

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**SINCRONIZADOR AUTOMÁTICO DIGITAL PARA EQUIPO DE
LAB-VOLT**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

ING. EDSON JAVIER MARES BAUTISTA
G08071577

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ



"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

Cd. Madero, Tamps; a **05 de Junio de 2017.**

OFICIO No.: U2.062/17
ÁREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

ING. EDSON JAVIER MARES BAUTISTA
NO. DE CONTROL G08071577
PRESENTE

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
SECRETARIO :	M.C. HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
VOCAL :	M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
SUPLENTE :	DR. PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
DIRECTOR DE TESIS :	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"SINCRONIZADOR AUTOMÁTICO DIGITAL PARA EL EQUIPO DE LAB-VOLT"

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta, esperando que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"®

DRA. ADRIANA ISABEL REYES DE LA TORRE
JEFA DE LA DIVISIÓN



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

c.c.p.- Minuta
Archivo

AIRT'RCG' 'mdcoa*



Ave. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz Col. Los Mangos, C.P. 89440 Cd. Madero, Tam.
Tel. (833) 357 48 20. e-mail: itcm@itcm.edu.mx
www.itcm.edu.mx



Dedicatoria

***A mi madre María Concepción Bautista, por su apoyo,
motivación y amor incondicional.***

***A mis hermanos, Eder, Verónica y Rubí por su cariño y
apoyo en esta etapa de mi vida.***

***A mis sobrinos Santiago, Eduardo Caleb y Vania por
ser fuente de inspiración para lograr este objetivo.***

***A mi abuelo Cirenio Bautista de la Rosa por su apoyo
para lograr este objetivo.***

***A mis amigos que me proporcionaron
palabras de apoyo durante mis estudios.***

Agradecimientos

A Dios porque es el principio y el fin de todas las cosas y darme la oportunidad de vivir cada uno de estos días para cumplir este objetivo.

A mi madre María Concepción Bautista por todo su apoyo, amor y motivación a lo largo de toda esta etapa de mi vida.

A mis hermanos, por su apoyo.

A mi abuelo Cirenio Bautista de la Rosa, aunque ya no se encuentre entre nosotros está presente en mí corazón.

Me gustaría agradecer enormemente a mi asesor M.C. Rafael Gutiérrez Castillo y a mí Co-asesor M.C. Aaron Gonzales, por la paciencia, confianza y apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo de Tesis. Gracias por brindarme parte de su tiempo para instruirme con grandes ideas y motivación.

A mis grandes amigos, Eduardo Daniel, Anselmo Martínez, José Inés y Noe Román por el apoyo y motivación ante las adversidades para concluir esta etapa de mi vida y contribuir de alguna manera en la elaboración de este proyecto.

A Erick Pecero practicante de la maestría por su apoyo en la elaboración de los interruptores en PCB.

A todos los profesores de la maestría en ingeniería eléctrica, por todos los conocimientos que me impartieron a lo largo de mi estancia en la maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado durante 2 años una beca para realizar mis estudios de maestría.

Sincronizador Automático Digital para el equipo de LAB-VOLT.

Ing. Edson Javier Mares Bautista

Resumen

Este trabajo presenta información relevante para el diseño y construcción de un sincronizador automático digital para el equipo de LAB-VOLT. El sincronizador trabaja con un sistema de generación a escala formado por un generador síncrono acoplado a un motor de impulsión de corriente directa y un sistema trifásico que proporciona CFE.

Los sincronizadores automáticos son ampliamente utilizados para conectar más de un generador síncrono, la tarea principal del sincronizador es capturar el voltaje, la frecuencia y la diferencia de fase entre los sistemas de generación de forma rápida y precisa. Esta tesis presenta un sincronizador automático digital basado en el Launch Pad MSP430G de Texas Instruments, el dispositivo consiste de 3 partes. La primera parte es la etapa de adquisición de datos, que captura el voltaje, la frecuencia y la diferencia de fase para cada uno de los sistemas de generación, la segunda parte es un gobernador de velocidad, que maneja la velocidad del motor del equipo de LAB-VOLT y la tercera parte es un interruptor que conecta los dos sistemas de generación basado en dispositivos electrónicos de potencia (MOSFET).

El sincronizador automático digital desarrollado es confiable y preciso para el monitoreo y las mediciones para el proceso de sincronización del equipo de LAB-VOLT.

Digital Automatic Synchronizer to LAB-VOLT equipment.

Ing. Edson Javier Mares Bautista

Abstract

This work presents relevant information for the design and construction of a digital automatic synchronizer to LAB-VOLT equipment. The synchronizer works with a small-scale generation system, consists of a synchronous generator coupled to a direct current motor and a three-phase system that CFE provides.

