

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE
UN MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA
DE MÁQUINAS SÍNCRONAS**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**

PRESENTAN:

ALBERTO ANTONIO SUPPÉN DIMAS

RAFAEL HERNÁNDEZ GALLARDO



MÉXICO, D. F.

2011

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

TEMA DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN
DEBERA(N) DESARROLLAR

INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
C.-RAFAEL HERNÁNDEZ GALLARDO
C.-ALBERTO ANTONIO SUPPÉN DIMAS

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA DE
MÁQUINAS SÍNCRONAS”**

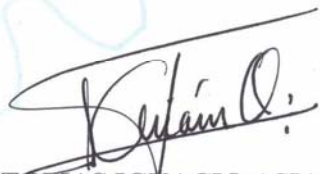
PRESENTAR LOS CONCEPTOS BÁSICOS DE OPERACIÓN, LAS ESPECIFICACIONES DE
FUNCIONAMIENTO, EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DE UN MEDIDOR DE
ÁNGULO DE CARGA PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS.

- INTRODUCCIÓN.
- EL ÁNGULO DE CARGA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA.
- ESPECIFICACIONES GENERALES DEL MEDIDOR DE ANGULO DE CARGA.
- MICROCONTROLADOR.
- DISEÑO DE SOFTWARE DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA.
- RESULTADOS EXPERIMENTALES.
- CONCLUSIONES.

MÉXICO D.F., 23 DE MAYO DE 2011.

ASESORES


DR. DANIEL RUÍZ VEGA.


M. EN C. TOMAS IGNACIO ASIAÍN OLIVARES.


M. EN C. SALVADOR RICARDO MENESES GONZALEZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO
DE INGENIERÍA EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA



DEDICATORIA

A Nuestros Padres

Por ser las personas más importantes en nuestras vidas, quienes nos brindan su apoyo, cariño y confianza en todas nuestras metas realizadas, y que sabemos lo seguirán haciendo hasta donde la vida se los permita. A ustedes que con su tiempo, dedicación y paciencia, nos han ayudado a lograr un objetivo tan valioso que constituye la mejor herencia que alguien puede tener.

A Nuestros Hermanos

Por toda la ayuda incondicional, apoyo moral y económico a lo largo de la vida, por soportar nuestro mal carácter en días y noches difíciles, gracias por su comprensión a lo largo de estos años de estudio.

A Nuestros Amigos

A ustedes que son parte importante en nuestras vidas profesionales y humanas, por ser quienes tienen el mejor consejo para las peores situaciones, por estar ahí cuando nadie quiere estar.

A Nuestros Abuelos

Porque aunque no estén ya con nosotros, vivirán siempre en nuestros corazones toda la vida.

“Nada se compara con observar que cada día se avanza un paso más para llegar a la meta, y esa es la satisfacción más dulce y duradera que alguien pueda tener en la vida.”

Alberto Antonio Suppén Dimas

“Cuando defiendes tus ideas frente a todo el mundo, debes esforzarte para vivir de acuerdo con ellas”

Hernández Gallardo Rafael

AGRADECIMIENTOS

A esta gran casa de estudios, el **Instituto Politécnico Nacional** y la **Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica** por darnos la oportunidad de formar parte de una generación más de brillantes ingenieros en este país, por la formación y preparación recibida para desarrollarnos en el área de la **Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica**.

Si bien ha requerido de mucho esfuerzo y dedicación por parte de los autores y de sus directores de tesis, el elaborar esta tesis de licenciatura, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaremos, las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación, sin mencionar la inspiración en momentos de esfuerzo y dedicación.

A nuestras maravillosas madres, que nos han enseñado que en la vida no todo es color de rosa y que debemos luchar hasta lograr nuestras metas, y que han hecho de nosotros día a día un mejor hombre en toda la extensión de la palabra.

A todos y cada uno de **nuestros Profesores**, que semestre a semestre, con sus enseñanzas, recomendaciones, transmisión de conocimientos, y regaños, gradualmente nos introdujeron en la Ingeniería de Comunicaciones y Electrónica.

Al Dr. Daniel Ruiz Vega, por aceptar ser nuestro director en este trabajo, por tomar de forma muy seria su labor, por sus observaciones, recomendaciones y exigencia que ayudaron en el mejoramiento del mismo.

Al M. en C. Tomás Ignacio Asiaín Olivares, porque gracias a su experiencia, y sus observaciones se pudieron llevar a cabo las pruebas experimentales de este trabajo, parte fundamental del mismo y que dan sustento.

Al Ing. Héctor Manuel Sánchez García, porque gracias a sus conocimientos teóricos y prácticos, sus observaciones y recomendaciones hechas durante el desarrollo de este proyecto se pudieron evitar muchas fallas en las mediciones, por ser un gran amigo y colega.

Al Dr. Raúl Cortés Mateos, por su inapreciable ayuda en el desarrollo del principio de medición y la programación del microcontrolador.

Al **IPN** y al **CONACyT** por facilitar a través de los proyectos SIP 20100895, SIP 20110561 y de ciencia básica 83701, los recursos para la construcción del medidor y los equipos necesarios en el área de las micromáquinas para su prueba e instalación.

RESUMEN

El ángulo de carga es una variable tan importante de las máquinas síncronas y de los sistemas de potencia que un tipo especial de estabilidad, la estabilidad angular, se ha definido en base a la observación de su comportamiento dinámico. Hasta ahora, medir de manera adecuada esta variable dinámica de la máquina síncrona continúa como un problema importante de instrumentación, debido a la sensibilidad, exactitud y velocidad requeridas para que estas mediciones puedan ser empleadas en dispositivos de control y protección.

A pesar de su importancia, actualmente no hay dispositivos de medición del ángulo de carga disponibles comercialmente y su desarrollo aún requiere de avances significativos para alcanzar las características necesarias para su aplicación práctica.

La medición del ángulo de carga de las máquinas síncronas es también requerida para el desarrollo de investigación en el área de la evaluación y control de problemas de estabilidad angular de sistemas eléctricos de potencia. En esta área, las mediciones del ángulo de carga en estado estacionario y dinámico proveen una referencia importante para validar los resultados de simuladores digitales y para el desarrollo de sistemas avanzados de control y protección.

Es por esta razón que en el presente trabajo, además de presentar sus conceptos básicos de operación, se ha diseñado e implementado un medidor de ángulo de carga de máquinas síncronas basado en un microcontrolador de la familia MSP430 de Texas Instruments. El desempeño del medidor fue probado teórica y experimentalmente utilizando las micromáquinas síncronas del Simulador Experimental de Laboratorio de la SEPI-ESIMEZ-IPN, que está siendo desarrollado por el Grupo de Investigación de Fenómenos Dinámicos en Redes Interconectadas y Máquinas Eléctricas.

El medidor es de muy bajo costo, y los resultados teóricos y experimentales son muy alentadores y muestran que se obtuvieron mediciones muy precisas del ángulo de carga.

ABSTRACT

The load angle is a variable of synchronous machines and of electric power systems that is so important, that a special type of stability, called angular stability, was defined based on the observation of its dynamic behavior. Until now, measuring this synchronous machine dynamic variable adequately remains as an important open research problem in the instrumentation area, due to the sensitivity, accuracy and speed required for these measurements to be used in control and protection devices.

Despite its importance, there are no devices for measuring the load angle commercially available, and its development still requires significative technical advances to reach the characteristics needed for its practical application.

Measuring the load angle is also required to develop research in the field of power systems angular stability assessment and control. In this area, steady state and dynamic load angle measurements provide an important reference to validate the results of digital computer simulators and to develop advanced control and protection systems.

This is the reason this work, besides presenting its basic operating concepts, design and implements a synchronous machine load angle measurement device, based in a MSP430 de Texas Instruments microcontroller. The load angle measuring device performance was tested theoretically and experimentally using the synchronous micromachines of the Experimental Power System Simulator of SEPI-ESIMEZ-IPN, that is being developed by the Research Group in Electric Machines and Interconnected Power Systems Dynamics.

The resulting measuring device has a very low cost, and the very encouraging theoretical and experimental results show that the load angle measurements were very accurate.

CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	XI
CONTENIDO	XIII
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABLAS	XIX
NOMENCLATURA	XXI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 ANTECEDENTES	2
1.2.1 Instrumentos de medición del ángulo de carga	2
1.2.2 El proyecto de un simulador de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP)	3
1.2.3 Trabajos realizados en el simulador.....	5
1.3 OBJETIVO	7
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	7
1.5 LIMITACIONES Y ALCANCES	7
1.6 APORTACIONES DE LA TESIS	7
1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	8
CAPÍTULO 2: EL ÁNGULO DE CARGA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA	11
2.1 INTRODUCCIÓN.....	11
2.2 MÁQUINA SÍNCRONA	11
2.3 TEORÍA GENERALIZADA DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS	13
2.4 DEFINICIÓN DEL ÁNGULO DE CARGA	14
2.4.1. La ecuación de oscilación.....	14
2.4.2 El ángulo de carga eléctrico.....	17
2.4.3 Determinación teórica del valor del ángulo de carga	18
CAPÍTULO 3: ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL MEDIDOR DEL ÁNGULO DE CARGA	21
3.1 INTRODUCCIÓN.....	21
3.2 ESPECIFICACIONES GENERALES DEL MEDIDOR.....	21
3.2.1 Transductor de la Señal de Posición del Rotor.....	23
3.2.2 Transductor de las señales de voltaje en las terminales de la máquina	26
3.2.3 Convertidor Digital-Analógico.....	29
3.3 RESULTADOS DE LA ADECUACIÓN DE SEÑALES	30
CAPÍTULO 4: MICROCONTROLADOR	33
4.1 INTRODUCCIÓN	33
4.2 MICROCONTROLADORES TEXAS MSP430	33
4.2.1 Memorias	34
4.2.2 CPU	35
4.2.3 Puertos de Entrada y Salida	36
4.2.4 Generador de Reloj.....	37
4.2.5 Interrupciones.....	38
4.2.6 Los temporizadores.....	39

	Página
CAPÍTULO 5: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL MEDIDOR.....	43
5.1 INTRODUCCIÓN	43
5.2 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA.....	43
5.2.1 Configuraciones del microcontrolador	45
5.2.2 Definición y declaración de las variables	47
5.2.3 Definición del programa principal.....	47
5.2.4 Definición de las rutinas de interrupción.....	47
CAPÍTULO 6: RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	51
6.1 INTRODUCCIÓN	51
6.2 MICROMÁQUINAS SÍNCRONAS DE LABORATORIO	51
6.3 EQUIPO REQUERIDO EN LAS PRUEBAS.....	55
6.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES	63
6.4.1 Introducción	63
6.4.2 Escalamiento de las mediciones.....	64
6.4.3 Pruebas de respuesta cuando la máquina se encuentra en vacío.....	65
6.4.4 Pruebas de respuesta ante el incremento gradual de la carga resistiva	66
6.4.5 Pruebas ante la disminución gradual de carga resistiva	67
6.4.6 Pruebas de respuesta ante el arranque de un motor de inducción.....	68
6.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	70
6.5.1 Comparación de los valores experimentales del ángulo de carga con los valores teóricos	70
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES	73
7.1 INTRODUCCIÓN	73
7.2 CONCLUSIONES	73
7.3 APORTACIONES DE LA TESIS	74
7.4 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....	75
REFERENCIAS.....	77
APÉNDICE A: DIAGRAMA DE CONEXIÓN COMPLETO DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA.....	79
APÉNDICE B: CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE CARGA DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS	81
APÉNDICE C: EQUIPO EMPLEADO EN LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES	83
APÉNDICE D: COSTOS DE MATERIAL Y COMPONENTES DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA.....	87

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIG. 1.1: IDEA GENERAL DEL SIMULADOR A ESCALA DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA [ADAPTADO DE RUIZ ET AL., 2011].	4
FIG. 1.2: LOCALIZACIÓN FÍSICA DE LAS DIFERENTES ÁREAS DEL SIMULADOR EXPERIMENTAL [ADAPTADO DE RUIZ ET AL., 2011].	5
FIG. 2.1: TIPOS DE CONSTRUCCIÓN PRINCIPALES DE LA MÁQUINA SÍNCRONA (ADAPTADO DE [ALBINO, 2006].)	12
FIG. 2.2: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA TRANSFORMACIÓN DE LOS DEVANADOS A, B, C DEL ESTATOR DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA EN DOS DEVANADOS FICTICIOS EN LOS EJES D Y Q. (ADAPTADO DE [KARADY, 2000].)	14
FIG. 2.3: DEFINICIÓN DEL ÁNGULO DE CARGA δ_m [RUIZ Y OLGUÍN, 1995].	15
FIG. 2.4: SISTEMA TURBINA-GENERADOR [URBINA ET AL., 2010]	16
FIG. 2.5: RELACIÓN ENTRE LOS GRADOS ELÉCTRICOS Y LOS GRADOS MECÁNICOS EN UNA MÁQUINA DE P POLOS (ADAPTADO DE [RUIZ Y OLGUÍN, 1995A]).	17
FIG. 2.6: DIAGRAMA FASORIAL DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES [RUIZ Y OLGUÍN, 1995].	19
FIG. 3.1: DIAGRAMA GENERAL DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA MOSTRANDO SU CONEXIÓN CON LA MÁQUINA SÍNCRONA.	22
FIG. 3.2: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA.	23
FIG. 3.3: DIAGRAMA A BLOQUES DEL TRANSDUCTOR DE LA SEÑAL DE POSICIÓN DEL ROTOR.	23
FIG. 3.4: DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL OPTO ACOPLADOR QRD1114.	24
FIG. 3.5: DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL 74LS132.	25
FIG. 3.6: DIAGRAMA A BLOQUES DEL ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES EN LAS TERMINALES DE VOLTAJE.	26
FIG. 3.7: COMPORTAMIENTO DEL COMPARADOR DE TENSIÓN.	26
FIG. 3.8: SEÑAL DIGITAL GENERADA POR EL COMPARADOR DE TENSIÓN.	27
FIG. 3.9: DIAGRAMA CONEXIÓN DEL COMPARADOR DE TENSIÓN.	28
FIG. 3.10: DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL DETECTOR DE CRUCE POR CERO.	29
FIG. 3.11: ETAPA FINAL DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA.	30
FIG. 3.12: DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE LA DAC0800.	30

	Página
FIG. 3.13 COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES DEL ROTOR Y DE LAS TERMINALES DEL GENERADOR DESPUÉS DE LA ETAPA DE ADECUACIÓN DE LA SEÑAL.	31
FIG. 4.1: COMPONENTES ESENCIALES DE UN MICROCONTROLADOR [DAVIES, 2008].	34
FIG. 4.2: PUERTOS DEL MICROCONTROLADOR MSP430F2274.....	36
FIG. 4.3 MODO CAPTURA USANDO UNA SEÑAL DE TIEMPO CONOCIDA [DAVIES, 2008].	40
FIG. 5.1: DIAGRAMA A BLOQUES DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS.	44
FIG. 6.1: UBICACIÓN DE LAS MICROMÁQUINAS, DENTRO DEL ÁREA DE LA MICRO RED DEL SIMULADOR EXPERIMENTAL (ADAPTADO DE [MEJÍA Y TRINIDAD, 2007]).	53
FIG. 6.2: ÁREA DE LA MICRO RED DEL SIMULADOR EXPERIMENTAL DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA. A: MICROMÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES. B: TABLERO DE CARGAS, CONEXIONES Y ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN. C: MICROMÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS LISOS (ADAPTADO DE [JUÁREZ ET AL., 2009]).	53
FIG. 6.3: DIMENSIONES Y ASPECTO DE LAS MICROMÁQUINAS SÍNCRONAS (ADAPTADO DE [MEJÍA Y TRINIDAD, 2007]).....	54
FIG. 6.4: CONEXIONES ELÉCTRICAS DE LAS TERMINALES. [ADAPTADO DE MEJÍA Y TRINIDAD, 1997].	54
FIG. 6.5: CARTAS DE OPERACIÓN TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES DE LAS MICROMÁQUINAS SÍNCRONAS DE LA MICRO RED [GARCÍA, 2007].....	55
FIG. 6.6: TRANSFORMADOR DE VOLTAJE.....	56
FIG. 6.7: TRANSFORMADOR DE CORRIENTE E INTERRUPTORES (ADAPTADO DE [SÁNCHEZ, 2010]).	56
FIG. 6.8: CAJÓN DE RESISTENCIAS.....	57
FIG. 6.9: MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO (ADAPTADO DE [SÁNCHEZ, 2010]).	57
FIG.6.10: MULTÍMETRO DIGITAL.	58
FIG. 6.11: OSCILOSCOPIO DIGITAL.	58
FIG. 6.12: SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD (ADAPTADO DE [SÁNCHEZ, 2010]).	59
FIG. 6.13: SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD.	59
FIG. 6.14: CONEXIÓN DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS DURANTE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES REALIZADAS A LA MÁQUINA DE POLOS SALIENTES. A) MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES, B) REGULADOR AUTOMÁTICO DE VOLTAJE (RAV), C) CAJÓN DE CARGA RESISTIVA, D) OSCILOSCOPIO, E) INTERRUPTOR TRIFÁSICO A, F) TRANSFORMADOR DE VOLTAJE, G) CONTROL DE VELOCIDAD, , H) COMPUTADORA PERSONAL. I) FUENTE SIMÉTRICA DE VOLTAJE.	60
FIG. 6.15: CONEXIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR. A) OSCILOSCOPIO, B) COMPUTADORA PERSONAL, C) PROGRAMADOR EZ430F2013, D) MEDIDOR DEL ÁNGULO DE CARGA, E) FUENTE SIMÉTRICA DE VOLTAJE.	60

	Página
FIG. 6.16: CONEXIONES PARA EL SENSADO DE LA SEÑAL DE LA FLECHA. A) OPTOACOPLADOR QRD1114, B) ENCODER CON UNA RANURA.	61
FIG. 6.17: ESTRUCTURA DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA A) ENTRADA DE LA FUENTE SIMÉTRICA, B) REGULADOR LF33, C) ENTRADA DEL TRANSFORMADOR 127/12V, D) REGULADOR 7805, E) BUS DE DATOS, F) DAC0800, G) SALIDA DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA, H) INTERFAZ PARA MSP430F2274, I) MICROCONTROLADOR MSP430F2274, J) CIRCUITO 74LS132, K) CIRCUITO LM311, L) CIRCUITO LM741, M) ENTRADA DEL OPTOACOPLADOR.	61
FIG. 6.18: REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.	62
FIG. 6.19: INTERIOR DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA FINAL. SE PUEDEN OBSERVAR LOS COMPONENTES DE LA FUENTE DE PODER Y DEL MEDIDOR. LA DESCRIPCIÓN DEL MEDIDOR SE PRESENTA EN LA FIGURA 6.17.	62
FIG. 6.20: EXTERIOR DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA FINAL INSTALADO EN UN GABINETE. LAS DIFERENTES CONEXIONES DE LOS TRANSDUCTORES Y DE LA SALIDA SE INDICAN EN LA FIGURA.	63
FIG. 6.21: CIRCUITO DE PRUEBA PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA EN VACÍO.	63
FIG. 6.22: PROGRAMA DE SIMULINK PARA CAMBIAR A GRADOS LAS MEDICIONES DE ÁNGULO DE CARGA OBTENIDAS EN EL OSCILOSCOPIO.	64
FIG. 6.23: ÁNGULO DE CARGA CUANDO SE ENCUENTRA LA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES EN VACÍO.	65
FIG. 6.24: ÁNGULO DE CARGA CUANDO LA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS LISOS SE ENCUENTRA EN VACÍO.	66
FIG. 6.25: ÁNGULO DE CARGA ANTE EL INCREMENTO DE CARGA RESISTIVA EN LA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES.	66
FIG. 6.26: ÁNGULO DE CARGA ANTE EL INCREMENTO DE CARGA RESISTIVA EN LA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS LISOS.	67
FIG. 6.27: ÁNGULO DE CARGA ANTE DECREMENTO DE CARGA RESISTIVA EN LA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES.	67
FIG. 6.28: ÁNGULO DE CARGA ANTE EL DECREMENTO DE CARGA RESISTIVA EN LA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS LISOS.	68
FIG. 6.29: RESPUESTA ANTE LA ENTRADA DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN EN LA MÁQUINA DE POLOS SALIENTES.	69
FIG. 6.30: RESPUESTA ANTE LA ENTRADA DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN EN LA MÁQUINA DE POLOS LISOS.	69
FIG. A.1: DIAGRAMA DE CONEXIÓN COMPLETO DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA.	80

LISTA DE TABLAS

	Página
TABLA 3.1 TABLA DE VERDAD DE LA COMPUERTA NAND	25
TABLA 4.1 MAPA GENERAL DE MEMORIA PARA LOS MSP430[TEXAS INSTRUMENT, 2009].	35
TABLA 4.2 REGISTROS GENERALES EN EL CPU DE LA FAMILIA MSP430 [DAVIES, 2008].....	35
TABLA 4.3 VECTORES DE INTERRUPCIÓN.	41
TABLA 6.1: DATOS DE PLACA DE LAS MICROMÁQUINAS SÍNCRONAS (ADAPTADA DE [SÁNCHEZ, 2010]).....	55
TABLA 6.2: RESULTADOS TEÓRICOS DEL ÁNGULO DE CARGA PARA LA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES.	71
TABLA 6.3: RESULTADOS TEÓRICOS DEL ÁNGULO DE CARGA PARA LA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS LISOS.....	71
TABLA 6.4: COMPARACIÓN DE LOS VALORES MEDIDO Y TEÓRICO DEL ÁNGULO DE CARGA DURANTE LA PRUEBA DE INCREMENTO DE CARGA.	71
TABLA 6.5: COMPARACIÓN DE LOS VALORES MEDIDO Y TEÓRICO DEL ÁNGULO DE CARGA DURANTE LA PRUEBA DE ARRANQUE DEL MOTOR EN VACÍO.	71
TABLA 6.6: DIFERENCIAS ENTRE LOS VALORES TEÓRICOS Y LOS MEDIDOS OBTENIDOS DURANTE LA PRUEBAS.....	72
TABLA C.1: OSCILOSCOPIO DIGITAL: DATOS DE PLACA.....	83
TABLA C.2: MULTÍMETRO: DATOS DE PLACA.	83
TABLA C.3: TRANSFORMADOR DE CORRIENTE. DATOS DE PLACA.	84
TABLA C.4: CARGA RESISTIVA. DATOS DE PLACA.	84
TABLA C.5: CARGA INDUCTIVA. DATOS DE PLACA.	84
TABLA C.6: DRIVE DE MICROMÁQUINAS: DATOS DE PLACA.	84
TABLA C.7: MICROMÁQUINA DE POLOS SALIENTES: DATOS DE PLACA.	85
TABLA C.8: PRIMO MOTOR DE MICROMÁQUINA DE POLOS SALIENTES: DATOS DE PLACA.....	85
TABLA C.9: TACO GENERADOR DE MICROMÁQUINA DE POLOS SALIENTES: DATOS DE PLACA.....	85
TABLA C.10: MICROMÁQUINA DE POLOS LISOS: DATOS DE PLACA.	85
TABLA C.11: PRIMO MOTOR DE MICROMÁQUINA DE POLOS LISOS: DATOS DE PLACA.....	86
TABLA C.12: TACO GENERADOR DE MICROMÁQUINA DE POLOS SALIENTES: DATOS DE PLACA.....	86

	Página
TABLA E1: COSTOS DE MATERIAL Y COMPONENTES DEL PROTOTIPO DE ÁNGULO DE CARGA EN PESOS MEXICANOS.....	88

NOMENCLATURA

δ	Ángulo de carga eléctrico.
δ_m	Ángulo de carga mecánico.
f.e.m.	Fuerza Electro-Motriz.
I_t	Corriente de línea.
P_{max}	Potencia Máxima.
ω	Velocidad síncrona.
J	Momento de inercia polar.
α_m	Aceleración angular.
T_m	Par mecánico de la turbina en Nm.
T_e	Par electromagnético en Nm.
T_d	Coeficiente de amortiguamiento del par en Nm/s.
T_a	Par de aceleración.
ω_m	Velocidad de la flecha del rotor en radianes mecánicos sobre segundo.
T	Par neto.
E_q	Voltaje de Interno.
V_t	Voltaje en las Terminales de la máquina síncrona.
x_q :	Reactancia de cuadratura.
x_d :	Reactancia del eje directo.
TBR	Registro contador del timer B.
TBCTL	Registro de control del timer B.
CNTLx	Bit del registro de control que indica el ancho del conteo.
TBSSELx	Seleccionador de la fuente del reloj.
IDx	Divisor de la entrada de reloj.
MCx	Indicador del modo de control.
TBCLR	Bit de reset del timer B.
TBIFG	Bandera de interrupción del timer B.
TBIE	Habilita las interrupciones por el Timer B.
TBCCRx	Registro de control de captura/compara del timer B.
TBCCTLx	Control del registro captura/compara del timer B.
CMx	Seleccionador del modo a capturar.
CCISx	Seleccionador de la entrada a capturar/comparar.
SCS	Seleccionador de sincronización de la señal capturada con el reloj.
CAP	Seleccionar el modo de captura o compara.
CCIE	Permite las interrupciones en este modo.
CCI	Seleccionar el modo de captura o compara.
CCIFG	Bandera del registro de control de captura/compara.
TBIV	Vector de interrupción del timer B.
uint16_t	Clase para crear variables de 16 bits de longitud.

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El ángulo de carga es la variable principal en la que se manifiesta el fenómeno de la estabilidad transitoria y en general en todos los fenómenos electromecánicos de la máquina síncrona, conocidos como estabilidad angular. Es por esta razón que muchos métodos de análisis y control de inestabilidades angulares están basados en la observación del comportamiento dinámico del ángulo de carga de los generadores síncronos del sistema. Hasta ahora, medir de manera adecuada esta variable dinámica de la máquina, continúa como un problema importante de instrumentación debido a la sensibilidad, exactitud y velocidad requeridas para que estas mediciones puedan ser empleadas en la evaluación y control en tiempo real de la estabilidad transitoria del sistema.

Actualmente, se han desarrollado sistemas de medición fasorial sincronizada que permiten obtener mediciones de voltajes y corrientes en nodos seleccionados del sistema eléctrico de potencia con tiempos de muestreo y exactitud bastante rápidos [Phadke and Thorp, 2008]. Esto ha ocasionado la utilización de estas mediciones para el desarrollo de sistemas de evaluación y control de problemas de estabilidad. Sin embargo, las mediciones de los ángulos de carga de las máquinas síncronas, necesarias para aplicar métodos de control de la estabilidad transitoria no están disponibles comercialmente y su desarrollo aún requiere de avances significativos para alcanzar las características necesarias en su aplicación práctica.

Es por esta razón que el presente trabajo está dedicado al desarrollo de un medidor del ángulo de carga en estado transitorio de la máquina síncrona. Se estudiarán los conceptos relacionados con la definición de las variables mecánicas de la máquina, las especificaciones de funcionamiento que deben cumplir esta clase de medidores y su implementación práctica en un sistema de laboratorio. El sistema resultante, además de ser muy importante en el desarrollo de la investigación en el área de la estabilidad de sistemas eléctricos de potencia, será una parte muy importante en el desarrollo del Área de las Micromáquinas del Simulador Experimental de Laboratorio que está

desarrollando el Grupo de Investigación de Fenómenos Dinámicos de la SEPI-ESIME-Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Instrumentos de medición del ángulo de carga

En el año de 1920 se comenzó a dar cada vez más importancia a la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia, ya que esta propiedad es muy importante para que el sistema funcione en buen estado después de un disturbio.

Durante muchos años la medición del ángulo de carga en los sistemas eléctricos de potencia causó muchas investigaciones, y las primeras mediciones se lograban haciendo la comparación física de una marca que se le hacía al rotor y al introducir carga a la máquina se podía notar con un estroboscopio como la marca en el rotor se desplazaba; dicho desplazamiento era la medición del ángulo de carga.

Años más tarde, con la aparición del circuito integrado, en 1944 se logró desarrollar un sistema en el cual un pulso producido por un sensor magnético encontrado cerca del rotor de la máquina síncrona, se comparaba con otro pulso generado por el voltaje terminal de la máquina. Este circuito calculaba la diferencia del desplazamiento de los impulsos medidos por el sensor cada vez que la carga de la máquina variaba [Sudan et al., 1955].

Los adelantos tecnológicos permitieron que en la década de los 90's por todo el mundo se empezaran a desarrollar métodos alternativos para determinar el ángulo de carga, permitiendo su obtención en tiempo real y con gran exactitud. Un ejemplo de estos nuevos sistemas fue diseñado en 1992, en donde se hacía la medición del ángulo de carga en estado estacionario y transitorio, velocidad angular y aceleración usando un encoder óptico en el generador asíncrono. Los resultados obtenidos eran muy satisfactorios, sin embargo las mediciones de la aceleración presentaban mayor error para valores mayores de 50 rad/s^2 , debido a problemas relacionados con la flexibilidad y la resonancia natural de la flecha [IEEE, 1982].

Tiempo después se logró desarrollar un instrumento que se encargaba de almacenar, controlar y mostrar las mediciones en un display de cristal líquido. Las mediciones hechas a la máquina eran: frecuencia del voltaje en terminales, velocidad y ángulo de carga de rotor. Éste último era calculado mediante unas formulas matemáticas utilizando la señal obtenida por un circuito de cruce de cero conectado a las terminales de voltaje, y una señal de referencia establecida con la máquina en vacío. [Kadhim et al., 1992].

