.7)).

En base este procedimiento se diseña un algoritmo a seguir para el método de Prony que se muestra en la figura 3.1

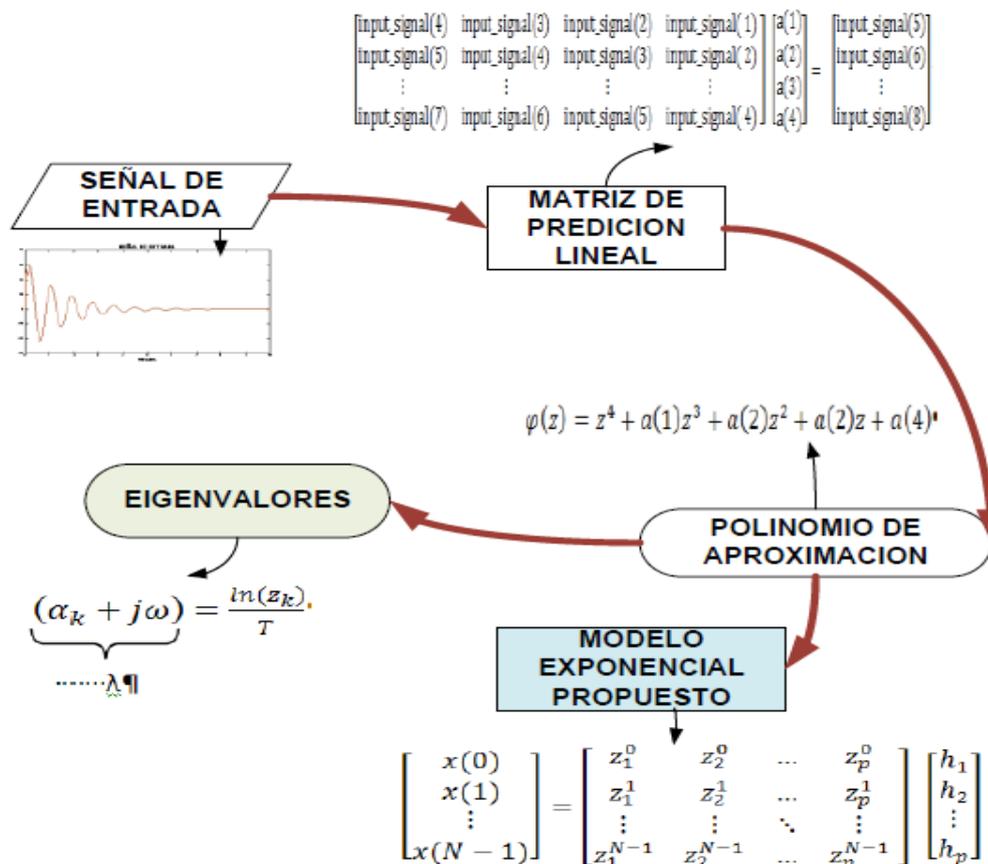


Figura 3.1.- Algoritmo general de Prony

3.4.- Observaciones acerca del método de Prony.

Un problema mayor en el análisis de Prony es que la dimensión verdadera n , quizás sea desconocida, o muy grande, de tal manera que cualquier modelo ajustado deba ser una aproximación de orden reducido. De cualquier forma el valor máximo que n puede alcanzar a ser igual a la mitad del número de datos disponibles, $n_{max} = N/2$. El análisis de descomposición en valores singulares y otros mecanismos pueden ser usados para ajustar las características del modelo a cada paso de solución [22].

Dentro del conjunto de los modos identificados con el análisis de Prony se va encontrar una serie de “modos espurios”, mismos que no representan ninguna dinámica existente dentro del sistema, y cuya única función es la de ajustar el ruido inherente en la señal [2].

Con el objeto de filtrar estos modos espurios de los resultados, la técnica de la ventana deslizante y otras consistentes en la eliminación de la tendencia de la señal han sido utilizadas, lográndose al mismo tiempo identificar a los modos electromecánicos dominantes consistentemente [2].

En la práctica, algunas variaciones entre los eigenvalores calculados por medio del análisis modal y los calculados por medio del análisis de Prony son aceptables. Una causa de que tales variaciones existan son las no linealidades del sistema con respuestas dependientes de la amplitud del disturbio [2].

Las simulaciones y el análisis de Prony son dependientes del tipo de disturbio que se esté analizando, por lo que diferentes tipos de disturbios excitarán diferentes componentes modales [5].

El análisis estándar de Prony es un método de identificación de señal y no provee estimaciones para la función de transferencia; sin embargo, si esta última es necesaria para la sintonización de controles o la estimación de la forma del modo, se pueden aplicar algunas extensiones del análisis de Prony a las mediciones de campo con el objetivo de lograr construir una función de transferencia. No obstante, estas estimaciones tienen la desventaja de involucrar una considerable cantidad de álgebra [5].

Otra de las aplicaciones del análisis de Prony es identificar los sistemas lineales de bajo orden modelados en programas de estabilidad transitoria estándar. Esto es logrado con el procesamiento de la respuesta del sistema ante la aplicación de un simple pulso en la entrada [22].

La metodología del análisis de Prony en si misma permite muchas variaciones, tales como [1]:

- *Pre-procesamiento, para mitigar los efectos del ruido o entradas no visibles.*
- *Cuántas de las mediciones a usar en el modelo, se ajustan.*
- *El orden del modelo ajustado.*
- *Sintonización del modelo ajustado [1].*

Esta técnica, además, no requiere la obtención de un modelo de tamaño medio y pueden ser modelados cambios grandes en el sistema y un nuevo modelo de tamaño medio puede ser derivado [2].

CAPITULO 4:

DISEÑO DE SOFTWARE

En este capítulo se expone detalladamente los programas desarrollados para el proyecto, en los cuales se pueden observar que se utilizaron dos tipos de programación que se relacionan a través de una interface de comunicación(RS-232), se utilizó para la parte de medición y cálculo de variables la programación en tiempo real en el programa CodeWarrior 7.2 para microcontroladores de la familia Coldfire V2 utilizando como plataforma MQX 3.6 [25][26], para el algoritmo de Prony y la interface de comunicación se utilizó el programa MATLAB.

Para explicar el software utilizado se comienza por hacer una descripción general del proyecto definiendo así los requerimientos bajo los cuales se realizó el diseño final, una vez explicado el concepto general del proyecto se realiza una definición de las partes que lo conforman en forma particular. Se utiliza un microcontrolador con el cual se desarrolla la primer parte del proyecto que realiza la medición y cálculo de variables, también este microcontrolador actúa como cliente al enviar los valores calculados y el programa en MATLAB es el servidor y la parte final del proyecto al recibir las variables e introducirlas como señal de entrada al método de Prony, finalmente realiza la exposición de los resultados en MATLAB.

4.1.- Requerimientos generales para el software implementado.

Se realizó una implementación utilizando un sistema de potencia de dos áreas cargado en un simulador en tiempo real, de donde se obtienen mediciones de corriente y voltaje con las cuales se calculan variables como potencia activa, potencia reactiva y voltaje en terminales, estos cálculos se obtienen a partir de los fasores de las señales medidas dentro del microcontrolador, una vez realizadas las mediciones y cálculos se envían a un programa de detección con el algoritmo de Prony programado (este envió se ejecuta mediante la interface de comunicación RS-232), obteniendo un análisis de oscilaciones de una señal de entrada con una ventana de muestra de 10 segundos utilizando un muestreo de 30 valores por segundos.

Como parte adicional a las prueba en línea se utiliza una memoria flash en la cual se almacenan las variables calculadas con el microcontrolador este almacenamiento en memoria también es programado en tiempo real, esto se realiza para obtener un respaldo de información y permitir realizar pruebas posteriores y análisis más detallados. Este procedimiento se muestra de manera conceptual en la figura 4.1.

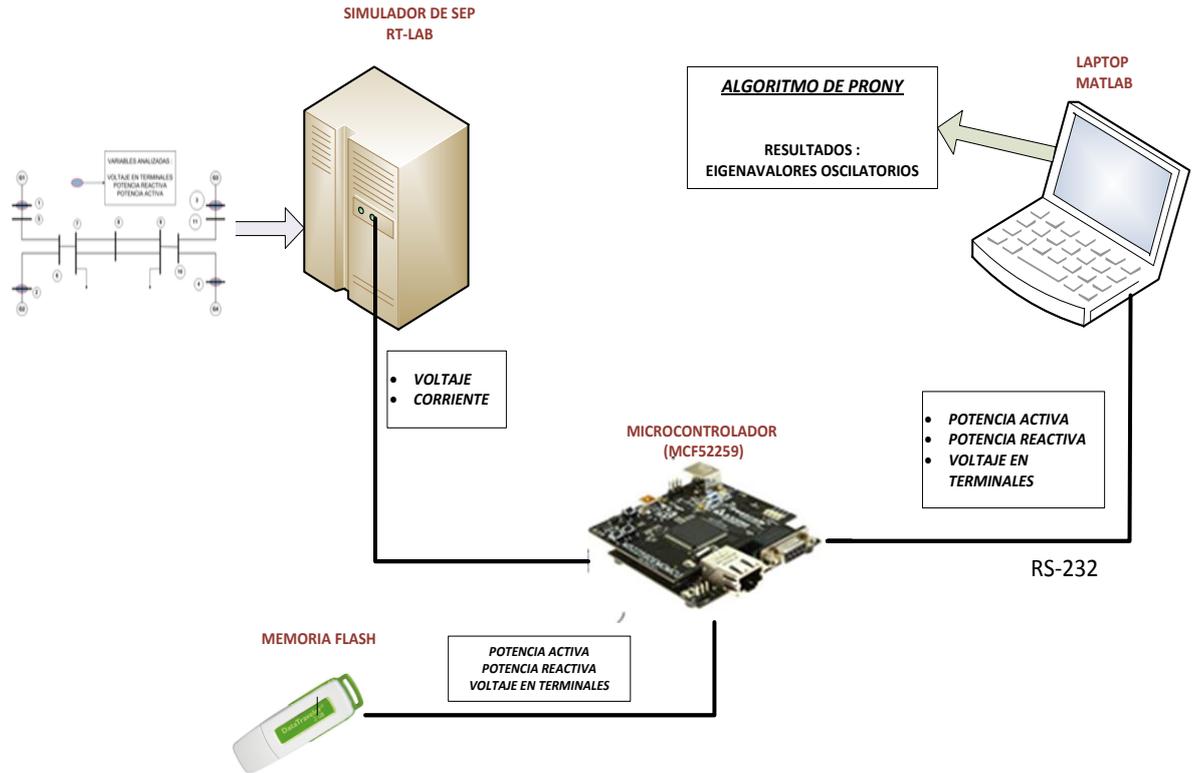


FIGURA 4.1.- Esquema general de proyecto implementado

Como se puede observar en la figura 4.1 se utilizan dos programas principales que se enlazan a través del cable RS-232, los dos programas trabajan de manera independiente y la comunicación entre ellos se efectúa cada 0.03 segundos que es el tiempo que tarda el microcontrolador en obtener el cálculo de una variable, en la figura 4.2 se muestra la interacción entre los dos programas elaborados.

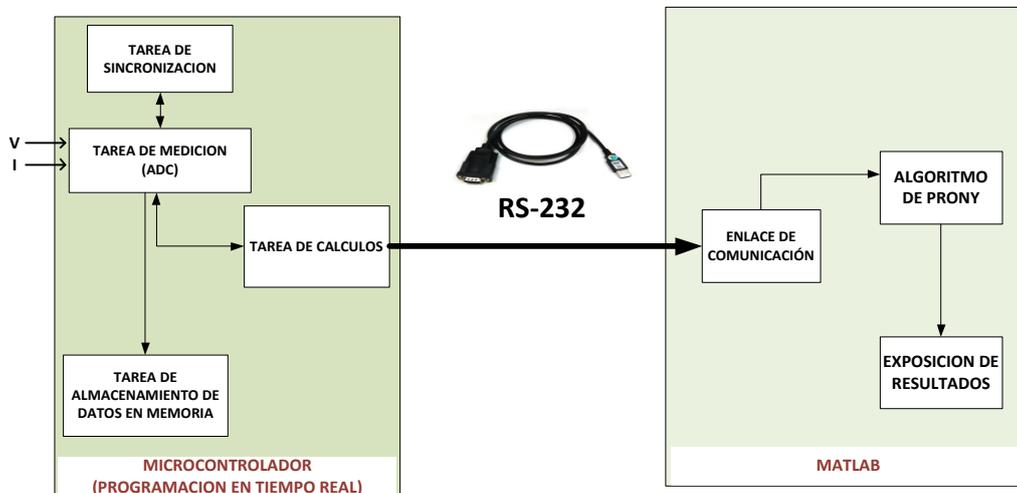


FIGURA 4.2.- Partes generales del proyecto desde el punto de vista del software

4.2 Programación en tiempo real.

Para la programación del Microcontrolador MCF52259 se utilizó un ambiente de desarrollo integral llamado "CodeWarrior" de Metroworks, utilizando el sistema operativo MQX como plataforma para la realización de la programación en tiempo real.

Con respecto a la utilización de la programación en tiempo real se está convirtiendo en un uso común entre los sistemas integrados este es debido a que este tipo de programación presenta algunas características favorables para ciertos requerimientos: como que usa menos espacio de memoria en su ejecución, cualquier evento en el soporte físico puede hacer que se ejecute alguna tarea y por ultimo presenta una flexibilidad en cuanto a arquitecturas ya que puede ejecutarse en otro microprocesador.

En este tipo de programación se trabaja utilizando tareas las cuales pueden estar en tres estados: ejecución, preparada y bloqueada, y solo es posible ejecutar una tarea a la vez, entonces por lo general la mayor parte del tiempo las tareas permanecen bloqueadas o en modo de espera. Las tareas son activadas o desactivadas utilizando comandos de bloqueo o retardos de tiempo programados, las tareas son ejecutadas en orden de prioridad a través de una lista de tareas preparadas.

Para realizar un proyecto en un sistema operativo en tiempo real es importante tomar algunas consideraciones previas entre las cuales se pueden mencionar; definir los requerimientos para el proyecto, las tareas necesarias para cumplir con dichos requerimientos, asignarle prioridad a las tareas y la secuencia de sincronización entre ellas.

Los requerimientos para nuestro proyecto es realizar mediciones de ciclos completos y hacer cálculos de potencia activa y reactiva que se envían al programa de Prony, estos cálculos se realizan basándose en los fasores de voltaje y corriente calculados mediante la transformada discreta de Fourier (DFT en inglés), para obtener 30 mediciones por segundo sincronizados mediante un pulso por segundo interno. Para dichos requerimientos se diseña un programa que trabaja utilizando 4 tareas: Sincroniza, ADC, USB y Calcula. Enumeradas de mayor a menor prioridad en nuestro proyecto. En cuanto a la secuencia de sincronización como se puede observar en la figura 4.3 el programa comienza realizando inicializaciones indispensables para utilizar el convertidor analógico digital (ADC en inglés) y la memoria de almacenamiento masivo. Después se empieza el ciclo de mediciones siendo el comienzo y fin de la secuencia la tarea sincroniza, la tarea ADC es quien coordina el cálculo de las variables que se realizan en la tarea Calcula en donde se encuentran todos los algoritmos de medición utilizados y envía los datos al algoritmo de Prony.

Este ciclo de mediciones es repetido según sea el número de variables que se necesiten guardar, en nuestro caso utilizamos un rango de medición de 600 valores por variable. Las variables son guardadas creando un archivo de texto por cada variable.

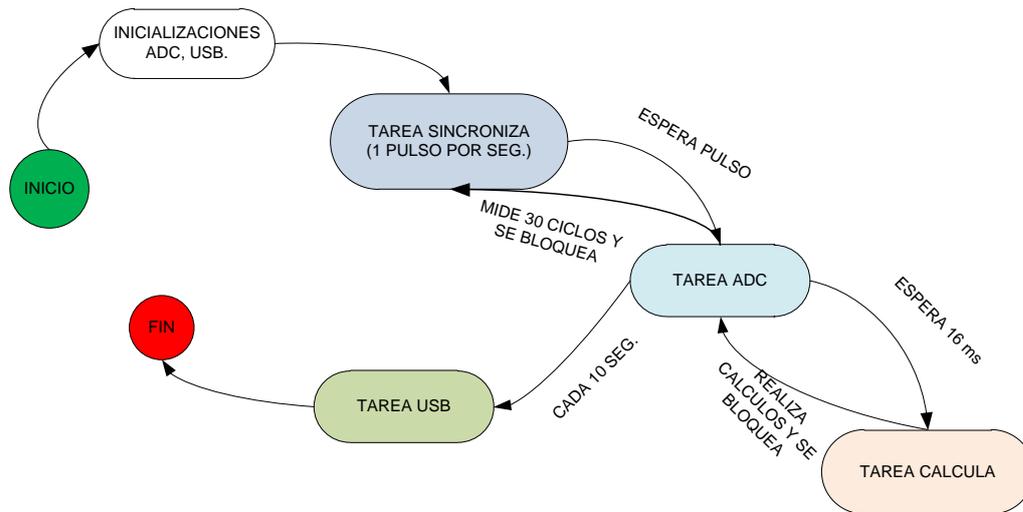


Figura 4.3 Sincronización de las tareas.

Una vez realizadas las inicializaciones, el ciclo general del programa se lleva a cabo de la siguiente forma: se ejecuta primero la tarea sincroniza que espera un pulso por segundo. Al recibir el pulso se desbloquea la tarea ADC y la tarea sincroniza se coloca en modo de espera. En la tarea ADC se obtienen una serie de mediciones provenientes de los dos canales programados de medición correspondiente uno al voltaje y el otro a la corriente, que obtienen 64 muestras para un ciclo completo de mediciones, una vez obtenidas se activa a la tarea Calcula para ejecutar los algoritmos de medición, mientras estos se realizan la tarea ADC se coloca en modo de espera por un ciclo completo en 60 Hz (16.66 ms) y esta actividad se repite 30 veces en un segundo obteniendo así los requerimientos planteados, una vez realizadas las 30 mediciones las tareas se bloquean y esperan por el siguiente pulso de sincronización.

El número de mediciones totales a guardar en la memoria está regido por la capacidad de almacenamiento disponible. Para el caso de nuestras pruebas se utilizó la medición de 600 fasores obtenidos en 20 segundos de repetición del ciclo expuesto anteriormente, una vez pasados estos 20 segundos todas las tareas son bloqueadas y dejando solo en funcionamiento a la tarea USB que realiza el almacenamiento de las mediciones en la memoria física una vez guardadas las 600 mediciones es posible regresar a la repetición de las tareas de medición y cálculo.

Para ilustrar el procedimiento descrito anteriormente en la figura 4.4 se puede observar en forma de diagrama de flujo la secuencia que sigue cada tarea y la relación que tienen cada una con las otras tareas, es importante señalar que el diagrama mencionado presenta la conceptualización general del programa, cada tarea en forma particular se describirá posteriormente.

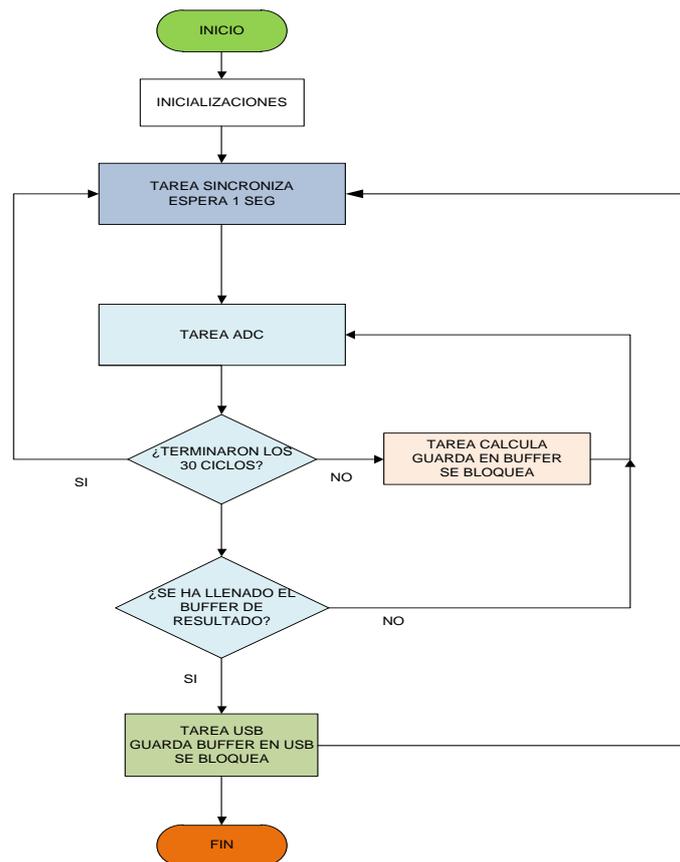


Figura 4.4 Diagrama de flujo de programa de medición de variables.

Para la obtención de buenos resultados en la programación en tiempo real es necesario un control estricto del tiempo de ejecución de cada tarea, para el caso particular del proyecto realizado se siguió una estrategia de bloqueo y desbloqueo de tareas, así como poner tareas en espera mediante retardos de tiempo.

La distribución del tiempo en las tareas de ADC, Calcula y Sincroniza es importante ya que un retardo no anticipado en cualquiera de las tareas nos llevaría a obtener cálculos o mediciones erradas de la señales de entrada y salida del programa, en la figura 4.5 se muestra una gráfica mostrando la secuencia del programa poniendo énfasis en el tiempo en el cual se ejecuta cada tarea y como se puede observar no se marca un tiempo específico para el guardado de datos en la memoria externa ya que esta asignación representaría la fase final del proceso, pero al realizar una serie de mediciones constantes en tiempos bastante largos se tiene que tomar este tiempo en consideración ya que al ejecutar el ciclo de medición muchas veces existirán ventanas de tiempo no precisas sin medir, en nuestro caso se realizó la medición en una sola secuencia.