Automatic synchronizers are widely employed to connect more than one synchronous generator, the main task of the synchronizer is to capture the voltage, frequency and phase differences between the generation systems accurately and rapidly. This thesis introduces a digital automatic synchronizer based on Launch Pad MSP430G of Texas Instruments, the device consists of three parts. The first part is data acquisition module that capture the voltage, frequency and the phase difference for each of the generation systems, the second part is a speed governor that controls the speed of motor LAB-VOLT equipment and the third part is a circuit breaker to connect both generation systems, based on electronic power devices (MOSFET).

The developed digital automatic synchronizer is reliable and precise for the monitoring and measuring for the synchronization of LAB-VOLT equipment.

Índice

	<i>Página</i>
Dedicatoria.....	I
Agradecimientos.....	II
Resumen.....	III
Abstract.....	IV
Lista de Figuras.....	IX
Lista de Tablas	X
Capítulo 1: Introducción.	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.1.1. Historia de los sistemas eléctricos de potencia	2
1.1.2. Sincronización Automática	2
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Hipótesis.....	4
1.6. Alcances y limitaciones.....	5
1.6.1. Alcances.....	5
1.6.2. Limitaciones.....	5
Referencias del capítulo.....	6
Capítulo 2: Generalidades de la maquinaria eléctrica.	8
2.1. Máquina Síncrona.....	9
2.1.1. Generador síncrono.....	9
2.1.1.1. Descripción del generador síncrono.....	9
2.1.1.2. Circuito equivalente de un generador síncrono.....	10
2.1.1.3. Generador síncrono que opera solo.....	10
2.2. Motor de corriente directa.....	12
2.2.1. Arranque de un motor de CD.....	13
2.2.2. Circuito equivalente de un Motor de CD.....	14
2.3. Descripción del módulo: Motor-Generador de LAB-VOLT.....	14

Capítulo 3: Sincronización	16
3.1 Sincronización.....	17
3.2. Operación de los generadores en paralelo.....	17
3.3 Condiciones requeridas para operar en paralelo.....	19
3.3.1. Condición de voltajes iguales en los dos generadores.....	21
3.3.2. Condición de misma secuencia de fases.....	23
3.3.3. Condición de ángulo de las dos fases a', b' y c' deben ser la misma....	23
3.3.4 Condición de la frecuencia en los dos generadores.....	24
3.4 Procedimiento general para conectar dos generadores en paralelo.....	25
3.5 Sincronización automática.....	26
3.6 Efectos de un error de sincronización.....	27
3.7 Operación de generadores en paralelo con grandes sistemas de potencia.....	28
3.8 Operación de generadores en paralelo con otros generadores de igual tamaño	29
Referencias del capítulo.....	33
Capítulo 4: Diseño del prototipo	34
4.1. Descripción del prototipo.....	38
4.2. Microcontrolador MSP430G.....	41
4.3. Etapa de adquisición de datos.....	44
4.3.1. Sensor de voltaje.....	45
4.3.1.1. Principio de operación.....	47
4.3.1.2. Circuitería del sensor de voltaje.....	49
4.3.1.3. Descripción de la configuración del ADC10 del MSP430G.....	51
4.3.1.4. Algoritmo de programación del MCU para el sensor de voltaje.....	53
4.3.2. Sensor de frecuencia.....	54
4.3.2.1. Principio de operación.....	55
4.3.2.1. Circuitería del sensor de frecuencia.....	58
4.3.2.3. Algoritmo de programación del MCU para el sensor de frecuencia...	60
4.3.3. Sensor de diferencia de ángulo de fase.....	63
4.3.3.1. Principio de operación.....	65
4.3.3.2. Circuitería del sensor de diferencia de fase.....	68
4.3.3.3. Descripción de los modos de operación del timer_A del MSP430G...	71
4.3.3.4. Algoritmo de programación del MCU para el sensor de ángulo.....	74
4.3.4. Comunicación UART.....	77
4.4. Diseño del gobernador de velocidad.....	80
4.5. Diseño de un interruptor trifásico.....	84

Capítulo 5: Conclusiones	85
5.1. CONCLUSIONES	86
5.2. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	87