La constante evolución en las tecnologías permitió que los encapsulados en los circuitos integrados fuesen más pequeños, eficientes y baratos, y con la aparición de software más rápido y flexible se desarrolló en 1994 un método alternativo para la deducción de la posición del ángulo par, el cual estaba basado en las componentes armónicas de secuencia cero que se obtenían de mediciones instantáneas del voltaje terminal en las 3 fases de la máquina [De Mello, 1994].

La ventaja de este método es que no requería de dispositivos externos tales como sensores ópticos o magnéticos; sin embargo el filtrado y procesamiento digital de las mediciones de tensión de las fases es indispensable ya que de éstas se extraen las armónicas que representan al sistema, e indican cuánto se ha desplazado respecto a la armónica obtenida cuando la máquina está en vacío [De Mello, 1994].

En 1999 se diseñó y construyó un instrumento para la medición del ángulo par, velocidad del rotor, y la frecuencia de la terminal de voltaje de las máquinas síncronas basado en un microcontrolador de 16 bits que contaba con un reloj interno de 16 MHz, y que era adecuado para ambos estados, estacionario y transitorio. La desventaja de esta técnica es que requiere de un laborioso procedimiento manual para calibrar el ángulo de par cero cada vez que el instrumento es conectado o desenergizado [Barrera et al., 1999].

Finalmente en el año 2007 se implementó un sistema simple, basado en comparaciones entre los pulsos generados por un circuito detector de cruce de cero cuando la onda de voltaje en la terminal cambia de niveles de tensión negativos a positivos, y los pulsos obtenidos por un sensor óptico, a medida de que se hace el incremento de carga en la máquina. El pulso producido por el voltaje terminal se empieza a desplazar con respecto a la referencia del pulso del rotor, y es esta diferencia entre los pulsos la que es medida por el sistema basado con un microcontrolador MC68HC908JK3 para obtener el ángulo de carga [Pérez et. al., 2007].

1.2.2 El proyecto de un simulador de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP)

El grupo de Investigación de Fenómenos Dinámicos en Redes Interconectadas y Máquinas Eléctricas de la SEPI-ESIME conformado desde mediados de la década de 1980 está desarrollando un simulador de sistemas eléctricos de potencia multimáquinas con 4 áreas de control. La figura 1.1 muestra en forma esquemática la idea general del simulador que se está construyendo [Ruiz et al., 2011].

Los aspectos fundamentales de diseño y construcción del simulador de sistemas eléctricos de potencia (SEP) concebido como un sistema multimáquinas conformado por grupos de máquinas motor de C.C. – alternador síncrono de diferente capacidad, así como de elementos como transformadores, líneas, interruptores, cargas dinámicas y estáticas entre otros, está fundamentado en trabajos que abordan aspectos del diseño y construcción de simuladores de SEP.

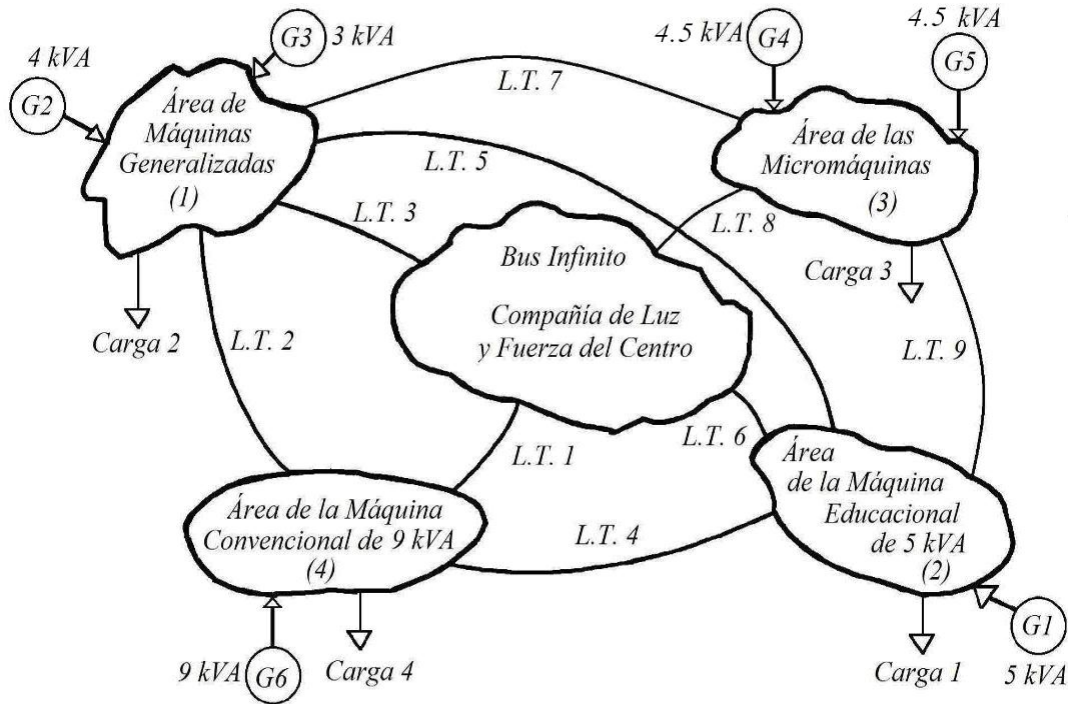


Fig. 1.1: Idea general del simulador a escala de un sistema eléctrico de potencia [Adaptado de Ruiz et al., 2011].

Las áreas de control que componen el simulador experimental de sistemas de potencia se encuentran desplazadas geográficamente dentro del área de la nave del edificio de Laboratorios Pesados II de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, como se muestra en la figura 1.2, para mejorar la representación de un sistema interconectado.

Este simulador experimental de un SEP cuenta con todos los tipos de simuladores físicos de máquinas eléctricas: máquinas generalizadas (máquinas especiales), micro máquinas (máquinas diseñadas especialmente para tener parámetros dinámicos similares a los de grandes unidades de generación) y simuladores no escalados (máquinas convencionales de pequeña capacidad). Esto aumenta aún más las ventajas del simulador, ya que permite explotar adecuadamente las ventajas de cada uno de estos simuladores, tanto en la investigación como en la docencia. Aunque se podría pensar que la construcción de este simulador es muy costosa, debido a los equipos especiales con los que cuenta, el costo de desarrollar este simulador es mucho menor que el esperado, ya que utiliza máquinas que ya se encontraban en el laboratorio de ingeniería eléctrica de la ESIME [Ruiz et al., 2011].

Este plan, que ya tiene aproximadamente diecisiete años de haber sido propuesto por el Dr. Daniel Olguín Salinas, y que desde sus inicios ha sido un proyecto de alcances muy ambiciosos, es retomado ahora por el actual grupo de investigación de

fenómenos dinámicos en redes interconectadas y máquinas eléctricas de la SEPI-ESIME-Zacatenco, formado por el Dr. Daniel Olguín, el M. en C. Tomás I. Asiaín y el Dr. Daniel Ruiz [Ruiz et al., 2011].

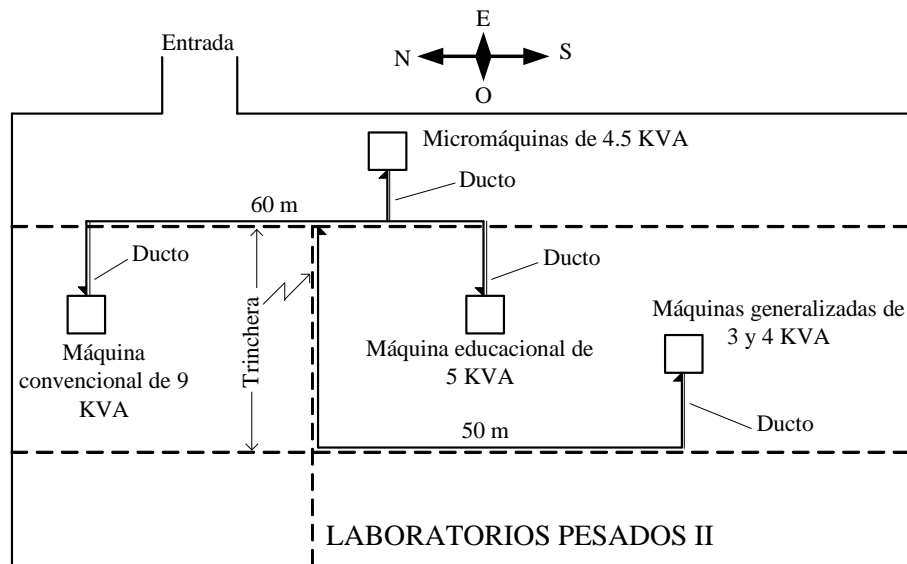


Fig. 1.2: Localización física de las diferentes áreas del Simulador Experimental [Adaptado de Ruiz et al., 2011].

1.2.3 Trabajos realizados en el simulador

La utilización de este enfoque, a la vez que ha facilitado la implementación del proyecto general, ha permitido probar la utilidad de las máquinas en las diferentes áreas de control por separado, en diferentes proyectos de investigación y docencia con resultados muy exitosos en la producción de recursos humanos y trabajos de investigación como son [Ruiz et al., 2011]:

- 16 tesis de maestría.
- 2 premios de tesis de maestría del IPN.
- 1 premios de tesis de licenciatura del IPN.
- 2 premios en los certámenes de tesis del IIE.
- 2 premios de ingeniería de la Ciudad de México
- 1 primer premio del concurso de software del IPN a nivel superior.
- 17 tesis de licenciatura.
- 2 artículos de investigación en revistas internacionales.
- 4 artículos de investigación en revistas nacionales.
- 43 artículos de investigación en congresos internacionales.
- 25 artículos de investigación en congresos nacionales.

Algunas de las aplicaciones utilizadas en estos trabajos son [Ruiz et al., 2011]:

- Determinación de parámetros dinámicos y en estado estacionario de máquinas eléctricas.
- Enseñanza práctica de la teoría generalizada de las máquinas eléctricas.
- Diseño de pruebas para la determinación de parámetros de cargas eléctricas a partir de mediciones.
- Implementación del control de excitación de un generador síncrono.
- Implementación de simuladores de turbina hidráulica con fines de investigación y docencia.
- Puesta en marcha de un sistema de control supervisorio y adquisición de datos (SCADA).
- Implementación de las protecciones de un generador síncrono de laboratorio.
- Técnicas para el monitoreo de la condición de máquinas eléctricas y transformadores.
- Validación de simuladores digitales de sistemas eléctricos interconectados y máquinas eléctricas para estudios de estabilidad.

El desarrollo del simulador de sistemas de potencia en etapas ha permitido a los miembros del grupo de investigación de fenómenos dinámicos adquirir una experiencia muy valiosa en la construcción y caracterización de los simuladores. En particular, se han desarrollado los siguientes trabajos de tesis con la microrred, descritos en orden cronológico descendente: [Trinidad, 2010, Ramos, 2010, Urbina et al., 2010, Sánchez, 2010, Juárez, 2008, Mejía y Trinidad, 2007, García, 2007].

El trabajo de algunos de estos alumnos de licenciatura y su contacto con las simulaciones experimentales posibles en el laboratorio los ha hecho decidirse a hacer trabajos de tesis teórico-experimentales utilizando el simulador y, en muchos casos, continuar sus estudios en un programa de maestría.

Por todos los resultados reportados y la experiencia adquirida a lo largo del desarrollo del simulador, se considera en el grupo de investigación de fenómenos dinámicos que la continuación de estos trabajos es de una gran importancia, ya que puede generar no solamente proyectos de investigación y docencia, tesis de nivel posgrado, licenciatura y artículos de investigación, sino que puede además ser utilizado, una vez terminado el proyecto general básico, para desarrollar prototipos de sistemas de control, monitoreo y protección que ayuden a fortalecer la independencia tecnológica de nuestro país.

El proyecto presente se encuentra, por lo tanto, insertado dentro de la larga tradición de desarrollo de proyectos teórico-experimentales que ha impulsado desde sus inicios el Instituto Politécnico Nacional [Ruiz et al., 2011].

1.3 OBJETIVO

Presentar los conceptos básicos de operación, las especificaciones de funcionamiento, así como el diseño e implementación práctica de un medidor de ángulo de carga de máquinas síncronas.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Actualmente la medición del ángulo de carga de las máquinas síncronas es requerida para el desarrollo de investigación en el área de la evaluación y control de problemas de estabilidad transitoria de sistemas eléctricos de potencia. Además, en la enseñanza del comportamiento en estado dinámico de la máquina síncrona, este tipo de mediciones es muy adecuado para poder comparar los resultados de simulaciones experimentales con los obtenidos en simuladores digitales.

El desarrollo de un sistema de medición del ángulo de carga de máquinas síncronas es, por lo tanto muy necesario para la utilización adecuada del Simulador Experimental de Laboratorio de la SEPI-ESIMEZ-IPN [Ruiz et al., 2011].

1.5 LIMITACIONES Y ALCANCES

Los métodos estudiados en esta tesis serán adecuados para máquinas síncronas en general, pero los resultados presentados en este trabajo se aplicarán en micromáquinas síncronas de laboratorio. La utilización de este tipo de máquinas permitirá probar diferentes opciones de medición en un ambiente seguro, tanto para los operarios del equipo como para los mismos equipos.

Adicionalmente, el no utilizar un generador real de gran capacidad evita las pérdidas económicas asociadas a detener la operación de este tipo de máquinas con el objeto de instalar y probar el sistema de medición propuesto. Después de estar debidamente probado en el sistema de laboratorio, se podría en un futuro programar la aplicación del medidor de ángulo de carga a un generador de gran capacidad.

1.6 APORTACIONES DE LA TESIS

Las aportaciones del presente trabajo pueden ser resumidas de la siguiente manera:

- Se describen de manera detallada los conceptos básicos del ángulo de carga, los cuales son aplicados en la implementación de un medidor del ángulo de carga para las máquinas síncronas el cual fue probado en estado estacionario y transitorio.

- Se propone un nuevo método de medición del ángulo de carga en el que el medidor puede funcionar de manera adecuada en máquinas de “n” pares de polos.
- Brindar un dispositivo sensible, barato y eficaz para la medición del ángulo de carga que no está disponible comercialmente y que en su desarrollo aún requiere de avances significativos para alcanzar las características necesarias para su aplicación práctica.

Además de las aportaciones teóricas y prácticas antes mencionadas, una aportación principal de esta tesis es su importante colaboración en el ajuste del nuevo sistema de control del área de las micromáquinas del simulador experimental de sistemas de potencia, el cual está siendo desarrollado por el grupo de investigación de fenómenos dinámicos en redes interconectadas y máquinas eléctricas de la SEPI-ESIME-Zacatenco, dentro de los proyectos CGPI 20040704, 20050139, 20060397, SIP 20070436, 20080956, 20090918, 20100895, 20110561 y CONACyT 83701.

El simulador es una herramienta importante en las tareas de docencia e investigación del comportamiento dinámico de sistemas eléctricos de potencia en estado estacionario y transitorio para los niveles de licenciatura y posgrado [Ruiz et al., 2011].

1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La estructura de este trabajo es la siguiente:

- **Capítulo 1: Introducción.**
En este capítulo se establece el planteamiento del problema que da fundamento a la razón de ser de este trabajo, se presentan antecedentes que se han tenido en la obtención de la medida del ángulo de carga, los trabajos que se han desarrollado durante la construcción del simulador experimental a escala, el objetivo y justificación para elaborar este trabajo, los límites a los cuales está sujeto y la estructura de la tesis.
- **Capítulo 2: El ángulo de carga de la máquina síncrona.**
En este capítulo se describe la máquina síncrona y se define al ángulo de carga, además se explica la estabilidad transitoria en los sistemas eléctricos de potencia que se refiere a la habilidad de un sistema eléctrico de potencia de volver al sincronismo (mismo estado de partida o muy cercano) frente a perturbaciones pequeñas y lentas. En este análisis adquiere una gran importancia la curva de ángulo y potencia.
- **Capítulo 3: Diseño del medidor de ángulo de carga.**
Este capítulo describe detalladamente el diseño de los circuitos para el tratamiento de las señales provenientes de las terminales de voltaje y de la

flecha del rotor, para ser usadas por el microcontrolador. Además se describe el funcionamiento del convertidor digital - analógico, el cual nos convierte los datos digitales en una señal de CD.

- **Capítulo 4: Estructura general del microprocesador y de los timers.**
En este capítulo se describe de forma breve la estructura del microcontrolador MSP430f2274 de Texas, el cual es el “cerebro” del medidor de ángulo de carga.
- **Capítulo 5: Diseño del software del medidor de ángulo de carga.**
El microcontrolador se considera el cerebro del instrumento, ya que en este dispositivo se realizan los cálculos para determinar el ángulo de carga en un tiempo muy pequeño, lo que requiere programar eficientemente al microcontrolador. En este capítulo se explica el diseño del software desarrollado para la medición de las variables, dicha explicación se basa en diagramas de flujo que muestran la lógica del código.
- **Capítulo 6: Resultados experimentales.**
En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas experimentales utilizadas con dos diferentes micromáquinas, una de polos lisos y una de polos salientes además de presentar las correspondientes graficas del ángulo de carga resultantes en estado transitorio al ser introducida y quitada la carga a las micromáquinas.
- **Capítulo 7: Conclusiones.**
En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo de tesis y sugerencias para trabajos futuros.
- **Referencias.**
En este capítulo se presentan los documentos que sirvieron como referencia a este trabajo.
- **Apéndice A.**
Se presenta el diagrama de conexión completo del medidor de ángulo de carga.
- **Apéndice B.**
Se presenta el código fuente del programa para la determinación del ángulo de carga de las máquinas síncronas (polos lisos y polos salientes).
- **Apéndice C.**
Se presentan las placas de datos de los equipos utilizados en las pruebas realizadas a las micromáquinas.
- **Apéndice D.**
Se presenta el desglose de los costos para elaborar el prototipo del medidor de ángulo de carga.

CAPÍTULO 2:

EL ÁNGULO DE CARGA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

2.1 INTRODUCCIÓN

La estabilidad de sistemas eléctricos de potencia corresponde a un área de estudios muy amplia que se relaciona directamente con disciplinas de control y máquinas eléctricas. La estabilidad analiza la capacidad de un sistema para desarrollar fuerzas restauradoras iguales o mayores a las fuerzas perturbadoras causadas por cambios de todo tipo, conocidos como disturbios.

El ángulo de carga de las máquinas síncronas es una variable tan importante del sistema, que un tipo particular de estabilidad se ha definido en base a la observación de su valor: la estabilidad angular. Este tipo de estabilidad se refiere a la habilidad de un sistema eléctrico de potencia de permanecer en una operación en sincronismo después de experimentar perturbaciones.

La operación en sincronismo de un sistema de potencia está relacionada directamente con las máquinas síncronas, generadores y motores, que están conectados en la red de transmisión de corriente alterna. Se dice que un SEP opera en sincronismo si la frecuencia eléctrica promedio de cada una de las máquinas síncronas del sistema es igual a la frecuencia del nodo de la red de corriente alterna a la cual están conectadas [IEEE, 1982].

Para medir correctamente el ángulo de carga en los estados estacionario y transitorio, es necesario conocer adecuadamente su definición y uso en la estabilidad de los sistemas de potencia. Esta tarea se realiza en el presente capítulo.

2.2 MÁQUINA SÍNCRONA

La máquina síncrona es un convertidor electromecánico de energía con una pieza giratoria denominada rotor o campo, cuya bobina se excita mediante la inyección de una corriente continua, y una pieza denominada estator o armadura por cuyas

bobinas circula corriente alterna. Las corrientes alternas que circulan por los enrollados del estator producen un campo magnético rotatorio que gira en el entrehierro de la máquina con la frecuencia angular de las corrientes de armadura.

El rotor debe girar a la misma velocidad del campo magnético rotatorio producido en el estator para que el par eléctrico medio pueda ser diferente de cero. Si las velocidades angulares del campo magnético rotatorio y del rotor de la máquina síncrona son diferentes, el par eléctrico medio es nulo. Por esta razón a esta máquina se la denomina síncrona, debido a que el rotor gira mecánicamente a la misma frecuencia del campo magnético rotatorio del estator durante la operación en régimen permanente [Uribe, 2003].

Durante la operación de la máquina síncrona en régimen permanente o estacionario, la velocidad mecánica del rotor es igual a la velocidad angular del campo magnético rotatorio producido por el estator. En estas condiciones, sobre los conductores o bobinas del campo no se induce fuerza electromotriz (fmm). Para producir la fmm en el rotor es necesario inyectar corriente en esta bobina mediante una fuente externa.

De esta forma se obtienen dos campos magnéticos rotatorios que giran a la misma velocidad, uno producido por el estator y otro por el rotor. Estos campos interactúan produciendo par eléctrico medio y se realiza el proceso de conversión electromecánica de energía [Uribe, 2003].

La figura 2.1 muestra las dos construcciones principales de la máquina síncrona dependiendo de la forma de su rotor: de polos salientes (Fig. 2.1 a)) y de polos lisos (Fig. 2.1 b)).

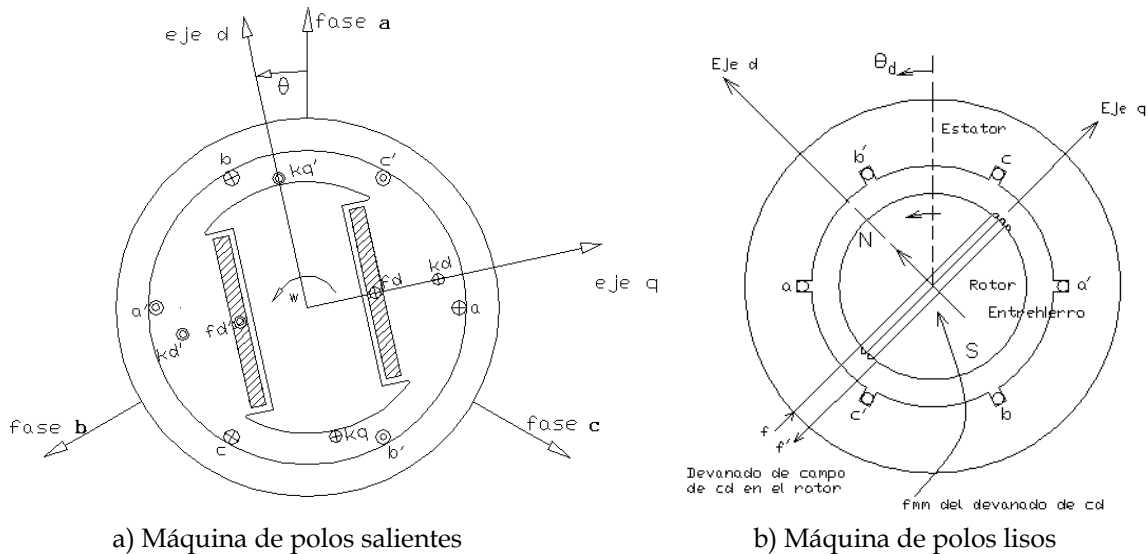


Fig. 2.1: Tipos de construcción principales de la máquina síncrona (Adaptado de [Albino, 2006].)

2.3 TEORÍA GENERALIZADA DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ¹

Antes de que surgiera la teoría generalizada, la forma usual de analizar las máquinas eléctricas consistía en tratar separadamente cada una de ellas, sin hacer referencia a las de otro tipo, utilizando métodos sencillos de análisis (generalmente gráficos como los diagramas fasoriales o las curvas de operación) para calcular su funcionamiento, sobre todo en estado estacionario.

Esta forma de abordar el problema tiene la desventaja de que se tiene que comenzar nuevamente al analizar otro tipo de máquina ó al analizarla en un régimen de funcionamiento transitorio o en desequilibrio.

La característica fundamental de la teoría generalizada, comparada con la manera anterior de analizar las máquinas eléctricas, es que el medio fundamental para la representación del comportamiento de la máquina es un modelo que está expresado por medio de ecuaciones, y que los circuitos equivalentes y diagramas de funcionamiento son meramente artificios que permiten solucionar de forma distinta algunos casos especiales.

El sistema de ecuaciones fundamentales se obtiene a partir de una máquina idealizada, que aproximadamente corresponde a la real, de acuerdo con ciertas hipótesis bien definidas. Por ejemplo, a diferencia de las máquinas de corriente continua, las ecuaciones que relacionan las corrientes y el par electromagnético para máquinas de corriente alterna tienden a complicarse y resultan de difícil solución. Se puede obtener una enorme simplificación si las corrientes de fase se expresan en función de corrientes ficticias que, aunque diferentes de las reales, producen el mismo efecto.

Estas corrientes adquieren un significado físico si se considera que circulan por devanados ficticios colocados sobre dos ejes perpendiculares denominados eje directo (d) y en cuadratura (q) (ver la Figura 2.2). De esta manera, al aplicar una transformación (la transformación de Park para la máquina síncrona en la Figura 2.2), se obtienen para máquinas de corriente alterna, de acuerdo a la teoría de los dos ejes, las ecuaciones que resultan son muy similares a las de las máquinas de corriente continua, pero más sencillas de resolver.

La teoría de los dos ejes, desarrollada por Blondel para el caso de máquinas síncronas de polos salientes en estado estacionario, fue el primer paso para el desarrollo de la teoría generalizada de máquinas. Tiempo después Park realizó una valiosa aportación al obtener las ecuaciones generales de la teoría de los dos ejes para la

¹ Esta sección fue adaptada, con permiso, de [Ruiz et al., 2011].

máquina síncrona indicando aplicaciones de estas ecuaciones en muchos problemas prácticos importantes.

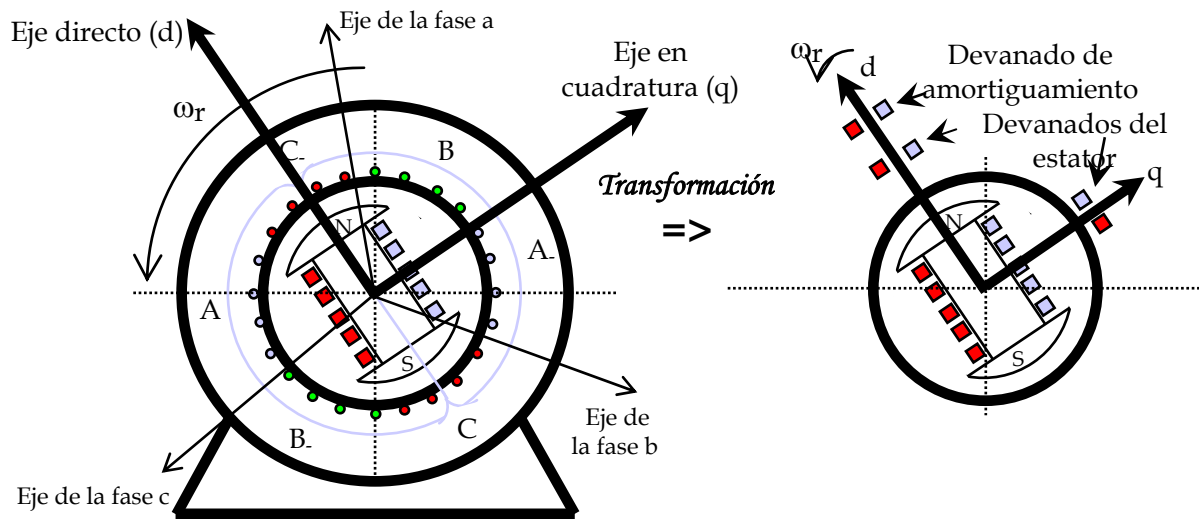


Fig. 2.2: Representación gráfica de la transformación de los devanados A, B, C del estator de una máquina síncrona en dos devanados ficticios en los ejes d y q. (Adaptado de [Karady, 2000].)

La transformación de Park fue el punto de partida para la teoría generalizada de Kron, que se publicó en algunos artículos y finalmente en un libro de investigación.

La teoría generalizada de máquinas proporciona un medio para investigar casi todos los problemas de funcionamiento de las máquinas eléctricas, aunque no sea posible resolver todos los problemas exactamente y sea necesario utilizar métodos aproximados que emplean computadoras digitales.

2.4 DEFINICIÓN DEL ÁNGULO DE CARGA

2.4.1. La ecuación de oscilación

La ecuación más importante que representa la dinámica de la máquina síncrona para transitorios electromecánicos de estabilidad angular es la ecuación de oscilación o de balance electromecánico, la cual se desarrolla en esta sección para definir el ángulo de carga del rotor.

Como se establece en la ecuación (2.1) el par aplicado al rotor es igual al producto de la aceleración angular y el momento de inercia polar:

$$T = J\alpha_m \quad (2.1)$$

O bien

$$T = J\ddot{\theta} \quad (2.2)$$

En donde

$$\ddot{\theta} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.3)$$

En este caso T es el par neto o la suma de todos los pares que actúan en la máquina.

El problema consiste en resolver la ecuación (2.2), para encontrar la posición angular del rotor θ en función del tiempo. Es más conveniente, sin embargo, medir la posición y la velocidad angular del rotor con respecto a un eje de referencia que gira a la velocidad síncrona que con respecto a un eje estacionario (Fig. 2.3).