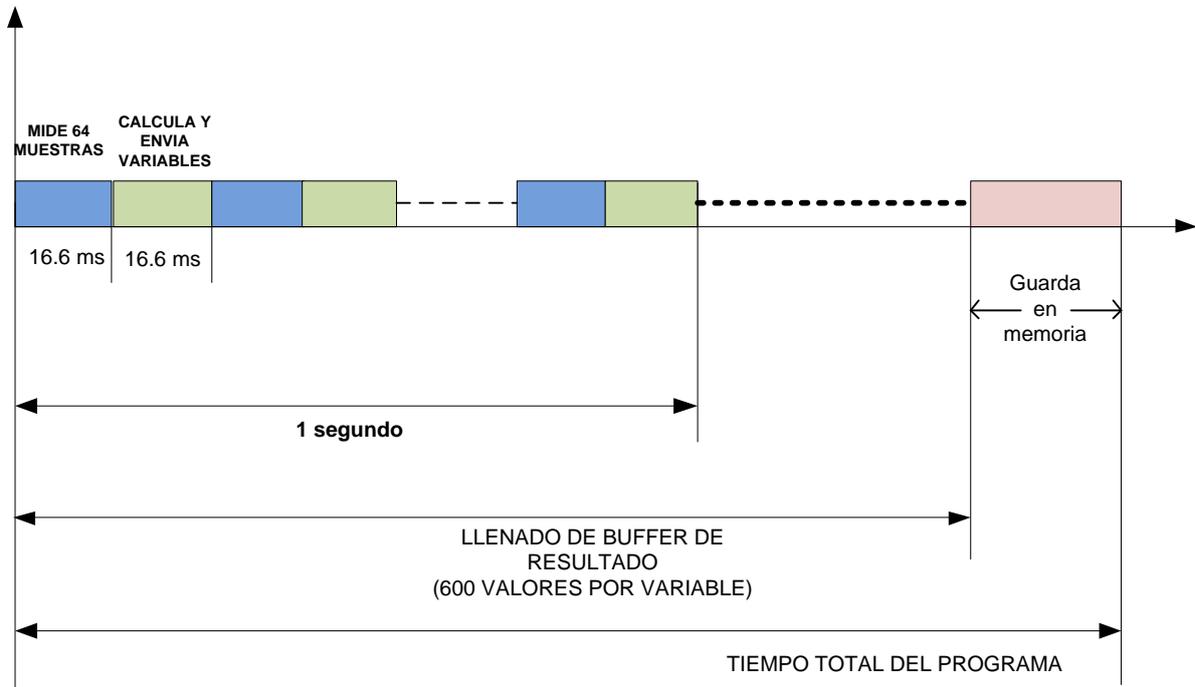


Figura 4.5.- Diagrama de secuencia de tareas.

4.2.1.- Tarea Sincroniza

La tarea sincroniza en nuestro proyecto es aquella que se encarga de entregar el pulso por segundo que simula la función que realiza un GPS en un unidad medidora fasorial (PMU en inglés), el pulso de sincronización marca el inicio de la medición de cada segundo, lo que permite que todos los medidores instalados en un sistema de potencia arranquen sus mediciones al mismo tiempo, lo que da como resultado mediciones sincronizadas de fasores.

La tarea sincroniza comienza realizando la inicialización para los leds que marcan en forma física el pulso por segundo en el microcontrolador, después hace un bloqueo temporal para permitir a las demás tareas ejecutar sus inicializaciones, una vez obtenido el desbloqueo, la tarea Sincroniza entra en el ciclo infinito en el cual se realiza el trabajo principal, una espera de un segundo, tiempo durante el cual la tarea Sincroniza se encuentra suspendida, en la figura 4.6 se expone procedimiento mediante un diagrama de estados de la tarea especificada. En esta figura se marca con un círculo el periodo de trabajo de la tarea, aunque la tarea en su programación es simple su participación es primordial en el desarrollo del proyecto, por lo anterior es a la tarea a la cual se le asigna la mayor prioridad.

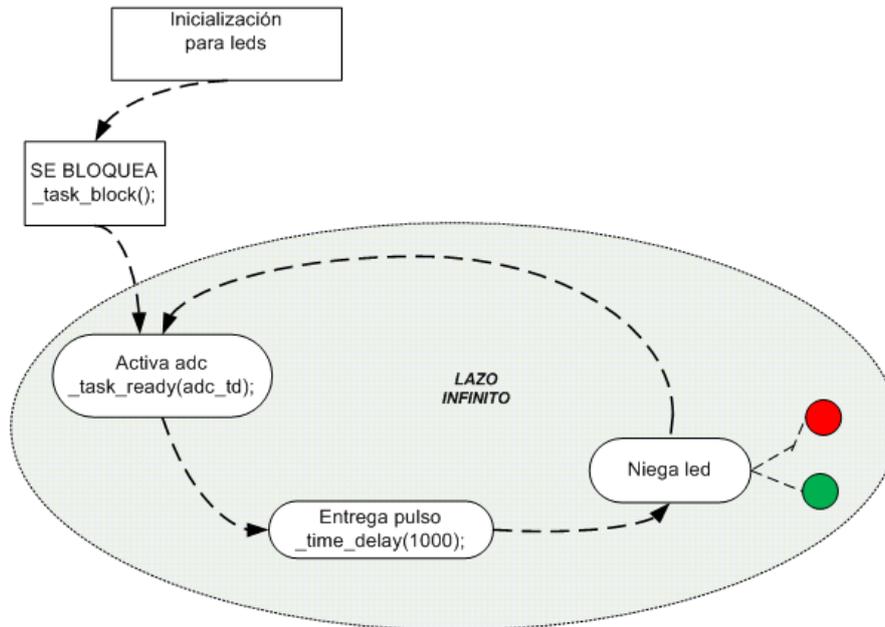


Figura 4.6 Diagrama de estados tarea sincroniza.

4.2.2.- Tarea ADC

Esta tarea debe su nombre al convertidor analógico digital (ADC en inglés) que se encarga de entregar al programa las mediciones digitales de las señales medidas, aunque esta no es su única función también en esta tarea se realiza la coordinación de las tareas Calcula y USB, es aquí donde se especifica que la tarea Calcula tiene un ciclo completo después del medido para realizar sus cálculos y cuando los cálculos han llegado a los 600 valores medidos, esta tarea bloquea los estados de todas las tareas para que la tarea USB guarde las variables en la memoria.

Antes de iniciar con la explicación general de la tarea es importante señalar que en la programación del ADC en tiempo real se ejecuta a través de una estructura en donde se especifican las características de funcionamiento del ADC, El microcontrolador utilizado consta de un ADC de 12 bits y utilizando dos de sus ocho canales (AN0 y AN2) programados para obtener 64 muestras por ciclo, con un periodo de muestreo de 260 μ s, en esta estructura se especifican también un vector en el cual se guardan las 64 muestras una vez realizadas la mediciones en los dos canales el ADC pone activo un evento el cual se utiliza en parte del código como una indicación de que el ADC ha concluido sus mediciones, En la tabla 4.1 se enumeran las características requeridas por nuestro proyecto para realizar la medición de la señal de entrada.

Tabla 4.1 Características de programación de uno de los canales del ADC utilizado.

const ADC_INIT_CHANNEL_STRUCT vL1_channel_param =	
Canal físico del ADC (0x00)	ADC_SOURCE_AN0
Medición continua después de realizado el disparo	(ADC_CHANNEL_MEASURE_LOOP ADC_CHANNEL_START_TRIGGERED)
Numero de muestras en una secuencia(64)	SAMPLES_PER_PERIOD
Tiempo de compensación utilizado por el disparo (0)	ADC_VOLTAGE_DELAY
Tiempo de muestreo (218)	ADC_SAMPLING_PERIOD
Rango de escala(no usado)	ADC_RESULT_RANGE_SCALE
Tamaño del buffer circular (64)	SAMPLE_BUFFER
Identificador del disparo del ADC (0x0001)	ADC_TRIGGER_1
Variable del evento ligero	&meter_shared_event
Mascara para el evento ligero (1)	ADC_DATA_READY_MASK

La tarea ADC arranca con inicializaciones indispensables tanto para el ADC en general como de cada uno de los canales a utilizar a cada inicialización se le asigna un archivo de referencia que se utiliza para hacer el disparo del ADC y usar las mediciones, una vez terminadas se realiza un bloqueo para permitir a la tarea USB terminar las inicializaciones, este bloqueo es desactivado una vez que la tarea Sincroniza nos indica que el pulso de sincronización ha sido ejecutado, la tarea realiza la medición del ciclo y se pone en un retardo de un ciclo completo activando a la tarea calcula para que realice sus cálculos después de un segundo espera nuevamente por el nuevo pulso de sincronización este ciclo se repite hasta que la medición llega a 600 cálculos. Este procedimiento se observa en la figura 4.7 mediante un diagrama de estados.

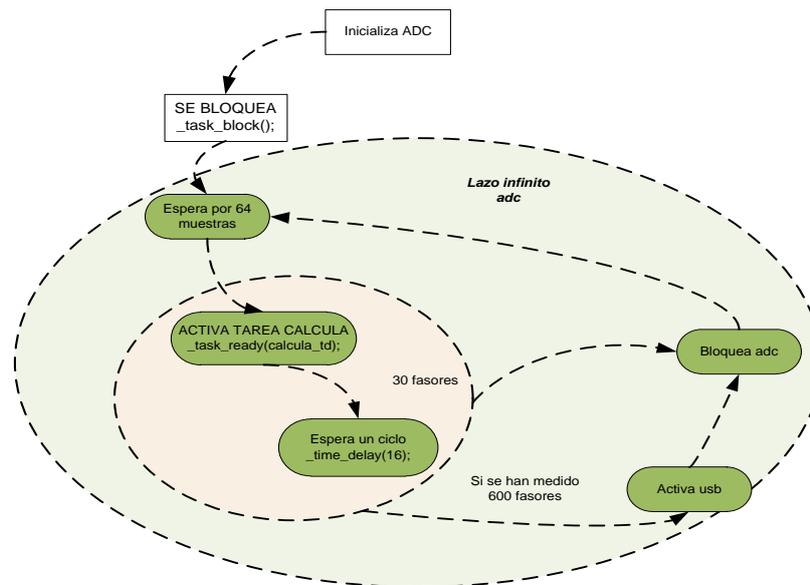


Figura 4.7 Diagrama de estados de la tarea ADC.

4.2.3.- Tarea Calcula

Lo más importante a destacar en la tarea Calcula es la utilización del algoritmo de la transformada discreta de Fourier para encontrar los fasores correspondientes a cada una de las variables medidas (voltaje y corriente) una vez obtenidas mediante una fórmula matemática se estima la potencia activa y la potencia reactiva, aunque no es utilizado para nuestra prueba general también se calculan los valores medios cuadráticos (RMS en inglés) en esta tarea que cuenta con la menor prioridad esto debido a que no utiliza inicialización para su funcionamiento es coordinada por la tarea ADC.

Un punto a destacar de esta tarea es que cada vez que se calcula un valor de potencia es enviado hacia el programa de Prony, también esta tarea es la encargada de llenar los buffers de variables para que la memoria flash realice en la parte final de la secuencia el almacenamiento.

4.2.3.1.- Transformada discreta de Fourier

La transformada discreta de Fourier (DFT en inglés) opera con una señal muestreada, a partir de esta se genera un espectro en el dominio de la frecuencia. El espectro que resulta es una aproximación de la Serie de Fourier, en el sentido que se pierde información entre las muestras de la forma de onda [15].

El análisis de la DFT es una aproximación del espectro de la señal analógica original. Su magnitud se ve influenciada por el intervalo de muestreo, mientras que su fase depende de los instantes de muestreo. Las formas seno y coseno usadas en las DFT son comúnmente llamadas funciones base de la DFT. Las funciones base son un conjunto de formas de onda de amplitud unitaria [16].

Si se cuenta con la señal en el dominio del tiempo, el proceso para conocer el dominio de la frecuencia es llamado descomposición o transformada discreta de Fourier. Si se conoce el dominio de la frecuencia, el cálculo para obtener el dominio del tiempo se conoce como inversa de la transformada discreta de Fourier [16].

El número de muestras en el dominio del tiempo se representa por la variable N , el cual puede tomar cualquier valor entero positivo, pero se eligen para nuestro caso 64, esto es debido a que los datos guardados digitalmente en una computadora usan direccionamiento binario, esta es la razón por la cual el algoritmo de la DFT conocido, opera con N muestras [30].

Las formas seno y coseno usadas en la DFT son comúnmente llamadas funciones base de la DFT. Las funciones base son un conjunto de formas de onda seno y coseno de amplitud unitaria [6]. Estas funciones son generadas de las ecuaciones siguientes [15]:

$$ReX = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} muestra(i) * \cos(i)}{\frac{N}{2}} \quad (4.1)$$

$$ImX = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} muestra(i) * \sen(i)}{\frac{N}{2}} \quad (4.2)$$

$$magnitud = \sqrt{(Im X)^2 + (Re X)^2} \quad (4.3)$$

$$angulo = \tan^{-1} \frac{Im X}{Real X} \quad (4.4)$$

En donde:

muestra = Representa cada muestra obtenida de la señal muestreada.

X = Representa la señal analógica en tiempo discreto

N. = Es el número de muestras a cuantificar del convertidor analógico digital (ADC).

i = índice para efectuar el producto de los elementos uno a uno, de cero hasta *N* – 1.

Im X y *Re X*. = Son las componentes rectangulares del vector correspondiente a la descomposición de la señal analógica.

En la figura 4.8 se muestra una prueba de la transformada de Fourier con una señal de voltaje de 127 Volts a 60 Hz para la cual se calcularon sus componentes rectangulares, la magnitud y el ángulo

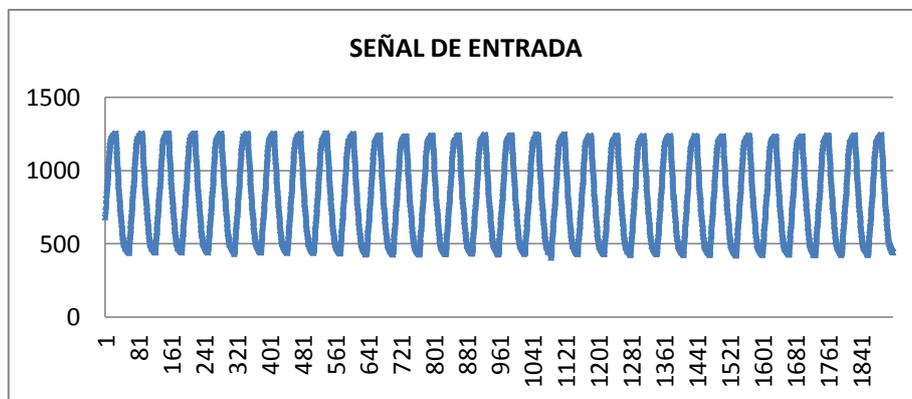


Figura 4.8. Muestra de la señal de entrada medida por el ADC.

Con esta señal de voltaje se descompone mediante la DFT en estas señales de parte real y parte imaginaria defasadas 90°.

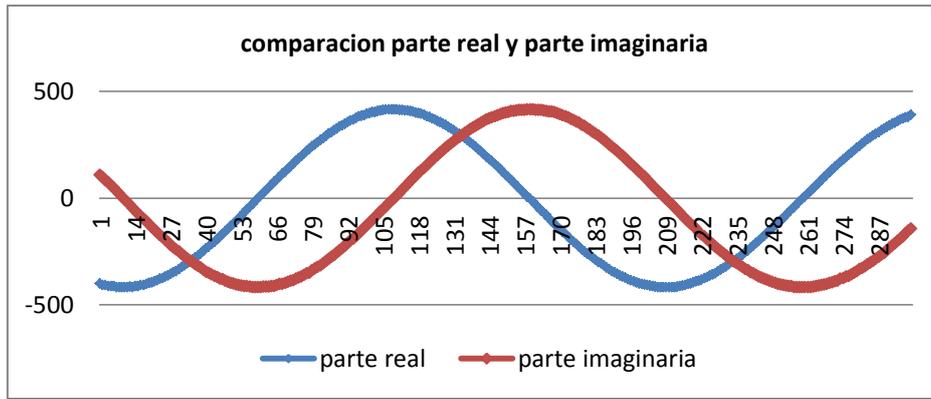


Figura 4.9. Componentes rectangulares de la señal de entrada.

Una vez obtenidas la parte real y parte imaginaria de una señal se calculan mediante la ecuación 4.3 y 4.4 la magnitud y el ángulo del fasor respectivamente para la prueba realizada se muestran estas características en las figuras 4.10 y 4.11.

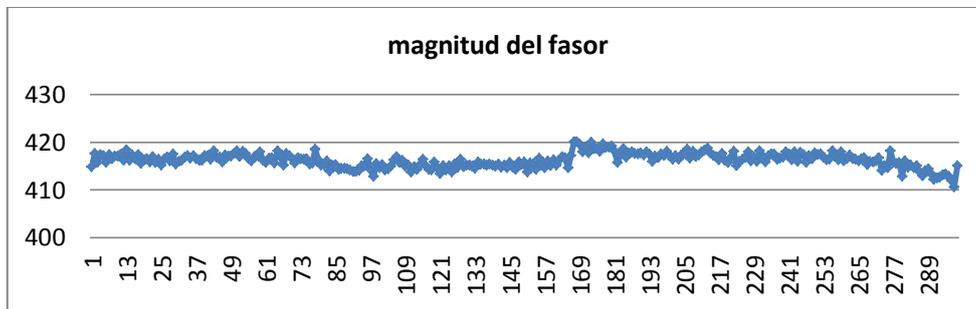


Figura 4.10. Magnitud de la señal de entrada.

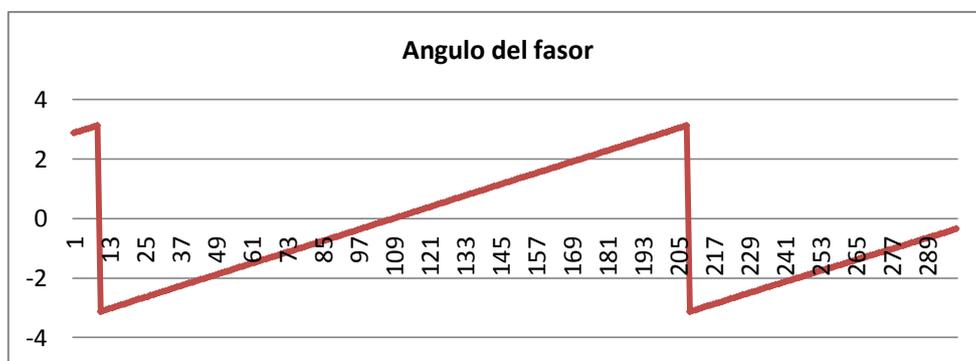


Figura 4.11. Ángulo de la señal de entrada.

Como se puede observar en los resultados obtenidos en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 las mediciones coinciden con la teoría expuesta para la medición de los fasores, ya que la parte real y la parte imaginaria presentan un desfase de 90°.

En la medición de magnitud, figura 4.10 se puede observar que en un rango de 0 a 420 unidades las variaciones se ubican en el intervalo de 414 a los 420. Lo que indica variaciones normales en la señal de voltaje de 127 Volts.

Por otro lado se observa en la figura 4.11 que el ángulo cambia de manera secuencial su valor, que oscila de $-\pi$ a π , este cambio es natural para la onda senoidal y nos indica el movimiento del fasor en el tiempo debido a que la frecuencia de la línea no es exacta a 60.0000 Hz.

Con estas mediciones obtenidas es posible encontrar más parámetros de gran importancia para el diagnóstico en tiempo real de un sistema de potencia. Es posible encontrar por ejemplo: la frecuencia, la potencia reactiva y potencia activa entre otros. Así es posible la toma de decisiones rápida y precisa en la operación de sistemas eléctricos de potencia.

4.2.3.2.- Cálculo de Potencia activa y Potencia reactiva.

Se necesita realizar el cálculo de potencia activa y potencia reactiva a partir de las componentes rectangulares de las señales de voltaje y corriente calculadas previamente utilizando la transformada discreta de Fourier.

El cálculo de la potencia activa y reactiva se realizó utilizando las ecuaciones 4.5 y 4.6:

$$P = (Re(V) * Re(I)) + (Im(V) * Im(I)) \quad (4.5)$$

$$Q = (Re(I) * Im(V)) - (Im(I) * Re(V)) \quad (4.6)$$

Dónde:

P = potencia activa.

Q = potencia reactiva.

$Re(V)$ =parte real de la señal de voltaje.

$Re(I)$ =parte real de la señal de corriente.

$Im(V)$ =parte imaginaria de la señal de voltaje.

$Im(I)$ =parte imaginaria de la señal de corriente.

4.2.4.- Tarea USB

Una vez terminadas las inicializaciones correspondientes a esta tarea, la tarea se bloquea esperando la activación por parte de la tarea ADC, una vez realizado el desbloqueo la tarea realiza el grabado de los resultados en la memoria, para realizar esta operación el procedimiento es el siguiente:

- Abrir archivo donde se almacenarán los datos, especificando la ubicación y el nombre del archivo, si el proyecto es nuevo se crea este espacio en memoria, si el proyecto ya existe se empiezan a grabar los datos a partir del final establecido anteriormente.
- Una vez abierto el archivo se transfieren los datos que se almacenaron en el buffer de resultado en el archivo abierto en el primer paso.
- Por último es necesario cerrar el archivo creado.

En la figura 4.10 se muestran los pasos a seguir en el almacenamiento de datos y la secuencia general de la tarea.

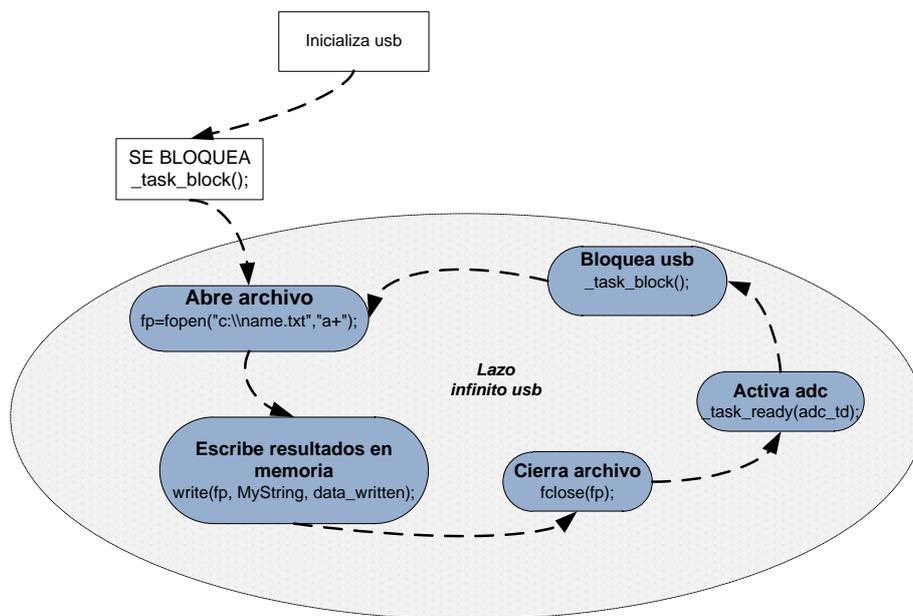


Figura 4.10 Diagrama de estados de la tarea USB.

4.3 Comunicación utilizando RS-232

La interface de comunicación fue programada en MATLAB y antecede al programa de Prony, en esta parte de comunicación se programa el enlace entre el microcontrolador y el programa de MATLAB, para este propósito es necesario saber en qué puerto de comunicación serial se encuentra el cable conectado en la computadora para nuestro caso se utiliza el COM 8 como puesto de comunicación serial, otro punto es saber el número de veces que cambia el estado de la señal transmitida en el tiempo, esta característica es medida en baudio, en nuestro caso utilizamos 115,200 baudios por segundo, el tamaño del número a recibir (8 bits), y los bits de parada (1).