Lista de Figuras

	<i>Página</i>
Figura 2.1 Devanado de estator y voltajes inducidos en el generador	14
Figura 2.2 Gráfica de flujo contra la corriente de campo del generador	15
Figura 2.3 Sistema de potencia.....	17
Figura 2.4 Generador trifásico elemental.....	19
Figura 2.5 Generador trifásico de rotor cilíndrico.....	19
Figura 2.6 Circuito equivalente del generador síncrono.....	21
Figura 2.7 Circuito equivalente monofásico del generador síncrono.....	22
Figura 2.8 Curva de velocidad contra la potencia en un motor primario.....	24
Figura 2.9 Un generador que alimenta una carga.....	24
Figura 2.10 Circuito equivalente de un motor de CD.....	25
Figura 2.11 Sistema de generación implementado.....	26
Figura 2.12 Generador síncrono.....	26
Figura 3.1 Diagrama vectorial de las variables de sincronización.....	28
Figura 3.2 Generador que se sincroniza a un sistema de potencia.....	30
Figura 3.3 Comparación de voltajes en la red.....	32
Figura 3.4 Las dos secuencias de fases posibles de un sistema trifásico.....	33
Figura 3.5 Generadores de igual número de fases.....	35
Figura 3.6 Método de las lámparas.....	36
Figura 3.7 Sincronoscopio.....	37
Figura 3.8 Sincronización Automática.....	39
Figura 3.9 Curvas de bus infinito.....	41
Figura 3.10 Generador síncrono que opera en paralelo con bus infinito.....	43
Figura 3.11 Diagrama de frecuencia contra la potencia en la conexión.....	45
Figura 3.12 Diagrama de frecuencia contra la potencia en vacío.....	46
Figura 3.13 Efecto en el sistema debido al incremento en los puntos de ajuste....	47
Figura 3.14 Efecto en el sistema debido al incremento de la corriente de campo..	48
Figura 3.15 Cambio en la distribución de potencia sin afectar la frecuencia.....	49
Figura 3.16 Cambio de la distribución de la potencia reactiva.....	51
Figura 4.1 Diagrama a bloques del sincronizador automático digital.....	54
Figura 4.2 Configuración de pines del MSP430G2553.....	55
Figura 4.3 Diagrama a bloques de cada sensor diseñado.....	56
Figura 4.4 Circuitería del sensor de voltaje.....	57
Figura 4.5 Grafica de la regresión lineal de VCA y VCD.....	59

Figura 4.6	Diagrama de flujo del sensor de voltaje.....	61
Figura 4.7	Circuitería del sensor de frecuencia.....	63
Figura 4.8	Grafica de linealidad de RPM contra VCD.....	65
Figura 4.9	Circuitería del sensor de frecuencia.....	69
Figura 4.10	Diferencia de fase entre dos señales.....	71
Figura 4.11	Convertidor de onda senoidal a cuadrada.....	74
Figura 4.12	La salida del convertidor de onda cuadrada.....	76
Figura 4.13	Parte del circuito de la diferencia de fase.....	76
Figura 4.14	Configuración de pines del flip-flop 74ls76.....	78
Figura 4.15	Configuración de pines de la compuerta XOR.....	79
Figura 4.16	Grafica del ángulo de fase sin/con flip-flop.....	79
Figura 4.17	Grafica de cada una de las señales obtenidas.....	81
Figura 4.18	Circuitería del sensor de diferencia de fase.....	82
Figura 4.19	Diagrama de flujo del sensor de diferencia de fase.....	83
Figura 4.20	Lauch Pad MSP430G2553.....	84
Figura 4.21	Conexión utilizando el protocolo UART.....	86
Figura 4.22	Conexión de jumpers para operar el protocolo.....	86
Figura 4.23	Pantalla LCD 20x4 y configuración.....	87
Figura 4.24	Tarjeta PCI6024E.....	88
Figura 4.25	Diagrama de conexiones del controlador.....	88
Figura 4.26	Señal de velocidad en el lazo abierto.....	89
Figura 4.27	Programa a bloques del gobernador de velocidad en RTAI.....	91
Figura 4.28	Diagrama general del interruptor.....	91
Figura 4.29	Configuración de la fuente flotante.....	92
Figura 4.30	Circuitería de los interruptores.....	93

Lista de Tablas

		<i>Página</i>
Tabla 3.1	Señales de un sincronoscopio.....	32
Tabla 4.1	Relación de voltaje alterno y el voltaje directo que captura el ADC...	48
Tabla 4.2	Tabla de comparación de voltaje	54
Tabla 4.3	Tabla de lecturas tomadas de RPM contra voltaje de CD.....	64
Tabla 4.4	Tabla de comparación del sensor de frecuencia.....	74
Tabla 4.5	Tabla del baud-rate para MSP430G2553.....	78
Tabla 4.6	Muestras RPM del motor de impulsión.....	81

Capítulo

1

Introducción

En este capítulo se muestra una introducción del trabajo realizado, en el cual se presentan los antecedentes, planteamiento del problema, justificación, así como los objetivos, limitaciones y alcances del mismo.