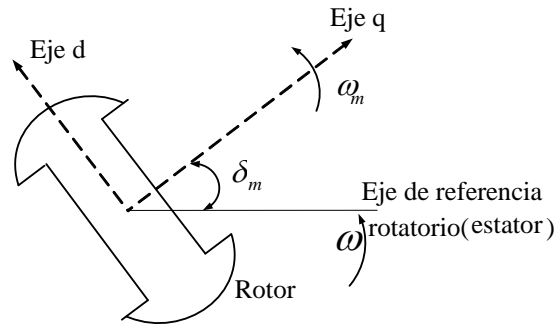


Fig. 2.3: Definición del ángulo de carga δ_m [Ruiz y Olgún, 1995].

De la Fig. 2.3 se asume que

$$\delta_m = \theta - \omega t \quad (2.4)$$

Donde ω es la velocidad síncrona. Si derivamos la ecuación (2.4) con respecto al tiempo:

$$\dot{\delta}_m = \dot{\theta} - \omega \quad (2.4.1)$$

Y también

$$\ddot{\delta}_m = \ddot{\theta} \quad (2.5)$$

Así, entonces sustituyendo la ecuación (2.5) en (2.2) se obtiene:

$$T = J\ddot{\delta}_m \quad (2.6)$$

Ahora se determina el valor de T , el par resultante aplicado al rotor de la máquina. Podemos escribir, si nos referimos al sistema turbina-generator de la Fig. 2.4:

$$T = T_m - T_e - T_d \quad (2.7)$$

T_m = Par mecánico de la turbina en Nm.

T_e = Par electromagnético en Nm.

T_d = Coeficiente de amortiguamiento del par en Nm/s.

ω_m = Velocidad de la flecha del rotor en radianes mecánicos sobre segundo.

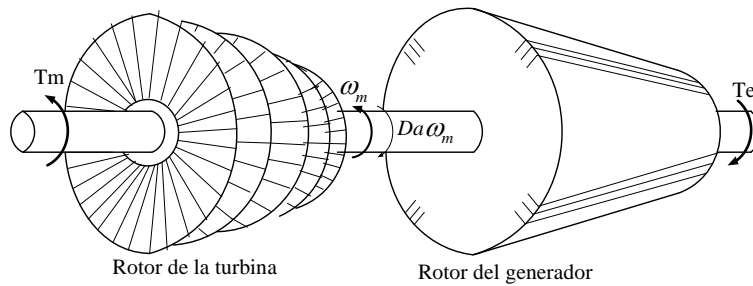


Fig. 2.4: Sistema Turbina-Generador [Urbina et al., 2010]

Sustituyendo la ecuación (2.7) en la (2.6) obtenemos:

$$J\ddot{\delta}_m = T_m - T_e - T_d \quad (2.8)$$

La turbina produce el par (T_m) en la dirección de la rotación. Como se muestra en la Fig. 2.6, a este par se opone, además del par de amortiguamiento antes mencionado, el par electromagnético (T_e), que es creado físicamente por la interacción de los campos magnéticos del rotor y del estator. Ambos pares (T_m y T_e) se consideran positivos cuando la máquina síncrona funciona como generador. Cuando esta máquina funciona como motor, los dos pares se consideran negativos [Urbina et. al, 2010]

Cuando el par total es positivo (ecuación (2.7)) produce la aceleración del rotor, por lo que es llamado también el par de aceleración. Si se desprecia al par de amortiguamiento T_d de la ecuación (2.8) se tiene que:

$$J\dot{\omega}_m = T_m - T_e \quad (2.9)$$

Al despreciar el término T_d , el par de aceleración es la diferencia entre el par mecánico y el par electromagnético:

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.10)$$

En estado estacionario esta diferencia es cero, y por lo tanto no hay aceleración. Durante los disturbios del tipo considerado en estudios de estabilidad transitoria, sin embargo, la diferencia existe, y hay una aceleración o una desaceleración, dependiendo si el par T_a es positivo o negativo, respectivamente.

2.4.2 El ángulo de carga eléctrico

Hasta ahora hemos considerado solamente máquinas de 2 polos, aunque en realidad, las máquinas eléctricas pueden tener casi cualquier número de polos; 2, 4, 6, ... , hasta más de 100 en el caso de generadores hidráulicos. En cuanto a las variables eléctricas, el análisis para una máquina de 2 polos y para una de p polos se realiza utilizando las mismas ecuaciones, pero para el análisis de una máquina de p polos se necesita modificar la ecuación de oscilación y tener en cuenta que, físicamente, la velocidad real del rotor de esta máquina es un múltiplo de la velocidad calculada utilizando un equivalente de 2 polos (Figura 2.5) [Urbina et al., 2010].

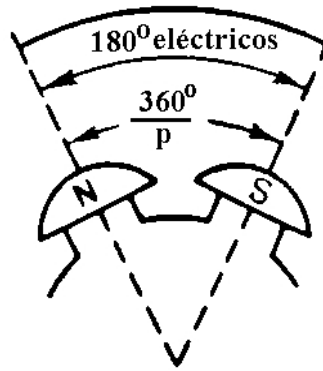


Fig. 2.5: Relación entre los grados eléctricos y los grados mecánicos en una máquina de p polos (Adaptado de [Ruiz y Olguín, 1995a]).

El ángulo δ_m de la ecuación (2.8) es un ángulo mecánico. Cuando se analiza un turbogenerador de dos polos, tenemos que $\delta_m = \delta$, donde δ es el ángulo eléctrico del rotor. Cuando se analizan máquinas que tienen más de dos polos, el ángulo δ eléctrico y el ángulo δ_m mecánico están relacionados de la siguiente manera:

$$\frac{\delta}{\delta_m} = \frac{180}{(360/P)} \quad (2.11)$$

O bien

$$\delta = \frac{P}{2} * \delta_m \quad (2.12)$$

Donde P es el número de polos. Derivando esta expresión, se encuentra la relación entre la velocidad angular mecánica w_m y la eléctrica ω :

$$\omega = \frac{P}{2} * \omega_m \quad (2.13)$$

Despejando w_m de (2.12) y sustituyendo su valor en (2.8):

$$\frac{2}{P} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad [\text{Nm}] \quad (2.14)$$

Se obtiene la ecuación de oscilación en términos de las potencias eléctricas y mecánica multiplicando la ecuación anterior por w_m [Sauer, 1992]:

$$\left(\frac{2}{P}\right)^2 J \omega \frac{d\omega}{dt} = \frac{2}{P} \omega T_m - \frac{2}{P} \omega T_e \quad [\text{W}] \quad (2.15)$$

Para el análisis del comportamiento dinámico del sistema de potencia es necesario expresar todas las ecuaciones diferenciales de los modelos de los componentes del sistema como un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden. La ecuación de oscilación, que es de segundo orden, se expresa como un sistema de dos ecuaciones de primer orden para cada máquina síncrona. El sistema de ecuaciones en función del ángulo de carga en grados eléctricos, la velocidad en radianes eléctricos por segundo y el par en p.u. (con el tiempo en segundos) es [Urbina et al., 2010]:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (2.16)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} \left(\hat{T}_m - \hat{T}_e - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) \right) \quad (2.17)$$

2.4.3 Determinación teórica del valor del ángulo de carga

Para determinar el valor del ángulo de carga es necesario utilizar el diagrama fasorial de la máquina síncrona, el cual se muestra en la figura 2.6.

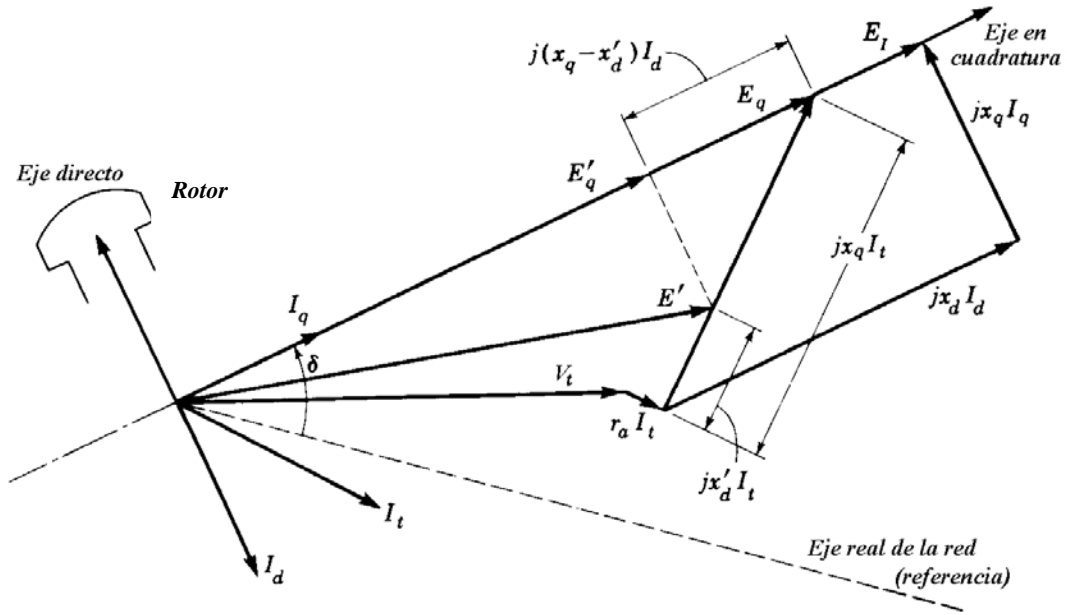


Fig. 2.6: Diagrama fasorial de una máquina síncrona de polos salientes [Ruiz y Olguín, 1995].

De la figura 2.6 podemos deducir que el voltaje interno E_q detrás de la reactancia síncrona en el eje en cuadratura x_q es:

$$E_q \angle \delta = V_t \angle 0 + r_a I_t \angle \theta + jx_q I_t \angle \theta \quad (2.18)$$

De donde:

- E_q : Voltaje interno.
- δ : Ángulo de carga eléctrico del rotor
- V_t : Voltaje en las terminales de la máquina síncrona.
- I_t : Corriente de línea.
- θ : Ángulo entre la corriente y el voltaje en las terminales de la máquina.
- x_q : Reactancia de cuadratura.
- r_a : Resistencia de armadura de la máquina síncrona.

La ecuación (2.18) cambia debido a que la resistencia de armadura de la máquina síncrona r_a es muy pequeña y para los cálculos del ángulo de carga es despreciable:

$$E_q \angle \delta = V_t \angle 0 + jx_q I_t \angle \theta \quad (2.19)$$

La reactancia síncrona en el eje de cuadratura x_q se puede estimar a partir de la reactancia síncrona en el eje directo x_d . Para la máquina de polos salientes $x_q = 0.6 x_d$, mientras que para la máquina de polos lisos $x_q = x_d$ [Roepfer, 1985, Juárez et al., 2009]. Esto es debido a las diferencias en el entrehierro que presentan los dos tipos de rotores de la máquina síncrona (ver la figura 2.1). El ángulo de carga es el ángulo del voltaje E_q resultante de la ecuación (2.19).

CAPÍTULO 3:

ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL MEDIDOR DEL ÁNGULO DE CARGA

3.1 INTRODUCCIÓN

Para este proyecto en el que se desarrolla el medidor de ángulo de carga, las señales que van a ser introducidas al microcontrolador necesitan un proceso de adecuación, para ser atenuadas y filtradas, ya que éste solo permite señales de entrada con voltajes menores a los 3.3 V.

Como se describe más adelante en este capítulo, se miden dos tipos de señales, una senoidal de CA del transductor de la señal de voltaje en terminales y otra digital que proviene de un sensor de la posición del rotor de la máquina, la cual se ve representada en una forma de pulsos. Para poder compararlas, la señal senoidal se debe transformar a una señal de pulsos de un nivel de voltaje similar al de la señal digital.

3.2 ESPECIFICACIONES GENERALES DEL MEDIDOR

La estructura del medidor que se muestra en la Figura 3.1, tiene tres etapas principales, con las cuales se resume la estructura de este instrumento. Como primera parte se tiene la etapa de acondicionamiento de la señal que proviene del rotor, la cual es sensada a través del opto acoplador (Etapa 1a). Esta etapa es también la encargada de reducir el voltaje pico-pico de la señal que existe en las terminales de voltaje del generador síncrono y que después se transformará a una señal cuadrada (Etapa 1b).

La segunda etapa es la más importante ya que consta del microcontrolador, el cual se encarga de hacer todas las operaciones de medición y de ejecutar las acciones requeridas para el buen funcionamiento del medidor, además del envío del valor en tiempo real del ángulo de carga a través de un bus de datos al convertidor D/A.

Finalmente la tercera etapa consta de un convertidor Digital/Analógico el cual transforma el valor del ángulo de carga a un nivel de voltaje en CD para poder ser graficado por el osciloscopio.

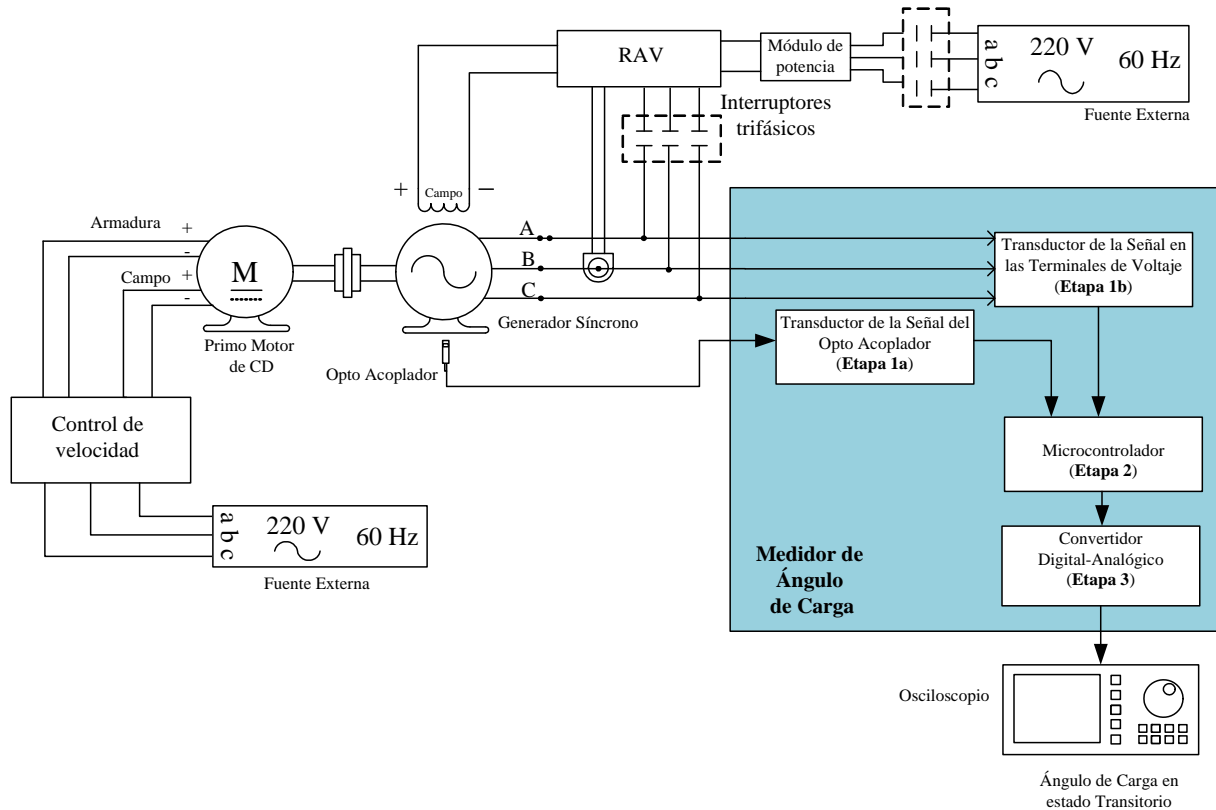


Fig. 3.1: Diagrama general del medidor de ángulo de carga mostrando su conexión con la máquina síncrona.

El principio de funcionamiento se muestra en la figura (3.2), y se basa en la detección de flancos provenientes de los transductores tanto de las terminales de voltaje del estator como del optoacoplador, ya que en el desfase entre ambas señales se encuentra el ángulo de carga. El microcontrolador al detectar estos cambios a través de los módulos del contador del timer, almacena estos datos en forma de pulsos a través de los registros, para posteriormente realizar los cálculos necesarios para obtener la medición del ángulo de carga.

Para la obtención del ángulo de carga se comienza con el cálculo del número de pulsos en vacío, el cual es necesario para hacer un pre-calibramiento del dispositivo. Al mismo tiempo el microcontrolador mide en pulsos el periodo de la señal proveniente de las terminales de voltaje (533 pulsos como se describe en § 5.2.4), ya que con este parámetro se procederá a escalar el valor de ángulo obtenido.

Para estas mediciones se ocupa un reloj constante de 32 kHz, el cual proporciona una mayor estabilidad en el sistema. El procesamiento realizado por el microcontrolador para la medición del ángulo de carga se describe con mayor detalle en el capítulo 5.

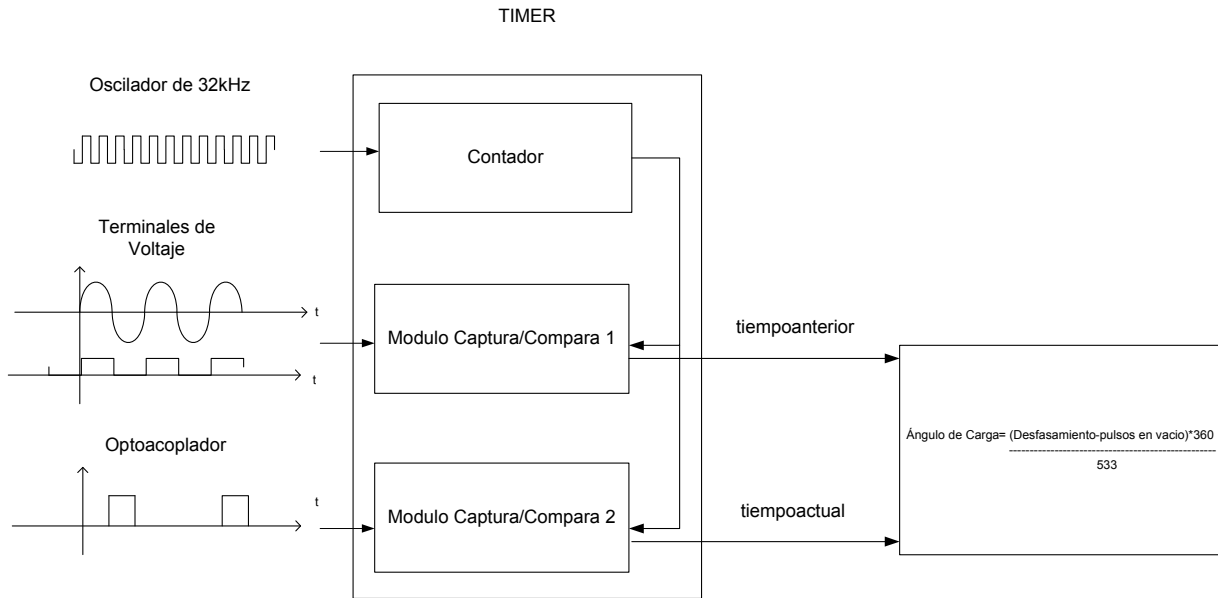


Fig. 3.2: Principio de funcionamiento del medidor de ángulo de carga.

3.2.1 Transductor de la Señal de Posición del Rotor

En la figura 3.3 se muestra el diagrama a bloques del transductor de la posición del rotor, el cual está formado por un codificador óptico para detectar la posición relativa del rotor de la máquina, junto con un acondicionador de nivel TTL.

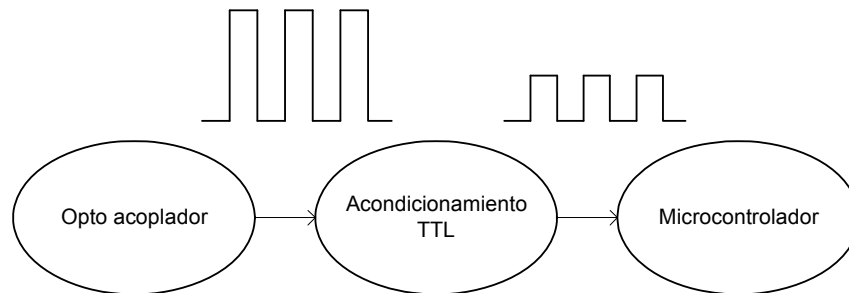


Fig. 3.3: Diagrama a bloques del transductor de la señal de posición del rotor.

Para este transductor se monta un disco directamente sobre el rotor y un sensor óptico montado en la flecha, el cual produce un pulso por cada revolución dada por la máquina síncrona. Estos pulsos son enviados por diferentes canales del sensor óptico para ser tratados en el microcontrolador.

3.2.1.1 Opto acoplador

Para obtener el número de revoluciones exactas a las que se encuentra girando la flecha de la máquina utilizamos el circuito opto acoplador QRD1114, el cual es un sensor óptico infrarrojo reflectivo de corto alcance. El empaquetado de este opto acoplador de $6.10 \times 4.39 \times 4.65$ mm contiene cuatro pines de conexión. Dos de ellos corresponden al ánodo y cátodo del emisor (diodo emisor infrarrojo), y los otros dos corresponden al colector y el emisor del receptor (fototransistor), el cual posee un filtro de luz de día para eliminar cualquier tipo de luz y evitar que esto se interprete como un cambio.

Este dispositivo sirve para detectar transiciones de Blanco - Negro que existan en el encoder montado en la flecha de la máquina. La salida va a ser cercana a 0 V cuando hay un objeto reflectivo delante del sensor (color blanco), esto provoca que no se genere un voltaje en la base del transistor y por lo tanto en las terminales del colector y emisor no conducen lo cual provoca un estado bajo 0 (0 V).

En ausencia de un objeto reflectivo delante del sensor (color negro) la salida va a ser cercana a 5V (asumiendo que la tensión de alimentación es 5V) debido a que en el diodo emisor de luz se produce un voltaje en la base de el transistor, el cual provoca que las terminales de colector y emisor entren en conducción permitiendo obtener un estado en alto 1 (5V).

Este sensor es el remplazo directo del CNY70 pero tiene un mejor desempeño, permitiendo hacer mediciones a mayor distancia. Este sensor se usa para detección de objetos, de colores, en aplicaciones robótica posición e identificación de objeto y rastreadores de línea.

En la figura 3.4 se muestra el diagrama de conexión usado cuya configuración básica es ocupada para alimentar al diodo emisor y alimentar al fototransistor cuando exista el nivel lógico 1 y producir 5v en la salida.

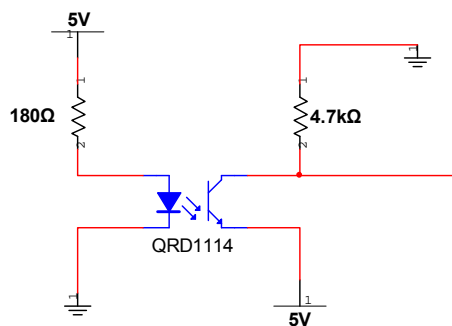


Fig. 3.4: Diagrama de conexión del opto acoplador QRD1114.

3.2.1.2 Acondicionamiento TTL de las señales del optoacoplador

La etapa de acondicionamiento TTL se encarga de adaptar los niveles de las señales provenientes del opto acoplador (señal digital) para que sean usadas en el microcontrolador en un nivel estándar TTL.

Dicho acondicionamiento se logra con el circuito 74LS132 el cual posee cuatro compuertas tipo NAND; La compuerta lógica NAND, funciona igual que la compuerta AND pero el resultado en la salida es opuesto, (ver tabla 3.1) la ecuación que representa su comportamiento es la siguiente:

$$S = \overline{AB} = \bar{A} + \bar{B}$$

Tabla 3.1 Tabla de verdad de la compuerta NAND

Entrada A	Entrada B	Salida
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

De la ecuación anterior y de la tabla de la verdad se observa que la salida solo puede tener un nivel lógico 0 cuando las entradas son de nivel lógico 1.

Cabe mencionar que cada compuerta es independiente en el encapsulado y cada una posee además un disparador tipo Schmitt. Esta característica es la más importante debido a que permite tener un integrado biestable (dos estados), con una entrada y una salida, el nivel en la salida cambia rápidamente cuando el nivel de la señal de entrada excede un valor predeterminado.

El diagrama de conexión básico para acondicionamiento TTL y minimizar el ruido que se pueda filtrar en la señal de entrada se muestra en la figura 3.5.

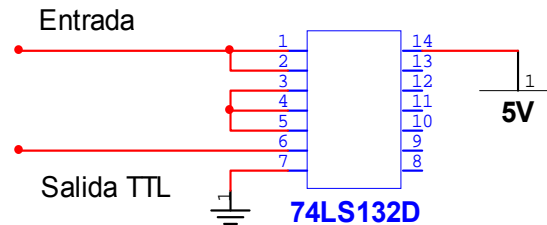


Fig. 3.5: Diagrama de conexión del 74LS132.

3.2.2 Transductor de las señales de voltaje en las terminales de la máquina

La figura 3.6 muestra el diagrama a bloques del transductor de las señales de voltaje en las terminales. Esta etapa del medidor corresponde a un circuito que recibe la señal de forma analógica que proviene de las terminales de la máquina y que la convierte en una señal digital de referencia para ser comparada con la señal del sensor óptico en el microcontrolador.

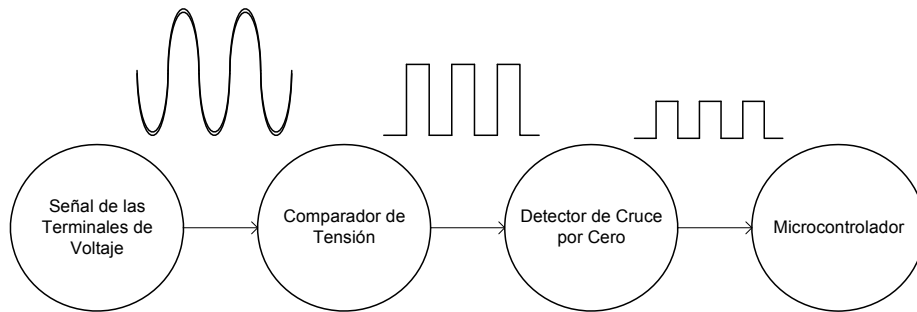


Fig. 3.6: Diagrama a bloques del acondicionamiento de las señales en las terminales de voltaje.

3.2.2.3 Comparador de Tensión

Un detector de cruce por cero se utiliza para convertir la onda analógica en una señal de digital, y la salida debe ser un nivel lógico bajo si la entrada es negativa y tomar un nivel lógico alto si la entrada si es positiva.

Los comparadores de tensión son un detector de cruce por cero que tienen como misión comparar una tensión variable con otra, normalmente constante, denominada tensión de referencia, dándonos a la salida una tensión positiva o negativa. Están basados en un amplificador operacional sin lazo de retroalimentación al que se le alimenta simétricamente, con lo cual se satura y da como resultado una señal digital con valores de la alimentación simétrica, es decir si la alimentación es +12 V y -12 V, en la salida del comparador de nivel de tensión vamos a obtener un nivel de saturación de +12 V y -12 V.

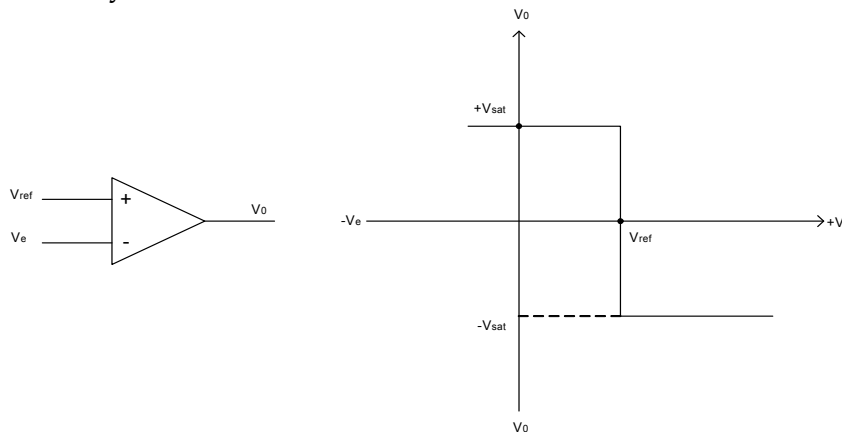


Fig. 3.7: Comportamiento del comparador de tensión.

El comportamiento del comparador de tensión no inversor se muestra en la figura (3.7), de la cual se puede deducir que:

- $V_e < V_{ref} \Rightarrow V_0 = +V_{sat}$
- $V_e > V_{ref} \Rightarrow V_0 = -V_{sat}$

Desafortunadamente, el voltaje de salida de los amplificadores operacionales de uso común no cambia con mucha velocidad, y un comparador debe ser de respuesta rápida.

Pero una ventaja de los comparadores de tensión radica en que el valor de V_H nos indica que tanto ruido pico-pico puede soportar el circuito, aunque eso no los hace vulnerables al ruido, por tanto se ha tenido que montar a su salida un detector de cruce por cero con el integrado LM311 el cual es un detector de precisión y que elimina el ruido que pudiera provocarse en el comparador de tensión.