En la figura 4.11 se realiza una descripción general de la programación de la interface de comunicación y como se reciben los datos y son direccionados en variables que se utiliza como entrada al método de Prony.

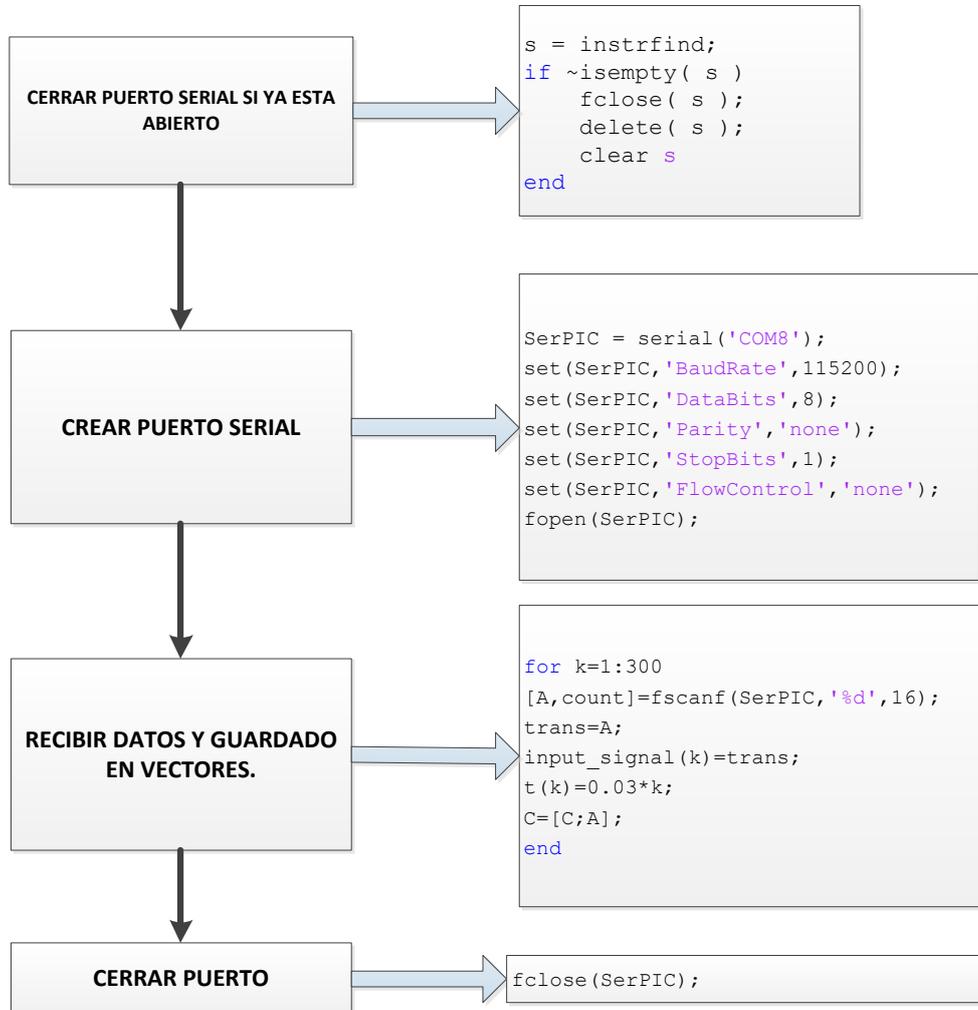


Figura 4.11 Secuencia de la interface de comunicación.

4.4 Programación del método de Prony

En la utilización del método de Prony es necesario tomar unas consideraciones previas para la señal de entrada con la cual se trabaja, esta señal debe estar acompañada de vector de tiempo de cada muestra y definir el periodo al cual estas señales están muestreadas. El programa de Prony empieza por formar la matriz de predicción lineal (ecuación 3.16), como ya se vio en el capítulo 3, esta matriz formada es no conformada, y se resuelve por medio de mínimos cuadrados de esta manera se encuentran los coeficientes del polinomio de aproximación (ecuación 3.9), una vez formado este polinomio se obtienen las raíces con las cuales se calculan los eigenvalores (ecuación 3.17), en esta parte es importante recalcar que el número de eigenvalores encontrados es igual al valor del orden del polinomio de aproximación, en el programa implementado se filtran estos eigenvalores para solo utilizar aquellos eigenvalores que estén dentro del rango de las oscilaciones de baja frecuencia. Una vez obtenidas estas raíces se forma el modelo exponencial propuesto (ecuación 3.7) y se determina el valor de la amplitud compleja, de esta manera se obtiene nuestro modelo que aproxima a la señal de entrada (ecuación 3.4).

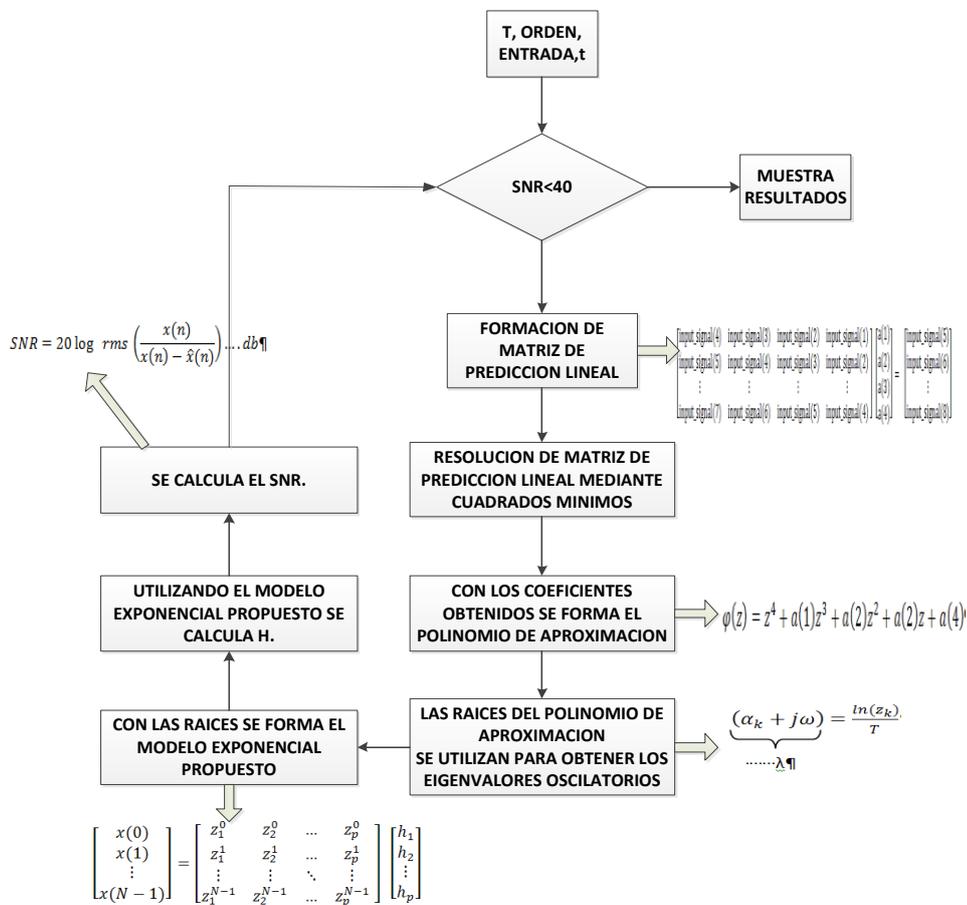


Figura 4.12 Diagrama de flujo del programa de Prony.

A continuación se realiza un ejemplo con una señal de entrada conocida para ilustrar mejor el método de Prony implementado y llevar a cabo paso a paso el método programado con el objetivo de explicar de mejor manera el algoritmo programado en MATLAB.

Primero es necesario hacer unas observaciones iniciales:

- Orden=4
- La señal de entrada utilizada se crea de acuerdo a lo revisado en las referencias [7][8][9] y muestra en según la forma programada en MATLAB:
- $input_signal = 150 * exp(Df1 * t) .* sin(f1 * t) + 160 * exp(Df2 * t) .* sin(f2 * t);$
- El tiempo de programación es $t = [0:0.001:5]$

Para ejemplo utilizando $Df1 = -2$, $f1 = 15$, $Df2 = -3$, $f2 = 10$, estos datos forman los siguientes eigenvalores:

$$\lambda_1 = -2 + 15i$$

$$\lambda_2 = -2 - 15i$$

$$\lambda_3 = -3 + 10i$$

$$\lambda_4 = -3 - 10i$$

• **Paso 1.**

Según lo descrito en el capítulo 3, el método de Prony logra desacoplar los valores de h_k y z_k utilizando solo 2p muestras de la señal de entrada, para nuestras pruebas se utiliza un análisis utilizando todos los valores obtenidos en nuestro intervalo de tiempo mencionado en las observaciones iniciales.

Siguiendo la referencia [1] y [4] utilizando el número máximo de muestras de Prony según la ecuación 3.16.

$$\begin{bmatrix} input_signal(4) & input_signal(3) & input_signal(2) & input_signal(1) \\ input_signal(5) & input_signal(4) & input_signal(3) & input_signal(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ input_signal(5000) & input_signal(4999) & input_signal(4998) & input_signal(4997) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(1) \\ a(2) \\ a(3) \\ a(4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} input_signal(5) \\ input_signal(6) \\ \vdots \\ input_signal(5001) \end{bmatrix}$$

• **Paso 2.**

Para este paso es necesario resolver la matriz formada en el paso anterior, con esta solución se obtiene el vector de coeficientes \mathbf{a} , para este paso se utiliza el método cuadrados mínimos como se muestra en la ecuación 4.7.

$$a = (X' * X)^{-1} * X' * b \quad (4.7)$$

Se forma el polinomio de aproximación $\varphi(z)$ de la ecuación (3.9) de la siguiente manera obteniendo así la ecuación (4.8):

$$\varphi(z) = z^4 + a(1)z^3 + a(2)z^2 + a(2)z + a(4) \quad (4.8)$$

Según los resultados de nuestro ejemplo:

$$\varphi(z) = z^4 - 3.989688743396 z^3 + 5.96942914683 z^2 - 3.96979021529 z + 0.9900474548$$

Una vez obtenido este polinomio se procede a calcular las raíces, tomando en cuenta que las raíces complejas son aquellas con oscilaciones de las cuales es posible calcular los eigenvalores de la señal utilizando la ecuación (3.17):

$$\begin{aligned} z[1] &= 0.969192098810829 + 0.146479059078195i \\ z[2] &= 0.969192098810829 - 0.146479059078195i \\ z[3] &= 0.965597348042785 + 0.096882893454959i \\ z[4] &= 0.965597348042785 - 0.096882893454959i \end{aligned}$$

Y los eigenvalores calculados son:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -2.000000000340843 + 14.999999988302905i \\ \lambda_2 &= -2.000000000340843 - 14.999999988302905i \\ \lambda_3 &= -2.99999999616888 + 10.000000017687121i \\ \lambda_4 &= -2.99999999616888 - 10.000000017687121i \end{aligned}$$

- **Paso 3.**

Para este paso es posible desarrollar el modelo exponencial propuesto de donde mediante un despeje se obtiene la amplitud compleja (h_k), se forma la matriz mostrada en 4.9 según la ecuación 3.4:

$$\begin{bmatrix} \text{input_signal}(0) \\ \text{input_signal}(1) \\ \vdots \\ \text{input_signal}(4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_p^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Obteniendo los siguientes valores de h_k :

$$\begin{aligned} h_1 &= 0.000000013383669 - 75.000000120744517i \\ h_2 &= 0.000000013380031 + 75.000000120755431i \\ h_3 &= -0.000000013380031 - 79.999999763749656i \\ h_4 &= -0.000000013387307 + 79.999999763735104i \end{aligned}$$

De esta manera se llega al fin del método, una variable que es importante a tomar en cuenta para la utilización del método de Prony es la amplitud de cada eigenvalor, se calcula como se muestra en la ecuación 4.10:

$$A_k = \text{sqrt}(\text{imag}(h).^2 + \text{real}(h).^2); \quad (4.10)$$

- **Paso 4.**

Se agrega este paso en donde se verifica si el modelo exponencial propuesto $\hat{x}(n)$ (de la ecuación 3.4), aproxima correctamente a la señal de entrada dada, utilizando a n como índice de cada valor desde $n = 0$ hasta $n = \text{orden}$:

Primero calculando:

$$\hat{x}(n) = Z * H$$

Y ahora si es posible calcular el *SNR* de la ecuación 3.20:

$$SNR = 20 \log \text{rms} \left(\frac{\text{input_signal}(n)}{\text{input_signal}(n) - \hat{x}(n)} \right)$$

CAPITULO 5

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se recopilan todas las pruebas realizadas al método de Prony desarrollado, teniendo como objetivo principal la prueba final, donde interviene la implementación utilizando un simulador de sistemas de potencia en tiempo real y un microcontrolador.

Estas pruebas inician utilizando señales ideales sin ruido a diferentes valores de frecuencia de oscilación, probando cambios de orden y moviendo los eigenvalores esto permitió tomar experiencia con el método y obtener más información acerca de la eficacia del algoritmo, después utilizando un sistema de potencia se realizan simulaciones para obtener valores de potencia activa, potencia reactiva y voltaje en terminales utilizando estas mediciones se calculan los eigenvalores oscilatorios validando resultados comparando con paqueterías comerciales, por último se agrega la prueba al simulador que representa el final del proyecto.

5.1 Pruebas a señales ideales sin ruido

En esta parte se realiza la detección de oscilaciones a una señal en la cual se insertan los eigenvalores a encontrar, de esta manera tenemos una salida conocida, con la cual el método debe comportarse de manera consistente, ya que no se le agrega ruido, esta parte sirve para familiarizarse con el método y encontrar los eigenvalores en donde el método entrega mejores resultados. Estas pruebas se dividen en algunas fases en las cuales se trabajó para encontrar las debilidades y fortalezas del algoritmo implementado.

5.1.1.- Condiciones previas

Se utiliza la siguiente ecuación mostrada de la forma introducida en MATLAB con la cual se realizaron las pruebas en señales ideales.

$$150 * \exp(Df1 * t) .* \sin(f1 * t) + 160 * \exp(Df2 * t) .* \sin(f2 * t);$$

En donde $Df1$ y $Df2$ representan el factor de amortiguamiento de los eigenvalores introducidos, $f1$ y $f2$ representan los valores de frecuencia de los eigenvalores.

Antes de empezar el análisis de las pruebas en cada una de las fases se muestra la tabla 5.1, para enfatizar por que se decidió utilizar todas las muestras disponibles de la señal en lugar de solo utilizar 2 veces el orden del polinomio de aproximación.

Tabla 5.1. Comparación método de Prony señal ideal utilizando diferentes valores de muestras para el análisis en el polinomio de aproximación.

Orden 4	Eigenvalores ($\alpha_k + j\omega$)	Frecuencia de oscilación (f_k)
Señal de entrada	$-2 + 15i$ $-2 - 15i$ $-3 + 10i$ $-3 + 10i$	2.387324146378430 -2.387324146378430 1.591549430918954 -1.591549430918954
Método de Prony (utilizando 2p muestras)	40.148903537913164 -2.716509243980154 +46.130759797896083i -2.716509243980154 -46.130759797896083i -44.718287876516889	- 7.341938450420044 7.341938450420044 -
Método de Prony (utilizando todas las muestras)	-2.021108889497766 +15.090128682169340i -2.021108889497766 -15.090128682169340i -2.978889993070167 + 9.861374689901375i -2.978889993070167 - 9.861374689901375i	2.401668571660039 -2.401668571660039 1.569486527579110 -1.569486527579110

5.1.2.-Fase 1 (movimiento de eigenvalores en baja frecuencia)

5.1.2.1 Descripción de la prueba

Se realizan movimientos en los eigenvalores de la entrada conocida, para observar el resultado obtenido del método Prony. Esto se realiza para evaluar la efectividad del método en las oscilaciones que se desean localizar (0.3hz -3.5hz).

Como ya se describió anteriormente en este caso se introducen 4 eigenvalores en una señal de entrada programada en la cual se parte de eigenvalores con valores de frecuencia de oscilación ligeramente mayores a 3 Hz en donde primero se disminuye gradualmente un par de eigenvalores hasta llegar a frecuencias por debajo de los 0.5 Hz, desde ahí se empieza a decrementar el siguiente par de eigenvalores para encontrarse en el punto más bajo fijado para esta fase, en donde se utiliza el orden del polinomio a orden igual a 4 que es el mismo orden de la señal de entrada. En la tabla 5.2 se muestra los resultados obtenidos en esta fase.

5.1.2.2 Resultados de la prueba

Tabla 5.2. Comportamiento de método de Prony ante diferentes entradas ideales.

Señal de entrada de 4° orden		Polinomio de Prony en 4° orden		
Eigenvalores	Frecuencia de oscilación	Eigenvalores	Frecuencia de oscilación	SNR (signal to noise ratio)
-2 + 20i -2 - 20i -3 + 15i -3 + 15i	3.1831 -3.1831 2.3873 -2.3873	-1.9955 +19.978i -1.9955 -19.978i -3.0045 +15.029i -3.0045 -15.029i	3.1796 -3.1796 2.392 -2.392	46.50811575537073
-2 + 20i -2 - 20i -3 + 12i -3 + 12i	3.1831 -3.1831 1.9099 -1.9099	-1.995 +19.966i -1.995 -19.966i -3.005 +12.057i -3.005 -12.057i	3.1777 -3.1777 1.9189 -1.9189	44.37357125586742
-2 + 20i -2 - 20i -3 + 10i -3 + 10i	3.1831 -3.1831 1.5915 -1.5915	-1.9944 +19.956i -1.9944 -19.956i -3.0056 +10.089i -3.0056 -10.089i	3.176 -3.176 1.6057 -1.6057	43.48369670221893
-2 + 20i -2 - 20i -3 + 8i -3 + 8i	3.1831 -3.1831 1.2732 -1.2732	-1.9841 +19.868i -1.9841 -19.868i -3.0159 +8.3247i -3.0159 -8.3247i	3.1621 -3.1621 1.3249 -1.3249	40.91169822294338
-2 + 20i -2 - 20i -3 + 6i -3 + 6i	3.1831 -3.1831 0.95493 -0.95493	-1.994 +19.951i 1.994 -19.951i -3.006 +6.1621i -3.006 -6.1621i	3.1753 -3.1753 0.98073 -0.98073	42.40822725145674
-2 + 20i -2 - 20i -3 + 4i -3 + 4i	3.1831 -3.1831 0.63662 -0.63662	-1.995 +19.949i -1.995 -19.949i -3.005 +4.2478i -3.005 -4.2478i	3.175 -3.175 0.67605 -0.67605	42.65882622421673
-2 + 20i -2 - 20i -3 + 3i -3 + 3i	3.1831 -3.1831 0.47746 -0.47746	-1.9889 +19.874i -1.9889 -19.874i -3.0111 +3.7496i -3.0111 -3.7496i	3.163 -3.163 0.59676 -0.59676	41.11029905620810
-2 + 15i -2 - 15i -3 + 3i -3 + 3i	2.3873 -2.3873 0.47746 -0.47746	-1.9905 +14.968i -1.9905 -14.968i -3.0095 +3.1589i -3.0095 -3.1589i	2.3822 -2.3822 0.50275 -0.50275	42.59953347385556
-2 + 12i -2 - 12i -3 + 3i -3 + 3i	1.9099 1.9099 0.47746 -0.47746	0.25595 +9.8087i 0.25595 -9.8087i -5.2559 +8.4547i -5.2559 -8.4547i	1.5611 -1.5611 1.3456 -1.3456	38.04900358026424
-2 + 10i -2 - 10i -3 + 3i -3 + 3i	1.5915 -1.5915 0.47746 -0.47746	-2.1958 +11.463i -2.1958 -11.463i 1.9629 -7.5713	1.8245 -1.8245 0 0	39.65122876509353
-2 + 8i -2 - 8i -3 + 3i -3 + 3i	1.2732 -1.2732 0.47746 -0.47746	-2.2999 +9.6549i -2.2999 -9.6549i 1.842 -7.2422	1.5366 -1.5366 0 0	38.81448959135097
-2 + 6i -2 - 6i -3 + 3i -3 + 3i	0.63662 -0.63662 0.47746 -0.47746	8.0378 -2.446 +12.518i -2.446 -12.518i -13.146	0 1.9923 -1.9923 0	36.26558394820322
2 + 4i -2 - 4i -3 + 3i -3 + 3i	0.95493 -0.95493 0.47746 -0.47746	8.8252 +11.932i 8.8252 -11.932i -13.825 +11.772i -13.825 -11.772i	1.899 -1.899 1.8736 -1.8736	32.94478606569294

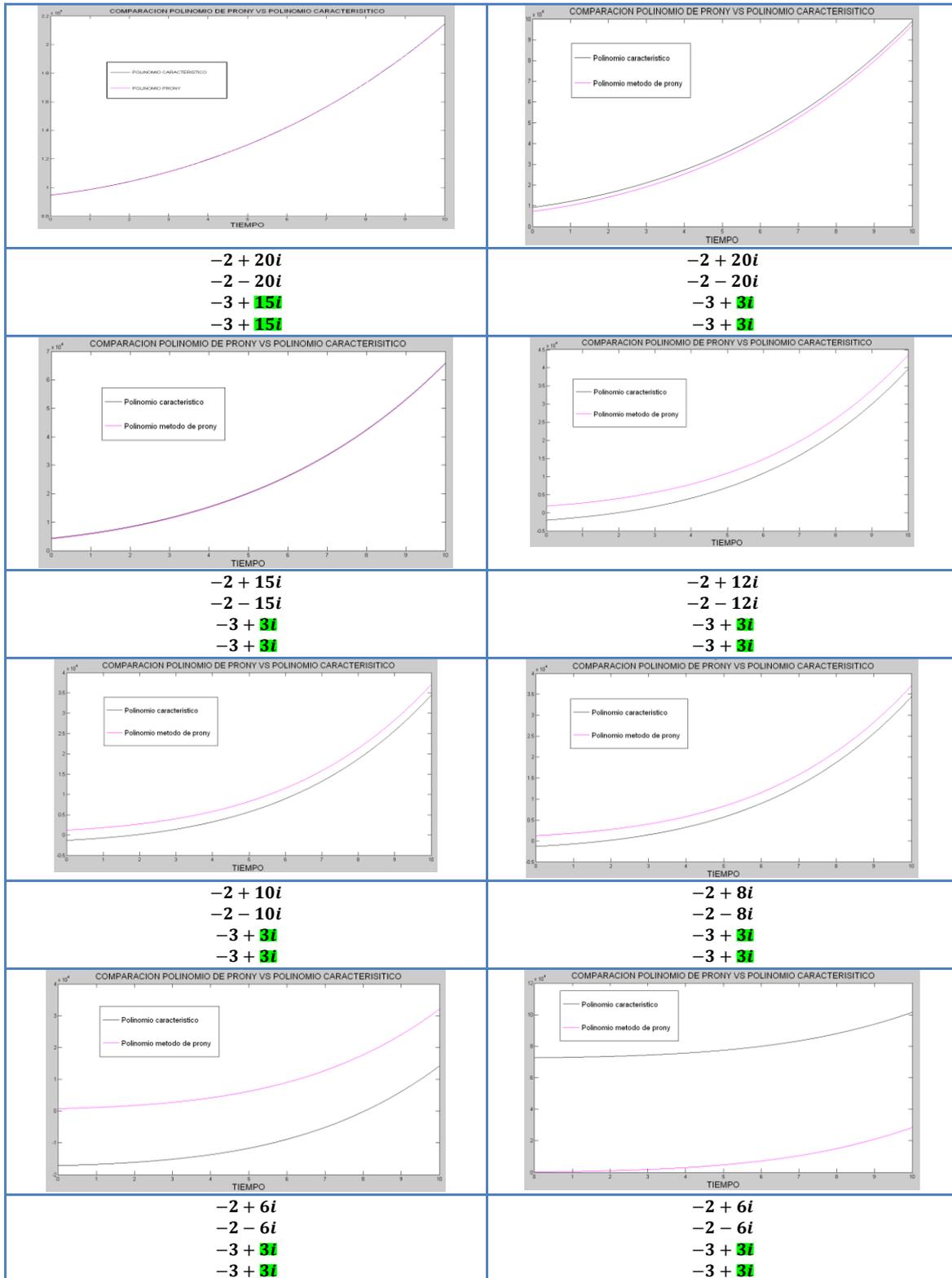


Fig. 5.1. Comparación de los polinomios característicos de señales de entrada con los polinomios obtenidos del método de Prony de la fase 1.