En la generación del instrumento para la medición de ángulo de carga se ha elegido el comparador de tensión para generar una señal digital bipolar con niveles de tensión de + 12 V y -12 V, con el mínimo posible de ruido como se muestra en la figura 3.8. El diagrama de conexión propuesto para dicha función es mostrado en la figura 3.9.

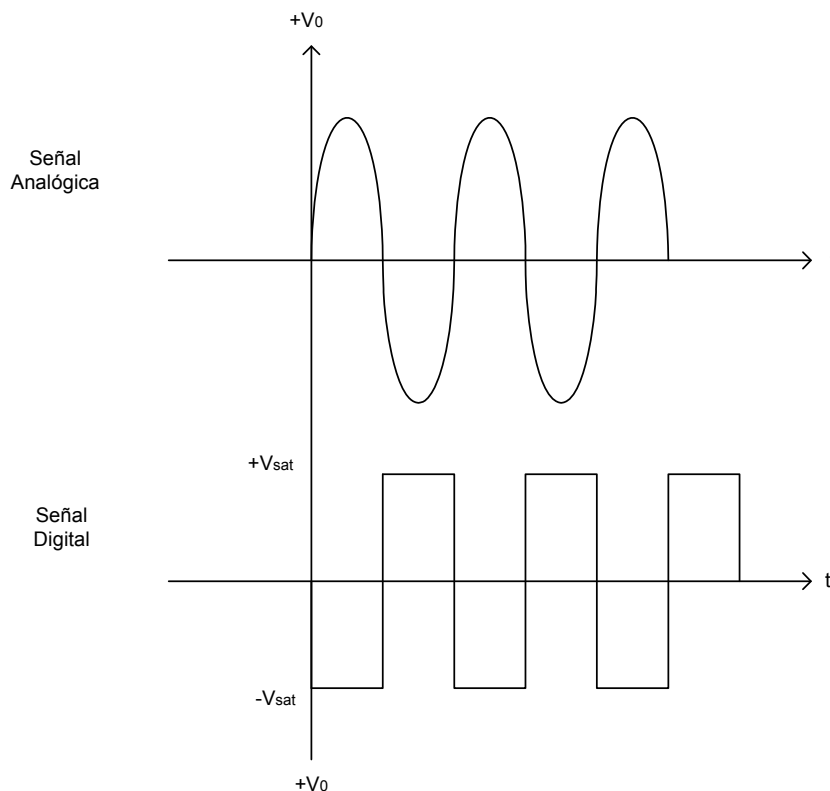


Fig. 3.8: Señal digital generada por el comparador de tensión.

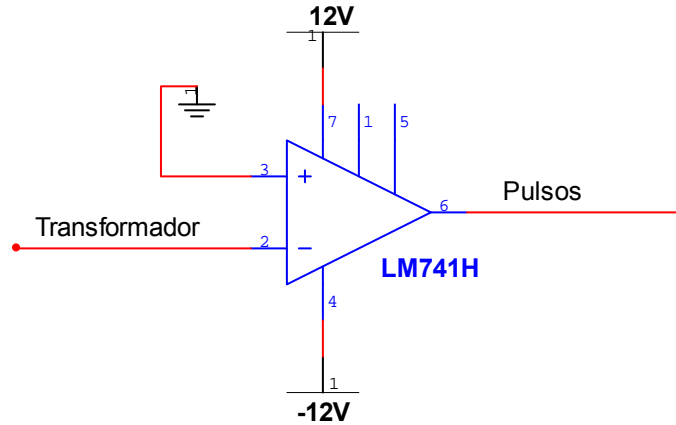


Fig. 3.9: Diagrama conexión del comparador de tensión.

3.2.2.3 Detector de cruce por cero

Una vez que se ha introducido la señal proveniente de las terminales de voltaje al comparador de tensión, se ha obtenido una señal digital de + 12 V y -12 V, susceptible a ruido de los demás componentes del medidor de ángulo de carga, pero aún falta pasar dicha señal digital por otro detector de cruce de cero que nos permita adecuar la señal a un nivel estándar TTL, mejorando la calidad de la señal y la velocidad de procesamiento.

El detector de cruce por cero LM311 forma parte de una familia de comparadores de voltaje que están diseñados para operar hasta los 5 V utilizados en circuitos lógicos, cuyas salidas son compatibles con RTL, DTL, TTL y la mayoría de los circuitos lógicos de tecnología MOS.

Tanto la salida como la entrada de estos comparadores puede ser aislada de la tierra del sistema al que se esté aplicando, y la salida puede manejar cargas referidas a tierra o fuente (tanto positiva como negativa). Incorporan el balance de offset y el pin strobe off, admiten conexión directa de salidas de varios integrados del tipo OR y tienen una mayor velocidad de respuesta con el cambio en sus entradas, es decir, es un integrado diseñado y optimizado para rendimiento superior en las aplicaciones de detector de nivel de voltaje.

En la Figura 3.10 se muestra el diagrama de conexión del detector de cruce por cero.

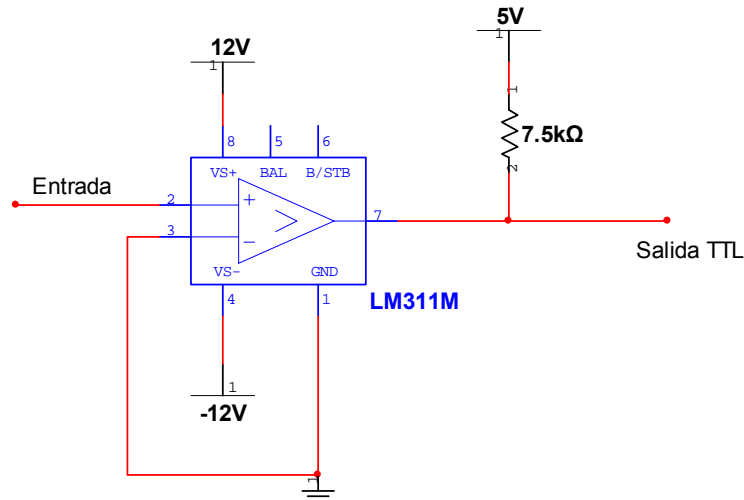


Fig. 3.10: Diagrama de conexión del Detector de Cruce por Cero.

Se puede observar que se comporta como un interruptor conectado entre la terminal de salida (7) y la terminal (1). La terminal de salida se conecta a través de una resistencia a un voltaje igual a 5 V, la terminal (1) igual que la entrada (-) se conecta a tierra (0V).

Cuando la terminal de entrada (+) es más positiva que la entrada (-) el interruptor de salida equivalente del LM311 está abierto. V_o tendrá un valor cercano a + 5V.

Cuando la entrada (+) es menos positiva que la entrada (-), el interruptor de salida equivalente del LM311 se cierra y se extiende la tierra en la terminal (1) a la salida V_o .

V_o estará a 5V para los medios ciclos positivos del voltaje de entrada E_i y V_o estará a 0 V para los medios ciclos negativos de E_i . Los voltajes de entrada E_i pueden variar entre niveles de +12V y -12V pero V_o está restringido a únicamente los niveles de + 5 V y 0 V.

3.2.3 Convertidor Digital-Analógico

La etapa final de este instrumento para la medición del ángulo de carga, (ver figura 3.11) debe graficar los datos proporcionados por el microcontrolador después que ha procesado la información recolectada. Ésta necesita ser convertida de datos digitales a magnitudes analógicas, las cuales nos permitan realizar los análisis transitorios correspondientes a las perturbaciones.

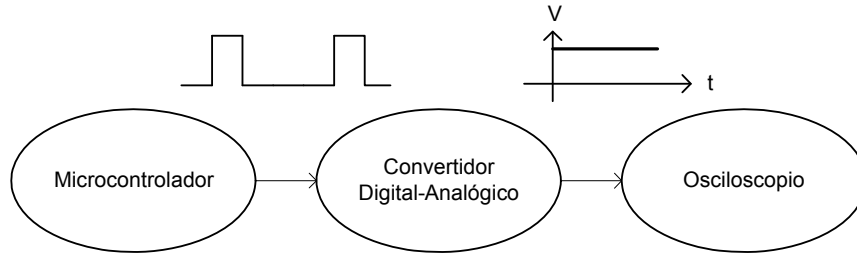


Fig. 3.11: Etapa final del medidor de ángulo de carga.

Para realizar esta tarea se seleccionó un convertidor digital-analógico de 8 bits el cual proporciona un rango bipolar de voltajes a la salida (de -5 V a 5 V), los cuales pueden ser ajustados de manera personalizada hasta poder tener si se desea un rango de (-10V a 10V). Gracias a la configuración seleccionada se obtiene una mínima cantidad de ruido en la señal y una gran capacidad de respuesta a los cambios en el orden de nano segundos.

Dichas características son sumamente importantes ya que de éstas depende directamente el nivel de sensibilidad del medidor. El diagrama de conexión se muestra a continuación en la Figura 3.12.

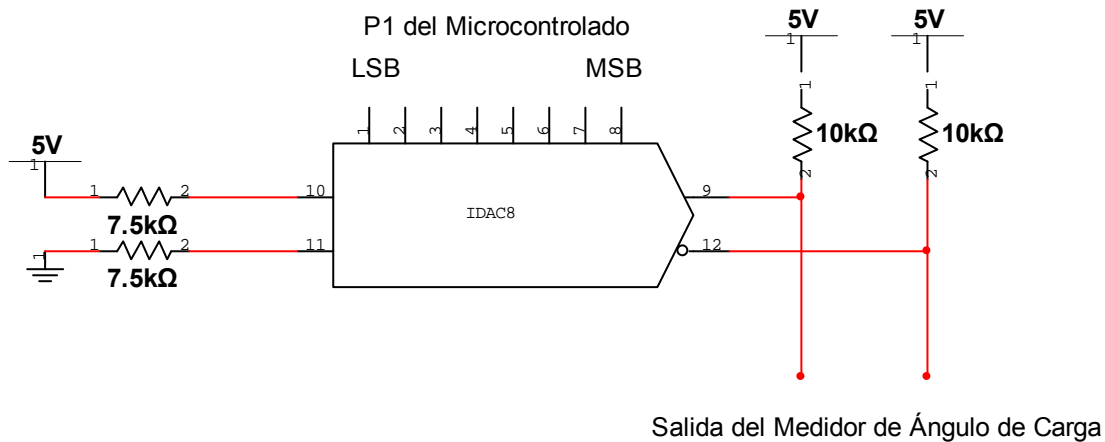


Fig. 3.12: Diagrama de conexión de la DAC0800.

En el apéndice A se muestra el diagrama completo de conexiones del instrumento para la medición del ángulo de carga.

3.3 RESULTADOS DE LA ADECUACIÓN DE SEÑALES

En esta sección se muestran los resultados de las mediciones de las señales de los transductores del rotor y de las terminales del generador aplicados en la

micromáquina síncrona de polos salientes que se describe en el capítulo 6. Las señales se comparan para obtener su desfase, el cual es proporcional al ángulo de carga, como se muestra en la figura 3.13.

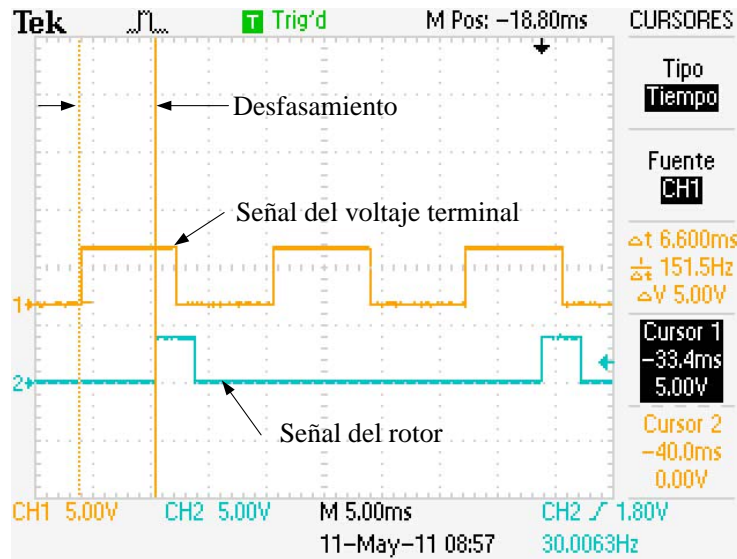


Fig. 3.13 Comparación de las señales del rotor y de las terminales del generador después de la etapa de adecuación de la señal.

CAPÍTULO 4:

MICROCONTROLADOR

4.1 INTRODUCCIÓN

Al diseñar sistemas que se basan en un microcontrolador, regularmente es indispensable conectar diversos componentes. Por esta razón es necesario tener conocimientos de las técnicas, protocolos y estándares utilizados por los distintos fabricantes. Es sumamente importante que el diseñador tenga conocimiento de las últimas técnicas de trabajo con microcontroladores, interfaces para señales analógicas y ahorro de energía en sistemas portátiles con el fin de maximizar el desempeño del dispositivo.

Un buen representante de los microcontroladores modernos es la familia de MSP430 de Texas Instruments. Estos microcontroladores de 16 bits son dispositivos que poseen la característica de bajo consumo de energía, dependiendo del modo que el diseñador elija. Además cuenta con conversores análogo a digital y comparadores para señales analógicas. El trabajo con este microcontrolador nos permite utilizar un emulador en línea con una interfaz JTAG, el cual permite descargar código a su memoria Flash, leer y escribir el estado de la memoria RAM y sus registros así como ejecutar el código paso a paso desde una interfaz gráfica.

4.2 MICROCONTROLADORES TEXAS MSP430

Este es un microcontrolador que posee un conjunto reducido de instrucciones (RISC) de 16 bits especialmente diseñadas para proporcionar mayor eficiencia en aplicaciones que requieran un bajo consumo de energía. Permite mezclar señales analógicas y digitales en un solo circuito, lo cual simplifica el diseño del hardware y reduce el costo, debido a que no es necesario agregar conversores análogo a digital por separado. Por el hecho de trabajar con palabras de 16 bits es especialmente indicado para ser programado en lenguajes de alto nivel, por ejemplo C o C++ para sistemas embebidos, generando un código compacto y de rápida ejecución.

Estos dispositivos poseen una arquitectura Von-Neumann, en la cual la memoria RAM y ROM comparten un solo mapa de memoria de hasta 64 kB. Además posee un sistema de reloj flexible el cual posee 3 osciladores independientes, diseñados con el propósito de ahorrar energía. Estos microcontroladores incorporan una serie de periféricos, tales como: temporizadores, canales de conversores análogo a digital, puertos seriales, un módulo de multiplicación por hardware, un comparador de niveles analógicos, un módulo el cual controla la memoria Flash y permite que el dispositivo se re programe a sí mismo, o guarde información en un espacio de memoria no volátil (Ver figura 4.1 que se muestra a continuación) [Davies, 2008].

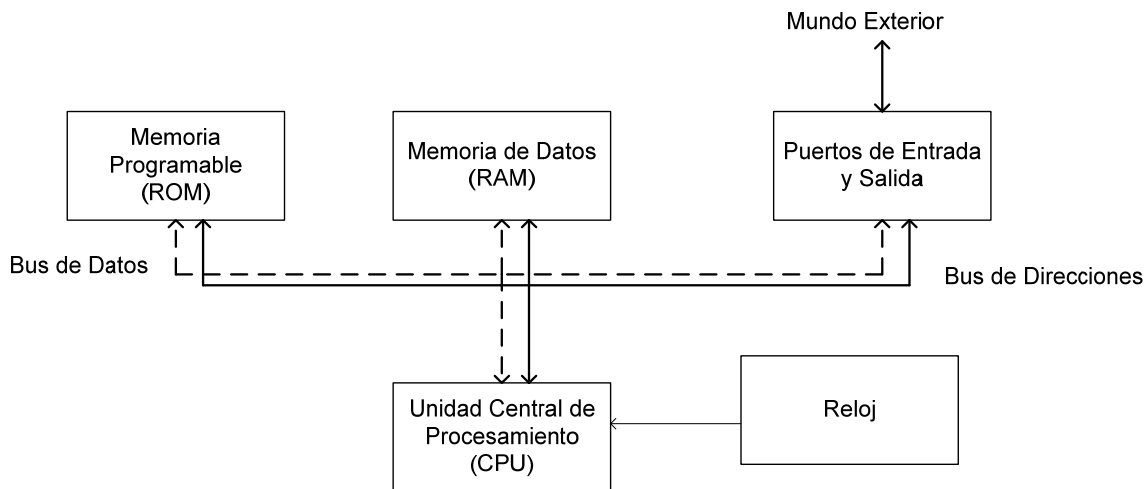


Fig. 4.1: Componentes esenciales de un microcontrolador [Davies, 2008].

A continuación se detallan los aspectos más importantes del microcontrolador MSP430F2274, ya que con él se realiza el medidor del presente trabajo.

4.2.1 Memorias

El microcontrolador MSP430 cuenta con un direccionamiento de memoria de 16 bits por lo que está limitado a 64 KB de memoria total. El mapa de memoria (resumido en la Tabla 4.1) se divide en:

- RAM: Registros de funciones especiales, acceso a periféricos y memoria de uso general.
- ROM: Memoria del cargador de software.
- FLASH: Memoria no volátil de información del usuario, memoria de código y el vector de interrupciones.

La grabación en la memoria Flash se puede hacer por bits, bytes o palabras. La diferencia entre el sector de código y el sector de memoria de información es que el primero se puede borrar en bloques de 512 bytes, en tanto el segundo se puede borrar

en bloques de 128 bytes, lo que lo hace más indicado para almacenar información de usuario, pero ello no impide que se pueda utilizar la sección de código no utilizada para almacenar información (Ver tabla 4.1 que se muestra a continuación).

Tabla 4.1 Mapa general de memoria para los MSP430[Texas Instrument, 2009].

Tipo de memoria	Uso	Tamaño	Dirección
Flash	Vector de interrupciones	60KB	FFE0-FFFF
	Memoria de información	256 Bytes	1100-FFFF
ROM	Cargador de software	1KB	1000-10FF
RAM	RAM de uso general	2KB	0200-09FF
	Periféricos y registros especiales		0100-01FF

El cargador de software es un programa precargado en el microcontrolador que permite descargar código a la memoria FLASH o RAM mediante una conexión USB. Para utilizarlo se indica a la CPU que se reinicie y comience la ejecución en la dirección de memoria correspondiente al cargador de software (Bootstrap Loader), esto se consigue aplicando una secuencia especial en los pines RESET y TEST.

4.2.2 CPU

El microcontrolador MSP430F2274 posee un poderoso CPU de 16 bits el cual se encarga de ejecutar las instrucciones localizadas en memoria, una unidad aritmética lógica (ALU), que realiza el procesamiento de las instrucciones. Además cuenta con 16 registros de 16 bits cada uno los cuales reducen el tiempo de ejecución.

Como se muestra en la Tabla 4.2, el CPU usualmente utiliza 4 de los registros, desde R0 hasta R3 para el contador del programa, el puntero de pila, el estado del registro y un generador constante respectivamente y el resto son usados para propósito general. [Davies, 2008]

Tabla 4.2 Registros generales en el CPU de la familia MSP430 [Davies, 2008].

Registro	Función	Tamaño
R0/PC	Contador de programa	16 bits
R1/SP	Puntero de pila	16 bits
R2/SR/CG1	Registro de estado	16 bits
R3/CG2	Generador constante	16 bits
R4	Propósito general	16 bits
...	16 bits
R15	Propósito general	16 bits

Las instrucciones generalmente consumen un ciclo de reloj por palabra adquirida o almacenada, por lo que la duración de las instrucciones va desde 1 ciclo para instrucciones de registro a registro a 6 ciclos para una instrucción con los dos operandos indexados.

Las instrucciones generalmente consumen un ciclo de reloj por palabra adquirida o almacenada, por lo que la duración de las instrucciones va desde 1 ciclo para instrucciones de registro a registro a 6 ciclos para una instrucción con los dos operandos indexados.

4.2.3 Puertos de Entrada y Salida

El microcontrolador MSP430F2274 posee 4 puertos de 8 bits de entrada y salida, cada bit del puerto se puede manejar de forma independiente. El control y acceso a los puertos se realiza por medio de 4 registros, cada uno de los puertos, pueden almacenar los datos de entrada (PnIN), de salida (PnOUT), la dirección de entrada o salida (PnDIR) y la función como puerto de entrada y salida o como el periférico correspondiente (PnSEL). Cuando un bit se ocupa para controlar un periférico no se configura automáticamente como de entrada o salida, sino que es trabajo del programador seleccionar el sentido correcto. [Davies, 2008]. Ver figura 4.2 que se muestra a continuación.

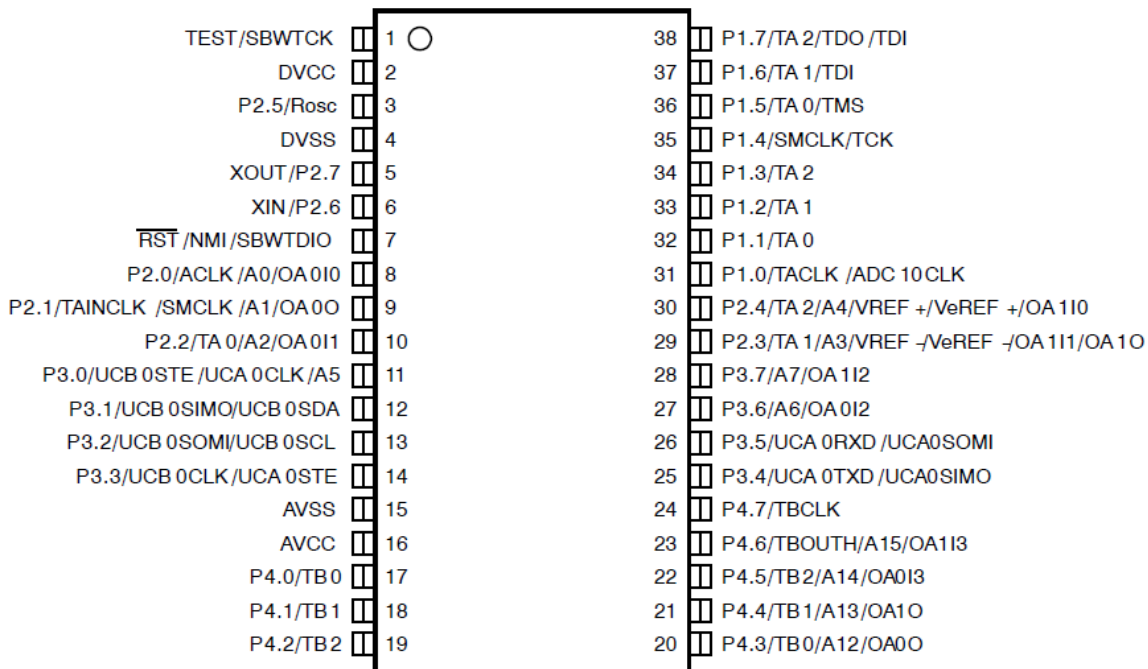


Fig. 4.2: Puertos del microcontrolador MSP430F2274.

Los dos puertos tienen la capacidad para generar interrupciones en cada uno de sus 8 bits. El registro de habilitación de interrupciones (PnIE) define que pin del puerto genera interrupciones, el registro de selección de flanco (PnIES) selecciona la transición que generará interrupciones (Flanco de bajada o de subida), y el registro que contiene las banderas de interrupción (PnIFG) el cual indica qué pin generó la interrupción. Cada puerto lleva a un solo vector de interrupciones por lo que la rutina

de atención de interrupciones debe verificar el estado del registro PnIFG para saber qué patilla del microcontrolador generó la interrupción.

La entrada y salida digital se lleva a cabo a través de conjuntos de pines en el paquete del circuito integrado llamado puertos. Cada puerto tiene un máximo de 8 pines. Estos pines típicamente pueden ser configurados para ser entradas o salidas, sin embargo algunos pueden generar interrupciones cuando el voltaje en los pines presente un cambio, esto puede ser utilizado para despertar el sistema el cual pudiera haber entrado en alguno de los estados de bajo consumo [Texas Instruments, 2009].

4.2.4 Generador de Reloj

La señal de reloj es básicamente una señal cuadrada, cuyos flancos de disparo sincronizan los distintos componentes dentro del microcontrolador. Sin embargo existe un conflicto entre la demanda de alto rendimiento y bajo consumo, esto significa que los microcontroladores más modernos tienen relojes mucho más complicados.

En muchas aplicaciones la CPU pasa la mayor parte de su tiempo en modo de bajo consumo hasta que algún evento se produce, y es entonces cuando se debe despertar y controlar el evento rápidamente.

A menudo se necesitan dos relojes con diferentes especificaciones:

- Un reloj rápido para conducir la CPU, que puede ser iniciado y detenido rápidamente para conservar energía, y que por lo general no tiene que ser preciso.
- Un reloj lento que se ejecute de manera continua para monitorear en tiempo real, y que utilice poca energía y si es posible que sea preciso. Los más comunes son:
 - Con cristales o resonadores cerámicos de baja frecuencia o de alta frecuencia. El modo se selecciona por software.
 - Un oscilador interno de características RC controlado digitalmente mediante registros de control (DCOCLK).

Sin embargo esta familia de microcontroladores posee tres relojes internos, los cuales pueden ser derivados de un máximo de cuatro fuentes. Estos relojes internos, son los mismos en todos los dispositivos [Texas Instruments, 2010].

A continuación se explica brevemente cada uno de ellos:

- Reloj maestro (MCLK): Que alimenta la CPU y el sistema y se puede generar a partir de la señal de baja frecuencia, la de alta frecuencia o el oscilador digital; que pueden dividirse por un factor de 1, 2, 4 u 8.
- Reloj de sub sistema (SMCLK): Que alimenta a los periféricos seleccionados por software. Se puede generar a partir de la señal de baja frecuencia, la de alta frecuencia o el oscilador digital; que pueden dividirse por un factor de 1, 2, 4 u 8.
- Reloj auxiliar (ACLK): Que alimenta a los periféricos seleccionados por software. Se genera a partir de la señal de baja frecuencia dividida por un factor de 1, 2, 4 u 8.

Muchas aplicaciones no requieren la sincronización exacta, y el DCOCLK es satisfactorio para el reloj principal, por lo tanto la configuración por defecto es ampliamente aplicable, aunque a menudo necesita ser configurado para una frecuencia más alta dependiendo de las necesidades del programa [Davies, 2008].

4.2.5 Interrupciones

Por lo general una interrupción es generada por hardware, aunque también puede ser iniciada por software. A menudo éste es un indicador de que ha ocurrido un acontecimiento y que necesita una respuesta urgente. El procesador detiene lo que estaba haciendo, y guarda el contenido del contador del programa y el registro de estado, para reanudar esta tarea más adelante y ejecuta una rutina de servicio de interrupción (una subrutina llamada por el hardware en lugar de software) y una vez que se ha completado el servicio de interrupción, el CPU vuelve a su actividad anterior [Davies, 2008].

Las interrupciones en el microcontrolador pueden ser de tres tipos, de reset, enmascarables y no enmascarables. La diferencia entre estas últimas es que las enmascarables se pueden habilitar o deshabilitar individualmente o mediante la bandera de habilitación general de interrupciones, en tanto las no enmascarables sólo se pueden habilitar o deshabilitar individualmente, la bandera de habilitación general no afecta su comportamiento.

El MSP430 utiliza vectores de interrupciones, cada ISR (Servicio de interrupción) tiene su propio vector, que está almacenado en una dirección predefinida, en una tabla de vectores al final de la memoria del programa. La dirección de cada vector de la interrupción se muestra en la hoja de datos. La tabla del vector no se encuentra en

una ubicación fija, los propios ISR pueden ser localizados en cualquier lugar de la memoria [Texas Instruments, 2010].

4.2.6 Los temporizadores

Existen tres temporizadores disponibles en el microcontrolador MSP430F2274, uno que realiza la función de perro guardián (watchdog). Un temporizador/contador que cuenta con 3 registros de captura o comparación y otro que cuenta con 7 registros de captura o comparación. Más detalles a continuación.

4.2.7.1 El temporizador watchdog

La principal función del temporizador de watchdog es reiniciar el procesador después de una falla en el software o al no producirse un evento esperado, al completarse un período de tiempo determinado.

Es decir, el programador selecciona un tiempo adecuado y dentro del programa reinicia periódicamente el temporizador, cuando el software se bloquee por alguna razón el procesador será reiniciado por el temporizador de watchdog al término del ciclo actual del temporizador.

Todo programa para este microcontrolador debe comenzar configurando o desactivando el temporizador de watchdog, ya que el microcontrolador se reinicia con esta función activada de forma predeterminada. Si no se utiliza como temporizador de watchdog el temporizador se puede utilizar para generar intervalos de tiempo, por ejemplo para generar interrupciones.

El período del temporizador se fija seleccionando la fuente de reloj que puede ser el reloj auxiliar (ACLK) o el reloj de sub sistemas (SMCLK) y el factor de división que puede ser 62, 512, 8192 ó 32768. Los valores son configurados mediante el registro de control del temporizador de watchdog (WDTCTL). [Davies, 2008]

4.2.7.2 Los Temporizadores A y B

Estos son temporizadores o contadores con registros de captura o comparación con la capacidad de generar múltiples salidas o interrupciones. La principal diferencia entre los temporizadores A y B es que el segundo tiene la posibilidad de seleccionar la longitud del registro temporizador entre 8, 10, 12 ó 16 bits, en tanto el primero tiene un registro de longitud fija de 16 bits. Además el temporizador B tiene 7 registros de captura o comparación, en tanto el A tiene sólo 3.

Por cada uno de los registros de captura o comparación se tiene una etapa de salida. Además los registros de captura o comparación del temporizador B pasan por un buffer adicional y se pueden agrupar.

En modo de temporizador las fuentes del reloj pueden ser las señales ACLK, SMCLK o una señal externa a través de los pines TACLK (TBCLK) o INCLK. A su vez la fuente de reloj elegida puede ser dividida por un factor de 2, 4 u 8 mediante los bits IDx del registro de control TACTL (TBCTL) [Davies, 2008].

4.2.7.2.1 Modo compara

El modo de comparación se utiliza para generar señales de modulación de ancho de pulso (PWM) o para generar interrupciones a intervalos específicos. Cuando el valor del contador TAR (TBR) llega a TACCRx (TBCCRx) se escribe un uno en la bandera de interrupción del temporizador y se produce la salida según se halla programado. En este punto los dos temporizadores difieren levemente debido al doble buffer del temporizador B. En el temporizador B se puede elegir el momento en que se actualizan los *latch* de comparación con el valor de los registros de comparación, que son los que el usuario manipula. Además se puede agrupar varios *latch* para su actualización simultánea. El momento se refiere al valor del contador TBR.

4.2.7.2.2 Modo captura

El modo de captura se utiliza para capturar eventos temporales, como medidas de velocidad o tiempo, esto se observa en la figura 4.1 y que se muestra a continuación.

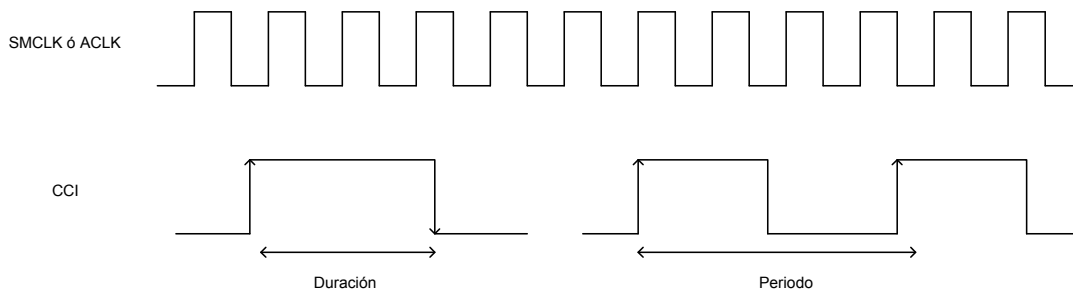


Fig. 4.3 Modo captura usando una señal de tiempo conocida [Davies, 2008].

Primero el usuario selecciona la señal interna o externa que provocará la captura y el flanco de subida, bajada o ambos. Cuando se produce la condición seleccionada el valor actual del contador TAR (TBR) se copia al registro de captura programado en el módulo del Timer. Al mismo tiempo a la bandera de interrupción del módulo correspondiente se le escribe el valor uno, lo cual indica que una interrupción si está habilitada, entrando así a la rutina de interrupción correspondiente en el vector de interrupciones. Una vez que realiza la rutina de interrupción, la bandera de

interrupción se limpia automáticamente permitiendo al programa seguir en el punto donde se detuvo cuando se encontró la interrupción de alguno de los Timers.

4.2.7.2.3 Interrupciones del Timer

Las interrupciones del microcontrolador se muestran en la Tabla 4.3. Asociado a cada uno de los temporizadores existen dos vectores de interrupción, el primero corresponde a interrupciones generadas por el flag CCIFG de TACCR0 (TBCCR0), el segundo corresponde a interrupciones generadas por las banderas restantes CCIFG de los registros TACCRx (TBCCRx) [Texas Instruments, 2010].

Las banderas se activan en modo de captura cuando un valor es capturado al registro correspondiente y en modo de comparación el flag responde cuando el valor del contador alcanza el valor del registro correspondiente.

Asociado al segundo vector de interrupción existe un registro, TAIIV (TBIV), que indica el módulo de captura o comparación que generó la interrupción, cada uno escribe un valor en el registro que puede utilizarse en instrucciones de salto para llegar a la rutina correspondiente [Texas Instruments, 2010].

Tabla 4.3 Vectores de interrupción.

Contenido del TAIIV	Fuente	Bandera	Prioridad
0x0000	Ninguna interrupción pendiente		Alta
0x0002	Captura/compara canal 1	CCIFG1	...
0x0004	Captura/compara canal 2	CCIFG2	
0x0006	-	-	
0x0008	-	-	
0x000A	Desbordamiento del Timer	TAIFG	Baja

CAPÍTULO 5:

DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL MEDIDOR

5.1 INTRODUCCIÓN

No hace muchos años, los microcontroladores por lo regular eran programados en lenguaje ensamblador; sin embargo hoy en día existen pocos casos donde aún valga la pena utilizar este lenguaje, a pesar de su eficiencia y rapidez.

Hoy en día contamos con un lenguaje de alto nivel denominado C, el cual es bastante conciso y fácil de usar. Es considerado ampliamente como un lenguaje de alto nivel, ya que posee una gran variedad de características importantes, tales como: programación estructurada, un método definido para llamada a funciones y para paso de parámetros, potentes estructuras de control, etc [Davies, 2008].

Sin embargo gran parte de la potencia de C reside en su habilidad para combinar comandos simples de bajo nivel, en complicadas funciones de alto nivel. En cierto modo, C puede considerarse como una clase de lenguaje ensamblador universal, el cual permite programar de manera rápida y sencilla, alcanzando casi la misma eficiencia que ofrecería hacerlo en lenguaje ensamblador. Es por esta razón, que los algoritmos para realización del software del medidor de ángulo de este trabajo fueron codificados utilizando este lenguaje de programación, ya que nos ofrece un código altamente eficiente para este propósito.

5.2 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

La estructura del programa fue desarrollada de tal manera que el CPU solo tuviera prioridad en atender las rutinas de interrupción. Estas interrupciones serán ocasionadas por flancos de subida de ondas cuadradas, las cuales provienen tanto de las señales de voltaje en las terminales del generador así como del encoder.

Cada rutina de interrupción guarda la cuenta del Timer en variables globales, las cuales posteriormente se utilizan para calcular el desfase que presenta el rotor de la máquina cuando se carga. En la figura 5.1 se puede apreciar el algoritmo del medidor.

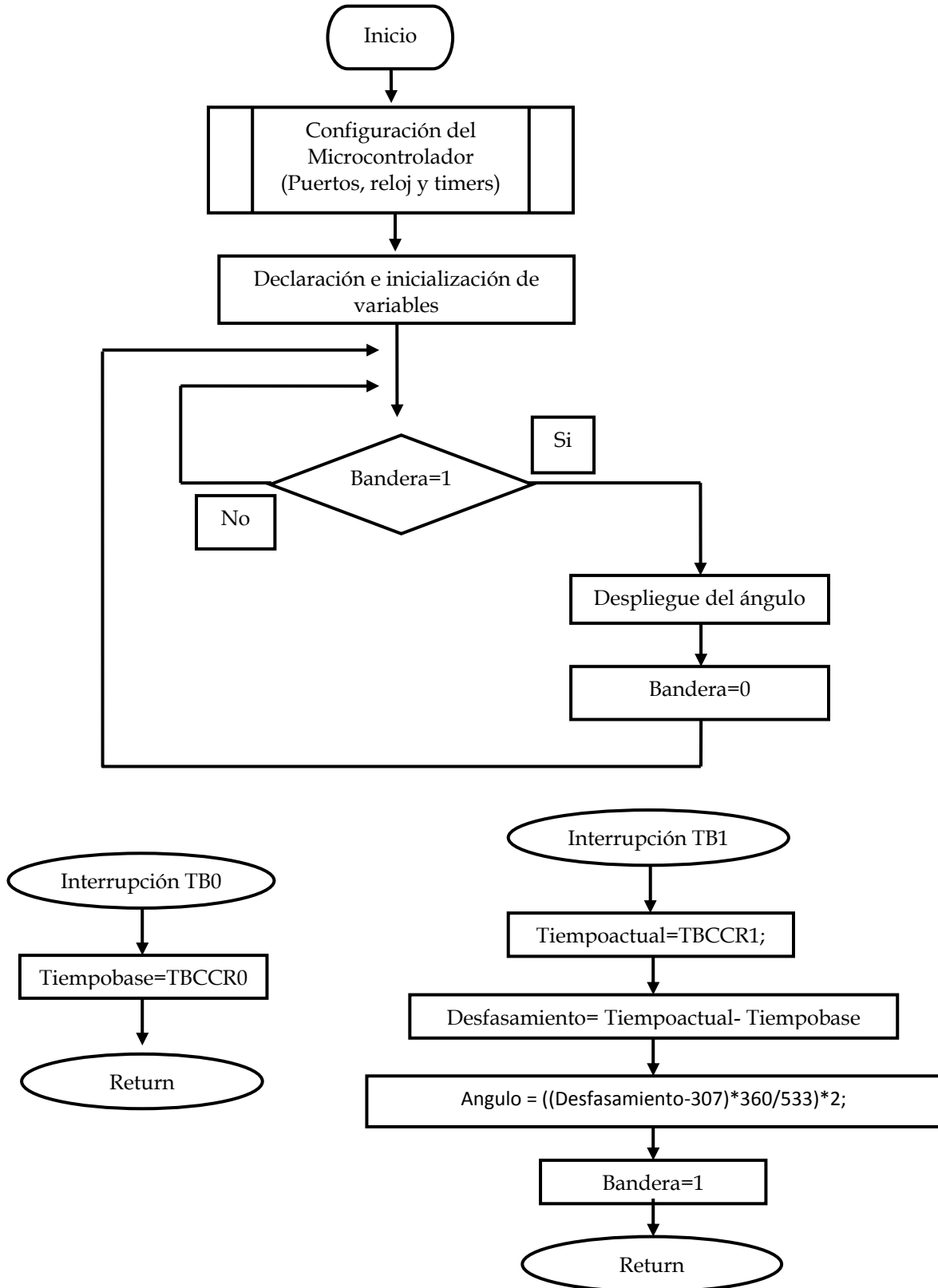


Fig. 5.1: Diagrama a bloques del medidor de ángulo de carga para máquinas síncronas.

Es importante destacar que este software fue diseñado para que el microcontrolador realice el procesamiento de información de manera rápida y eficaz, de tal manera que la sensibilidad de este medidor sea mucho mayor lo cual permite ofrecer un buen análisis en el estado transitorio de cada perturbación.

5.2.1 Configuraciones del microcontrolador

5.2.1.1 Definición y declaración de las bibliotecas

Debido a que C es un lenguaje pequeño, su funcionalidad la obtiene a través de un amplio conjunto de bibliotecas de funciones las cuales también son conocidas como librerías. Estas deben ser declaradas al inicio del programa con el objetivo de que el compilador obtenga las direcciones de las mismas y pueda acceder de manera eficiente a las estructuras definidas dentro de estas librerías.

5.2.1.2 Activación/Desactivación del perro guardián

La función principal del perro guardián (Watchdog) es reiniciar el procesador después de una falla en el software o al producirse un evento esperado.

Es importante destacar que todo programa se debe comenzar por la configuración del temporizador del perro guardián, cabe destacar que el microcontrolador tiene activada esta función por defecto, sin embargo el usuario puede configurar esta opción, dependiendo de las necesidades de su algoritmo.

En este trabajo se decidió desactivar esta función, debido a que el microcontrolador podría perder sincronía con las señales, y con esto sufriría una pérdida de valiosa información la cual que se vería reflejada directamente en la señal proporcionada por el medidor.

5.2.1.3 Configuración de la velocidad del reloj

En la siguiente etapa de inicialización es necesario configurar la velocidad de nuestro microcontrolador, debido a que de esta velocidad dependerá no solo la ejecución del código fuente del programa, también la velocidad con la que se procesaran los datos.

El microcontrolador MSP4302274 ofrece una amplia gama de velocidades para seleccionar, desde 1, 8, 12 y 16 MHz. Sin embargo para nuestro medidor basta seleccionar la velocidad de 1MHz lo cual nos ofrecerá rapidez, así como calidad en el procesamiento de la información.

5.2.1.4 Configuración de los puertos

La configuración de los puertos como entradas o salidas es de suma importancia para el medidor, debido a que de esto dependerá la información que será procesada por el CPU de nuestro microcontrolador.

Es importante recalcar que algunos de los pines conectados al CPU desempeñan funciones especiales las cuales se muestran en el apéndice de esta tesis. Por esta razón se decidió seleccionar dos pines el P4.3 y el P4.4, como entradas para las señales provenientes de la máquina, debido a que ahí se encuentran localizados los pines que permiten las interrupciones diseñadas para el Timer B. Para la salida de la información se seleccionaron los 8 pines del puerto 1, los cuales serán conectados al dispositivo de conversión digital analógico externo.

5.2.1.5 Configuración del Timer B

La configuración del hardware para la realización de las mediciones es de suma importancia; es aquí donde se definen los parámetros que permitirán las interrupciones así como el modo de conteo con el que trabajara así como el reloj con el cual será sincronizado.

La configuración se divide en dos partes:

- La primera es la configuración general del módulo de reloj: Debido a que el Timer B nos permite seleccionar la máxima cuenta que el contador puede tener, la cual puede ser de 8, 12 y 16 bits dependiendo de las necesidades del programa. Para nuestro caso se selecciona el contador de 8 bits con el objetivo de evitar el desbordamiento de datos tomando en cuenta la limitación del convertidor digital analógico el cual es de 8-bits. Después se selecciona la señal de reloj con la cual se sincronizará el módulo del reloj. Para este caso sincronizaremos con una señal externa proveniente de un cristal de 32 kHz ideal para mediciones de tiempo entre dos eventos. Una vez hecho esto, debemos seleccionar la división de esta señal; sin embargo trabajaremos con esta señal sin dividirla, puesto que es ideal para no alcanzar el límite de la cuenta. Y para terminar configuramos las banderas de interrupción y el modo de conteo el cual será continuo hasta llegar a el valor máximo predeterminado por el número de bits que se selecciona anteriormente.
- En la segunda parte se configuran los registros del Timer que llevarán a cabo la tarea de guardar el contador, cuando se presenten las perturbaciones. Aquí se habilitan las banderas de interrupción así como los flancos con los cuales reaccionará el sistema.

5.2.1.6 Habilidad de interrupciones globales

Debido a que se desea que el microcontrolador tenga prioridad en recolectar los datos provenientes de las interrupciones es necesario activar las banderas de interrupción globales.

5.2.2 Definición y declaración de las variables

Es en esta etapa que se declaran los espacios de memoria determinados para guardar los datos provenientes del procesamiento de la información. Estos espacios dependen directamente del tipo de datos que serán guardados dentro de ellos. En el caso particular del medidor de este trabajo se requieren espacios de memoria de 16 Bits, para ofrecer la seguridad de que no se presentará un desbordamiento de datos y con esto, la pérdida de información importante.

Es importante destacar que las variables correspondientes a la medición del tiempo deben ser declaradas globales, debido a que es requerido que posteriormente puedan ser manipuladas por las rutinas de interrupción de los Timers.

5.2.3 Definición del programa principal

Éste es una de las partes clave del programa ya que el CPU solo se encontrará monitoreando las interrupciones y desplegando los datos cuando se cumpla una condición determinada, permitiendo realizar el despliegue de la información y la inicialización de la condición antes mencionada con el objetivo de volver a comenzar el proceso.

5.2.4 Definición de las rutinas de interrupción

Este medidor posee dos interrupciones para que los timers lleven a cabo la tarea de recolección de datos.

- El Timer TB0: Se encarga de recolectar el tiempo base, cada vez que encuentre un flanco de subida producto de las señales de voltaje del generador. Debido a que el dato recolectado necesita ser visualizado por la otra rutina de interrupción, se guarda en una variable global denominada Tiempobase, quien posteriormente podrá ser manipulada cuando se presente una interrupción en el Timer TB1.

- El Timer TB1: Tal y como su predecesor, este módulo del Timer B se activará cada vez que ocurra una interrupción, recolectando el valor del contador, el cual contiene el tiempo que tardó en ocurrir la segunda interrupción denominado Tiempoactual. Una vez obtenido este parámetro se procede a realizar el cálculo del ángulo mediante una resta del Tiempoactual menos el Tiempobase. Una vez realizada la operación se procede a calcular el ángulo de carga de la siguiente manera:
 - El primer paso es calcular en número de pulsos existentes entre el desfaseamiento inicial de la máquina en vacío, para poder llevar a cabo la calibración automática del dispositivo. El número total de pulsos en vacío será eliminado para la calibración automática del medidor de ángulo de carga, debido a que existe un pequeño desfaseamiento en las máquinas cuando estas se encuentran en vacío. Dicho número de pulsos se calcula de la siguiente manera:

$$Pulsos\ vacío = \frac{Desfaseamiento}{Periodo\ de\ la\ señal\ del\ cristal} \quad (5.1)$$

El periodo de la señal del cristal se obtiene de la siguiente manera:

$$Periodo\ de\ la\ señal\ del\ cristal = \frac{1}{Frecuencia\ del\ cristal} \quad (5.2)$$

Sustituyendo el valor de la frecuencia del cristal, obtenemos que:

$$Periodo\ de\ la\ señal\ del\ cristal = \frac{1}{32kHz} = 31.25\ \mu s \quad (5.3)$$

Se sabe que el desfaseamiento en vacío entre las señales es de 9.6 milisegundos, entonces:

$$Pulsos\ vacío = \frac{9.6ms}{31.25\ \mu s} = 307\ pulsos \quad (5.4)$$

La calibración automática se lleva a cabo restando el número total de pulsos en vacío al desfaseamiento, obtenido por el microcontrolador con el objetivo de que éste aproximadamente sea cero.

- El siguiente paso es escalar el valor del ángulo de carga obtenido por el microcontrolador. Esto se realiza calculando el valor del número de pulsos obtenidos en la frecuencia base, es decir a 60 Hz. La fórmula para calcular este parámetro es la siguiente:

$$Pulsos\ de\ frecuencia\ base = \frac{Periodo\ de\ la\ frecuencia\ base}{Periodo\ de\ la\ señal\ del\ cristal} \quad (5.5)$$

El periodo de la frecuencia base se lleva acabo de la siguiente manera:

$$\textit{Periodo de la frecuencia base} = \frac{1}{\textit{Frecuencia base}} \quad (5.6)$$

Sustituyendo los valores para la ecuación (5.6), obtenemos:

$$\textit{Periodo de la frecuencia base} = \frac{1}{60\text{Hz}} = 16.6 \text{ ms} \quad (5.7)$$

Sustituyendo en la ecuación (5.5) el valor obtenido con la ecuación (5.7), obtenemos:

$$\textit{Pulsos de frecuencia base} = \frac{16.6\text{ms}}{31.25 \mu\text{s}} = 533 \text{ pulsos} \quad (5.8)$$

Este valor es correspondiente a los 360° de la señal en las terminales de voltaje. Una vez obtenido este valor se procede a determinar el ángulo de carga medido de la siguiente manera:

$$\textit{Ángulo de carga medido} = \frac{(\textit{Desfasamiento} - \textit{Pulsos en vacío}) * 360}{533} \quad (5.9)$$

Sin embargo el valor del ángulo de carga medido es muy pequeño en magnitud, para poder observarse en el osciloscopio, por esa razón se decidió multiplicarlo por una ganancia de 2 con el objetivo de observar mejor los cambios que se presenten, con él osciloscopio.

Una vez hecho el procedimiento de cálculo anterior se procede a cambiar el valor de la bandera para que el nuevo dato del ángulo pueda ser desplegado en el puerto 1 de salida y así ser procesado por el convertidor digital analógico para su despliegue por medio de una señal analógica.

En el apéndice B se muestra el código fuente desarrollado para el medidor de ángulo de carga basado en el microcontrolador MSP430f22774.

CAPÍTULO 6:

RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las pruebas efectuadas al medidor de ángulo de carga realizado en esta tesis. Las pruebas se realizaron utilizando las micromáquinas síncronas de polos listos y polos salientes con el objetivo de comparar su comportamiento transitorio ante carga tanto resistiva así como inductiva.

Para graficar los resultados de las pruebas se utilizó un osciloscopio digital con el objetivo de observar el comportamiento de la variable en un período equivalente a 10 s. Con el fin de validar los resultados obtenidos, estos fueron comparados con valores calculados teóricamente. Mediante la medición de los parámetros pertenecientes a cada prueba realizada sobre las máquinas.

A continuación se hace una breve descripción de las áreas del sistema experimental del laboratorio en las que se encuentran las micromáquinas a las que se les va a instalar el medidor de ángulo de carga.

6.2 MICROMÁQUINAS SÍNCRONAS DE LABORATORIO

El sistema de las micromáquinas fue adquirido por la ESIME en 1971, mediante un convenio con la UNESCO que empezó en la década de 1960. Es un simulador comercial diseñado especialmente por el grupo ALSTHOM de París, Francia, para reproducir a escala el comportamiento dinámico de sistemas de potencia reales. Esta área fue asignada al grupo de investigación de fenómenos dinámicos de la SEPI-ESIME en 2003 [Ruiz et al., 2011].

El simulador a escala cuenta con modelos físicos de elementos del sistema de transmisión como líneas de transmisión y transformadores, cargas eléctricas estáticas de impedancia constante resistivas, capacitivas e inductivas y máquinas síncronas.

Estos últimos componentes son de especial interés dado que las micromáquinas son especialmente costosas y raras actualmente.

Al igual que en otras ocasiones, al entregar este equipo no se proporcionó ninguna información acerca de su estructura, inventario y operación. Sin embargo, aprovechando la experiencia adquirida en el desarrollo de dos áreas de control anteriores (de las máquinas generalizadas y de la máquina educacional de 5 kVA), se tomaron las siguientes decisiones en el trabajo de esta área de control [Ruiz et al., 2011]:

- La operación del sistema de la micro red era considerada difícil anteriormente debido a que su frecuencia de operación nominal original es de 50 Hz. Por lo tanto, todos sus controles y equipos tenían que operar a esta frecuencia. Para evitar esta dificultad, se decidió que en esta etapa era conveniente operar la micro red a la frecuencia de 60 Hz. Esta decisión también se tomó porque unas máquinas que anteriormente eran utilizadas para proporcionar la frecuencia de operación de 50 Hz se desecharon del laboratorio, facilitando por lo tanto la elección de la frecuencia de operación.
- De acuerdo a la decisión anterior, se decidió cambiar los controles analógicos originales del sistema a 50 Hz por unos controles digitales a 60 Hz.

Estas dos decisiones facilitaron sobremanera el trabajo en el área de control de las micromáquinas. Los elementos que eran considerados más conflictivos anteriormente estaban relacionados con esta diferencia en la frecuencia de operación: los controles analógicos, los puentes rectificadores y la máquina que era utilizada como un bus infinito. Al eliminar los rectificadores y cambiar los controles por equipos digitales más modernos, se aprovecha la parte más valiosa del simulador: las micromáquinas.

Este cambio en la frecuencia de operación facilita también la interconexión del área de las micromáquinas con las áreas de control restantes del simulador experimental de sistemas de potencia [Ruiz et al., 2011].

En la figura 6.1 se muestra la ubicación de las micromáquinas de la microrred, mientras que en la figura 6.2 se presenta una imagen del área de las micromáquinas.

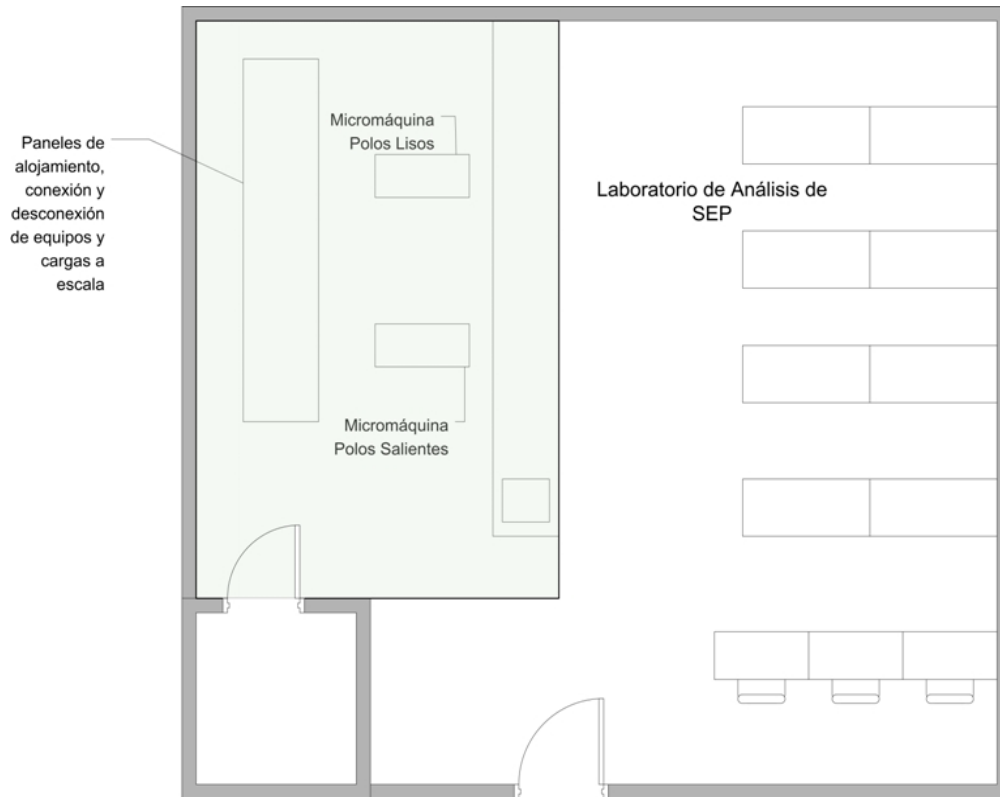


Fig. 6.1: Ubicación de las micromáquinas, dentro del área de la micro red del simulador experimental (Adaptado de [Mejía y Trinidad, 2007]).

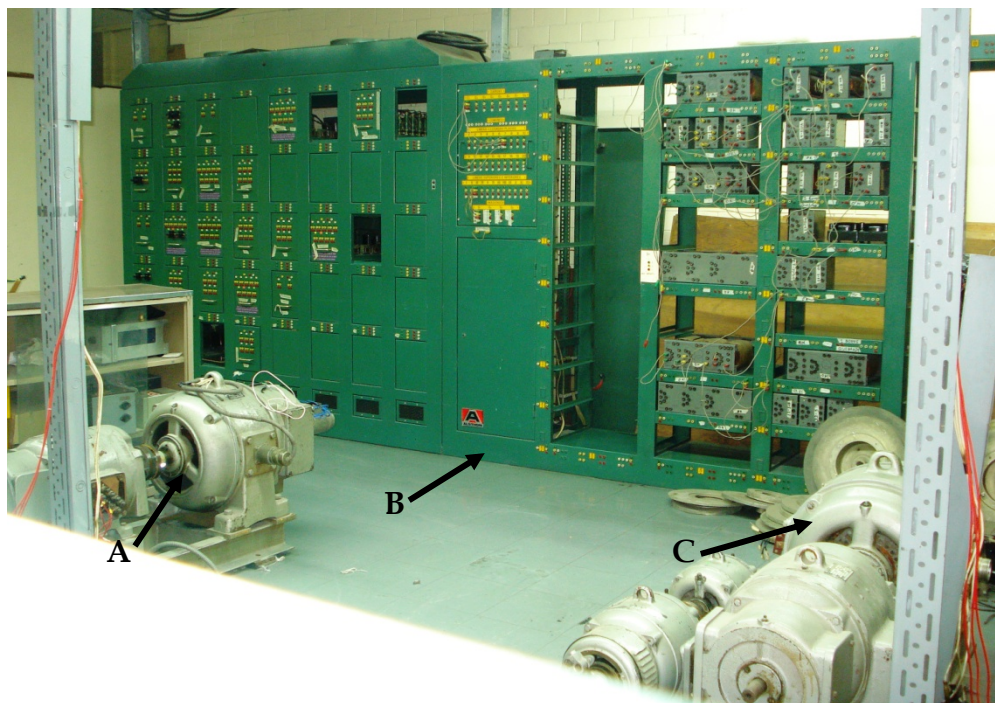


Fig. 6.2: Área de la Micro red del simulador experimental de sistemas eléctricos de potencia. A: Micromáquina síncrona de polos salientes. B: Tablero de cargas, conexiones y elementos de transmisión. C: Micromáquina síncrona de polos lisos (Adaptado de [Juárez et al., 2009]).

En la figura 6.3 se muestra un diagrama esquemático de las dimensiones de las máquinas. Es importante mencionar que la apariencia exterior de la máquina de polos salientes es la misma que la de la máquina de polos lisos.