5.1.2.3.-Análisis de la prueba

En la tabla 5.2 y la figura 5.1 se observa el comportamiento del método ante señales ideales, cuando se trabaja con este tipo de entrada podemos describir el comportamiento del método apropiadamente, se marcaron con diferentes tonos de sombreado en la tabla 5.2 valores en los cuales el método con un orden fijo 4 no detecta de manera precisa los eigenvalores de la entrada, esto se corrobora con la figura 5.1 donde se observa que a medida que la señal del polinomio característico tiende a ser más lenta el polinomio de aproximación del algoritmo de Prony se separa lo que nos entrega como resultados eigenvalores oscilatorios erróneos

A medida que las oscilaciones introducidas en la señal de entrada tienden a ser más lentas el método de Prony necesita mayor número de muestras en la matriz de predicción lineal, lo cual se puede conseguir aumentando el orden del polinomio de aproximación, en la figura 5.2 se observa la diferencia entre dos señales de entrada la primer señal introducida en prueba de la fase 1 y el caso crítico final.

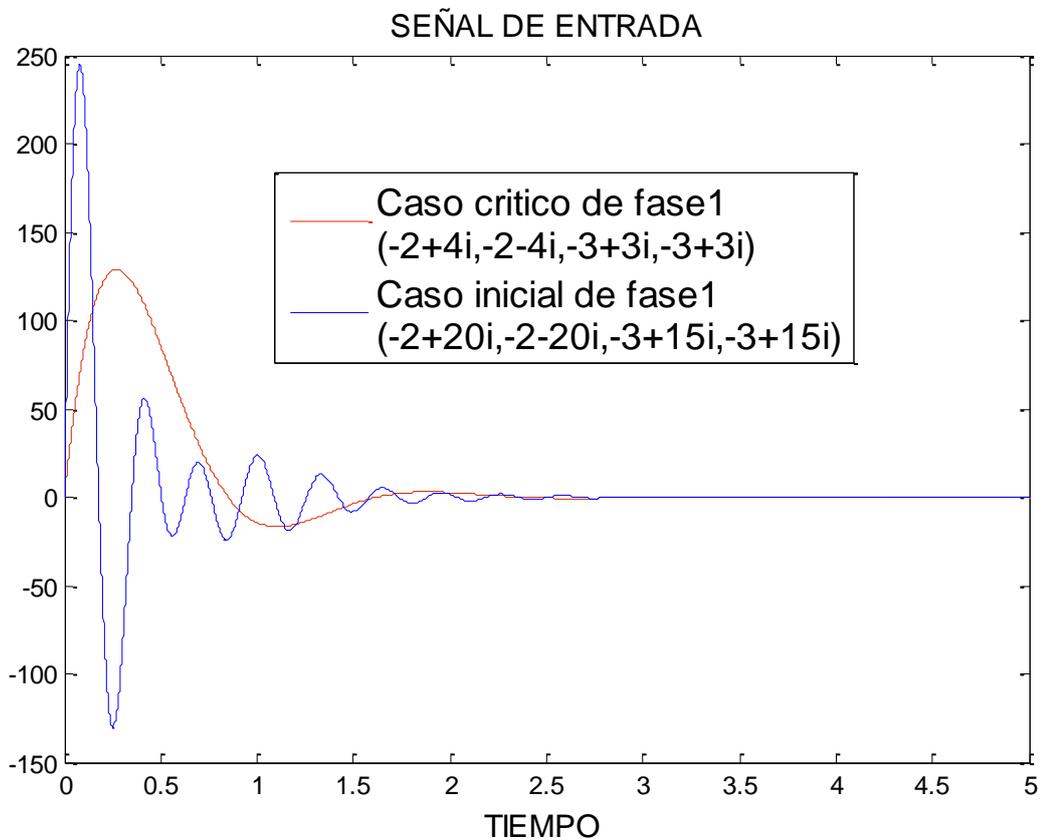


Fig. 5.2. Comparación de las señales de entrada caso inicial y caso crítico.

5.1.3.-Fase 2 (Comparación moviendo el orden del polinomio de aproximación)

5.1.3.1 Descripción de la prueba

Se realiza una comparación moviendo el orden del polinomio de aproximación de Prony conservando la misma señal de entrada y así observar el comportamiento en órdenes diferentes del método.

Para esta prueba se utilizan casos denominados críticos y sombreados en la tabla 5.2 donde el valor de SNR fue menor a 40 db y se prueba estos valores de entrada moviendo el orden, para probar así una de las observaciones realizadas en la fase anterior que a medida que las oscilaciones son más lentas se tiene que aumentar el número de datos a tomar en cuenta lo cual se consigue aumentando el orden del polinomio.

Para esta fase se analizaron 5 valores críticos mostrando en las tablas los eigenvalores a detectar de manera resaltada para diferenciarlos de los eigenvalores espurios que se agregan al aumentar el orden del polinomio.

5.1.3.2 Resultados de la prueba

Tabla 5.3. Comparación variando el orden en el algoritmo de Prony ante una señal de entrada con eigenvalores $-2 + 12i$, $-2 - 12i$, $-3 + 3i$, $-3 - 3i$

	Señal de entrada	4° orden (SNR= 38.0490035)	12° orden (SNR= 48.6070889)	24° orden (SNR= 52.355541)		30°orden (SNR= 51.52288436)	
Eigenvalores	$-2 + 12i$	0.25595 +9.8087i	-151.95 +2875.9i	$-2+12i$	-92.448 +1706.8i	$-2 +12i$	-82.109+1788.1i
	$-2 - 12i$	0.25595 -9.8087i	-151.95 -2875.9i	$-2 -12i$	-92.448 -1706.8i	$-2 -12i$	-82.109-1788.1i
	$-3 + 3i$		-146.74 +2342.4i	$-3 +3i$	-96.298 +1969i	$-3 +3i$	-84.476+1996.9i
	$-3 - 3i$	-5.2559 +8.4547i	-146.74 -2342.4i	$-3 -3i$	-96.298 -1969i	$-3 -3i$	-84.476-1996.9i
		-5.2559 -8.4547i	-135.44 +1800.3i		-99.203 +2230.3i		-86.361+2205.4i
			-135.44 -1800.3i	-59.861 +619.87i	-99.203 -2230.3i	-48.186+497.13i	-86.361-2205.4i
			-115.14 +1231.9i	-59.861 -619.87i	-101.29 +2491i	-48.186 497.13i	-89.922+3037.6i
			-115.14 -1231.9i	-72.281 +905.23i	-101.29 -2491i	-58.36 + 725.94i	-89.922-3037.6i
				-72.281 -905.23i	-103.31 +3011.5i	-58.36 -725.94i	-89.578+2829.7i
				$-2 +12i$	-103.31 -3011.5i	-65.587+943.68i	-89.578-2829.7i
				$-2 -12i$	-102.64 +2751.4i	-65.587-943.68i	-88.881+2621.8i
				$-3 +3.0013i$	-102.64 -2751.4i	-71.153+1157.2i	-88.881-2621.8i
				$-3 -3.0013i$		-71.153-1157.2i	-87.817+2413.7i
						-75.591+1368.6i	-87.817-2413.7i
						-75.591-1368.6i	
					-79.185+1578.7i		
					-79.185-1578.7i		

Tabla 5.4. Comparación variando el orden en el algoritmo de Prony ante una señal de entrada con eigenvalores $-2 + 10i$, $-2 - 10i$, $-3 + 3i$, $-3 + 3i$

	Señal de entrada	4° orden (SNR= 39.6512287)	12° orden (SNR= 50.8016028)	24° orden (SNR= 56.514835912)		30°orden (SNR= 60.174324563)	
Eigenvalores	$-2 + 10i$	-2.1958 +11.463i	-151.95 +2875.9i	$-2+12i$	-92.448 +1706.8i	$-2 +12i$	-82.109+1788.1i
	$-2 - 10i$	-2.1958 -11.463i	-151.95 -2875.9i	$-2 -12i$	-92.448 -1706.8i	$-2 -12i$	-82.109-1788.1i
	$-3 + 3i$		-146.74 +2342.4i	$-3 +3i$	-96.298 +1969i	$-3 +3i$	-84.476+1996.9i
	$-3 + 3i$	1.9629	-146.74 -2342.4i	$-3 -3i$	-96.298 -1969i	$-3 -3i$	-84.476-1996.9i
		-7.5713	-135.44 +1800.3i		-99.203 +2230.3i		-86.361+2205.4i
			-135.44 -1800.3i	-59.861 +619.87i	-99.203 -2230.3i	-48.186+497.13i	-86.361-2205.4i
			-115.14 +1231.9i	-59.861 -619.87i	-101.29 +2491i	-48.186 497.13i	-89.922+3037.6i
			-115.14 -1231.9i	-72.281 +905.23i	-101.29 -2491i	-58.36 + 725.94i	-89.922-3037.6i
				-72.281 -905.23i	-103.31 +3011.5i	-58.36 -725.94i	-89.578+2829.7i
				$-2 +12i$	-103.31 -3011.5i	-65.587+943.68i	-89.578-2829.7i
				$-2 -12i$	-102.64 +2751.4i	-65.587-943.68i	-88.881+2621.8i
				$-3 +3.0013i$	-102.64 -2751.4i	-71.153+1157.2i	-88.881-2621.8i
				$-3 -3.0013i$		-71.153-1157.2i	-87.817+2413.7i
						-75.591+1368.6i	-87.817-2413.7i
						-75.591-1368.6i	
						-79.185+1578.7i	
					-79.185-1578.7i		

Tabla 5.5. Comparación variando el orden en el algoritmo de Prony ante una señal de entrada con eigenvalores $-2 + 8i$, $-2 - 8i$, $-3 + 3i$, $-3 + 3i$

	Señal de entrada	4° orden (SNR= 38.8144895)	12° orden (SNR= 47.357274)	24° orden (SNR= 52.5780472)		30°orden (SNR= 50.744698689)	
Eigenvalores	$-2 + 8i$	-2.2999 +9.6549i	-151.96 +2875.9i	$-2 +8i$	-99.211 +2230.3i	$-2 +8i$	-82.12+1788.1i
	$-2 - 8i$	-2.2999-9.6549i	-151.96 -2875.9i	$-2 8i$	-99.211 -2230.3i	$-2 -8i$	-82.12-1788.1i
	$-3 + 3i$		-146.75 +2342.4i	$-3 +2.9999i$	-101.3 + 2491i	$-3 +3i$	-84.486+1996.9i
	$-3 + 3i$	1.842	-146.75 -2342.4i	$-3 -2.9999i$	-101.3 -2491i	$-3 -3i$	-84.486-1996.9i
		-7.2422	-135.44 +1800.3i	-59.872 +619.84i	-103.32 +3011.5i	-48.199+497.09i	-86.371+2205.4i
			-135.44 -1800.3i	-59.872 -619.84i	-103.32 - 3011.5i	-48.199-497.09i	-86.371-2205.4i
			-115.14 +1231.9i	-72.291 +905.21i	-102.65 +2751.4i	-58.372+725.91i	-89.932+3037.6i
			-115.14 -1231.9i	-72.291 -905.21i	-102.65 -2751.4i	-58.372-725.91i	-89.932-3037.6i
				-80.953 +1176.8i		-65.599+943.66i	-89.588+2829.7i
				-80.953 -1176.8i		-65.599-943.66i	-89.588-2829.7i
				$-2.9983 +2.9825i$		-71.164+1157.2i	-88.891+2621.8i
				$-2.9983 -2.9825i$		-71.164-1157.2i	-88.891-2621.8i
				-87.455 - 1443.1i		-75.601+1368.6i	-87.827+2413.7i
				-92.457 +1706.8i		-75.601-1368.6i	-87.827-2413.7i
				-92.457 -1706.8i		-79.196+1578.7i	
				-96.307 + 1969i		-79.196-1578.7i	
			-96.307 - 1969i				

Tabla 5.6. Comparación variando el orden en el algoritmo de Prony ante una señal de entrada con eigenvalores $-2 + 6i$, $-2 - 6i$, $-3 + 3i$, $-3 + 3i$

	Señal de entrada	4° orden (SNR= 3.6265583)	12° orden (SNR= 47.014846)	24° orden (SNR= 51.40083588)		30°orden (SNR= 47.939615)	
Eigenvalores	$-2 + 6i$	8.0378	-151.96+2875.9i	-2 +6.0001i	-96.31 +1969i	-2+6.0001i	-82.123+1788.1i
	$-2 - 6i$	-2.446 +12.518i	-151.96 -2875.9i	-2 -6.0001i	-96.31 -1969i	-2 -6.0001i	-82.123-1788.1i
	$-3 + 3i$	-2.446 - 12.518i	-146.75 +2342.4i	-3 +2.9998i	-99.214 +2230.3i	-3 +2.9998i	-84.49+1996.9i
	$-3 + 3i$	-13.146	-146.75 -2342.4i	-3 - 2.9998i	-99.214 -2230.3i	-3 -2.9998i	-84.49-1996.9i
			-135.45 +1800.3i	-59.875+619.83i	-101.3 +2491i	-48.204+497.07i	-86.375+2205.4i
			-135.45 -1800.3i	-59.875 -619.83i	-101.3 -2491i	-48.204-497.07i	-86.375-2205.4i
			-115.14 +1231.9i	-72.294 +905.21i	-103.32 +3011.5i	-58.376+725.9i	-89.936+3037.6i
			-115.14 - 1231.9i	-72.294 -905.21i	-103.32 -3011.5i	-58.376-725.9i	-89.936-3037.6i
			-1.9958 +5.9916i	-80.956 +1176.8i	-102.65 + 2751.4i	-65.602+943.66i	-89.591+2829.7i
			-1.9958 -5.9916i	-80.956 -1176.8i	-102.65 -2751.4i	-65.602-943.66i	-89.591-2829.7i
			-3.0042 +3.0181i	-87.458 +1443.1i		-71.168+1157.2i	-88.895+2621.7i
			-3.0042 -3.0181i	-87.458 -1443.1i		-71.168-1157.2i	-88.895-2621.7i
				-92.46 +1706.8i		-75.605+1368.5i	-87.831+2413.7i
				-92.46 -1706.8i		-75.605-1368.5i	-87.831-2413.7i
						-79.199+1578.7i	-79.199-1578.7i

Tabla 5.7. Comparación variando el orden en el algoritmo de Prony ante una señal de entrada con eigenvalores $-2 + 4i$, $-2 - 4i$, $-3 + 3i$, $-3 + 3i$

	Señal de entrada	4° orden (SNR= 32.944786)	12° orden (SNR= 45.541399)	24° orden (SNR= 48.0077339)		30°orden (SNR= 46.49569679)	
Eigenvalores	$-2 + 4i$	8.8252 +11.932i	-151.96+2875.9i	-2.0073+4.0057i	-99.216+2230.3i	-1.9995+3.9997i	-82.126+1788.1i
	$-2 - 4i$	8.8252 -11.932i	-151.96 -2875.9i	-2.0073 -4.0057i	-99.216 -2230.3i	-1.9995-3.9997i	-82.126-1788.1i
	$-3 + 3i$	-13.825 +11.772i	-146.75 +2342.4i	-2.9927 +2.9899i	-101.3 +2491i	-3.0005+3.0006i	-84.492+1996.9i
	$-3 + 3i$	-13.825 -11.772i	-146.75 -2342.4i	-2.9927 -2.9899i	-101.3 - 2491i	-3.0005-3.0006i	-84.492-1996.9i
			-135.45 +1800.3i	-59.878 +619.82i	-103.32 +3011.5i	-48.208+497.07i	-86.377+2205.4i
			-135.45 - 1800.3i	-59.878 -619.82i	-103.32 -3011.5i	-48.208-497.07i	-86.377-2205.4i
			-115.15 + 1231.9i	-72.296 +905.2i	-102.66 + 2751.4i	-58.379+725.9i	-89.939+3037.6i
			-115.15 -1231.9i	-72.296 - 905.2i	-102.66 - 2751.4i	-58.379 - 725.9i	-89.939-3037.6i
			-1.9942 +4.0107i	-80.958 +1176.8i		-65.605+943.65i	-89.594+2829.7i
			-1.9942 -4.0107i	-80.958 -1176.8i		-65.605-943.65i	-89.594-2829.7i
			-3.0058 + 2.9878i	-87.46 +1443.1i		-71.171+1157.2i	-88.897+2621.7i
			-3.0058 - 2.9878i	-87.46 -1443.1i		-71.171-1157.2i	-88.897-2621.7i
				-92.462+1706.8i		-75.608+1368.5i	-87.833+2413.7i
				-92.462-1706.8i		-75.608-1368.5i	-87.833-2413.7i
						-79.202+1578.7i	-79.202-1578.7i

5.1.3.3 Análisis de la prueba

Al aumentar el orden del polinomio se consiguió mejorar la detección de eigenvalores oscilatorios de la señal de entrada, aunque al ejecutar este procedimiento se agrega al resultado eigenvalores espurios los cuales deben ser desechados para que solo intervengan los eigenvalores que son parte de la señal a analizar.

En la figura 5.3 se muestra la señal de entrada comparada con el algoritmo de Prony propuesto a diferente valore de orden, esta grafica se elabora utilizando el modelo exponencial propuesto y se puede observar que conforme el orden de polinomio del algoritmo de Prony es aumentado la aproximación a la señal de entrada mejora, Es por esto que en la tabla 5.7 se observa que a partir del orden 12, se consigue detectar los eigenvalores introducidos en la señal de entrada.

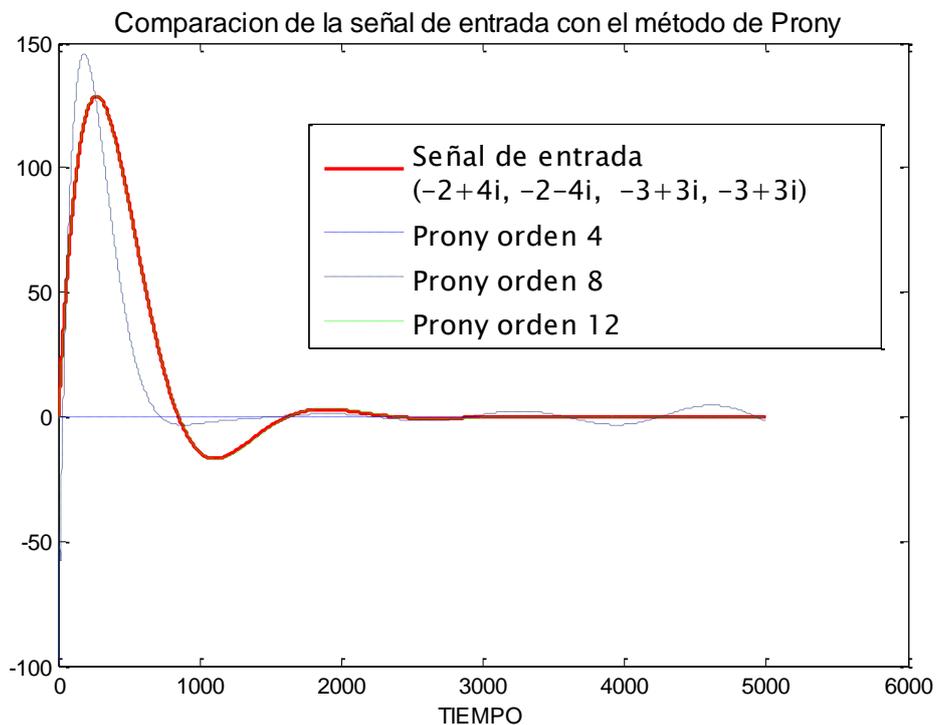


Fig. 5.3. Comparación de la señal de entrada caso crítico con el método de Prony a diferentes órdenes de aproximación.

5.1.4.-Fase 3 (Análisis de tiempo de muestreo)

5.1.4.1 Descripción de la prueba

Para esta fase se utilizan eigenvalores de entrada menores que el caso crítico, de acuerdo a lo visto en las fases anteriores se necesita en este tipo de eigenvalores mayor orden para detectarlos.

Los eigenvalores con los cuales se trabajó en esta fase se encontraron al mover los datos de la entrada alrededor de las señales que son más conflictivas para el método, de esta manera encontrar un caso para el cual decidir a qué tiempo de muestreo se comporta mejor el algoritmo propuesto.

5.1.4.2 Resultados de la prueba

Tabla 5.8 Comparación de diferentes tiempos de muestreo para caso especial.