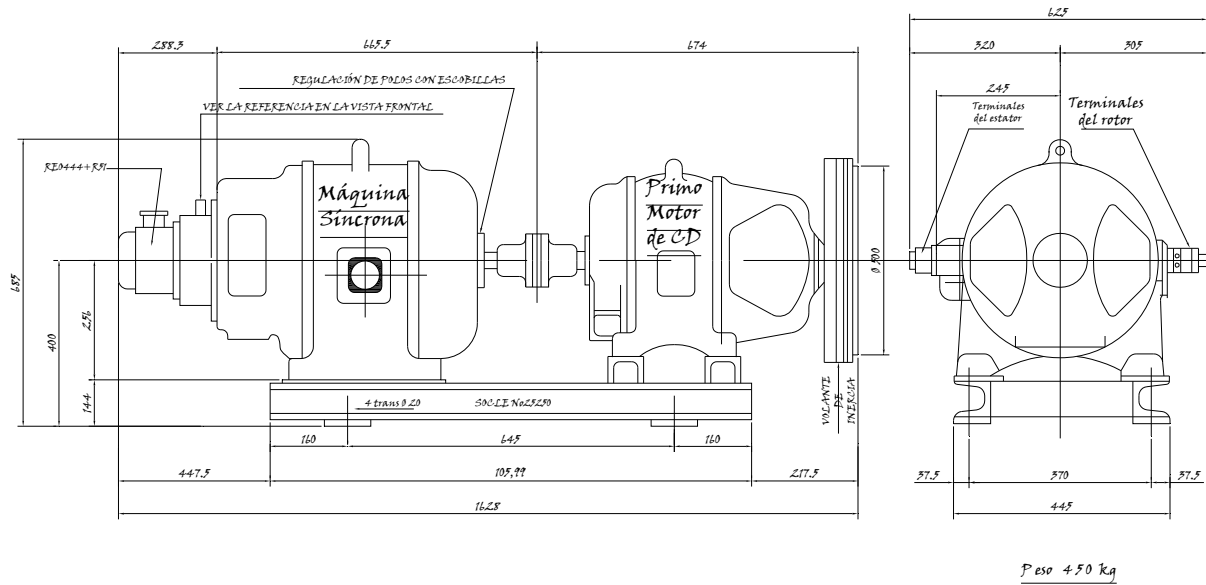
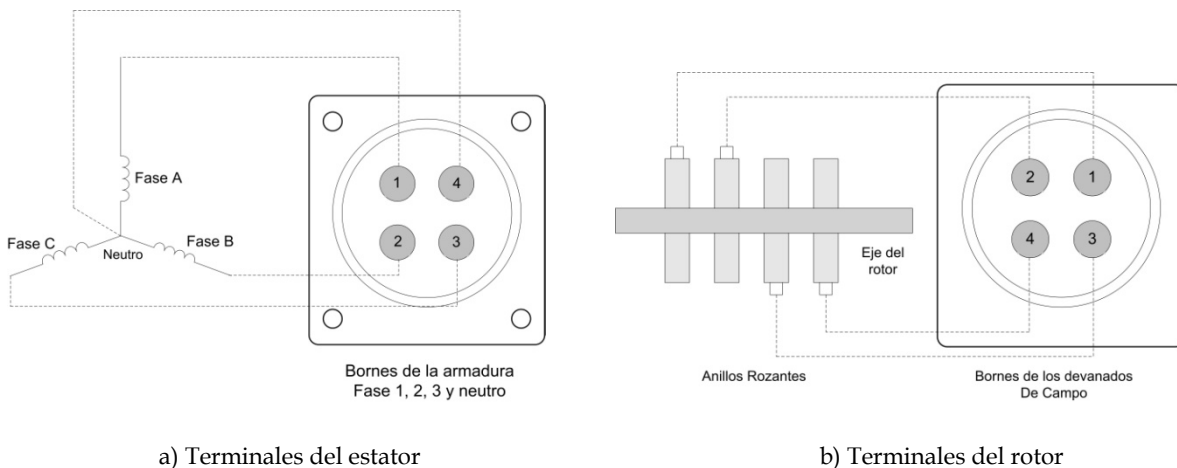


Fig. 6.3: Dimensiones y aspecto de las micromáquinas síncronas (Adaptado de [Mejía y Trinidad, 2007]).

En la figura 6.4 a) se muestran los bornes de las conexiones del estator, identificando la numeración correspondiente a cada una de las fases de las máquinas y la terminal de neutro, en la figura 6.4 b) se muestran los bornes y la numeración de la conexión del devanado de campo.



a) Terminales del estator

b) Terminales del rotor

Fig. 6.4: Conexiones eléctricas de las terminales.

[Adaptado de Mejía y Trinidad, 1997].

En la figura 6.5 se muestran las cartas de operación teóricas y experimentales de cada una de las máquinas, las cartas de operación de las máquinas son de vital importancia, pues a partir de estas se ajustan los controles de sobre y baja excitación con el fin de no exceder los límites de operación.

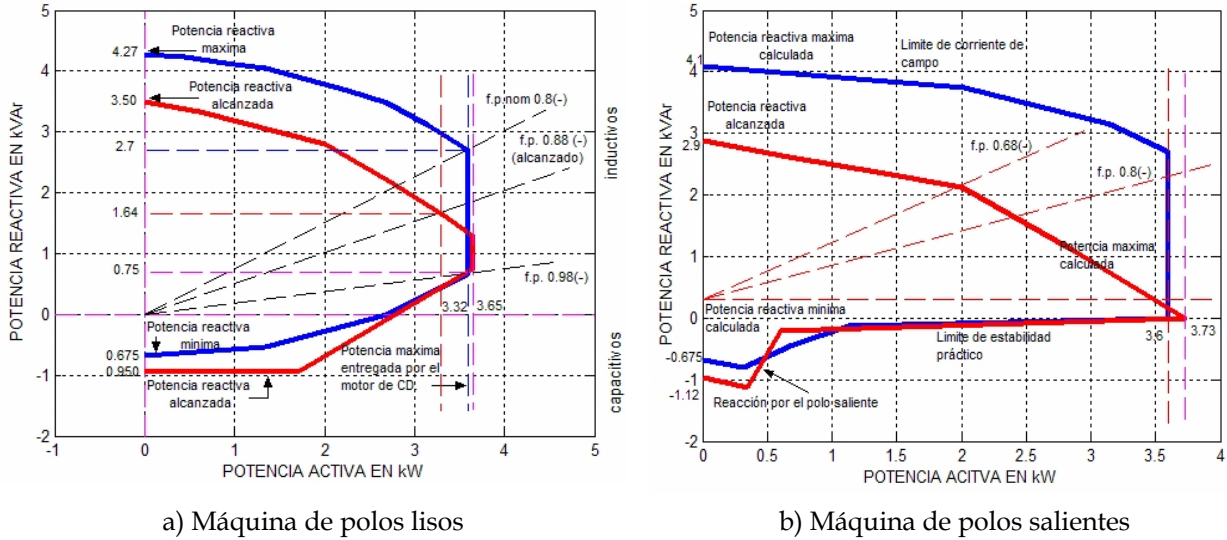


Fig. 6.5: Cartas de operación teóricas y experimentales de las micromáquinas síncronas de la micro red [García, 2007].

Por último, en tabla 6.1 se muestran los datos de placa de cada una de las micromáquinas.

Tabla 6.1: Datos de placa de las micromáquinas síncronas (Adaptada de [Sánchez, 2010]).

Máquina de polos salientes		Máquina de polos lisos	
Marca	Alsthom	Marca	Alsthom
Tipo	M20 AT1	Tipo	M20 AT1
Capacidad	4.5 KVA	Capacidad	4.5 KVA
Nº	146883	Nº	146884
V	127/220	V	127/220
RPM	1800	RPM	1800
$\cos \varphi$	0.8	$\cos \varphi$	0.8
Conexión	Ψ	Conexión	Ψ
Hz	60	Hz	60
Nº Polos	4	Nº Polos	4
Excitatriz	Separada	Excitatriz	Separada
Aislamiento	B	Aislamiento	B

6.3 EQUIPO REQUERIDO EN LAS PRUEBAS

El equipo necesario para realizar las pruebas experimentales se enlista a continuación, especificando sus más esenciales características, sin embargo en el apéndice C se muestran todas las características de cada uno de los dispositivos ocupados para las pruebas:

- Transformador de voltaje:

Transformador de Voltaje: 120VAC-12 VAC, relación de transformación 10:1, corriente máxima 500 mA. En la figura 6.6 se muestra la imagen del transformador de voltaje.

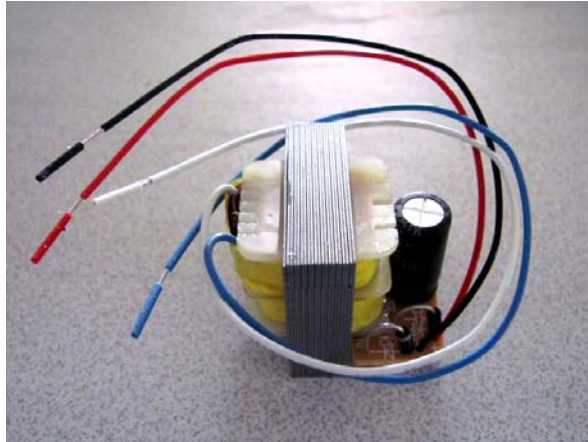


Fig. 6.6: Transformador de voltaje.

- Transformador de corriente e interruptores:

Transformador de Corriente: GEC ALSTOM, No. MC-B0110, 60 Hz, precisión 0.6, Norma ANSI-C57.13, relación de transformación 20:5, corriente máxima 15 A. En la figura 6.7 se muestra la imagen del transformador de corriente y un interruptor trifásico.

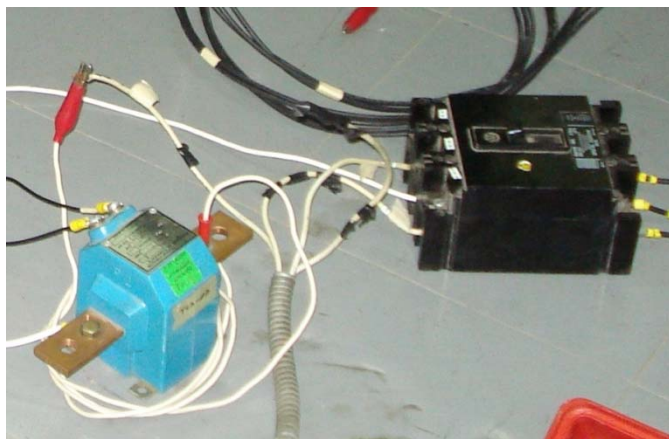


Fig. 6.7: Transformador de corriente e interruptores (Adaptado de [Sánchez, 2010]).

Interruptores trifásicos termomagnéticos: Square D, FA en caja moldeada, marco de 100 A, tensión nominal máxima de interrupción 600 V de CA, 3 polos con disparo termomagnético, capacidad interruptiva 20 000 A RMS asimétricos, 18 000 A. RMS simétricos.

- Cajón de resistencias:

Conjunto de resistencias que pueden llegar a consumir hasta 2.75 kW. Este dispositivo nos permite cargar la máquina con carga resistiva. Cabe destacar que solo se puede utilizar un 75% con el objetivo de evitar provocar el desbalanceo de la máquina. En la figura 6.8 se muestra una imagen del dispositivo.



Fig. 6.8: Cajón de resistencias.

- Motor de inducción :

Motor Baldor Industrial (figura 6.9), 1 HP, voltaje dependiendo de la conexión usada: 208-230 (estrella)/460 (delta) V, corriente nominal dependiendo de la conexión usada: 3.7-3.4 (estrella)/1.7 (delta) A, 1725 RPM, 60 Hz, código M, clase de aislamiento B.



Fig. 6.9: Motor de inducción trifásico (Adaptado de [Sánchez, 2010]).

- **Multímetro:**

Multímetro FLUKE 117 (figura 6.10). Multímetro digital, 600 V como máximo entre una terminal y conexión a tierra, temperatura de operación de -10°C a 50°C , selección automática del rango de voltaje para CA y CD, precisión en la medición de volts RMS: $1\% + 3$ (CD, 45 Hz a 500 Hz), $2\%+3$ (500 Hz a 1kHz).



Fig.6.10: Multímetro digital.

- **Osciloscopio digital:**

Osciloscopio Tektronics TPS2024B, 4 canales, ancho de banda de 200 MHz, velocidad de muestreo de hasta 2 GS/s en tiempo real, en la figura 6.11 se muestra una imagen del dispositivo.

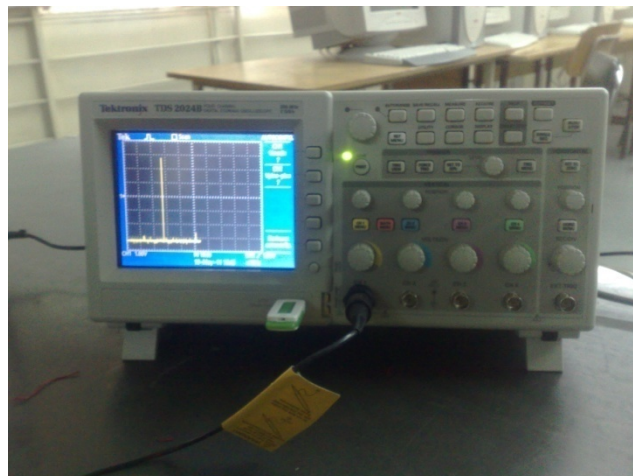


Fig. 6.11: Osciloscopio digital.

- Sistema de control de velocidad:

Una descripción detallada del control de velocidad se hace en [Ramos, 2010]. En ese trabajo se hace una descripción detallada de este equipo y se hace el ajuste de las ganancias de control, en la figura 6.12 se muestra el sistema de control de velocidad.

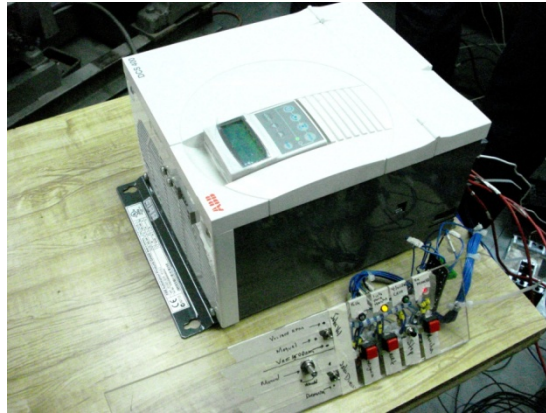


Fig. 6.12: Sistema de control de velocidad (Adaptado de [Sánchez, 2010]).

- Control de voltaje de campo:

Este dispositivo nos permite controlar el voltaje en el campo cuando la máquina alimenta una carga ya sea resistiva o inductiva en el caso del motor (Figura 6.13). Mantiene el voltaje en las terminales a 220 VAC y evita el sobrecalentamiento del transformador utilizado para reducir la señal y adaptarla a nivel TTL.



Fig. 6.13: Sistema de control de velocidad.

En las figuras 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 y 6.18 se muestran la conexión de los dispositivos para realizar la medición del ángulo de carga y la realización de las pruebas.

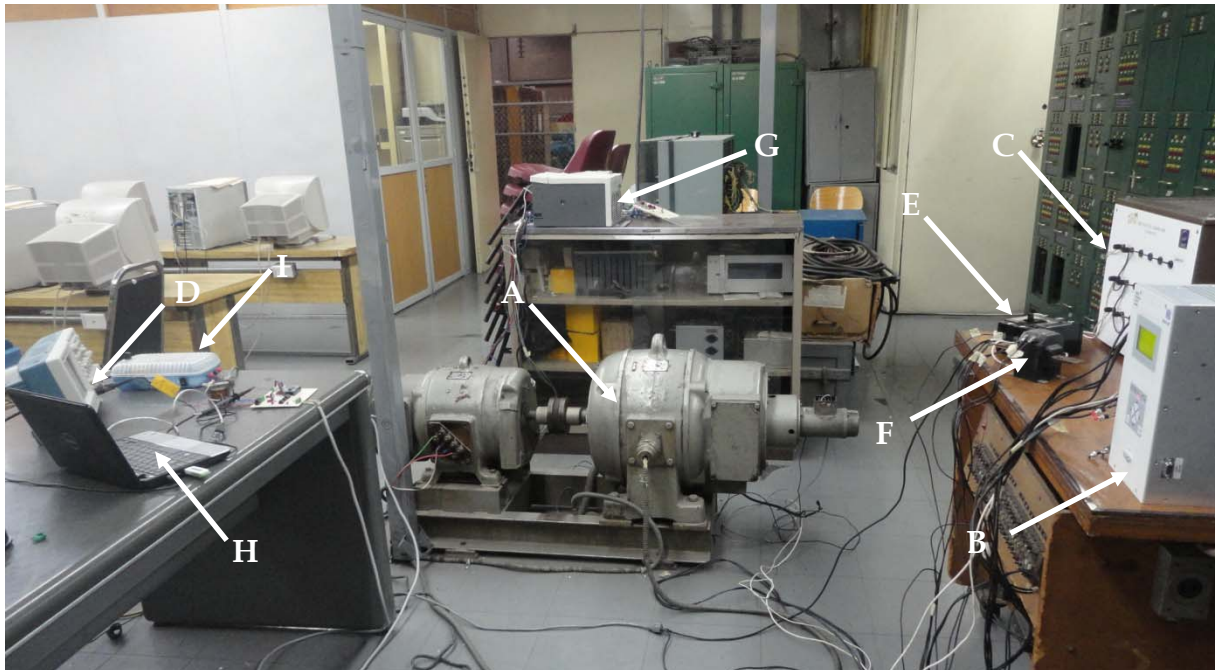


Fig. 6.14: Conexión de los equipos empleados durante las pruebas experimentales realizadas a la máquina de polos salientes. A) Máquina síncrona de polos salientes, B) Regulador Automático de Voltaje (RAV), C) Cajón de carga resistiva, D) Osciloscopio, E) Interruptor trifásico A, F) Transformador de voltaje, G) Control de velocidad, H) Computadora personal. I) Fuente simétrica de voltaje.

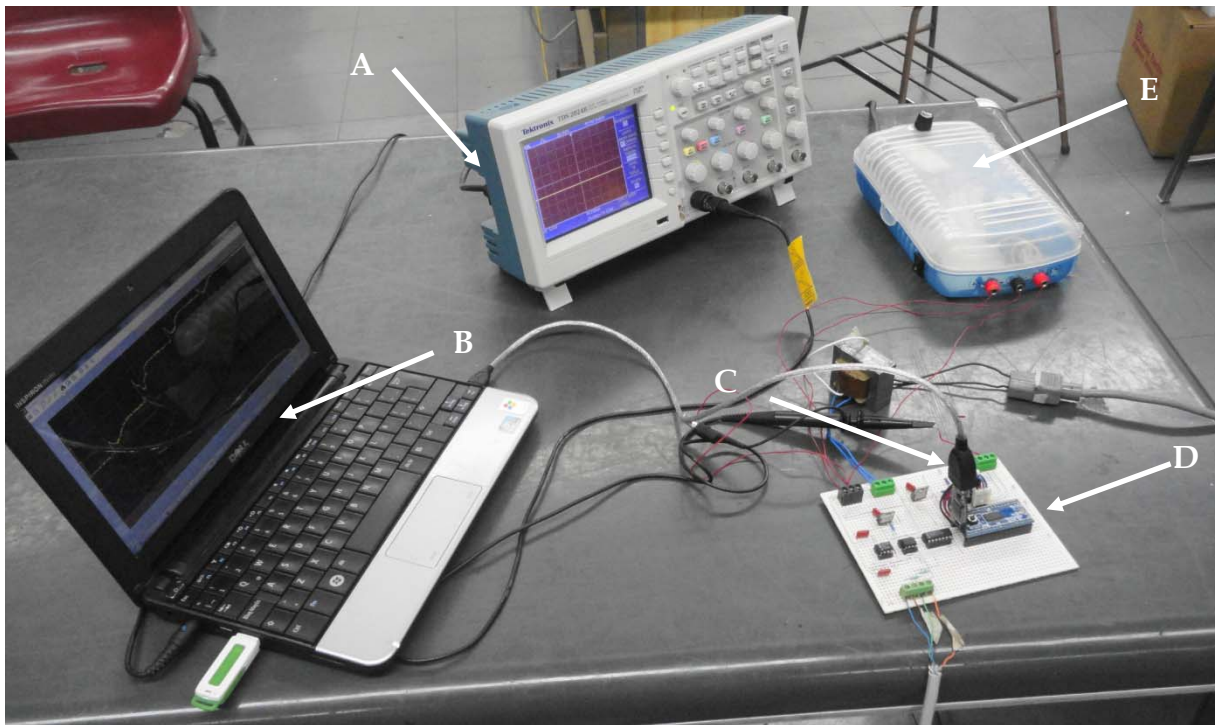


Fig. 6.15: Conexiones para la programación del microcontrolador. A) Osciloscopio, B) Computadora personal, C) Programador eZ430f2013, D) Medidor del ángulo de carga, E) Fuente simétrica de voltaje.

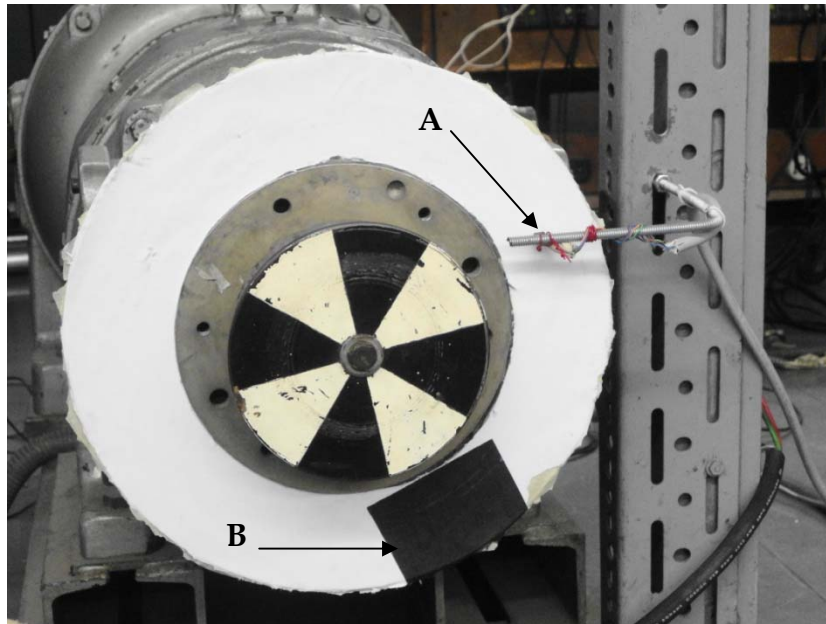


Fig. 6.16: Conexiones para el sensado de la señal de la flecha. A) Optoacoplador QRD1114, B) Encoder con una ranura.

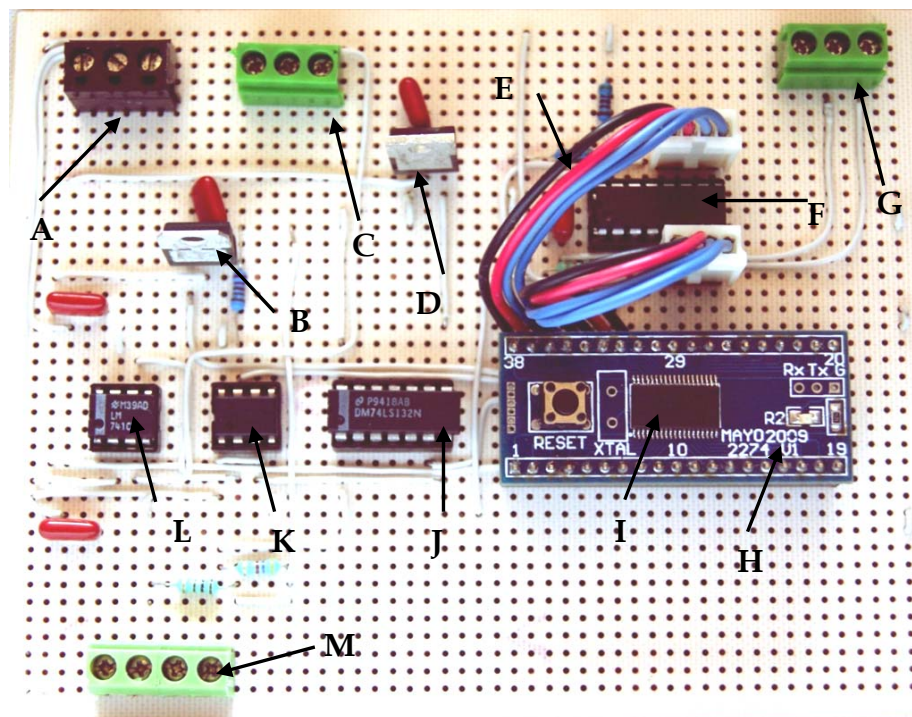


Fig. 6.17: Estructura del medidor de ángulo de carga A) Entrada de la fuente simétrica, B) Regulador lf33, C) Entrada del transformador 127/12V, D) Regulador 7805, E) Bus de datos, F) DAC0800, G) Salida del medidor de ángulo de carga, H) Interfaz para MSP430f2274, I) Microcontrolador MSP430f2274, J) Circuito 74ls132, K) Circuito lm311, L) Circuito lm741, M) Entrada del Optoacoplador.



Fig. 6.18: Realización de las pruebas experimentales.

Después de probar exitosamente el desempeño del equipo, se procedió a instalar de manera permanente en un gabinete para evitar falsos contactos y otros problemas debido a la instalación temporal que se empleó durante las pruebas. En las figuras 6.19 y 6.20 se muestran diferentes aspectos del instrumento terminado.

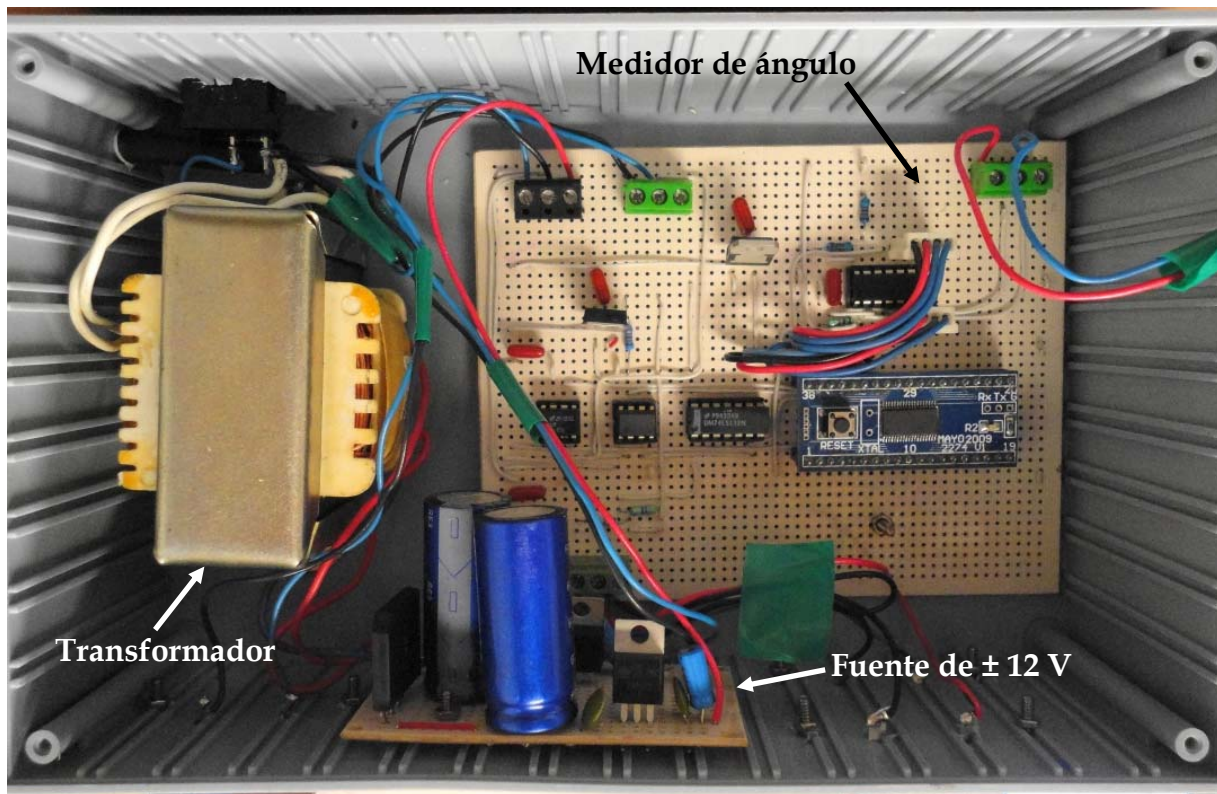


Fig. 6.19: Interior del medidor de ángulo de carga final. Se pueden observar los componentes de la fuente de poder y del medidor. La descripción del medidor se presenta en la figura 6.17.



Fig. 6.20: Exterior del medidor de ángulo de carga final instalado en un gabinete. Las diferentes conexiones de los transductores y de la salida se indican en la figura.

6.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.4.1 Introducción

Para probar el desempeño del medidor de ángulo de carga, se diseñaron diferentes pruebas en las cuales la máquina síncrona era sometida a variaciones de carga resistiva e inductiva. Para facilitar la descripción de las pruebas experimentales, se desarrolló un diagrama general del circuito de prueba, el cual es mostrado en la Figura 6.21.

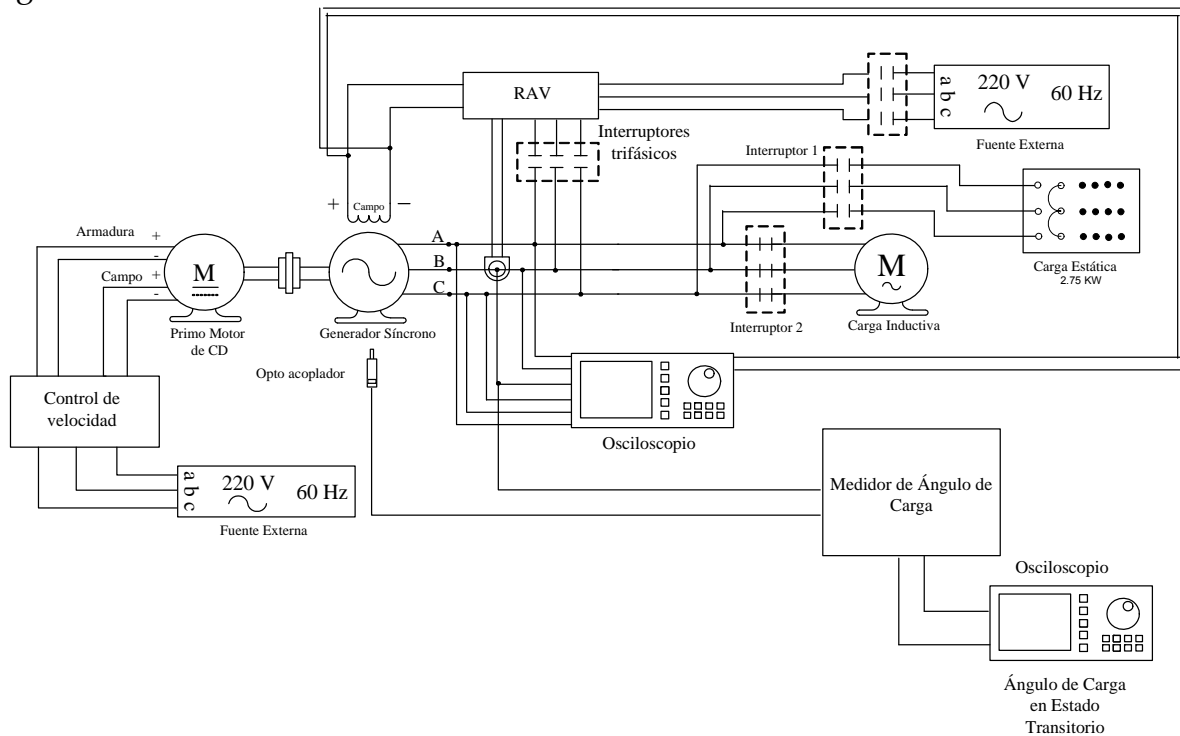


Fig. 6.21: Circuito de prueba para la obtención de la respuesta del sistema en vacío.

6.4.2 Escalamiento de las mediciones

El proceso de escalamiento de las mediciones se realizó por medio de un programa que se desarrolló en simulink de MATLAB®, el cual se presenta en la figura 6.22. Debido a que la señal de salida del microcontrolador tiene una magnitud de entre - 5 a 5 V, es conveniente llevar a cabo la adición o sustracción de una constante con el objetivo de ajustar las mediciones a un rango de 0 a 10 V. Esta es la función de la constante C1 en la figura 6.22.

Se sabe además que el convertidor digital-analógico (DAC-0800), está limitado a 8 bits, es decir que el valor máximo obtenido cuando se tengan 10 volts, corresponderá a 254 bits. Sin embargo, la magnitud obtenida en este punto es el doble del valor real correspondiente al ángulo de carga debido a que, como se especificó en el capítulo 5, el ángulo fue multiplicado por una ganancia con un valor de 2 con el objetivo de observar mejor los cambios en el osciloscopio y con ello llevar a cabo un mejor análisis. De esta manera se obtuvo por medio de una regla de tres la ecuación (6.1), la cual escala el ángulo de carga medido con el osciloscopio (aplicando con el microcontrolador la ecuación (5.9) al desfase medido, de acuerdo al desarrollo mostrado en § 5.2.4, y al programa presentado en el Apéndice B) a partir de los datos obtenidos en el laboratorio.

$$\delta_{escalado} = \frac{\delta_{Medido} * 254}{20} \quad (6.1)$$

Para ajustar offset inicial de las mediciones al valor del ángulo de carga de la máquina en vacío se empleó la constante C2 del modelo de la figura 6.22. Este valor de ángulo de carga fue validado experimentalmente por medio de las pruebas presentadas en la siguiente sección.

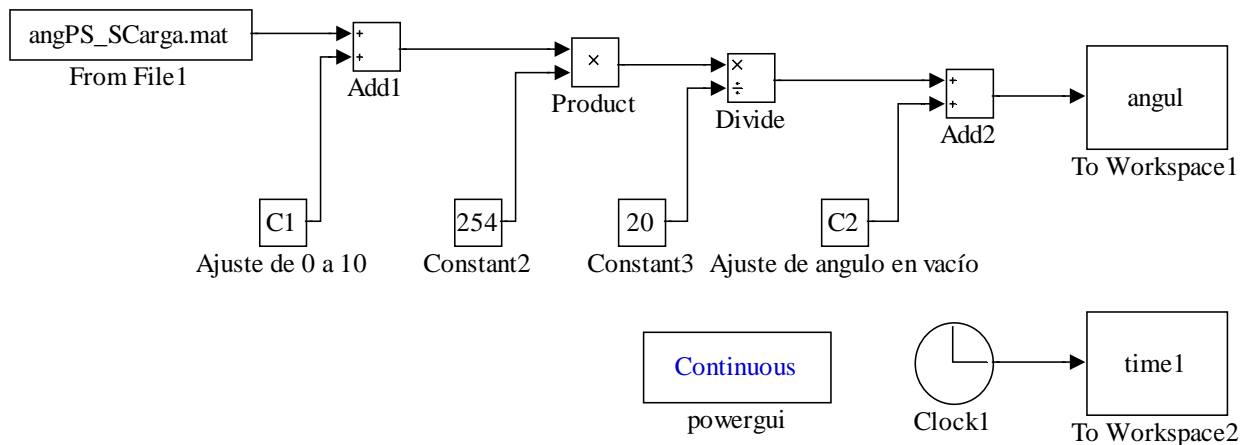


Fig. 6.22: Programa de simulink para cambiar a grados las mediciones de ángulo de carga obtenidas en el osciloscopio.

6.4.3 Pruebas de respuesta cuando la máquina se encuentra en vacío

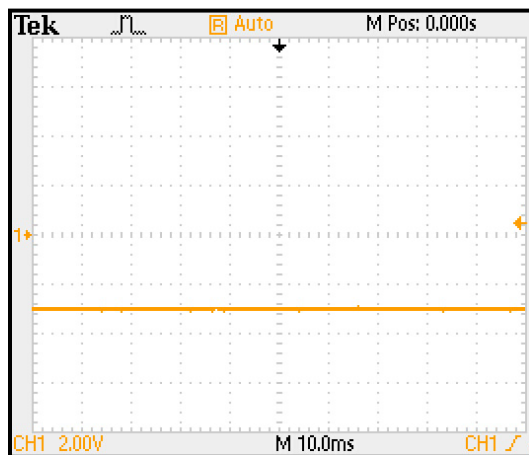
Para verificar que el medidor no tenga errores o la medición contenga un nivel de ruido apreciable, se propone realizar la medición del ángulo de carga con la máquina síncrona funcionando en vacío.

6.4.3.1 Circuito de prueba

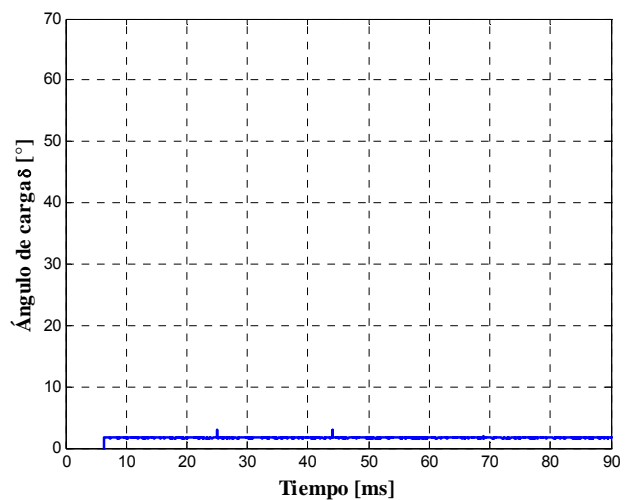
Para realizar la prueba de respuesta del medidor con la máquina en vacío, se utilizó el circuito de la figura 6.21, teniendo abiertos los dos interruptores de carga, 1 y 2.

6.4.3.2 Resultados de la prueba en la máquina de polos salientes

En la figura 6.23 se muestra la gráfica correspondiente a la medición obtenida por medidor con el osciloscopio. Esta figura muestra valores instantáneos, con un período de 10 segundos del voltaje en el medidor cuando la máquina se encuentra en vacío.



a) Medición original.

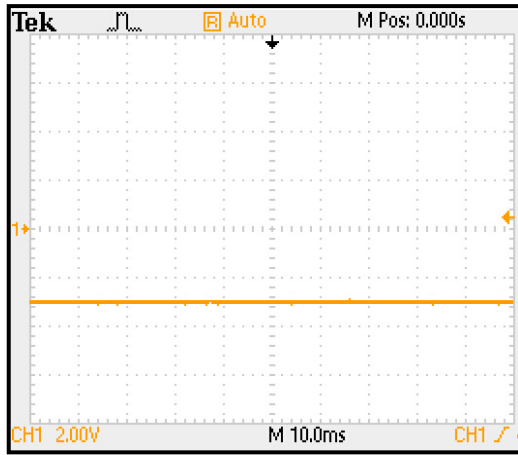


b) Medición escalada.

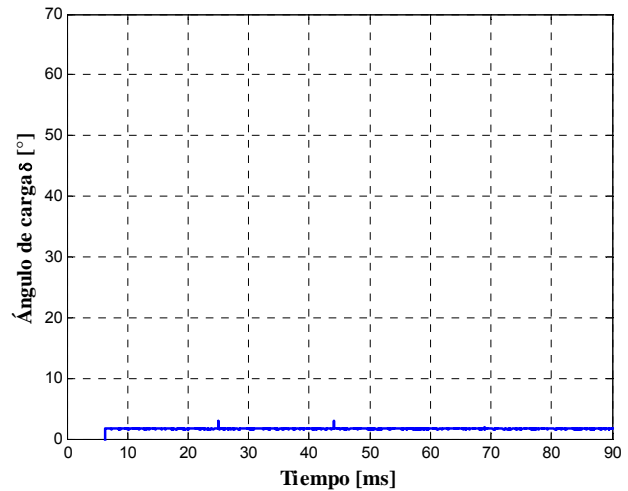
Fig. 6.23: Ángulo de carga cuando se encuentra la máquina síncrona de polos salientes en vacío.

6.4.3.3 Resultados de la prueba de la máquina de polos lisos

En la figura 6.24 se muestra la gráfica correspondiente a la medición obtenida cuando la máquina síncrona de polos lisos se encuentra en vacío.



a) Medición original.



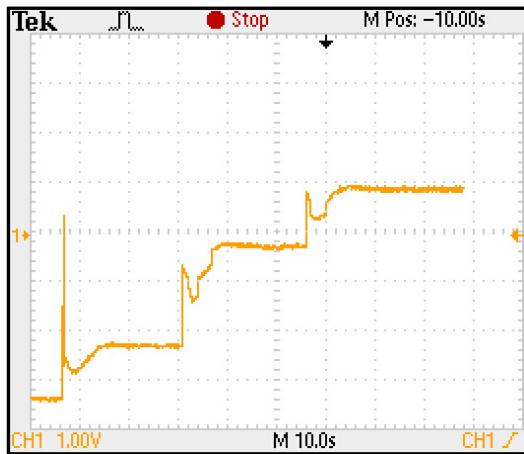
b) Medición escalada.

Fig. 6.24: Ángulo de carga cuando la máquina síncrona de polos lisos se encuentra en vacío.

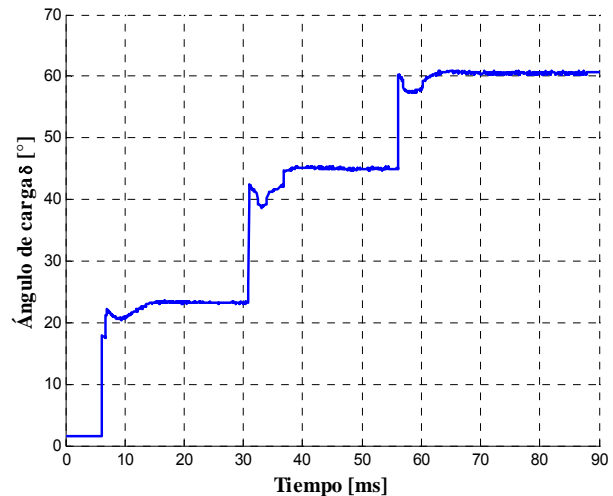
6.4.4 Pruebas de respuesta ante el incremento gradual de la carga resistiva

6.4.2.1 Resultados de la prueba en la máquina de polos salientes

En la figura 6.25 se muestra la gráfica correspondiente a la medición obtenida con el osciloscopio cuando a la máquina síncrona de polos salientes se le incrementa gradualmente la carga resistiva en bloques de 687.5 W trifásicos. Esto se logra cerrando el interruptor 1 de la figura 6.21.



a) Medición original.

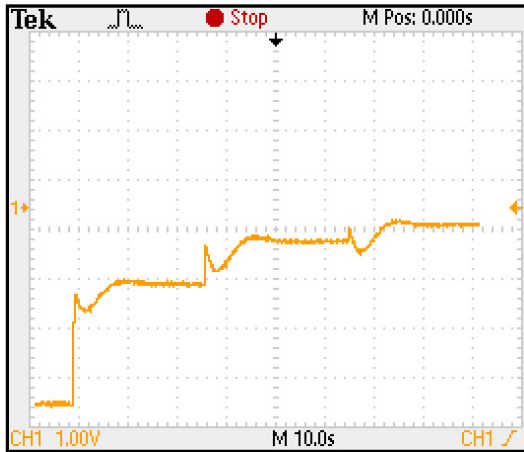


b) Medición escalada.

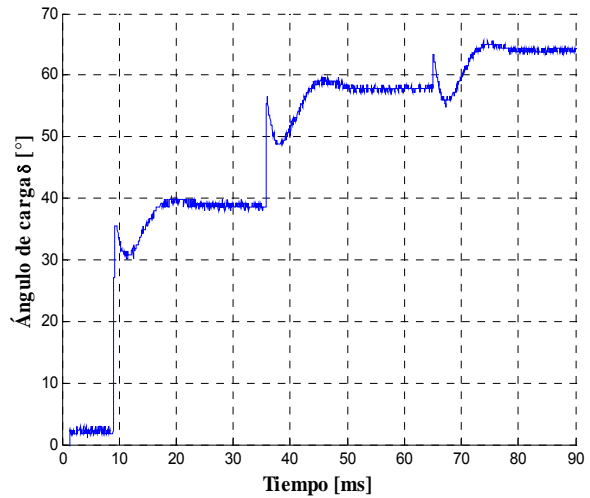
Fig. 6.25: Ángulo de carga ante el incremento de carga resistiva en la máquina síncrona de polos salientes.

6.4.2.2 Resultados de la prueba de la máquina de polos lisos

En la figura 6.26 se muestra la gráfica correspondiente a la medición obtenida con el osciloscopio cuando a la máquina síncrona de polos lisos se le incrementa gradualmente la carga resistiva en bloques de 687.5 W trifásicos.



a) Medición original.



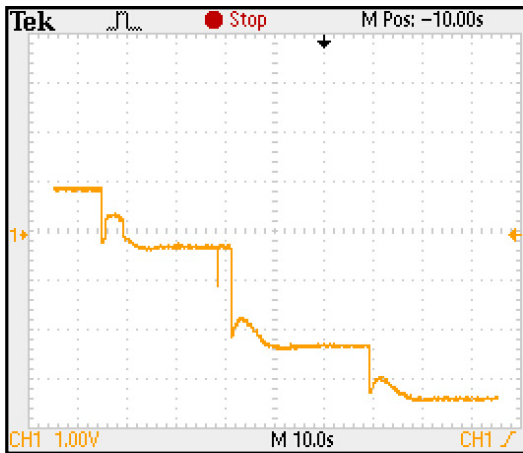
b) Medición escalada.

Fig. 6.26: Ángulo de carga ante el incremento de carga resistiva en la máquina síncrona de polos lisos.

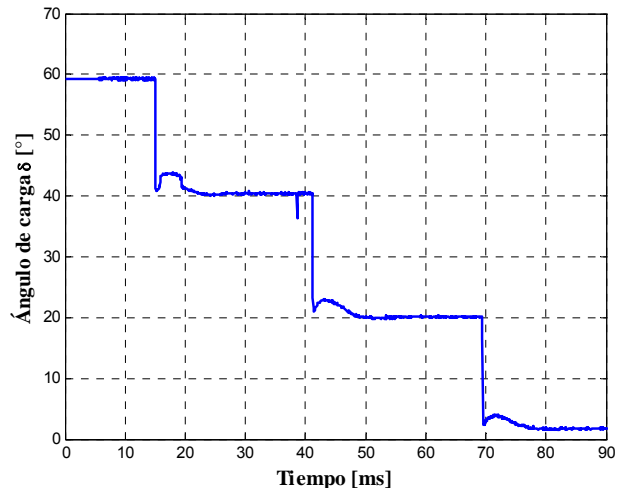
6.4.5 Pruebas ante la disminución gradual de carga resistiva

6.4.5.1 Resultados de la prueba en la máquina de polos salientes

En la figura 6.27 se muestra la gráfica correspondiente a la medición obtenida con el osciloscopio cuando a la máquina síncrona de polos salientes se le disminuye gradualmente la carga resistiva en bloques de 687.5 W trifásicos.



a) Medición original.

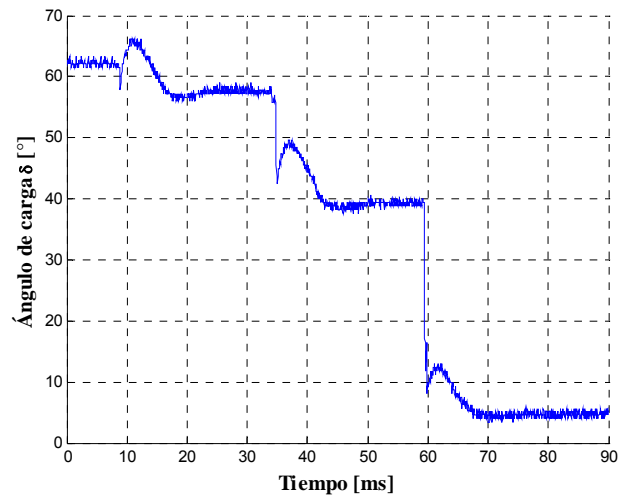
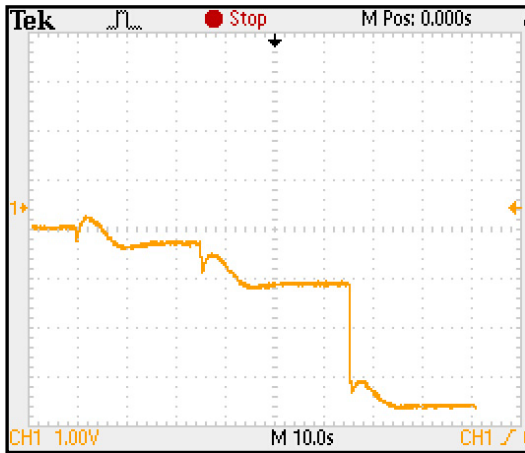


b) Medición escalada.

Fig. 6.27: Ángulo de carga ante decremento de carga resistiva en la máquina síncrona de polos salientes.

6.4.5.2 Resultados de la prueba de la máquina de polos lisos

En la figura 6.28 se muestra la gráfica correspondiente a la medición obtenida con el osciloscopio cuando a la máquina síncrona de polos lisos se le disminuye gradualmente la carga resistiva en bloques de 687.5 W trifásicos.



a) Medición original.

b) Medición escalada.

Fig. 6.28: Ángulo de carga ante el decremento de carga resistiva en la máquina síncrona de polos lisos.

6.4.6 Pruebas de respuesta ante el arranque de un motor de inducción

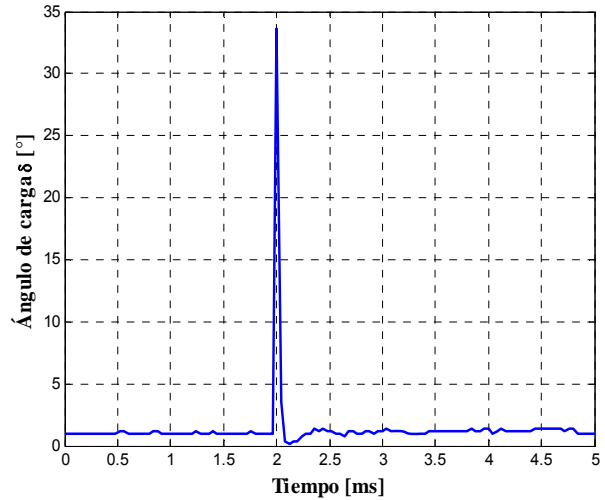
Teniendo en cuenta que el control de la potencia reactiva de la máquina síncrona es manejado por el sistema de control de excitación, y el control de potencia activa por el sistema de control de velocidad, con el fin de verificar el desempeño del sistema de excitación, se propone en esta sección hacer una prueba de respuesta ante la demanda de potencia reactiva causada durante el arranque de un motor de inducción en vacío. Esto se logra dejando abierto el interruptor 1 y cerrando el interruptor 2 de la figura 6.21. En la tabla 6.6 se muestra la comparación de los valores teóricos y experimentales del ángulo de carga para ambas máquinas síncronas.

6.4.6.1 Resultados de la prueba de la máquina de polos salientes

En muestra en la figura 6.29 se presentan los resultados obtenidos con el osciloscopio, ante el arranque del motor de inducción, para la máquina de polos salientes.



a) Medición original.

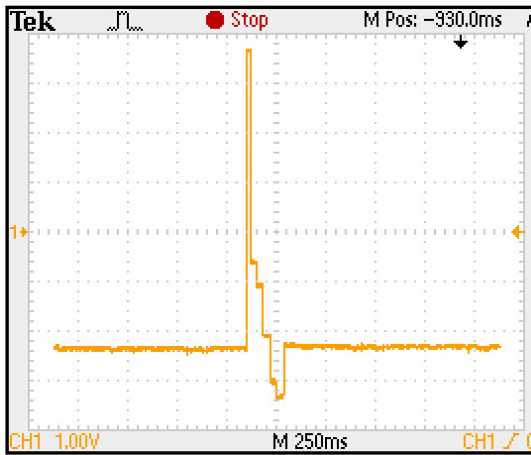


b) Medición escalada.

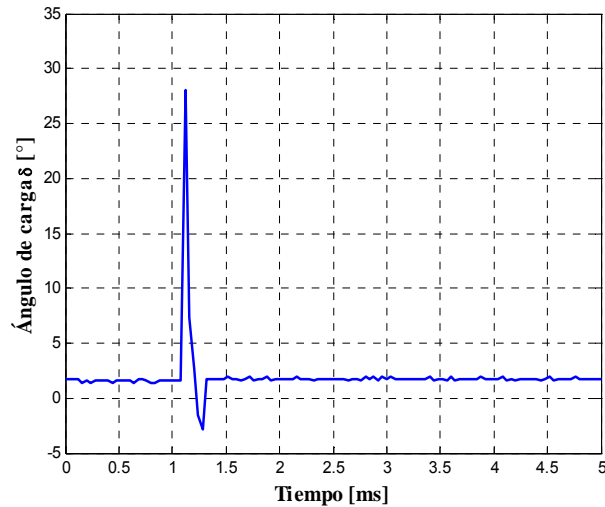
Fig. 6.29: Respuesta ante la entrada de un motor de inducción en la máquina de polos salientes.

6.4.6.2 Resultados de la prueba de la máquina de polos lisos

En muestra en la figura 6.30 se presentan los resultados obtenidos con el osciloscopio, ante el arranque del motor de inducción, para la máquina de polos lisos.



a) Medición original.



b) Medición escalada.

Fig. 6.30: Respuesta ante la entrada de un motor de inducción en la máquina de polos lisos.

6.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Es importante mencionar que el ruido producido por los diversos componentes del sistema puede producir pequeñas variaciones o interferencias con los dispositivos que constituyen el medidor, que aunque mínimas afectan su comportamiento, ocasionando que los cálculos realizados por el microcontrolador presenten variaciones significativas respecto al valor calculado teóricamente del ángulo de carga.

Como se puede observar en las figuras 6.23 y 6.24, la respuesta del ángulo de carga para las máquinas síncronas de polos lisos y polos salientes presentan un comportamiento similar en vacío debido a que teóricamente dicho ángulo es muy cercano cero.

Sin embargo ante los cambios graduales de la carga estática resistiva se observaron cambios drásticos entre el comportamiento de ambas máquinas, lo que permitió observar que el comportamiento en la máquina de polos salientes posee mucho más estabilidad (el ángulo de carga al que finalmente llega es menor) respecto al obtenido con la de polos lisos. Esto se debe a sus diferencias en la construcción del rotor, las cuales hacen que la reactancia x_q de la máquina de polos salientes sea menor a la de polos lisos.

Un aspecto interesante de mencionar es el hecho de que se comprueba que el ángulo de carga de ambas máquinas es insensible ante cambios de carga inductiva, como es el caso del arranque del motor trifásico de 1 HP en vacío mostrado en las figuras 6.29 y 6.30. El pico transitorio observado en las respuestas se debe al transitorio inicial del voltaje en terminales el cual se atenúa rápidamente, pero afecta a la medición del ángulo, llegando ambas máquinas a un valor del ángulo de carga permanente muy pequeño y similar al ángulo de la máquina en vacío.

6.5.1 Comparación de los valores experimentales del ángulo de carga con los valores teóricos

Los resultados de la medición del ángulo de carga obtenidos por este instrumento durante las pruebas experimentales pueden compararse con los obtenidos teóricamente con las ecuaciones (2.18) y (2.19) del capítulo 2, los cuales se muestran en las tablas 6.2 y 6.3 para las máquinas de polos salientes y lisos, respectivamente. En el cálculo de estos resultados, se considera que la reactancia en eje de cuadratura para la máquina de polos salientes es $x_q = 0.6 x_d$, y para la máquina de polos lisos $x_q = x_d$ y que el término de la potencia activa Q es despreciable, siguiendo el procedimiento experimental en el cual las máquinas síncronas solamente alimentaron cargas resistivas. Los resultados teóricos se calcularon para las pruebas de aumento de carga, y se incluyó en el último renglón la estimación de un aumento adicional de carga para cada máquina.

Tabla 6.2: Resultados teóricos del ángulo de carga para la máquina síncrona de polos salientes.

$P (W)$	$V_t (V)$	$x_q (\Omega)$	$I_t (A)$	$E_q (V)$	$\delta (^{\circ})$
687.5	127	37.092	1.804461417	127+66.9310828913386i	27.78996598
1375	127	37.092	3.608923858	127+133.862203750866i	46.50686704
2062.5	127	37.092	5.413385827	127+200.793307086614i	57.68700699
2750	127	37.092	7.217847244	127+267.724389977953i	64.62181362

Tabla 6.3: Resultados teóricos del ángulo de carga para la máquina síncrona de polos lisos.

$P (W)$	$V_t (V)$	$x_q (\Omega)$	$I_t (A)$	$E_q (V)$	$\delta (^{\circ})$
687.5	127	61.82	1.804461417	127+111.551804818898i	41.29479975
1375	127	61.82	3.608923858	127+223.10367291811i	60.34964679
2062.5	127	61.82	5.413385827	127+334.655511811024i	68.21851064
2750	127	61.82	7.217847244	127+446.207316629921i	74.11253061

En las tablas 6.4 y 6.5 se comparan los valores medido y teórico del ángulo de carga para las dos máquinas síncronas, en las pruebas de incremento de la carga resistiva y de arranque del motor en vacío, respectivamente.

Tabla 6.4: Comparación de los valores medido y teórico del ángulo de carga durante la prueba de incremento de carga.

Máquina de polos salientes			Máquina de polos lisos		
$P(W)$	$\delta (^{\circ})$ teórico	$\delta (^{\circ})$ medido	$P(W)$	$\delta (^{\circ})$ teórico	$\delta (^{\circ})$ medido
687.5	27.789	24	687.5	41.294	39
1375	46.506	45	1375	60.349	58
2062.5	57.687	60	2062.5	68.218	64
2750	64.621	65	2750	74.1125	72

Tabla 6.5: Comparación de los valores medido y teórico del ángulo de carga durante la prueba de arranque del motor en vacío.