Señal de entrada eigenvalores	12° orden		
	0.001	0.01	0.1
$-0.028 + 2.8903i$ $-0.028 - 2.8903i$ $-0.0634 + 3.1416i$ $-0.0634 - 3.1416i$	-0.094906±8.0317i	-0.063402 ± 3.1416i -0.027998 ± 2.8903i	-1.2514 ± 18.181i -1.0371 ± 12.635i <u>-0.0634 ± 3.1416i</u> <u>-0.028 ± 2.8903i</u>
	24° orden		
	0.001	0.01	0.1
	-0.041841 ± 3.4183i -0.049561 ± 2.5568i	-0.0634 ± 3.1416i -0.028 ± 2.8903i	<u>-0.028 ± 2.8903i</u> <u>-0.0634 ± 3.1416i</u> -0.94512 ± 7.29i -1.2236 ± 10.051i -1.4223 ± 12.74i -1.5781 ± 15.406i -1.7055 ± 18.065i -1.8108 ± 20.723i

5.1.4.3 Análisis de la prueba

En esta fase se analizaron 3 tiempos de muestreo, moviendo el orden de 12 a 24, se puede observar que para este caso en específico cuando se analiza la señal de entrada especial para detectar las oscilaciones de baja frecuencia con menor orden se puede trabajar con un menor número de muestras por segundo, es importante contar con un muestreo adecuado de la señal, cuando se disminuye el número de muestras por ciclo se aumenta la rapidez con la que la señal muestra su comportamiento completo, entonces como se puede decir que al utilizar más muestras por ciclo se tiene que incrementar el orden del polinomio, y por el contrario a muy pocas muestras por ciclo se altera el resultado al aparecer eigenvalores espurios de baja frecuencia que no pertenecen a la señal de entrada, para los cuales es necesario tomar otras medidas que se analizaran posteriormente. Lo mostrado en las tablas se puede observar de manera gráfica en las figuras 5.5 y 5.6 en donde se observa que la mejor aproximación de la señal de se obtiene a un tiempo de muestreo de 0.01 segundos.

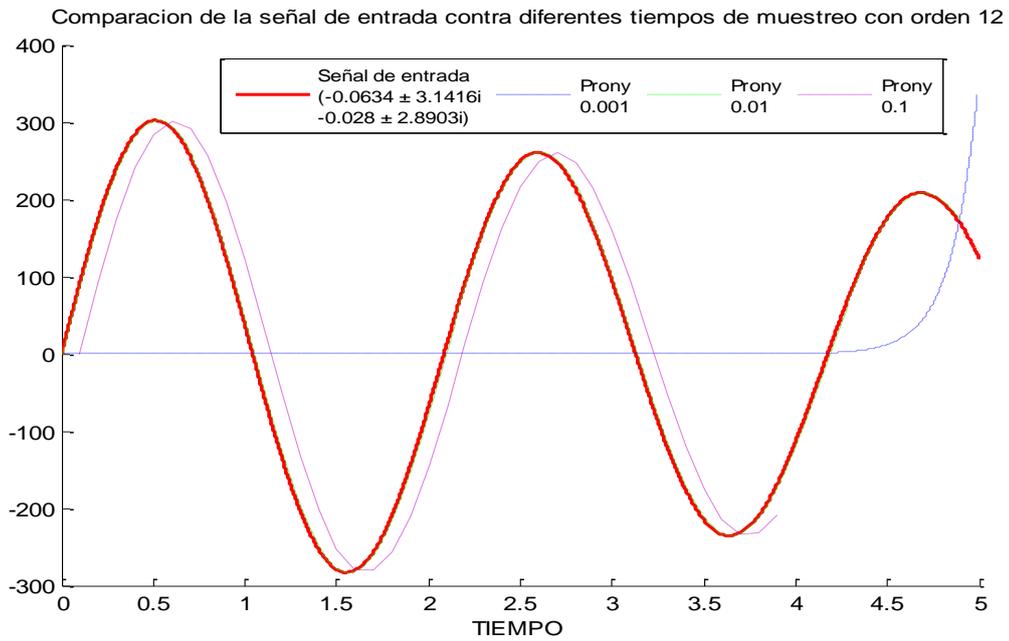


Figura 5.4 Comparación de la señal de entrada para el caso especial contra el algoritmo de Prony a diferentes tiempos de muestreo con orden 12.

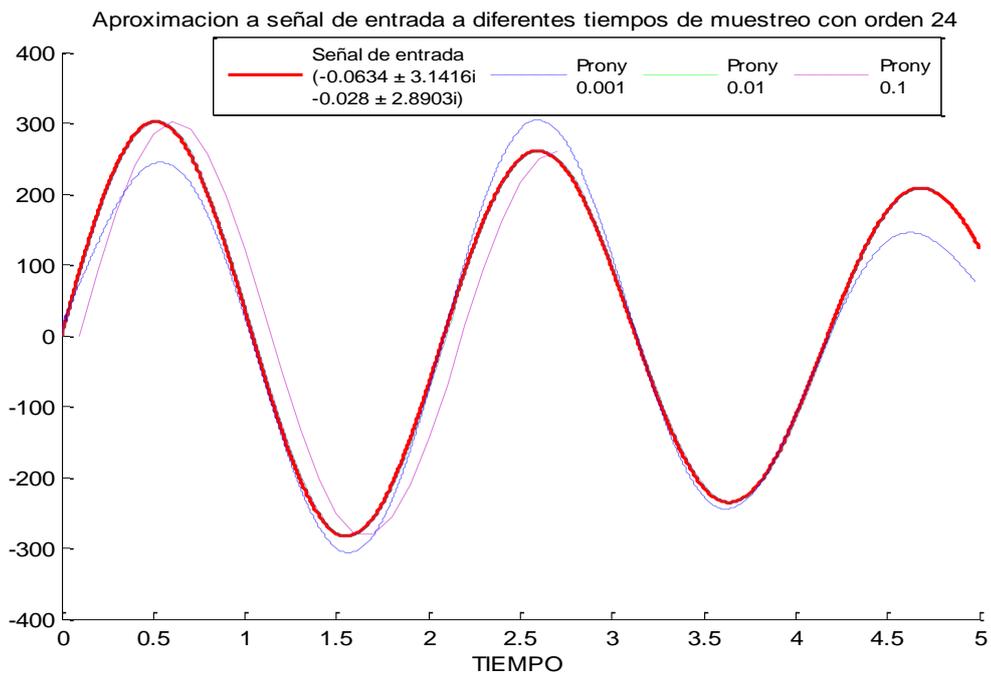


Figura 5.5 Comparación de la señal de entrada para el caso especial contra el algoritmo de Prony a diferentes tiempos de muestreo con orden 24.

5.2.- Prueba con sistema de potencia de dos áreas.

5.2.1.- Descripción de la prueba

Para realizar esta prueba se utiliza el sistema de potencia de dos áreas que presenta oscilaciones de baja frecuencia, las cuales han sido muy estudiadas anteriormente. Este sistema se cargó utilizando los datos mostrados en el apéndice A, El sistema es simulado en un programa especializado de sistemas de potencia con el cual se analizan diferentes variables como son: potencia activa, potencia reactiva y el voltaje en terminales en algunos nodos de la red, estas variables son utilizadas como señales entrada para el algoritmo de Prony ya descrito, los datos de salida obtenidos con el método de Prony son comparados con paquetes comerciales para probar la efectividad del método y el algoritmo de implementado. Los resultados de los paquetes comerciales fueron obtenidos de [31] y [4], también se realiza una comparación con [10].

Los paquetes utilizados adaptados de [4]:

PSS/E [32]

DIGSILENT[33]

EUROSTAG[34]

También se realizaron simulaciones dinámicas y cálculo de eigenvalores en The Power System Analysis Toolbox (PSAT) [35]de MATLAB Y en Small Signal Analysis Tool (SSAT) [36]de Power Tech.

En la figura 5.6 se muestran los puntos de análisis en el sistema de potencia de dos áreas de los cuales se obtuvieron las mediciones de las variables mencionadas que se obtienen utilizando el PSAT para MATLAB. Se realiza una simulación dinámica ante una falla trifásica en el nodo 8 del sistema de potencia mostrado en la figura 5.6. Se miden las variables mencionadas de 0 a 20 segundos tomando ventanas de esta señal como entrada para el algoritmo de Prony. Se comparan los resultados del análisis de la estabilidad de pequeña señal en PSAT y una adaptación de las pruebas realizadas con el mismo sistema en [4].

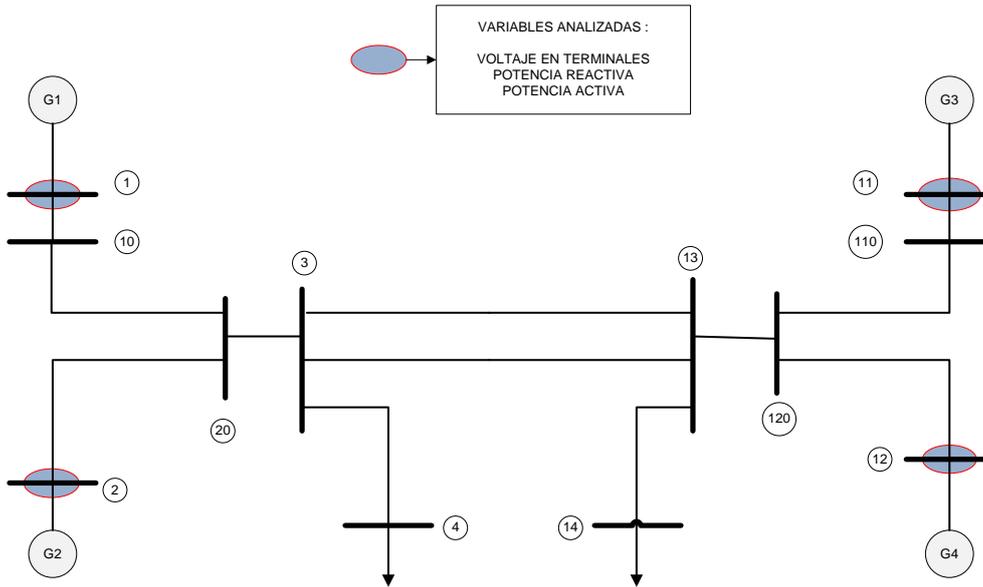


Figura 5.6. Puntos a analizar del sistema de potencia de dos áreas.

En las figuras 5.7, 5.8 y 5.9 se muestra el manejo de la simulación realizada en PSAT obteniendo el comportamiento de las variables durante un periodo completo de 20 segundos de los cuales se analizaron 10 segundos con un muestreo de 0.01 segundos.

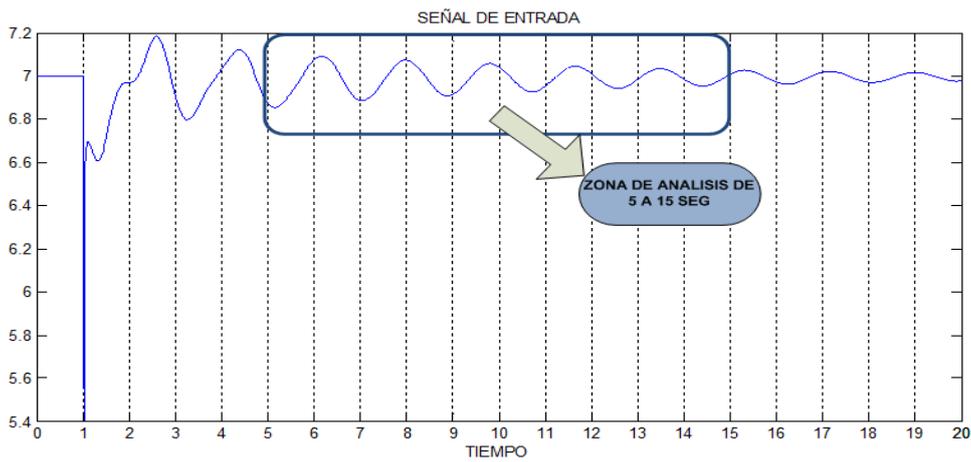


Figura 5.7. Señal de entrada de la potencia activa especificando el área de análisis

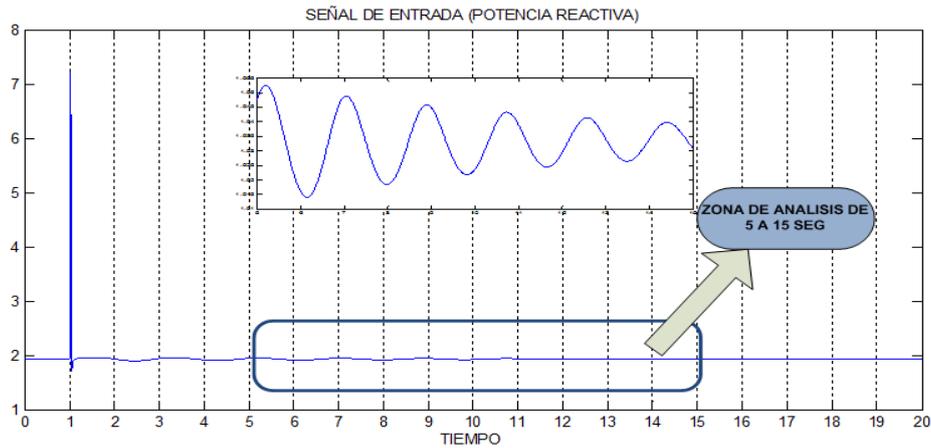


Figura 5.8. Señal de entrada para la potencia reactiva especificando el área de análisis.

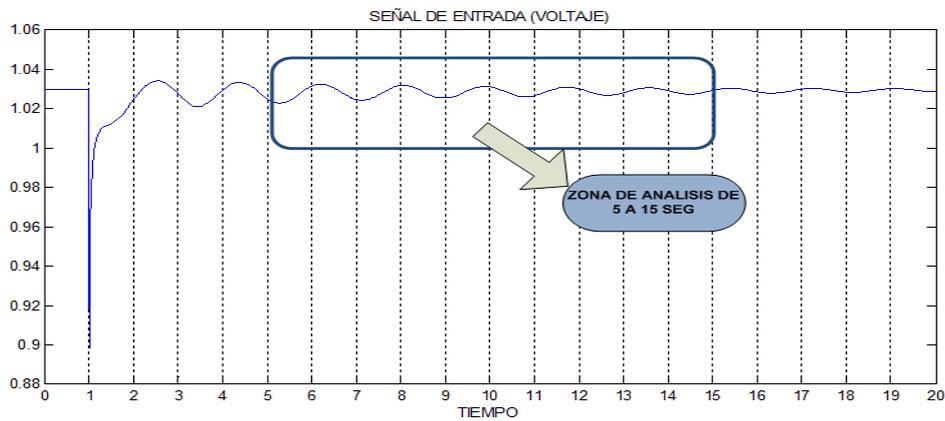


Figura 5.9. Señal de entrada para el voltaje especificando el área de análisis.

En las tablas 5.9 y 5.10 se puede observar los resultados obtenidos al analizar la señal con el programa PSAT. En cada tabla se especifica el orden del polinomio de aproximación el cual se obtuvo partiendo de un orden de 50 hasta llegar al orden donde el valor de la relación señal ruido (SNR) supera los 40 db. También se muestran los valores de la frecuencia (f) y amplitud (A) de cada eigenvalor oscilatorio. En las tablas se muestran solo los eigenvalores oscilatorios en el rango de las oscilaciones de baja frecuencia (0.5 a 3.5 Hz).

Se realizan los eigenvalores similares a los encontrados por el PSAT para hacer más fácil la visualización de los resultados, se especifican los eigenvalores encontrados por nodo de análisis según lo observado en la figura 5.6.

5.2.2 Resultados de la prueba

Tabla 5.9. Análisis de resultados obtenidos con el algoritmo de Prony y el programa PSAT prueba con potencia activa y potencia reactiva.

Eigenvalores calculados PSAT	Eigenvalores calculados con el algoritmo de Prony			
	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
<p>$-0.5554 \pm j6.594$ (f = 1.0495 Hz)</p> <p>$-0.5664 \pm j6.785$ (f = 1.0799 Hz)</p> <p>$-0.1307 \pm j3.413$ (f = 0.54329 Hz)</p>	<p>Potencia activa (orden 54)</p> <p>$-0.67681 \pm 6.7922i$ (f = 1.081 Hz) (A=0.0074131)</p> <p>$-0.12923 \pm 3.4164i$ (f = 0.54374 Hz) (A=0.063893)</p> <p>SNR=48.148 db</p>	<p>Potencia activa (orden 66)</p> <p>$-0.56955 \pm 6.7289i$ (f = 1.0709 Hz) (A=0.0055873)</p> <p>$-0.12382 \pm 3.4091i$ (f = 0.54257 Hz) (A=0.024002)</p> <p>$-10.668 \pm 14.6i$ (f = 2.3236 Hz) (A=0.00017234)</p> <p>SNR=43.24 db</p>	<p>Potencia activa (orden 52)</p> <p>$-0.43096 \pm 6.4999i$ (f = 1.0345 Hz) (A=0.0044396)</p> <p>$-0.12503 \pm 3.418i$ (f = 0.54399 Hz) (A=0.032638)</p> <p>SNR=40.401 db</p>	<p>Potencia activa (orden 56)</p> <p>$-0.68781 \pm 6.7275i$ (f = 1.0707 Hz) (A= 0.005787)</p> <p>$-0.12979 \pm 3.4176i$ (f = 0.54393 Hz) (A= 0.06913)</p> <p>SNR=43.72 db</p>
	<p>Potencia Reactiva (orden 214)</p> <p>$-0.22574 \pm 6.8065i$ (f = 1.0833 Hz) (A=0.00077909)</p> <p>$-0.13001 \pm 3.4189i$ (f = 0.54414 Hz) (A=0.010582)</p> <p>$-0.65633 \pm 6.9514i$ (f = 1.1063 Hz) (A=0.00054337)</p> <p>$-0.57849 \pm 10.138i$ (f = 1.6136 Hz) (A=1.9814e-005)</p> <p>$-0.75829 \pm 15.667i$ (f = 2.4935 Hz) (A=1.3556e-006)</p> <p>$-0.75491 \pm 20.482i$ (f = 3.2598 Hz) (A=1.3126e-006)</p> <p>$-3.9828 \pm 19.767i$ (f = 3.146 Hz) (A=1.5808e-005)</p> <p>SNR=40.485</p>	<p>Potencia Reactiva (orden 106)</p> <p>$-0.56491 \pm 6.6756i$ (f = 1.0625 Hz) (A=0.0012907)</p> <p>$-0.12945 \pm 3.4184i$ (f = 0.54406 Hz) (A=0.061253)</p> <p>$-1.4672 \pm 9.9246i$ (f = 1.5795 Hz) (A=9.7078e-005)</p> <p>SNR=40.344</p>	<p>Potencia Reactiva (orden 146)</p> <p>$-0.12942 \pm 3.4186i$ (f = 0.54409 Hz) (A=0.0026569)</p> <p>$-0.4384 \pm 6.815i$ (f = 1.0846 Hz) (A=4.8901e-005)</p> <p>$-1.4793 \pm 14.788i$ (f = 2.3536 Hz) (A= 8.0266e-007)</p> <p>$-1.3584 \pm 18.297i$ (f = 2.912 Hz) (A=1.5649e-006)</p> <p>SNR=41.97</p>	<p>Potencia Reactiva (orden 62)</p> <p>$-0.49566 \pm 6.6406i$ (f = 1.0569 Hz) (A= 0.0022558)</p> <p>$-0.15227 \pm 3.4015i$ (f = 0.54136 Hz) (A= 0.0036334)</p> <p>SNR=41.086</p>

Tabla 5.10. Análisis de resultados obtenidos con el algoritmo de Prony y el programa PSAT prueba con la variable voltaje en terminales.

Eigenvectores calculados PSAT	Eigenvectores calculados con el algoritmo de Prony			
	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
	Voltaje (orden 146)	Voltaje (orden 138)	Voltaje (orden 137)	Voltaje (orden 153)
	<u>-0.12942±3.4186i</u> (f = 0.54409 Hz) (A=0.0026569)	<u>-0.12956±3.4186i</u> (f = 0.54408 Hz) (A=0.0033476)	<u>-0.13016±3.4184i</u> (f 0.54406Hz) (A= 0.0010777)	<u>-0.41069±6.7177i</u> (f = 1.0691Hz) (A= 8.9168e-005)
-0.5554± j6.594 (f = 1.0495 Hz)	<u>-0.4384±6.815i</u> (f = 1.0846 Hz) (A=4.8901e-005)	<u>-0.31218±6.9136i</u> (f = 1.1003Hz) (A=2.9727e-005)	<u>-0.36875±6.646i</u> (f= 1.0577Hz) (A= 5.9463e-005)	<u>-0.12958±3.418i</u> (f 0.54399Hz) (A= 0.0014576)
-0.5664± j6.785 (f = 1.0799Hz)	<u>-1.4793±14.788i</u> (f = 2.3536Hz) (A=8.0266e-007)	<u>-1.2602±14.211i</u> (f = 2.2617Hz) (A=4.2259e-007)	<u>-1.0846±15.671i</u> (f = 2.4942Hz) (A= 1.3071e-006)	<u>-0.86568±12.994i</u> (f = 2.068 Hz) (A= 1.1801e-006)
-0.1307± j3.413 (f 0.54329Hz)	<u>-1.3584±18.297i</u> (f = 2.912Hz) (A=1.5649e-006)	<u>-1.0383±20.075i</u> (f = 3.195Hz) (A=1.1735e-006)	<u>-1.8446±20.13i</u> (f =3.2037Hz) (A= 2.7988e-006)	<u>-1.981±17.434i</u> (f = 2.7747Hz) (A= 2.1324e-006)
	SNR=41.978	SNR=40.92	SNR=43.718	SNR=40.038

5.2.3 Análisis de la prueba

Al realizar las pruebas con el sistema de potencia simulado se destaca que es importante tomar en cuenta la amplitud como parámetro para desechar valores espurios en los resultados obtenidos como eigenvectores oscilatorios en el rango de las oscilaciones de baja frecuencia, para la tabla 5.11 se toman en cuenta solo los eigenvectores que presenten amplitudes mayores a 0.001, realizando un resumen de los eigenvectores más cercanos a la simulación en PSAT de las tablas 5.9 y 5.10, así tener en cuenta los valores más representativos del método de Prony.

En la tabla 5.11 se agregan los eigenvectores obtenidos con paqueterías comerciales con el propósito de validar los resultados del método, analizando cada variable por separado mostrando así que la potencia activa es la variable con la cual se obtienen mejores resultados en el análisis al utilizar menor orden para detectar oscilaciones y presentar con mayor precisión los resultados esperados para la simulación del sistema de potencia de dos áreas.

Tabla 5.11. Comparación de los eigenvalores de oscilaciones de baja frecuencia utilizando el método de Prony con algunas paqueterías comerciales (Adaptado de [Kaberere et al,2005]).

PSS/E	DigSILENT	EUROSTAG	SSAT	Kundur [14]	PSAT	Prony
$-0.613 \pm j6.76$ (f = 1.075 Hz)	$-0.626 \pm j6.67$ (f = 1.062 Hz)	$-0.558 \pm j6.58$ (f = 1.047 Hz)	$-0.5125 \pm j7.2365$ (f = 1.1197 Hz)	$-0.492 \pm j6.82$ (f = 1.087 Hz)	$-0.5554 \pm j6.594$ (f = 1.0495 Hz)	POTENCIA ACTIVA
$-0.631 \pm j6.94$ (f = 1.105 Hz)	$-0.636 \pm j6.90$ (f = 1.097 Hz)	$-0.570 \pm j6.77$ (f = 1.077 Hz)	$-0.5145 \pm j7.2365$ (f = 1.1517 Hz)	$-0.506 \pm j7.02$ (f = 1.117 Hz)	$-0.5664 \pm j6.785$ (f = 1.0799 Hz)	-0.43096 ± j6.4999 (f = 1.0345 Hz) (A=0.0044396) BUS 3
$-0.155 \pm j3.41$ (f = 0.543 Hz)	$-0.140 \pm j3.41$ (f = 0.542 Hz)	$-0.115 \pm j3.42$ (f = 0.544 Hz)	$-0.1022 \pm j4.3849$ (f = 0.6979 Hz)	$-0.111 \pm j3.43$ (f = 0.545 Hz)	$-0.1307 \pm j3.413$ (f = 0.5432 Hz)	-0.67681 ± j6.7922 (f = 1.081 Hz) (A=0.0074131) BUS2
$+0.187 \pm j0.163$ (f = 0.026 Hz)		$-0.0998 \pm j0.030$ (f = 0.005 Hz)		$-37.89 \pm j0.142$ (f = 0.023 Hz)		
$-0.149 \pm j0.067$ (f = 0.011 Hz)				$-38.01 \pm j0.038$ (f = 0.006 Hz)		-0.12979 ± j3.4176i (f = 0.54393 Hz) (A= 0.06913) BUS4
				$-0.00076 \pm j0.0022$ (f = 0.0003 Hz)		POTENCIA REACTIVA
						-0.49566 ± j6.6406 (f = 1.0569 Hz) (A= 0.0022558) BUS 4
						-0.12942 ± j3.4186i (f = 0.54409 Hz) (A=0.0026569) BUS3
						VOLTAJE
						-0.12958 ± j3.418i (f 0.54399 Hz) (A= 0.0014576) BUS4

5.3 Implementación utilizando simulador de sistemas de potencia en tiempo real

5.3.2 Prueba en línea

5.3.1.1 Descripción de la Prueba

Se realiza la prueba en línea utilizando el simulador en tiempo real cargando el sistema de potencia de dos áreas del cual se realizan mediciones en tiempo real de voltaje y corriente con el microcontrolador, el sistema de potencia cargado tiene una falla trifásica ubicada como se muestra en la figura 5.10.

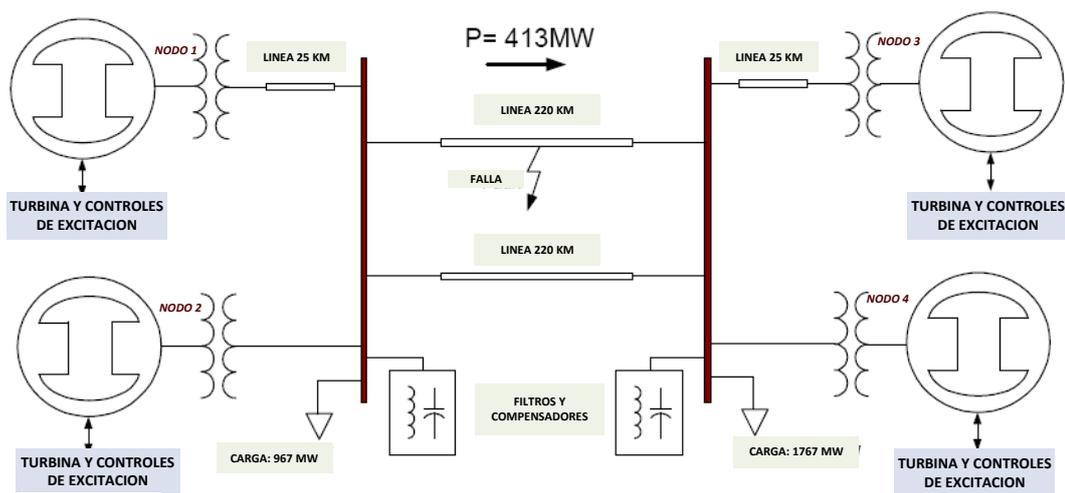


Fig. 5.10. Sistema de potencia de dos áreas pre cargado en el simulador de sistemas de potencia en tiempo real.

Una vez cargado el sistema de dos áreas al simulador se obtienen las mediciones directamente utilizando los canales del ADC del microcontrolador una vez obtenidas las mediciones el microcontrolador se encarga de enviar las variables magnitud de voltaje, potencia activa y potencia reactiva al programa de Prony utilizando que se encuentra programado en la computadora portátil, en el programa de Prony se realizan pruebas moviendo el orden y el tiempo de muestreo, la prueba se realiza analizando cada nodo por separado y del mismo modo cada variable, La prueba es realizada en línea enviando una variable cada 1/30 de segundo, el programa de Prony se encarga de acumular el vector de mediciones hasta acumular un periodo de tiempo de 20 segundos, en los resultados mostrados se observan los eigenvalores oscilatorios que se asemejan más a las simulaciones realizadas previamente.

5.3.1.2 Resultados de la Prueba

Tabla 5.12. Resultados obtenidos de la implementación del algoritmo de Prony y el programa PSAT prueba utilizando la magnitud de voltaje.

Magnitud de voltaje			
	(con t de muestreo de 0.0333)	(con t de muestreo de 0.1)	Eigenvalores calculados PSAT
Nodo 1	-0.63045 ± 6.5105i (f= 1.0362 Hz) -0.17521 ± 3.4033i (f=0.54165 Hz) -0.2616 ± 6.6813i (f=1.0634 Hz)	-0.5757 ± 6.5766i (f=1.0467 Hz) -0.12409 ± 3.5857i (f=0.57069 Hz)	
Nodo 2	-0.56048 ± 6.6394i (f= 1.0567Hz) -1.612 ± 3.1605i (f=0.50302 Hz) -0.52901 ± 6.7029i (f=1.0668 Hz)	-0.37549 ± 6.5865i (f=1.0483 Hz) -0.1984 ± 3.279i (0.52187) -0.52041 ± 6.8813i (f=1.0952 Hz)	-0.5554± j6.594 (f = 1.0495 Hz) -0.5664± j6.785 (f = 1.0799Hz)
Nodo 3	-0.53063 ± 6.5915i (f= 1.0491 Hz) 0.29192 ± 3.4642i (f= 0.55135 Hz)	-0.1905 ± 3.5235i (f= 0.56079 Hz) -0.63808 ± 6.7397i (f= 1.0727 Hz)	-0.1307± j3.413 (f 0.54329Hz)
Nodo 4	--0.68263 ± 6.5771i (f= 1.0468 Hz) 0.15268 ± 3.4074i (f= 0.54231 Hz) -0.53127 ± 6.7123i (f= 1.0683 Hz)	-0.56113 ± 6.4627i (f= 1.0286 Hz) -0.94275 ± 3.5512i (f= 0.56519 Hz) -0.87569 ± 6.7861i (f= 1.08 Hz)	

Tabla 5.13. Resultados obtenidos de la implementación del algoritmo de Prony y el programa PSAT prueba utilizando Potencia Activa.

Potencia Activa			
	(con t de muestreo de 0.0333)	(con t de muestreo de 0.1)	Eigenvalores calculados PSAT
Nodo 1	$-0.51383 \pm 6.4626i$ (f= 1.0286 Hz)	$-0.22129 \pm 6.6489i$ (f=1.0582Hz)	
	$-0.10026 \pm 3.6588i$ (f=0.58232 Hz)	$-0.33498 \pm 3.4658i$ (f=0.5516Hz)	
	$-0.53947 \pm 6.6714i$ (f=1.0618Hz)	$-0.36252 \pm 6.7912i$ (f=1.0809 Hz)	
Nodo 2	$-0.53936 \pm 6.4382i$ (f= 1.0247 Hz)	$-0.068539 \pm 6.5781i$ (f=1.0469 Hz)	
	$-0.50566 \pm 3.4218i$ (f=0.5446Hz)	$-0.33498 \pm 3.4658i$ (f= 0.5516 Hz)	$-0.5554 \pm j6.594$ (f = 1.0495 Hz)
	$-0.52901 \pm 6.7029i$ (f=1.0668 Hz)	$-0.52354 \pm 6.7094i$ (f=1.0678 Hz)	$-0.5664 \pm j6.785$ (f = 1.0799Hz)
Nodo 3	$-0.66717 \pm 6.5749i$ (f= 1.0464 Hz)	$-0.22015 \pm 6.5475i$ (f= 1.0421Hz)	$-0.1307 \pm j3.413$ (f 0.54329Hz)
	$-1.2201 \pm 3.0571i$ (f= 0.48655 Hz)	$-0.58044 \pm 3.0979i$ (f= 0.49305 Hz)	
	$-0.63691 \pm 6.6285i$ (f= 1.055 Hz)		
Nodo 4	$-0.72005 \pm 6.4959i$ (f= 1.0339 Hz)	$-0.1912 \pm 3.6038i$ (f= 0.57356 Hz)	
	$-0.16593 \pm 3.4587i$ (f= 0.55046 Hz)	$-0.45002 \pm 6.979i$ (f= 1.1107 Hz)	
	$-0.28982 \pm 6.846i$ (f= 1.0896 Hz)		

Tabla 5.14. Resultados obtenidos de la implementación del algoritmo de Prony y el programa PSAT prueba utilizando Potencia Reactiva.

Potencia Reactiva			
	(con t de muestreo de 0.0333)	(con t de muestreo de 0.1)	Eigenvalores calculados PSAT
Nodo 1	-0.13535 ± 3.3267i (f=0.58232 Hz) 0.51623 ± 6.7872i (f=1.0802 Hz)	-0.19491 ± 3.402i (f=0.54144 Hz)	
Nodo 2	-0.47921 ± 6.6791i (f=1.063Hz) -0.17298 ± 3.1809i (f=0.50625 Hz)	-0.52066 ± 6.5939i (f=1.0494 Hz) -0.1267 ± 3.3479i (f= 0.53283 Hz)	5554± j6.594 (f = 1.0495 Hz)
Nodo 3	-0.58095 ± 6.5719i (f= 1.046Hz) -0.45983 ± 3.3871i (f= 0.53907 Hz) -0.49112 ± 6.7561i (f= 1.055 Hz)	-0.74627 ± 6.5543i (f= 1.0431 Hz) -0.61739 ± 3.5261i (f= 0.56119 Hz)	-0.5664± j6.785 (f = 1.0799Hz) -0.1307± j3.413 (f 0.54329Hz)
Nodo 4	-0.45698 ± 6.6182i (f= 1.0533 Hz) -0.38848 ± 3.4608i (f= 0.5508 Hz)	-0.54968 ± 6.5962i (f= 1.0498 Hz) -0.21799 ± 3.3075i (f= 0.52641 Hz)	

5.3.3 Análisis de la Prueba

Según la prueba realizada se observa que al utilizar 10 muestras por segundo es posible obtener los resultados con menor orden del polinomio de aproximación aunque al utilizar los valores de variables como fueron calculadas según el microcontrolador (30 muestras por segundo) los resultados son más precisos pero necesita más tiempo de ejecución del método, las conclusiones obtenidas para la prueba final se ajustan a lo analizado en la prueba anterior.

CAPITULO 6:

CONCLUSIONES.

6.1 Conclusiones

Como conclusión general de este trabajo se puede decir que se consigue el objetivo planteado al detectar oscilaciones de baja frecuencia a partir de mediciones de sincrofasores utilizando un microcontrolador, esto se realizó al ejecutar la prueba final que fue validada con simulaciones previas. Para conseguir realizar la implementación previamente se probaron algoritmos de medición de fasores utilizando la programación en tiempo real, y el algoritmo de detección de oscilaciones de baja frecuencia del cual se realizó una evaluación previa lo que trajo consigo conclusiones importantes.

6.1.1 Algoritmo de medición de fasores utilizando programación en tiempo real.

De este trabajo se puede concluir que es posible realizar una Unidad Medidora Fasorial (PMU en inglés) utilizando el sistema operativo en tiempo real MQX, siendo necesario poner atención en la sincronización y tiempo de activación de las diferentes tareas. Estos dos puntos son los de mayor importancia dado que cualquier error en éstos, entregará como resultados datos errados en la medición de fasores.

Otro punto a destacar, es el espacio de memoria disponible para el guardado de resultados, en este caso utilizamos una herramienta muy importante que el sistema de desarrollo implementado nos entrega, como es, el guardado de los datos en memoria USB, también se trabajó con la comunicación vía RS-232, Para así obtener la parte final de las tareas correspondientes al microcontrolador, la transmisión de resultado al centro de detección de oscilaciones.

6.1.2 Algoritmo de detección de oscilaciones de baja frecuencia.

Como ya se ha dicho en repetidas ocasiones se utilizó el método Prony como algoritmo de detección al cual se le realizaron diferentes pruebas de las cuales se obtuvieron conclusiones particulares que nos ayudan a utilizar mejor el método.

En el capítulo 5 al analizar el algoritmo utilizando señales ideales, con el objetivo de evaluar el método y analizar las ventajas y desventajas que el método tiene en su formulación, se logró comprobar que es posible detectar los eigenvalores oscilatorios de una señal en el rango de 0.5 – 3.5 Hz.

En esta prueba se concluye que para utilizar este método es necesario tomar en cuenta algunos parámetros importantes como es el orden del polinomio de aproximación, el cual tiene que ser más alto que el orden de la señal de entrada aumentando precisión en los resultados, a medida que se aumenta el orden del método de Prony se logra con más exactitud encontrar los eigenvalores oscilatorios de la señal de entrada, aunque esta medida añade eigenvalores espurios en los respuestas del método, un concepto muy utilizado en el método de Prony para determinar el orden es la relación señal ruido (SNR). Si el valor de esta relación es mayor a 40 db indica que al ajustar la ecuación 3.7 que utiliza la señal de entrada el ajuste propuesto en el método a pesar de ser inexacto se puede tomar como una buena aproximación.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es el tiempo de muestreo utilizado, como se puede observar en tabla 5.8 cuando se trabajan con oscilaciones a frecuencias muy bajas, es imprescindible trabajar con un muestreo adecuado de la señal de entrada, al utilizar más muestras por ciclo se tiene que aumentar el orden del polinomio, y por el contrario a muy pocas muestras por ciclo se altera el resultado al aparecer eigenvalores espurios de baja frecuencia que no pertenecen a la señal de entrada.

Al trabajar con las oscilaciones provenientes de un sistema de potencia, se utilizan señales no ideales y que se acercan más a la realidad, el método también logra detectar los eigenvalores concluyendo de este prueba que la variable más adecuada de las tres variables evaluadas para el algoritmo de Prony, es la potencia activa, esta conclusión se observa en la tabla 5.11.

Se encuentra también que la amplitud es una variable a tomar en cuenta para descartar eigenvalores espurios en el rango de las oscilaciones de baja frecuencia. En la Tabla 5.11 se realiza un resumen de eigenvalores donde se muestra esta característica, al tomar en cuenta solo los eigenvalores representativos.

Como conclusión final acerca del método de Prony se puede agregar que con este trabajo se comprueba que el método logra encontrar los eigenvalores oscilatorios del sistema de potencia, Se validaron los resultados obtenidos con simulaciones de estabilidad a pequeños disturbios en paqueterías comerciales y con los resultados obtenidos de la literatura.

En la implementación realizada se observa que es posible detectar los eigenvalores utilizando mediciones provenientes de un microcontrolador es importante poner atención en la disminución del ruido para el análisis de la señal, ya que esta es la principal desventaja del método.

6.2 Aportaciones

- *Se utiliza el algoritmo de medición de fasores programados en un lenguaje muy utilizado recientemente para programación de sistemas embebidos (programación en tiempo real), se realizan las mediciones de fasores interactuando con dispositivos físicos y una comunicación con el programa MATLAB, se elaboró un programa en lenguaje c con soporte de MQX 3.6 y CodeWarrior 7.2.*
- *Se muestra acerca del método de Prony su formulación detallada incluyendo los pasos para la programación y un programa utilizando lenguaje de MATLAB para el algoritmo de Prony, realizando evaluación del método, obteniendo así de manera experimental algunas condiciones importantes para la utilización del método y descripción del mismo.*
- *Se realizó una implementación utilizando un simulador de SEPs utilizando los programas ya descritos en los dos puntos anteriores, comprobando los resultados obtenidos con las simulaciones hechas anteriormente.*

6.3 Recomendaciones para trabajos futuros

- *En cuanto la programación del microcontrolador se puede agregar un GPS para la utilización de mas microcontroladores interviniendo en la medición de fasores en un sistema de potencia, permitiendo mediciones sincronizadas de la señales, para obtener una mejor comunicación con un centro de control es necesario programar una comunicación vía Ethernet que permite mayor velocidad.*
- *En cuanto al método de Prony es posible mejorar el algoritmo implementado reprogramando el método utilizando la descomposición en valores singulares o el método de componentes principales, es posible que el método logre ser más robusto mejorando su programación y trasladarlo a otro lenguaje de programación.*
- *En términos generales se podría utilizar más sistemas de potencia de prueba para encontrar oscilaciones y validar los resultados en otros sistemas de potencia utilizados en análisis de oscilaciones de baja frecuencia.*
- *Al utilizar la medición de fasores se podría conectar en el mismo sistema de potencia más microcontroladores midiendo de manera sincronizada y calcular las oscilaciones de baja frecuencia utilizando el método de Fourier, contando con este trabajo para la comparación de resultados.*

REFERENCIAS

- [1] J. F. Hauer, C.J. Demeure and L.L. Scharf. "Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 5, No. 1, pp. 80-89, February 1990.
- [2] C.E. Grund, J. J. Paserba, J. F. Hauer and S. Nilsson. "Comparison of Prony Analysis and Eigenanalysis for Power System Control Design". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No.3, pp 964-971, August, 1993.
- [3] J. F. Hauer, J. M. Johnson, D. Trudnowski, G. Rogers, B. Mittelstadt and W. Litzemberger. "Keeping an Eye on Power System Dynamics". IEEE Computer Applications in Power, October 1997.
- [4] K. K. Kaberere, K. A. Folly, M. Ntombela and A. I. Petroianu. "Comparative Analysis and Numerical Validation of Industrial-Grade Power System Simulation Tools: Application to Small Signal Stability". Proceedings of the Power Systems Computation Conference PSCC'2005, (Session 32, Paper 3), August 22-26, 2005, Liege, BELGIUM.
- [5] D. J. Trudnowski and J. E. Dagle, "Effects of Generator and Static-Load Nonlinearities on Electromechanical Oscillations". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 12, No. 3, pp. 1283-1289, August 1997.
- [6] D. J. Trudnowski, J.M. Johnson and J.F. Hauer. "Making Prony Analysis More Accurate using Multiple Signals". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 14, No. 1, pp. 226-231, February 1999.
- [7] Lan Ding, Ancheng Xue, Fukun Han, JinLi, Maohai, Wang Tianshu BiJinping Wang. "Dominant Mode Identification for LowFrequency Oscillations of Power Systems basedon Prony Algorithm". IEEE Transactions on Power Systems 2010.
- [8] Ning Zhou, Zhenyu Huang, Francis Tuffner, John Pierre, Shuangshuang Jin. "Automatic Implementation of Prony Analysis for Electromechanical Mode Identification from Phasor Measurements" IEEE Transactions on Power Systems 2010.
- [9] Wuxing Liang, Harmeet Kang, Liangzhong Yao. "Detection of Power System Oscillation Using Moving Window Prony Method". IEEE Transactions on Power Systems 2010. International Conference on Power System Technology
- [10] P. Kundur. Power System Stability and Control. 1st Edition, The EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill Inc., New York NY, U.S.A., 1994.
- [11] M. A. Pai, D. P. Sen Gupta and K. R. Padiyar. Small Signal Análisis of Power Systems. 1a. Edición. Alpha Science International LTD. 2005. pp 199-212.

- [12] G. Rogers. Power System Oscillations. Kluwer Academic Press, 2000.
- [13] Louis L. Scharf. "Statiscal Signal Procesing Detecction, Estimation, and Time Series Analysis". Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [14] Ek Wee. Tan "Power System Dynamic Security Assignment via Prony analysis", Tesis para obtener el grado de Bachelor en Ingenieria de University of Queensland, Australia 2003.
- [15] Carlos Cuvas Castillo. "Implementación de un medidor fasorial". Tesis para obtener el grado de M. C. en Ing. Eléctrica, S.E.P.I-E.S.I.M.E I.P.N., México D.F 2006.
- [16] Blanca Verónica Hernández Gómez. "Diseño e implementación de un medidor fasorial síncrono normalizado con el estándar IEEE C37.118". Tesis para obtener el grado de M. C. en Ing. Eléctrica, S.E.P.I-E.S.I.M.E I.P.N., México D.F 2009.
- [17] David Villarreal Martínez. "Análisis modal de sistemas eléctricos de potencia". Tesis para obtener el grado de M. C. en Ing. Eléctrica, S.E.P.I-E.S.I.M.E I.P.N., México D.F 2008.
- [18] Oscar Moreno Reyes. "Identificación de la Estabilidad a Pequeños Disturbios de la Máquina Síncrona Bus-Infinito por Redes Neuronales" Tesis para obtener el grado de M. C. en Ing. Eléctrica, S.E.P.I-E.S.I.M.E I.P.N., México D.F 2005.
- [19] CIGRE Task Force 38.01.07, Analysis and Control of Power System Oscillations, Task Force 07 of Advisory Group 01 of Study Committee 38, Technical Brochure No. 111. December 1996.
- [20] P. Kundur, G.J. Rogers, D.Y. Wong, L. Wang and M.G. Lauby, "A Comprehensive Computer Program Package for Small Stability Analysis of Power Systems". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp 1076-1083, November 1990.
- [21] J. F. Hauer. (1989). "Introduction to the 1989 IEEE/PES Symposium on Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance". Tutorial: Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance, Publication No. 90 TH0292-3-PWR, pp 1-4, 1989.
- [22] J. Sanchez Gasca and J.H. Chow, "Performance Comparison of Three Identifications Methods for the Analysis of Electromechanical Oscillations". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 995-1002, August 1999.
- [23] G. R. B. Prony. "Essai Experimental el Analyti". J. de L'École Polytechnique (Paris); Vol. EI, 1795, pp. 24-76.