Máquina de polos salientes			Máquina de polos lisos		
$P(W)$	$\delta (^{\circ})$ teórico	$\delta (^{\circ})$ medido	$P(W)$	$\delta (^{\circ})$ teórico	$\delta (^{\circ})$ medido
≈ 0	1.898	1.8	≈ 0	1.942	1.9

Los resultados mostrados en las Tablas 6.4 y 6.5 muestran que el medidor de ángulo de carga desarrollado en el presente trabajo realiza la medición de manera muy cercana a los valores teóricos esperados. Considerando que se emplearon los componentes más sencillos y económicos posibles, la relación costo-beneficio obtenida es muy alta, como se puede observar en el Apéndice D de este trabajo, en el cual se detallan los costos requeridos por el medidor.

Es importante obtener el error entre la medición real y la medición obtenida en las pruebas con el objetivo de mostrar el nivel de precisión que posee el dispositivo. En la siguiente tabla se muestra esta diferencia.

Tabla 6.6: Diferencias entre los valores teóricos y los medidos obtenidos durante la pruebas.

Prueba	Máquina de polos salientes		Máquina de polos lisos	
	$P(W)$	$\delta(^{\circ})$ Diferencia	$P(W)$	$\delta(^{\circ})$ Diferencia
Aumento de carga resistiva	687.5	3.789	687.5	2.294
	1375	1.506	1375	2.349
	2062.5	2.313	2062.5	4.218
	2750	1.621	2750	2.112
Arranque del motor de inducción en vacío	≈ 0	0.098	≈ 0	0.042

De los resultados de la Tabla 6.6 se observa que existe una diferencia promedio de $\pm 2.5^{\circ}$ entre los valores teóricos y los valores obtenidos durante las pruebas. Esto corresponde, con respecto a un ángulo máximo teórico posible de 90° , a un error porcentual de 2.8%.

Esto se debe a diferentes causas, entre las que podemos mencionar variaciones en los voltajes, imprecisiones en el cálculo del valor teórico del ángulo (ecuaciones (2.18) y (2.19) del capítulo 2), debido a que el valor del parámetro x_q empleado en ambas máquinas es estimado a partir de valores conocidos y no se emplea un valor más exacto obtenido por medio de pruebas a la máquina.

Se espera que teniendo un valor más exacto de x_q se pueda determinar un ángulo teórico que ayude a calibrar de manera más exacta al equipo de medición. Sin embargo se considera que la exactitud actual del medidor es aceptable para las aplicaciones de investigación y docencia.

Los buenos resultados de este trabajo alientan a continuar en esta línea de investigación desarrollando medidores más eficientes, rápidos, sensibles y precisos. Las conclusiones de este trabajo e ideas para el desarrollo de nuevos medidores de ángulo se presentan en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 7:

CONCLUSIONES

7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas al término de este trabajo, así como algunas recomendaciones para trabajos futuros que podrían aumentar la calidad del medidor, ya que cuando se llevó a cabo el diseño del circuito mínimo, el principal objetivo considerado fue que fuera un medidor muy rápido.

7.2 CONCLUSIONES

Se logró diseñar e implementar un prototipo de medidor de ángulo de carga el cual fue probado de manera adecuada experimentalmente en dos micromáquinas síncronas de laboratorio del Área de las Micromáquinas del Simulador Experimental de Sistemas Eléctricos de Potencia que está siendo desarrollado por el Grupo de Investigación de Fenómenos Dinámicos de SEPI-ESIME-Zacatenco.

El medidor fue probado en máquinas síncronas de polos salientes y polos lisos y se pudieron comprobar varios aspectos teóricos de este tipo de máquinas experimentalmente que fueron considerados de manera adecuada en el diseño del medidor.

El concepto básico de medición del ángulo de carga es algo simple a primera vista, y aunque este parámetro es de vital importancia para poder entender el comportamiento de máquinas síncronas, no se emplea comúnmente en la industria aunque es necesario, debido a que no existe un medidor comercial de esta variable.

Al comparar los resultados experimentales con los teóricos se puede comprobar que siempre existe una diferencia mínima entre ellos, debida quizá a que no se tiene el valor exacto del parámetro x_q .

La utilización de circuitos de filtrado y acoplamiento bien diseñados permitieron obtener muy buenos resultados, ya que de esta manera se limitó el efecto del ruido en las mediciones y se dió mejor forma y presentación a la información obtenida por el instrumento.

Las pruebas realizadas al instrumento mostraron su buena exactitud y resolución en la medición del ángulo de carga, sin embargo por las características del microcontrolador se ha limitado la aplicación de medir únicamente el ángulo de carga. Este instrumento se puede utilizar en forma autónoma para monitorear la operación de la máquina síncrona en estado estable o transitorio.

La determinación de los valores medidos en ángulos se realizaron utilizando MatLab®. Esto permitió ofrecer una mayor calidad en la información.

7.3 APORTACIONES DE LA TESIS

Las aportaciones del presente trabajo pueden ser resumidas de la siguiente manera:

- Se describen de manera detallada los conceptos básicos del ángulo de carga, los cuales son aplicados en la implementación de un medidor del ángulo de carga para las máquinas síncronas el cual fue probado en estado estacionario y transitorio.
- Se propone un nuevo método de medición del ángulo de carga en el que el medidor puede funcionar de manera adecuada en máquinas de “n” pares de polos.
- Brindar un dispositivo sensible, barato y eficaz para la medición del ángulo de carga que no está disponible comercialmente y que en su desarrollo aún requiere de avances significativos para alcanzar las características necesarias para su aplicación práctica.

Además de las aportaciones teóricas y prácticas antes mencionadas, una aportación principal de esta tesis es su importante colaboración en el ajuste del nuevo sistema de control del área de las micromáquinas del simulador experimental de sistemas de potencia, el cual está siendo desarrollado por el grupo de investigación de fenómenos dinámicos en redes interconectadas y máquinas eléctricas de la SEPI-ESIME-Zacatenco, dentro de los proyectos CGPI 20040704, 20050139, 20060397, SIP 20070436, 20080956, 20090918, 20100895, 20110561 y CONACyT 83701.

El simulador es una herramienta importante en las tareas de docencia e investigación del comportamiento dinámico de sistemas eléctricos de potencia en estado estacionario y transitorio para los niveles de licenciatura y posgrado [Ruiz et al., 2011].

7.4 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos con el medidor de ángulo de carga son muy alentadores debido a la gran sensibilidad y precisión que presenta este dispositivo, además de que las técnicas utilizadas para las mediciones son eficientes.

Sin embargo el diseño del medidor podría mejorar su calidad con la introducción de un microcontrolador de la familia Texas Instruments serie 430 con características como: más puertos de salida para poder conectar pantallas de LCD y mostrar los datos resultantes, mejor resolución en los contadores de los timers para mejorar la calidad en la medición del ángulo de carga, etc. Y que permitan la medición no sólo del ángulo de carga, sino también de la velocidad y aceleración del rotor u otras mediciones que se requieran para las máquinas síncronas.

El adquirir un microprocesador de la familia Texas Instruments de la serie 430 podría tener la ventaja de ocupar el mismo programa y mejorar el desempeño del instrumento para la medición del ángulo de carga. Específicamente se recomienda un microcontrolador, o un dispositivo con las siguientes características:

- Un convertidor digital analógico de 12 bits que permita disminuir no solo el tamaño del diseño si no también hacer el sistema más inmune al ruido provocado.
- Una velocidad de procesamiento de información del CPU mucho más rápida para acelerar el despliegue de datos y se pueda obtener mucho más sensibilidad.
- Puertos con funciones que permitan realizar el intercambio de información entre el microcontrolador y la computadora con el objetivo de poder desplegar la información mediante el uso de algún software gráfico que haría mucho más fácil la tarea de crear una interfaz con el usuario.
- Cristales resonadores más precisos y de mejor calidad que los que se usan comúnmente, que nos permitan obtener una medida mucho más precisa.
- Convertidores analógicos digitales que permitan procesar las señales analógicas provenientes de los voltajes de las terminales y de corriente, con el objetivo de ser desplegadas posteriormente mediante pantallas de LCD para que el usuario tome las decisiones pertinentes para prevenir el daño en la máquina, así como para recuperar parámetros importantes en las mediciones.

También se recomienda el uso de dispositivos con encapsulados más pequeños y que presenten mayor inmunidad al ruido. Así como un dispositivo de pantalla que

permita desplegar los valores del ángulo; una interconexión con la PC para monitorear en tiempo real el desempeño de la máquina y del ángulo de carga ante cambios repentinos de carga, además de el diseño profesional de la placa con el objetivo de mejorar su funcionamiento, presentación y duración.

En un futuro se requiere de un sistema que sincronice en el tiempo y mantenga una referencia angular común para varios medidores de ángulo en la red. Con esto, se podrán comparar las mediciones angulares de varias máquinas conectadas simultáneamente en un sistema de potencia.

REFERENCIAS

- [Albino, 2006] I. Albino Padilla. “*Impacto de la Excentricidad Estática de la Estabilidad Transitoria de un Generador de Polos Salientes*”. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, SEPI-ESIME-Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, 2006.
- [Aller, 1999] J. M. Aller. *Conversión De Energía Eléctrica Capítulo 14: La Máquina Síncrona En Régimen Permanente*. Universidad Simón Bolívar, Bogota Colombia, 1999.
- [Barrera et al., 1999] E. Barrera-Cardiel and N. Pastor-Gomez. “Microcontroller-Based Power-Angle Instrument for a Power System Laboratory”. *Proceedings of the IEEE PES General Meeting*, July 1999.
- [Davies, 2008] J. H. Davies. *MSP430 Microcontroller Basics*, 2008, Newnes.
- [De Mello, 1994] F.P. De Mello “Measurement of Synchronous Machine rotor Angle from Analysis of Zero Harmonic Components of Machine Terminal Voltage”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 4, October 1994.
- [García, 2007] P. García Téllez (2007). *Evaluación de la Capacidad de Potencia Reactiva de Generadores Síncronos de Laboratorio*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista presentada el 31 de Mayo del 2007 en la ESIME-Zacatenco del IPN. Directores de Tesis: Dr. Daniel Ruiz Vega y M. en C. Tomás I. Asiaín Olivares. Mayo del 2007.
- [IEEE, 1982] IEEE Task Force on Terms & Definitions, Power System Dynamic Performance Subcommittee. “Proposed Terms and Definitions for Power System Stability”, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 7, pp. 1894-1898, July, 1982.
- [Juárez, 2008] L. L. Juárez Caltzontzin. *Determinación de los Parámetros Dinámicos de Máquinas Síncronas por Medio de un Programa de Computadora Digital*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista presentada el 20 de Agosto del 2008 en la ESIME-Zacatenco del IPN. Directores de Tesis: Dr. Daniel Ruiz Vega y M. en C. Tomás I. Asiaín Olivares (Tesis ganadora de 3 premios en 2008 y 2009).
- [Juárez et al., 2009] L. L. Juárez-Caltzontzin, G. Trinidad-Hernández, T. I. Asiaín-Olivares and D. Ruiz-Vega (2009). “Theoretical and Experimental Analysis of the Short Circuit Current Components in Salient Pole Synchronous Generators”. *Proceedings of the 11th Spanish Portuguese Conference on Electrical Engineering (11CHLIE)*, 1 to 4 July, 2009, Zaragoza, SPAIN.
- [Karady, 2000] G. Karady. Course EEE360 Lecture Notes. Topic 4.
- [Mejía y Trinidad, 2007] A. Mejía Ramírez y G. Trinidad Hernández. *Determinación de Parámetros Dinámicos en Máquinas Síncronas a Escala Utilizando la Prueba Convencional en el Dominio del Tiempo*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista presentada el 12 de Junio del 2007 en la ESIME-Zacatenco del IPN. Directores de Tesis: Dr. Daniel Ruiz Vega y M. en C. Tomás I. Asiaín Olivares. Junio del 2007.
- [Phadke and Thorp, 2008] A. G. Phadke and J. S. Thorp. *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. Springer, 2008.

- [Pérez et. al., 2007] A. M. Pérez, Y. A. Romero and S. M. Pérez, “Identificación de Los Parámetros de un Modelo de Tercer Orden para una Máquina Síncrona utilizando Mediciones en Línea” *Scientia et Technica*, Núm. 037, Vol. XIII, pp.37-41,67-71.
- [Ramos ,2010] J. C. Ramos Ramos. *Instalación y Sintonización del Sistema de Control de Velocidad de Micromáquinas Síncronas de Laboratorio*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista presentada el 10 de Agosto del 2010 en la ESIME-Zacatenco del IPN. Directores de Tesis: M. en C. Tomás I. Asiaín Olivares y Dr. Daniel Ruiz Vega.
- [Roeper, 1985] R. Roeper. *Corrientes de Cortocircuito en Redes Trifásicas*. Siemens-Marcombo 1985.
- [Ruiz et al., 2011] D. Ruiz Vega, T. I. Asiaín Olivares y D. Olguín Salinas. “Puesta en Marcha y Automatización de un Simulador de Sistemas de Potencia a Escala”, Reporte de Investigación No. PROY-001-POS, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME-IPN, Mayo de 2011, México D. F., México.
- [Ruiz y Olguín, 1995] D. Ruiz Vega, D. Olguín Salinas. “Modelado de la máquina síncrona para estudios de estabilidad a grandes disturbios en sistemas eléctricos de potencia con parámetros obtenidos mediante pruebas convencionales”. Reporte interno No. SEPI-IE95- 03. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME - IPN. México D.F.
- [Ruiz y Olguín, 1995a] D. Ruiz Vega, D. Olguín Salinas. “La ecuación de oscilación en máquinas de corriente alterna”. Reporte interno No. SEPI-IE95-01. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME - IPN. México D.F.
- [Sánchez, 2010] H. M. Sánchez García. *Sintonización del Regulador Automático de Voltaje del Sistema de Control Basler 125-15 en Micromáquinas Síncronas de Laboratorio*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista presentada el 26 de Enero del 2010 en la ESIME-Zacatenco del IPN. Directores de Tesis: Dr. Daniel Ruiz Vega y M. en C. Tomás Asiaín Olivares (Tesis ganadora de 2 premios en 2010).
- [Sauer, 1992] P. W. Sauer. “Constraints on Saturation Modeling in ac Machines”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.7, Marzo de 1992.
- [Sudan et al., 1955] R. N. Sudan, V. N. Manohar and B. Adkins, “*Transient Torque and Load Angle of Model Machine*”. Ph. D.Thesis, University of London 1955, pp. 53-60.
- [Sudan et al., 1960] R. N. Sudan, V. N. Manohar and B. Adkins, ”The Measurement of Transient Torque and Load Angle in Model Synchronous Machines”. *IEEE Transactions on Power System*, No. 3151 S, February 1960.
- [Texas Instruments, 2010] Texas Instruments, *User´s Guide*, 2010.
- [Trinidad, 2010] G. Trinidad Hernández. *Determinación de los Parámetros de Máquinas Síncronas Mediante la Prueba de Respuesta a la Frecuencia con el Rotor en Reposo*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica presentada el 16 de Diciembre de 2010 en la SEPI-ESIME-Zacatenco, IPN. Director de tesis: M. en C. Tomás I. Asiaín Olivares.
- [Urbina et al., 2010] M. Urbina Palomares, J. J. Galindo Hernández, O. Villarreal Martínez. *Determinación de la Constante de Inercia de Máquinas Síncronas de Laboratorio*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista presentada el 11 de Mayo del 2010 en la ESIME-Zacatenco del IPN. Directores de Tesis: Dr. Daniel Ruiz Vega y M. en C. Tomás I. Asiaín Olivares.
- [Uribe, 2003] U. Uribe Fernández. *Instrumentación Virtual de un Generador Síncrono de Laboratorio con Labview*. M.Sc. Thesis, Instituto Politécnico Nacional, 2003.

APÉNDICE A:

DIAGRAMA DE CONEXIÓN COMPLETO DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA

En este apéndice se presenta el diagrama de conexión completo del medidor de ángulo de carga en la figura A.1.

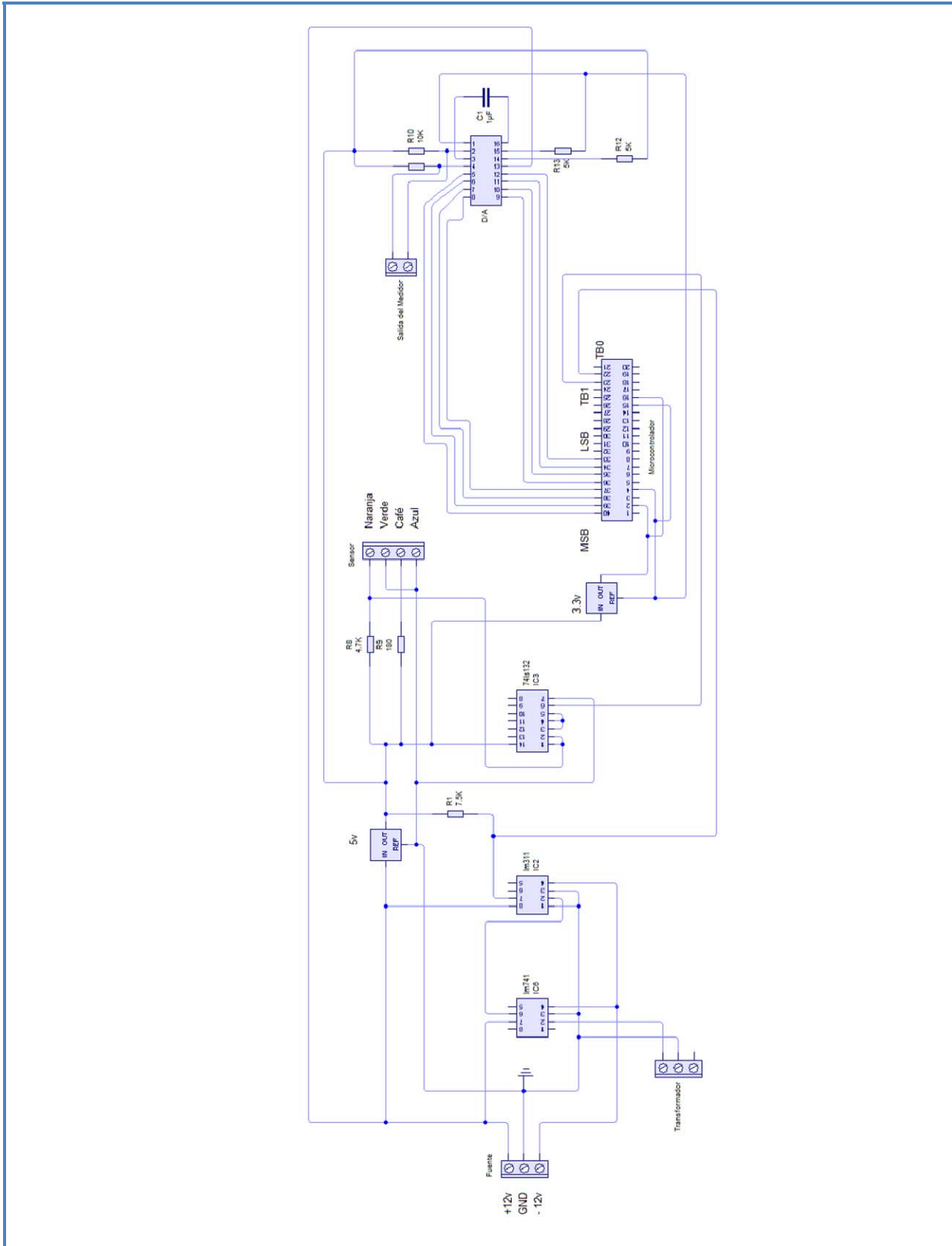


Fig. A.1: Diagrama de conexión completo del medidor de ángulo de carga.

APÉNDICE B:

CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE CARGA DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

En este apéndice se presenta el código fuente final del programa de determinación de del ángulo de carga para las máquinas síncronas. El programa está escrito en lenguaje C y fue compilado en IAR Embedded Workbench Versión: 3.41^a.

Software: Medidor ángulo de carga

```
// Suppen Dimas Alberto Antonio
// Hernandez Gallardo Rafael
// Tesis: Determinacion del ángulo de carga de un
// generador sincrono
// Marzo 31, 2011
// IAR Embedded Workbench Version: 3.41A
```

Declaración de las Bibliotecas

```
#include "msp430x22x4.h"
#include <intrinsics.h>
#include <stdint.h>
```

Inicialización de las variables

```
uint16_t tiempobase = 0 ,desfasamiento = 0,
tiempoanterior = 0, periodo=0;
uint16_t ángulo=0, suma = 0, tiempoactual=0,
tiempouno=0;
int bandera = 0;
```

Programa Main

```
void main(void)
{
```

Desactivación del perro guardián

```
    WDTCTL = WDTPW + WDTHOLD;
```

Configuración del reloj

```
BCSCTL1=CALBC1_1MHZ;
DCOCTL=CALDCO_1MHZ;
```

Configuración de los puertos

```
P4OUT = 0x00;
P4DIR = 0x00;
P4SEL = 0xFF;
P1OUT = 0x00;
P1DIR = 0xFF;
```

Configuración del reloj de Timer B

```
TBCCTL0 = CM_1 | CCIS0 | SCS | CAP | CCIE;
TBCCTL1 = CM_1 | CCIS0 | SCS | CAP | CCIE;
TBCTL = CNTL_0 | TBSSEL_1 | ID_0 | MC_2 |
TBCLR;
```

Configuración de las interrupciones

```
__bis_SR_register(GIE);
```

Programa principal

```
for (;;) {
    if(bandera==1){
        P1OUT=ángulo;
        bandera=0;
    }
}
```

Interrupción del Timer "B0"

```
#pragma vector=TIMERB0_VECTOR
__interrupt void TB0_ISR(void)
{
    tiempoanterior = TBCCR0;
    periodo = tiempoanterior - tiempouno;
    tiempouno=tiempoanterior;
}
```

Interrupción del Timer "B1"

```
#pragma vector=TIMERB1_VECTOR
__interrupt void TBX_ISR(void)
{
    switch (TBIV)
    {
        case 2:
            tiempobase=TBCCR1;
            desfasamiento= tiempobase - tiempoanterior;
            ángulo=((307-desfasamiento)*360)/533*2;
            bandera=1;
            break;
    }
}
```


APÉNDICE C:

EQUIPO EMPLEADO EN LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Equipo utilizado en las pruebas de medición del ángulo de carga para diferentes cargas (dinámica y estática) para dos micromáquinas una Polos Lisos y una de Polos Salientes, cabe mencionar que se utilizó el mismo equipo en común, el cual a continuación se presenta:

Tabla C.1: Osciloscopio Digital: Datos de placa.

Osciloscopio de Fósforo Digital 200MHz, 2 GS/s, 4 Can. Analógicos.			
<i>Marca Tektronix, modelo TPS2024</i>			
Características:			
Ancho de banda	200 MHz		
Cantidad de Canales	4 canales analógicos		
Velocidad de muestreo	hasta 2 GS/s en tiempo real		
Tipo de Almacenamiento	USB		
Archivos generados	JGP	Archivo SET	Excel
Canales flotantes aislados entre si y de la entrada de disparo externo			

Tabla C.2: Multímetro: Datos de placa.

<i>Multímetro Digital Fluke 1178</i>	
Tensión Máxima entre terminales	Protección contra sobretensiones 600 V CAT III
600V	Fusible para la entrada A _ 11A, 1 000V Fusible FAST
Temperatura de operación -10°C hasta 50°C	Medición 20 A
Pantalla Digital de 6 000 cuentas, actualizaciones 4/seg	

Tabla C.3: Transformador de Corriente. Datos de placa.

EMECON 5308	
Especificaciones eléctricas	
Corriente en el lado primario	50 A Nom., 125 A Max
Relacion de vueltas	1000:1 ± 1%
Resistencia a 20°C en C.D	46 Ω
Resistencia Dielectrica Tensión (Hi-Pot)	4 kV R.M.S.

Tabla C.4: Carga Resistiva. Datos de placa.

EMECON 5308	
Carga Total 2.75KW	
0%	0 W
25%	687.5 W
50%	1.375 kW
75%	2.0625 kW
100%	2.75 kW

Tabla C.5: Carga Inductiva. Datos de placa.

Motor de Inducción	
Motor trifásico	
IEM modelo 168212	
Número de Polos	4
Capacidad	1Hp
Frecuencia	60Hz
	220/440 V
	9/4.5 A
Velocidad	1732 RPM
Eficiencia	0.81.5%,
Aislamiento	clase F

Tabla C.6: Drive de Micromáquinas: Datos de placa.

ABB Automation Products GMBH			Made in Germany	FAN115/230 V	C UL US
Type: DCS401.0045	U1	3 - 230.500 V	U1	265..580 VCD	LISTED
SER No, 0183459A08289355	I1	36A	I1	45 A	IND. CONT. EQ
	F1	50/60 Hz	F1	6 A	78 WN

Tabla C.7: Micromáquina de Polos Salientes: Datos de placa.

ZENCO	ANCIENS AT EVE & NOIZET	PARIS	
TYPE M20 AT1	No. 146883		
PUISS ce	V 190/1250	A	
TM 1500	COS ℓ 0.8	C + Y	PH 3
ISOL + B	ECH + 80 °c	Hz 50	
PROTECTION ABRITE	SERVICE S1		
BALAI MARQUE CARBONE LORRAINE	QUAL + é CG65		
EXC SEPARÉE	V 120		A
20 X 10			

Tabla C.8: Primo motor de Micromáquina de Polos Salientes: Datos de placa.

ENCO	PRIMO MOTOR A		
94 CHOISY LE ROI. FRANCE	CORRIENTE CONTINUA		
TIPO F5P	No. 175434		
PUISS ce 6GV	122 V	46 A	
T 1500	ISOL + E	ECH + 75 °C	
PROTECCION ABIERTA	SERVICE S1		
EXC SERIE SEPARADA	V 180	A 07	
BALAI MARQUE MARSHALL	QUAL + e FG236		
8X20X32			

Tabla C.9: Taco generador de Micromáquina de Polos Salientes: Datos de placa.

RADIO - ENERGIE	
91 - MASSY	
TYPE RS1 25 / REO 444	
No. 380 327	tr / mn 1500
VOLTS 2 X 58	A 0.07
VOLTS 90	A

Tabla C.10: Micromáquina de Polos Lisos: Datos de placa.

ZENCO	ANCIENS AT EVE & NOIZET	PARIS	
TYPE M20 AT1	No. 146884		
PUISS ce	V 190/1250	A	
TM 1500	COS ℓ 0.8	C + Y	PH 3
ISOL + B	ECH + 80 °c	Hz 50	
PROTECTION ABRITE	SERVICE S1		
BALAI MARQUE CARBONE LORRAINE	QUAL + é CG65		
EXC SEPARÉE	V 120		A

Tabla C.11: Primo motor de Micromáquina de Polos Lisos: Datos de placa.

ENCO		PRIMO MOTOR A	
94 CHOISY LE ROI. FRANCE		CORRIENTE CONTINUA	
TIPO F5P		No. 175435	
PUISS ce 6GV	122 V	A 46	
T 1500	ISOL + E	ECH + 75 °C	
PROTECCION ABIERTA		SERVICE S1	
EXC SERIE SEPARADA	V 180	A 07	
BALAIS MARQUE MARSHALL		QUAL + e FG236	
8X20X32			

Tabla C.12: Taco generador de Micromáquina de Polos Salientes: Datos de placa.

RADIO - ENERGIE	
91 - MASSY	
TYPE RS1 25 / REO 444	
No. 380 327	tr / mn 1500
VOLTS 2 X 58	A 0.07
VOLTS 90	A

APÉNDICE D:

COSTOS DE MATERIAL Y COMPONENTES DEL MEDIDOR DE ÁNGULO DE CARGA

En la tabla E1 se presenta el costo de cada uno de los componentes usados para la fabricación del diseño y prototipo del medidor de ángulo de carga.

Tabla E1: Costos de material y componentes del prototipo de ángulo de carga en pesos mexicanos

Cantidad	Nombre	Especificaciones	Costo unitario	Costo Total
1	LM741	Comparador de tensión	6	6
1	LM311	Detector de cruce por cero	15	15
1	74ls132	Compuertas NAND	9	9
1	DAC0800	Convertidor Digital-Analógico	38	31
1	QRD114	Opto acoplador	25	25
1	MSP430f2274	Microcontrolador con interfaz	543	543
1	eZ430f2013	Programador	310	310
7	Bornes	Bornes para Conexión	8	56
2	Bases	8pines	5.50	11
1	Base	14pines	9	9
1	Base	16pines	10.50	10.50
1	Base	38pines	16.50	16.50
1	7805	Regulador de voltaje	10.50	10.50
1	Lf33	Regulador de voltaje	22	22
1	Transformador	127V/12V	69	69
5	Capacitores	0.01 μ f	3	15
5	Resistencias de Precisión	5 k Ω	10	10
5	Resistencias de Precisión	7.5 k Ω	10	10
5	Resistencias de Precisión	10 k Ω	10	10
5	Resistencias de Precisión	180 Ω	10	10
2	Disipadores de calor	Tipo araña	7	14
1	Placa	Universal	45	45
1	Tubo	Soldadura	15	15
1	Maya	Desoldadora	23	23
5	Metros	Alambre	2	10
			Subtotal	1305.50
			I.V.A	208.88
			TOTAL	1514.38