- [24] J.J. Sanchez Gasca, V. Vittal, M. J. Gibbard, A. R. Messina, D. J. Vowles, S. Liu, U. D. Annakage, “Inclusion of higher order terms for small-signal (modal) analysis : Committee Report – Task Force on Assessing the Need to Include Higher Order Terms for Small-Signal (Modal) Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 4, pp. 1886-1904, November 2005.
- [25] CodeWarrior Development Studio for ColdFire Architectures V7.2 Quick Start
- [26] Freescale MQXTM, Real-Time Operating System, User’s Guide, Document Number: MQXUG, Rev. 1, 01/2010.
- [27] Freescale MQXTM RTOS, Reference Manual, Document Number: MQXRM, Rev. 3,01/2010.
- [28] Freescale M52259DEMOCOM, “Hardware User Guide”, Document Number: 0453-010, Rev. A, 10/2008
- [29] Freescale MQXTM, USB Host User’s Guide, Document Number: MQXUSBHOSTUG, Rev. 1, 1/2009.
- [30] Steven W. Smith “The scientist and Engineer s Guide to digital Signal Procesing ” Second edition
- [31] J. G. Sloopweg, J. Persson, A. M. Van Voorden, G. C. Paap and W. L. Kling. “A Study of the Eigenvalue Analysis Capabilities of Power System Dynamics Simulation Software”. Proceedings of the Power Systems Computation Conference PSCC’2002. (Session 26, Paper 3). June 24-28, 2002, Sevilla, SPAIN.
- [32] PTI, PSS/ETM 29 Program Application Guide, October 2002
- [33] DIgSILENT Manuals, DIgSILENT PowerFactory, Version 13, 2003
- [34] EUROSTAG Release 4.2 Package Documentation Part I, Octo-ber 2002
- [35] Power System Analysis Toolbox (PSAT)
<http://www3.uclm.es/profesorado/federico.milano/software.htm>
- [36] Dynamic Security Assessment Software (DSA TOOLS).
www.dsatools.com/
- [37] Kumaresan R, Tufts D W, Scharf L L. “A Prony Method for Noisy Data: Choosing the Signal Components and Selecting the Order in Exponential Signal Models”. Proc IEEE, 1984, 72(2): 230-233.
- [38] C. A. Juárez, D.G. Colomé, (2009). “Tendencias en la supervisión en tiempo real de la estabilidad de pequeña señal de sistemas de potencia”, XIII eriac décimo tercer encuentro regional iberoamericano de cigré
- [39] A.G. Phadke, J. S.Thorp: Computer Relaying for Power Systems. John Wiley & Sons, New York, 1988; reprinted May 1993.
- [40] IEEE Standard for Synchrophasors: IEEE Std. 1344–1995, copyright 1996 by IEEE, 345 East 47th Street, New York, NY 10017–2394.

- [41] David G. Hart, David Uy, Vasudev Gharpure, Damir Novosel, Daniel Karlsson, Mehmet Kaba, (2001). “Unidades PMU Supervisión de las redes eléctricas: un nuevo enfoque”, Revista ABB
- [42] J. Depablos, V. Centeno, A. G. Phadke, M.Ingram, (2005),” Comparative Testing of Synchronized Phasor Measurement Units”,IEEE 2005.
- [43] Jose A. de la O Serna, Kenneth E. Martin. Improving Phasor Measurements Under Power System Oscillations. IEEE Transactions on Power Systems.Vol. 18,No. 1. February 2003.
- [44] A. G. Phadke. Time synchronization techniques, coupled with the computer-based measurements techniques, provide a novel opportunity to measure phasors and phase angle differences in real time. IEEE Computer Applications in Power. April 1993. 11-15
- [45] J. Z. Yang and C. W. Liu. “A precise calculation of power system frequency and phasor”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 2, April 2000.
- [46] Freescale MCF5225x Family, “Fact sheet” Document number: KRN3MCF5225XFS/ REV 2, 2008.

APENDICE A

DATOS SISTEMAS DE POTENCIA DE DOS ÁREAS

Este sistema es muy utilizado para el análisis de oscilaciones de baja frecuencia debido a su simetría. Este sistema consta de dos áreas similares, cada área contiene un par de unidades de generación. Existen diferentes versiones de este sistema, los datos utilizados en este trabajo se obtuvieron de [10].

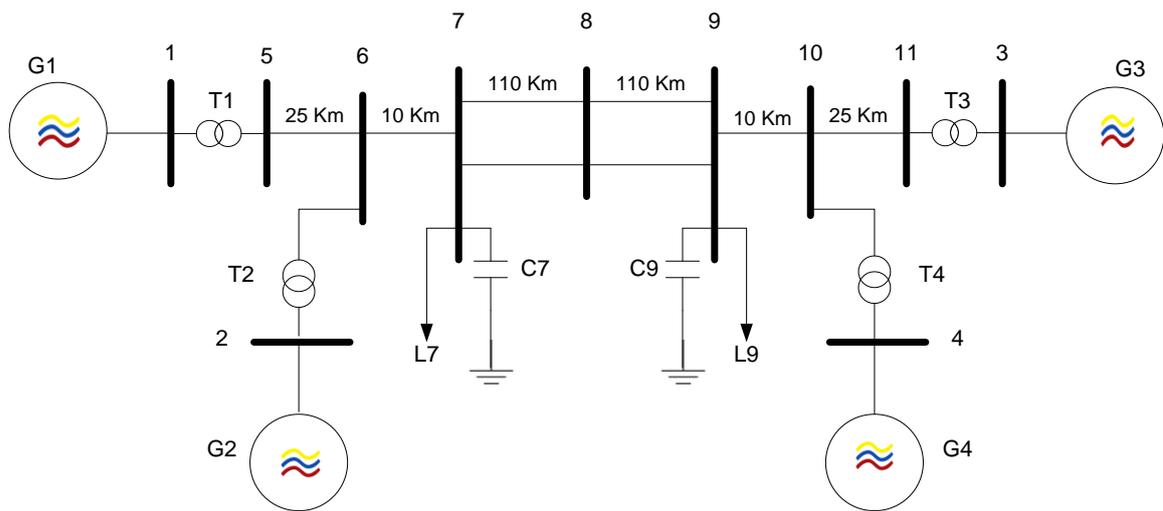


Figura A.1 Diagrama unifilar del sistema de dos áreas de [10].

Tabla A.1.- Datos de la red de transmisión

Buses terminales		Impedancia serie		Tap		No. Cto.	B/2	Elemento
Nodo i	Nodo j	R_i	X_i	Mag.	Angulo			
1	5	0	0.016667	1	0	1	0	Transf. 1
2	6	0	0.016667	1	0	1	0	Transf. 2
5	6	0.0025	0.025	0	0	1	0.02188	Línea 1
6	7	0.001	0.010	0	0	1	0.00875	Línea 2
7	8	0.011	0.11	0	0	1	0.09625	Línea 3
7	8	0.011	0.11	0	0	2	0.09625	Línea 4
8	9	0.011	0.11	0	0	1	0.09625	Línea 5
8	9	0.011	0.11	0	0	2	0.09625	Línea 6
9	10	0.001	0.01	0	0	1	0.00875	Línea 7
10	11	0.0025	0.025	0	0	1	0.02188	Línea 8
4	10	0	0.016667	1	0	1	0	Transf. 4
3	11	0	0.016667	1	0	1	0	Transf. 3

Tabla A.2.- Datos de los buses

Bus	V	δ	P_G	Q_G	P_d	Q_d	P_{sh}	Q_{sh}
1	1.029994	20.2003	7.01174	1.894401	0	0	0	0
2	1.010003	10.3962	7	2.446621	0	0	0	0
3	1.029996	-7.2034	7.19	1.930478	0	0	0	0
4	1.010001	-17.4413	7	2.431114	0	0	0	0
5	1.005760	13.7230	0	0	0	0	0	0
6	0.976486	3.6026	0	0	0	0	0	0
7	0.959300	-4.8457	0	0	9.670	1	0	2
8	0.940315	-18.8831	0	0	0	0	0	0
9	0.959300	-32.7801	0	0	17.670	1	0	3.5
10	0.976737	-24.2331	0	0	0	0	0	0
11	1.005512	-13.8477	0	0	0	0	0	0

Tabla A.3.- Parámetros de la maquina síncrona del sistema

parámetro	Bus al que está conectada la maquina			
	1	2	3	4
H	6.5	6.5	6.175	6.175
D	0	0	0	0
R_a	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
X_l	0.2	0.2	0.2	0.2
X_d	1.8	1.8	1.8	1.8
X_q	1.7	1.7	1.7	1.7
X'_d	0.3	0.3	0.3	0.3
X'_q	0.55	0.55	0.55	0.55
T'_{d0}	8	8	8	8
T'_{q0}	0.4	0.4	0.4	0.4
X''_d	0.25	0.25	0.25	0.25
X''_q	0.25	0.25	0.25	0.25
T''_{d0}	0.03	0.03	0.03	0.03
T''_{q0}	0.05	0.05	0.05	0.05
A_{sat}	0.015	0.015	0.015	0.015
B_{sat}	9.6	9.6	9.6	9.6
Ψ_{TI}	0.9	0.9	0.9	0.9

Tabla A.4.- Parámetros para el sistema de excitación tipo DC1

parámetro	Bus al que está conectada la maquina			
	1	2	3	4
K_A	0	5	6	5
T_A	0	0.060	0.05	0.06
T_B	0	0	0	0
T_C	0	0	0	0
K_E	0	-0.05	-0.06	-0.02
T_E	0	0.25	0.41	0.5
K_F	0	0.040	0.057	0.08
T_F	0	1	0.5	1
S_{E1}	0	0.08	0.66	0.13
S_{E2}	0	0.26	0.88	0.34
V_{min}	0	-1	-1	-1
V_{max}	0	1	1	1

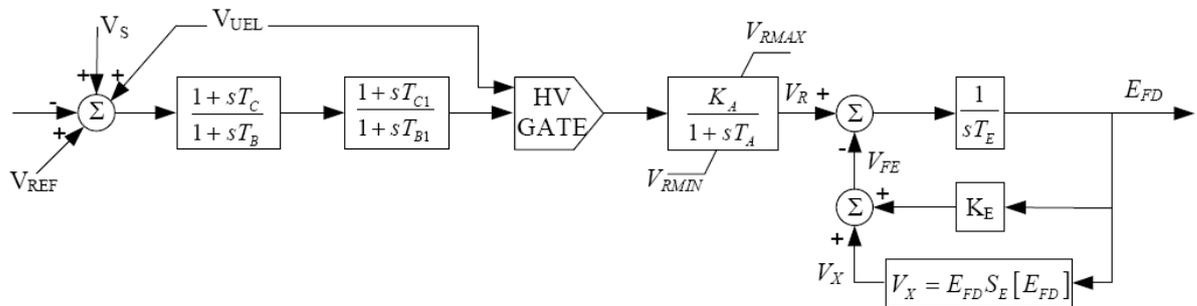


Figura A.2.- Sistema de excitación DC1.

APENDICE B

HARDWARE

B.1 Introducción

En este apartado se presenta la descripción del hardware utilizado en la implementación del proyecto, desde la medición de fasores hasta la prueba final utilizando el simulador de sistemas de potencia, el hardware se resume en dos dispositivos básicos:

- *Microcontrolador Cold fire version 2 MCF 52259*
- *Interface adecuadora de señal*

B.2 Microcontrolador Coldfire version 2 MCF 52259

Esta sección proporciona una visión general del microcontrolador utilizado mencionando sus características generales y sus componentes principales

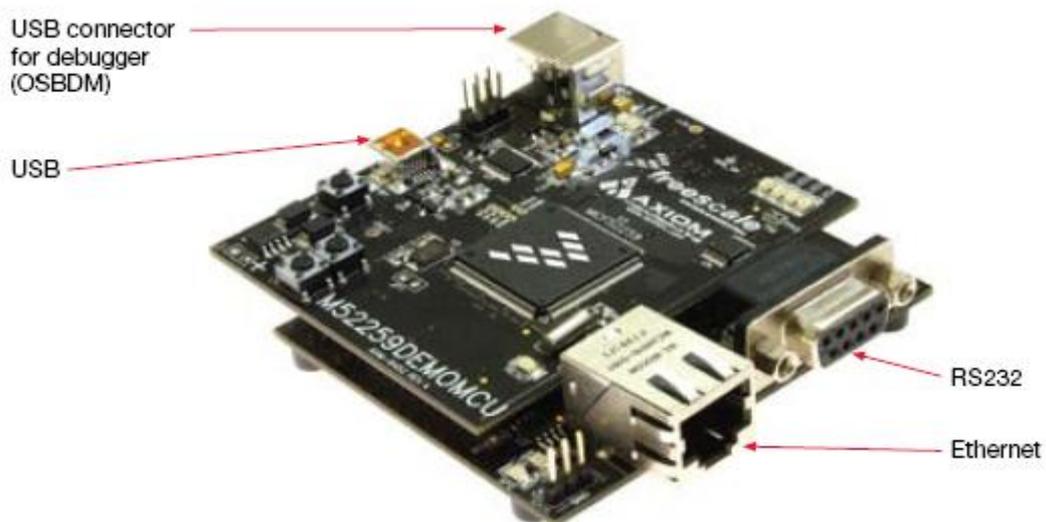


Figura B.1 Tarjeta de desarrollo MCF 52259

El MCF52259 es miembro de la familia Coldfire V2, es un dispositivo de 32 bits basado en la versión 2 con núcleo ColdFire operando a una frecuencia de hasta 80 MHz, que ofrece alto rendimiento y bajo consumo de energía. En el chip de recuerdos estrechamente conectado con el núcleo del procesador incluyen hasta 512 Kb de memoria Flash y 64 KB de memoria estática [28]. A continuación se enumeran algunos módulos incluidos en el chip:

- *Aceleración de la Unidad de cifrado (CAU)*
- *Controlador rápido de Ethernet (FEC)*
- *Bus serial universal on-the-go(USBOTG)*
- *Transceptor USB ()*
- *Modulo controlador de red de área Flex-can(CAN).*
- *Tres receptores universales asíncronos / transmisores (UARTs).*
- *Dos interfaces de bus de circuito integrado*
- *Módulo de interfaz periférica serial (QSPI).*
- *Ocho canales de 12 bits para el convertidor analógico digital (ADC) con muestreo simultáneo.*
- *Cuatro canales, 32 bits de acceso directo a memoria (DMA)*
- *Cuatro canales, 32 bits de captura de entrada / salida de temporizadores para comparar con el DMA de apoyo (DTIM).*
- *Cuatro canales con temporizador de propósito general (GPT) con captura de entrada y salida, con modulación de la amplitud de pulso (PWM), código de modulación de pulso (PCM) y acumulación de pulso.*
- *8 canales de 8 bits o 4 canales de 16 bits para el temporizador de la modulación de la amplitud e pulso.*
- *Dos temporizadores de interrupción periódica de 16 bits (PITs).*
- *Módulo de reloj de tiempo real con cristal de 32 kHz*
- *Software programable del temporizador de vigilancia.*
- *Temporizador de vigilancia secundario con reloj independiente.*
- *Controlador de interrupción capaz de manejar 57 fuentes de interrupción.*
- *Módulo de reloj con 8 MHz en el chip relajación del oscilador y lazo de fase cerrada integrada (PLL).*
- *Prueba de acceso y puerto de depuración (JTAG, BDM)*

EL chip del microprocesador cuenta con 100 pines configurados como se muestra en la figura B.2 adaptado de [28].

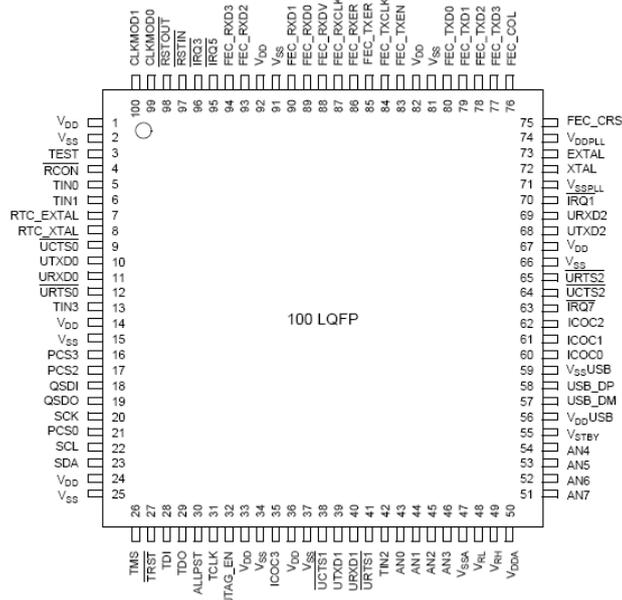


Figura B.2 Microprocesador de 100 pines

B.2.1 Diagrama a bloques

El controlador embebido MCF5225x proporciona un conjunto de periféricos, la memoria de un tamaño compacto y plataforma Ethernet. En la figura B.3 adaptada de [46] se muestra el diagrama a bloques de la tarjeta de desarrollo.

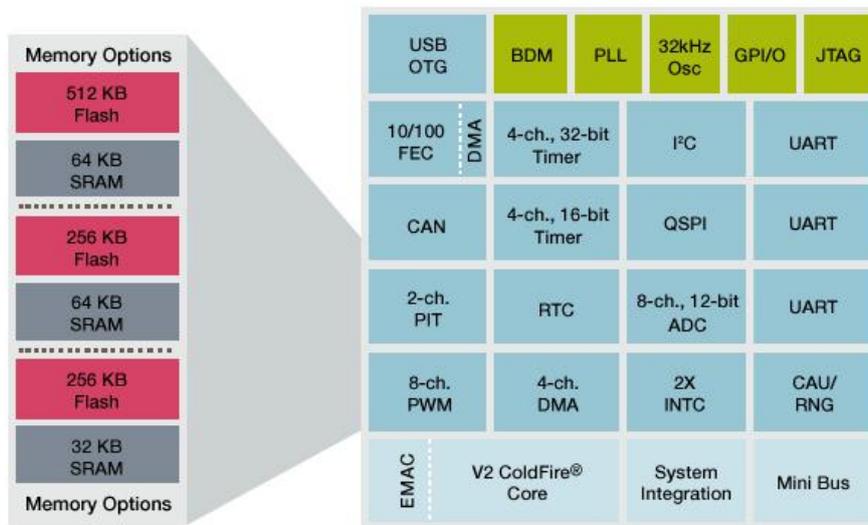


Figura B.3 Diagrama a bloques de MCF 5225x

En la figura B.4 se muestra un diagrama a bloques del dispositivo más detallado con respecto al funcionamiento [28].

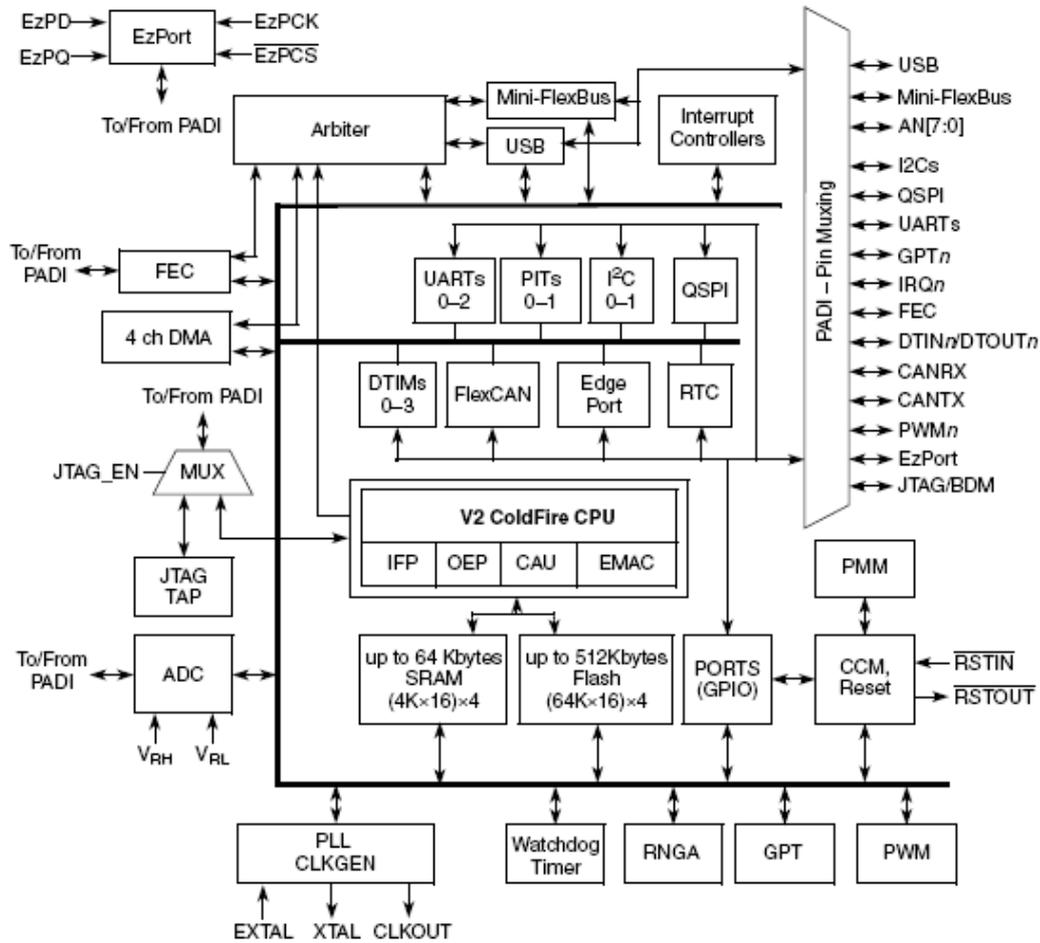


Figura B.4 Diagrama a bloques de alto nivel del dispositivo.

El MCF52259 cuenta con un módulo flash Coldfire (CFM) el cual es una memoria no volátil (NVM) del módulo que se conecta al transformador de alta velocidad de los buses locales. El CFM está construido con cuatro bancos matrices flash de 32 K x 16 bits para generar 256 Kbytes de 32 bits de memoria flash. Estos conjuntos son eléctricamente borrables y programables, no volátil de datos de programa y memoria. La memoria flash es ideal para el programa y almacenamiento de datos que permite la reprogramación. La memoria flash también puede ser programada a través EzPort, que es una interfaz serie flash de programación que permite que la memoria pueda ser leída, borrada y programada por un controlador externo en un formato compatible con la mayoría del bus SPI de chips de memoria flash. Este dispositivo permite la fácil programación automatizada a través de equipo de prueba o de distribución masiva de herramientas de programación [28].

B.2.2.-ADC

El ADC consta de ocho canales de entrada con una resolución de 12 bits. Este almacena los resultados en un buffer accesible para su posterior procesamiento. Puede ser configurado para realizar una única medición y detenerse, realizar un análisis cada vez que es activado, o hacer una exploración en secuencia programada varias veces hasta que se detiene manualmente.

El ADC puede ser configurado en forma secuencial o simultánea de conversión. Cuando se configura para forma de conversión secuencial, hasta ocho canales pueden ser incluidos en la muestra y se almacena en el orden especificado por el registro de lista canales. Se pueden generar Interrupciones opcionales al final de la secuencia de exploración si un canal está fuera del rango (por debajo de las medidas de bajo umbral o límite por encima del umbral de alto límite establecido en el límite de registros) o en diferentes condiciones de cruce por cero. Entre las principales características del ADC revisadas de [28]:

- *Resolución de 12 bits*
- *Frecuencia de reloj ADC máxima de 5 MHz con periodo de 200 ns.*
- *Rango de muestreo arriba de 1.66 millones de muestras por segundo.*
- *Tiempo de conversión sencilla de 8.5 ciclos de reloj ADC 1.7 μ s*
- *Tiempo de conversión adicional 6 ciclos de reloj del ADC 5.3 μ s usando modo simultáneo.*
- *Las conversiones del ADC pueden ser sincronizadas por el PWM y reloj.*
- *Muestreo simultáneo o secuencial.*
- *Capacidad para muestreo simultáneo y retención de dos entradas.*
- *Capacidad para escanear secuencia y almacenamiento de ocho mediciones.*
- *Multiplexado interno para seleccionar dos de ocho entradas.*
- *Interrupción mediante eventos al finalizar de escanear, si un límite de fuera de rango es excedido.*

Los puertos del ADC utilizados para las mediciones en este proyecto son los resaltados en la figura B.5 adaptado de [28] que muestra en el puerto 29 la obtención de las muestras provenientes de la señal de voltaje y en el puerto 31 las señales medidas de corriente.

J1			
+3.3V	1	2	RSTIN*
GND	3	4	RESET*
ICOC0	5	6	ICOC1
ICOC2	7	8	ICOC3
UTXD2/CANTX	9	10	URTS2*/I2C_SDA1
URXD2/CANRX	11	12	UCTS2*/I2C_SCL1
TIN1	13	14	TIN0
TIN3	15	16	TIN2
IRQ1*	17	18	IRQ7
QSDO	19	20	PCS3
	21	22	PCS2
QSDI	23	24	PCS0
SCK	25	26	SCL
SDA	27	28	
AN0	29	30	AN1
AN2	31	32	AN3
AN6	33	34	AN7
AN5	35	36	AN4
GND	37	38	GND
+3.3V	39	40	+3.3V

Figura B.5 Configuración de puertos del conector J1

B.2.3.-Temporizadores

Existen cuatro temporizadores independientes capaces de transferir DMA de 32 bits (DTIM0, DTIM1, DTIM2 y DTIM3) en la tarjeta de desarrollo. Cada módulo incorpora un temporizador de 32 bits con un registro separado establecido para la configuración y control [28].

Los temporizadores se pueden configurar para operar desde el reloj del sistema o de una fuente externa de reloj de una de las señales, puede ser dividido por 16 o 1, este es el pre escalador. Los eventos del temporizador, opcionalmente pueden causar solicitudes de interrupción o transferencia DMA.

B.2.4.-Pines de entrada y salida de propósito general (GPIO)

Casi todos los pines en el dispositivo son de propósito general de E / S y se agrupan en los puertos de 8 bits. Algunos de los puertos no utilizan todos los ocho bits. Cada puerto tiene registros para configurar, supervisar y controlar.

Estos pines permiten comunicarse con hardware externo, mediante la lectura y escritura de pines, y pueden ser utilizados para identificar una interrupción externa.

B.2.5.-Reloj de tiempo real.

El módulo de reloj en tiempo real provee al sistema de un reloj, cronometro, alarma y también es capaz de interrumpir rutinas. Incluye funciones completas de reloj: segundos, minutos, horas y días, es compatible con una gran variedad de funciones de interrupción de tiempo [28].

B.2.6.-Controlador USB On-The-Go

Este dispositivo incluye un bus serie universal On-The-Go (USB OTG) de modo dual del controlador. USB es un estándar para la conexión de periféricos y dispositivos portátiles de electrónica de consumo tales como cámaras digitales y computadoras, entre otros.

El suplemento OTG con la especificación USB se extiende a la aplicación par por par , lo que permite a los dispositivos conectarse directamente sin la necesidad de una computadora. El controlador de modo dual en el dispositivo puede actuar como un anfitrión y USB OTG como un dispositivo USB. También es compatible con los modos de alta velocidad y baja velocidad.

B.2.7.- Interfaz de comunicación serial.

La interfaz de comunicación serial permite enviar y recibir información entre el microcontrolador y un dispositivo remoto, incluyendo otros microcontroladores. Consta de un transmisor y un receptor que opera de manera independiente, pero usa una misma velocidad de comunicación el microcontrolador utilizado cuenta con tres puertos seriales.

Se utilizó el puerto UART1, que utiliza para la intercomunicación una velocidad de 115200 baudios para poder realizar las actualizaciones de fasores 30 veces por segundo, 8 bits, sin bit de parada y un bit de paro [16].

B.3 Interface adecuadora de señal

La interface que adecua la señal está diseñado para que el máximo voltaje de entrada al ADC del microcontrolador sea de 3.3 volts. El ADC tiene capacidad para recibir señales de voltaje en el rango de 0 a 3.3 volts por lo que es necesario superponer un voltaje de CD para que la onda senoidal se encuentre entre los rangos tanto en su pico positivo como su pico negativo [16].

B.3.1 Acondicionamiento de señales de voltaje de CA.

La medición de voltaje de CA se realiza mediante un circuito basado en la topología de divisor de voltaje de la figura B.6, en el cual mide una entrada en un rango de 0 a 300 V de corriente alterna y da una medición de salida proporcional dentro del rango de 0 a 3.3 V de corriente directa, el cual estará montado sobre una señal de 1.65 V de corriente directa.

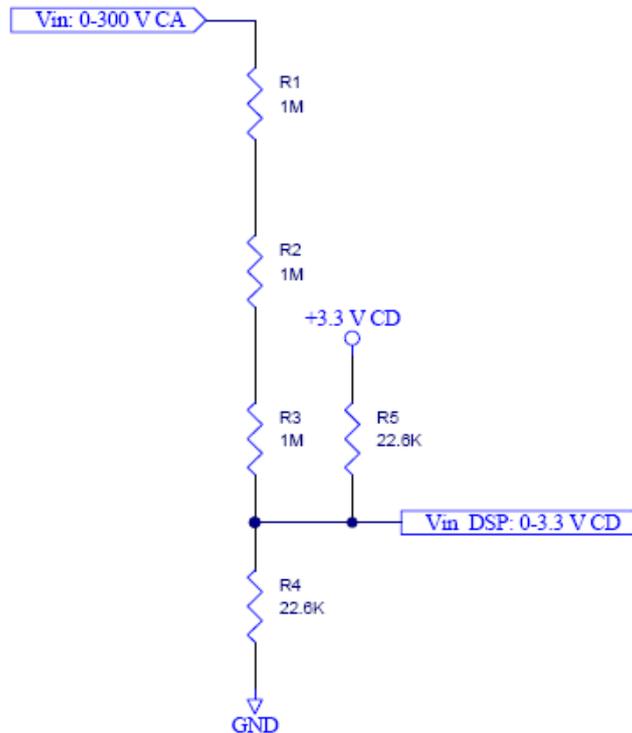


Figura B.6 Circuito acondicionador de señal de VAC.

B.3.1.1 Análisis en corriente alterna.

Por el teorema de superposición de fuentes de voltaje, primero se analiza la red de CA, por lo que la fuente de voltaje de 3.3 V de corriente directa se comporta como un corto circuito, al forzar el voltaje en sus terminales a 0 V, quedando el resistor R5 conectado a tierra y a V_{in} . La red se simplifica sumando los resistores serie R1, R2, R3 y el paralelo que se forma con los resistores en serie. Considerando un voltaje de entrada $V_{in} = 300 \text{ v}$ se calcula el voltaje pico para el semiciclo positivo:

$$V_{in_{pico}} = V_{in} x \sqrt{2} \quad (B.1)$$

$$V_{in_{pico_positivo}} = 300 x \sqrt{2} = 424.26 \text{ v} \quad (B.2)$$

De la misma manera para el semiciclo negativo.

$$V_{in_{pico_negativo}} = -300 x \sqrt{2} = -424.26 \text{ v} \quad (B.3)$$

Por el método de divisor de voltaje, se obtiene la el voltaje de entrada al microcontrolador.

$$V_{in_{Dsp_{pico_positivo}}} = \frac{424.26 x 11.3 \text{ k}\Omega}{(3M + 11.3 \text{ k})\Omega} = 1.5921 \text{ v} \quad (B.4)$$

$$V_{in_{Dsp_{pico_negativo}}} = \frac{-424.26 x 11.3 \text{ k}\Omega}{(3M + 11.3 \text{ k})\Omega} = -1.5921 \text{ v} \quad (B.5)$$

B.3.1.2 Análisis en corriente directa.

Procediendo con el análisis por el teorema de superposición, se analiza la red de la figura B.7 en corriente directa, en la que la fuente de voltaje V_{in} se comporta como un corto circuito, al forzar el voltaje en sus terminales a 0 V, la red se simplifica al sumar los resistores en serie R1, R2, R3 y el arreglo en paralelo de R3 con R4.

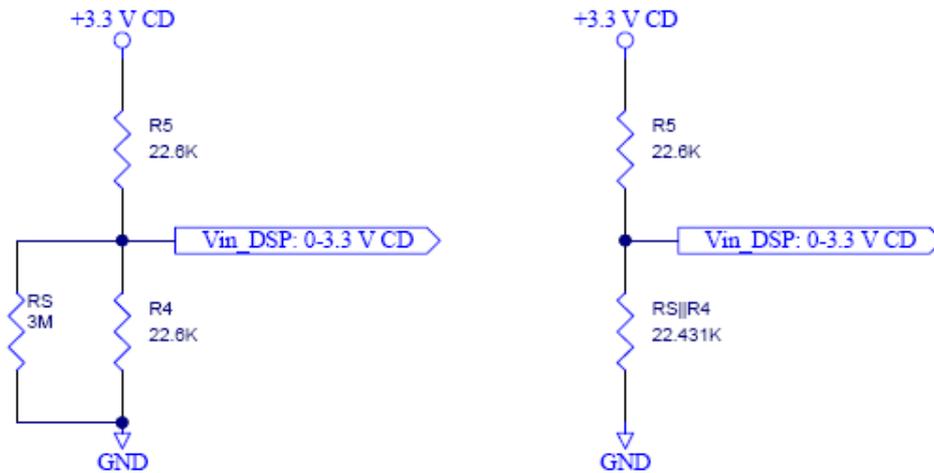


Figura B.7.- Circuito resultante con fuente de CA en corto

Se calcula por divisor de voltaje, el voltaje a la entrada en el microcontrolador.

$$V_{in_DSPCD} = \frac{3.3 V \times 22.431 K\Omega}{(22.6 K + 22.431 K)\Omega} = 1.6438 V \quad (B.6)$$

Por lo tanto, para el simiciclo positivo:

$$\begin{aligned} V_{in_DSP} &= V_{in_Dsp_pico_positivo} + V_{in_DSPCD} = 1.592 + 1.6438 \\ &= 3.2359 V \end{aligned} \quad (B.7)$$

Y para el negativo:

$$\begin{aligned} V_{in_DSP} &= V_{in_Dsp_pico_negativo} + V_{in_DSPCD} = -1.592 + 1.6438 \\ &= 0.051 V \end{aligned} \quad (B.8)$$

Con lo cual se cumple con el propósito inicial utilizando niveles permitidos de voltajes de entrada del puerto ADC, los cuales pueden estar dentro de 0 a 3.3 V de corriente directa.

APENDICE C

LA PROGRAMACIÓN EN TIEMPO REAL

C.1 Introducción

En este proyecto se utilizó la programación en tiempo real que se ha convertido en un tipo de lenguaje muy utilizado en aplicaciones con sistemas embebidos, este tipo programación surge con la exigencia a sistemas que cumplan con la ejecución en sus respuestas bajo ciertas restricciones de tiempo. Para garantizar el comportamiento correcto en el tiempo requerido se requiere que el sistema con el cual se trabaja sea predecible.

Una de las dificultades al utilizar la programación en tiempo real es la existencia de procesos concurrentes que implican un problema para la sincronización de los mismos, otro aspecto importante es que los sistemas que utilizan la programación en tiempo real trabajan a una velocidad predeterminada, lo que impone limitaciones a las tardanzas propias de un sistema real.

Para el caso de este proyecto se utiliza el sistema operativo en tiempo real MQX en su versión 3.6 de la marca Freescale, este sistema operativo se describirá a continuación.

C.2 MQX

C.2.1 organización de MQX

MQX está constituido de los componentes del núcleo (no- opcional) y los componentes opcionales, en el caso de los componentes del núcleo, solo se muestran aquellas funciones que MQX o la aplicación llama, para coincidir con los requerimientos se extiende el uso y la configuración de los componentes principales mediante los componentes opcionales.

En la figura C.1 se muestran los componentes del núcleo en el centro y los componentes opcionales alrededor de estos.

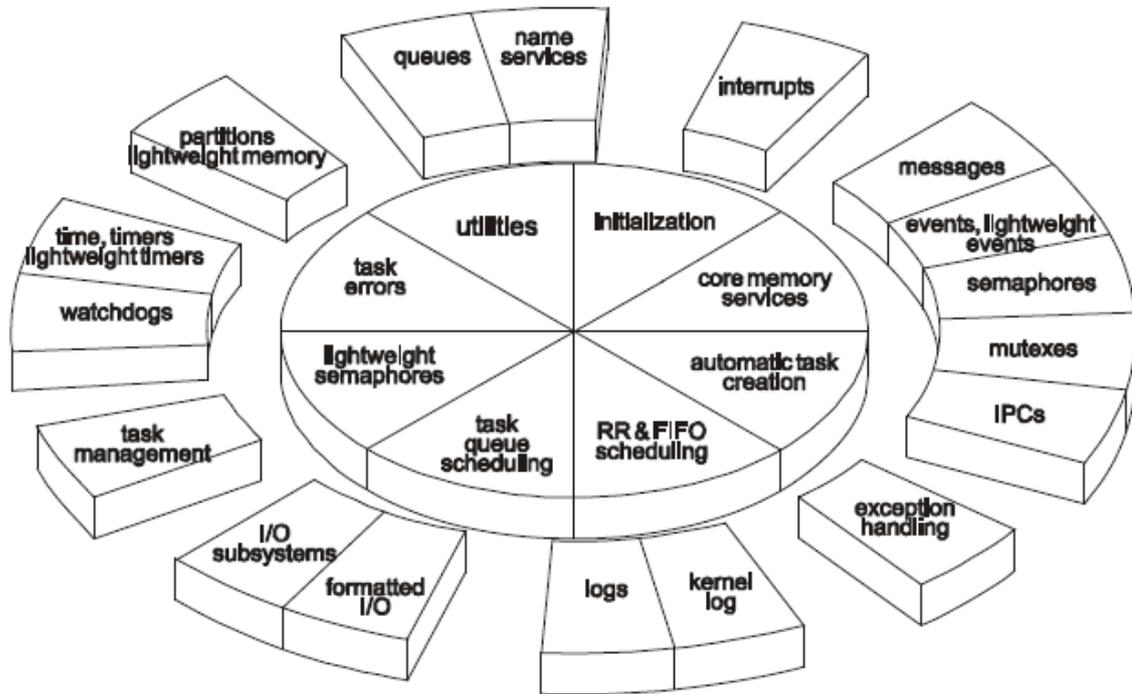


Figura C.1.- Organización de MQX.

C.2.2 inicialización

La inicialización es un componente del núcleo, esta aplicación comienza cuando se usa la instrucción `_mqx()`, cuando MQX arranca crea tareas que la aplicación define como de autoarranque [26].

C.2.3 Administrador de tareas

El administrador de tareas es parte de los componentes del núcleo.

Así como se crean automáticamente las tareas cuando MQX se inicia, una aplicación también puede crear, administrar y terminar tareas para la ejecución de la aplicación. Se pueden crear varias instancias de la misma tarea, y no hay límite para el número total de tareas en una aplicación. La aplicación puede cambiar dinámicamente los atributos de cualquier tarea. MQX libera los recursos de la tarea, cuando se termina su utilización..

Además, para cada tarea se puede especificar:

- *Una función de salida, que MQX llamará una vez finalizada la tarea.*
- *Un manejador de excepciones, que MQX llamará si se produce alguna excepción, mientras la tarea está activa.*

C.2.4 Programación de tareas

Para la programación de las tareas MQX incluye las siguientes opciones [26]:

- *FIFO(también llamado con base en prioridad preventiva) es componente del núcleo. Se ejecuta primero la tarea con mayor prioridad que lleva más tiempo preparada para ejecutarse.*
- *Round Robin (también llamado de rebanadas de tiempo) es un componente del núcleo. Se ejecuta la tarea de acuerdo a la tarea con mayor prioridad que lleva más tiempo preparada y que no ha consumido su porción de tiempo.*
- *Programación explícita (fila de tareas) es un componente opcional.- se puede utilizar la fila de tareas para programar explícitamente las tareas o crear un mecanismo de sincronización más complejo. Debido a que las filas de tareas proporcionan una funcionalidad mínima, son más rápidas, Un aplicación puede especificar un FIFO o Round Robin cuando se crea la fila de tareas.*

C.2.5 Sincronización de tareas

C.2.5.1 Eventos ligeros

Los eventos ligeros son componentes opcionales. Son una forma de baja sobrecarga para tareas a sincronizar utilizando pequeños cambios de estado. Los eventos ligeros requieren una cantidad mínima de memoria y se ejecutan rápidamente.

C.2.5.2 Eventos

Los eventos son un componente opcional. Estos apoyan la gestión dinámica de objetos que están formados como un campo de bits. Tareas y rutinas con servicio de interrupción pueden usar eventos para sincronizar y transmitir información simple en la forma de pequeños cambios de estado.

Los grupos de eventos pueden tener bits de auto limpieza del evento, donde MQX limpia inmediatamente el evento después de que este ha sido puesto, una aplicación puede poner un evento en un grupo de eventos que se encuentran en procesador remoto.

C.2.5.3 Semáforos ligeros

Los semáforos ligeros son componentes del núcleo. Son una forma de baja sobrecarga para tareas que comparten recursos de acceso. Los semáforos ligeros requieren un mínimo de memoria y se ejecutan rápidamente. Los semáforos ligeros cuentan con semáforos FIFO sin la herencia de prioridad.

C.2.5.4 Semáforos

Los semáforos son componentes opcionales. Se usan los semáforos para sincronizar tareas. Se puede usar un semáforo para proteger el acceso a recursos compartidos, o para mecanismo de señalización productor / consumidor. Los semáforos proporcionan filas FIFO, filas de prioridad y herencia de prioridad. Los semáforos pueden ser estrictos o no estrictos.

C.2.5.5 Exclusiones mutuas

Las exclusiones mutuas son un componente opcional. Proporciona exclusiones mutuas entre tareas, cuando se tiene acceso a recursos compartidos. Las exclusiones mutuas proveen votación, colas FIFO, filas de prioridad, herencia de prioridad y una protección prioritaria. Las exclusiones mutuas son estrictas, es decir, una tarea no puede abrir una exclusión mutua, a menos que se haya cerrado primero la otra exclusión.

C.2.5.6 Mensajes

Los mensajes son un componente opcional. Las tareas pueden comunicarse con otras enviando mensajes a la fila de mensaje que se abren con otras tareas. Cada tarea abre su propia fila de entrada de mensajes. Un mensaje es identificado en la fila de mensajes mediante su identificador, que MQX asigna cuando se crea la fila. Solo la tarea que abre la cola de mensajes puede recibirlos. Cualquier tarea puede enviar un mensaje a cualquier fila previamente abierta, si conoce el identificador de la fila de tareas.

C.2.5.7 Fila de tareas

Además de proporcionar un mecanismo de programación, las filas de tareas proporcionan una forma simple y eficiente de sincronizar las tareas. Se puede suspender las tareas removiéndolas de la fila de tareas.

C.2.6. Elementos temporizadores.

C.2.6.1. introducción

El tiempo es un componente opcional que se puede habilitar o deshabilitar a nivel de BSP. Existe el tiempo transcurrido y el tiempo absoluto, este último es posible cambiarlo. El tiempo de resolución depende de la resolución definida por la aplicación que se establece para el hardware de destino cuando se inicia MQX.

C.2.6.2. Temporizadores ligeros

Los temporizadores ligeros son un componente opcional y proporcionan un mecanismo de baja sobrecarga para el llamado de funciones de la aplicación en intervalos periódicos. Los temporizadores ligeros están instalados mediante la creación de una fila periódica, entonces agregando un temporizador para expirar algún desplazamiento desde el inicio del periodo.

C.2.6.3. Temporizadores.

Los temporizadores son un componente opcional. Estos proporcionan la ejecución periódica de una función en la aplicación. MQX considera temporizadores de un solo tiro, que se ejecutan una sola vez, y temporizadores periódicos, que expiran varias ocasiones en un intervalo dado. Se pueden utilizar los temporizadores para comenzar a una hora específica o después de un tiempo determinado.

Cuando se establece un temporizador, se especifica la función de notificación que la tarea temporizador llama cuando se agota el tiempo. La función de notificación se puede utilizar para sincronizar las tareas mediante el envío de mensajes, manifestación de eventos o el uso de uno de los mecanismos de sincronización de MQX.

C.2.7. Plantillas de trabajo para tareas.

La lista de plantillas de trabajo define un conjunto inicial de plantillas de las tareas que se pueden crear en el procesador.

En la inicialización, MQX crea una instancia de cada tarea, cuya plantilla la define como una tarea de inicio automático. Además, mientras se ejecuta una aplicación, puede crear otras tareas con una plantilla de tarea que se encuentra previamente definida o bien la aplicación la define dinámicamente. El final de la lista de plantillas es una tarea sin contenido.

Ahora se muestra la estructura que define la plantilla de tareas.

```
typedef struct task_template_struct
{
    _mqx_uint                INDICE DE LA PLANTILLA
    void *_CODE_PTR_        DIRECCION DE LA TAREA
    _mem_size                TAMAÑO DEL APILADO DE LA TAREA
    _mqx_uint                PRIORIDAD DE LA TAREA
    char_PTR                NOMBRE DE LA TAREA
    _mqx_uint                ATRIBUTOS DE LA TAREA
    uint_32                 CREACION DE PARAMETROS
    _mqx_uint                REBANADA DE TIEMPO POR DEFECTO
} TASK_TEMPLATE_STRUCT, _PTR_TASK_TEMPLATE_STRUCT_PTR;
```

C.2.8. Asignación de la prioridad de tareas.

Cuando se asigna la prioridad de las tareas en la plantilla de tareas:

- *MQX crea una fila de tareas activa por para cada prioridad desde la más alta hasta la menor prioridad (el número más alto).*
- *Mientras se ejecuta una aplicación, no se puede crear una tarea que tenga menor prioridad que la tarea que ocupa la menor prioridad en la lista de plantillas.*