1.1. Antecedentes.

En 1878, Thomas A. Edison empezó a trabajar en el alumbrado eléctrico y formuló el concepto de una estación de energía ubicada centralmente, con un alumbrado distribuido que diera servicio a un área circundante. En octubre de 1879, perfeccionó su alumbrado y la apertura de su histórica Estación de Pearl Street en la ciudad de Nueva York, el 4 de septiembre de 1882, marcó el principio de la industria eléctrica. En Pearl Street, los generadores de cd, conocidos entonces como dínamos, eran impulsados por máquinas de vapor, para alimentar una carga inicial de 30 kW para lámparas incandescentes de 110 V, para 59 clientes en un área de una milla cuadrada. Desde este inicio en 1882 hasta 1972, la industria eléctrica creció a un ritmo notable; un crecimiento basado en reducciones continuas en el precio de la electricidad, debido principalmente a los logros tecnológicos y a la creatividad de la ingeniería.

1.1.1. Historia de los sistemas eléctricos de potencia. [1]

La introducción del motor práctico de CD, por parte de la Sprague Electric, así como el crecimiento del alumbrado incandescente, promovió la expansión de los sistemas de CD de Edison. El desarrollo de sistemas de CD de 220 V, de tres conductores, permitió incrementar un poco la carga, pero a medida que las distancias de transmisión y las cargas siguieron creciendo, aparecieron problemas con el voltaje. Estas limitaciones de distancia y carga máximas fueron superadas en 1885, con el desarrollo de William Stanley de un transformador comercialmente práctico. Stanley instaló un sistema de distribución de CA en Great Barrington, Massachusetts, para alimentar 150 lámparas. Con el transformador, la capacidad de transmitir energía eléctrica a alta tensión, una corriente más baja y con caídas más bajas en la tensión de línea, hicieron más atractiva la CA que la CD. La primera línea monofásica de CA se puso en operación en Estados Unidos en 1889, en Oregon. Entre la ciudad de Oregon y Portland; 21 km a 4 kV.

El crecimiento de los sistemas de CA se vio impulsado aún más en 1888, cuando Nikola Tesla presentó un artículo en una reunión del American Institute of Electrical Engineers describiendo los motores bifásicos, de inducción y síncronos, lo cual hizo

evidentes las ventajas de los sistemas polifásicos en comparación con los monofásicos. La primera línea trifásica se puso en operación en Alemania, en 1891, transmitiendo energía eléctrica a 179 km, a 12 kV. En Estados Unidos, la primera línea trifásica se puso en operación en 1893, transmitiendo energía a 12 km. a 2.3 kV. El motor trifásico de inducción, concebido por Tesla, se convirtió en el caballo de trabajo de la industria.

En el mismo año en que se inauguraron los generadores impulsados por vapor de Edison, se instaló un generador impulsado por una turbina hidráulica en Appleton, Wisconsin. Desde entonces, la mayor parte de la energía eléctrica se ha generado en plantas accionadas por vapor y por turbinas hidráulicas. En la actualidad, las turbinas de vapor representan más de 85% de la generación de energía eléctrica en Estados Unidos, en tanto que las turbinas hidráulicas significan el 7%. En algunos casos se usan turbinas de gas para satisfacer cargas punta.

Empezando en la década de 1990, la selección del combustible para nuevas plantas generadoras en Estados Unidos era el gas natural. La turbina que quema gas es segura, limpia, más eficiente que las de tecnologías que compiten con ella y no genera controversias. Desde 2001, la tendencia hacia el gas natural se ha acelerado. Se estima que se están desarrollando 200 plantas grandes cuyo combustible es el gas, lo que representa de 75 a 90% de la expansión planeada en Estados Unidos. Sin embargo, el aumento en los precios del gas natural puede disminuir esta tendencia.

Se están usando otros tipos de generación de energía eléctrica, incluyendo generadores de turbina de viento: plantas geotérmicas, en donde se extrae la energía de la corteza terrestre superior en forma de vapor o de agua caliente; arreglos de celdas solares, y plantas en donde se aprovechan las mareas. No se pueden ignorar estas fuentes de energía, pero no se espera que suministren un gran porcentaje de las necesidades futuras de energía en el mundo. Por otra parte, la energía proveniente de la fusión nuclear podría hacerlo. Esfuerzos sustanciales de investigación han demostrado que la energía proveniente de la fusión nuclear es una tecnología que promete producir energía eléctrica segura, sin contaminación y económica a finales del siglo XXI y más allá. El combustible que se

consume en una reacción de fusión nuclear es el deuterio, del cual un suministro casi inagotable se encuentra en el agua de mar.

Los primeros sistemas de CA se operaron a diversas frecuencias, incluyendo 25, 50, 60 y 133 Hz. En 1891 se propuso que la de 60 Hz fuera la frecuencia estándar en Estados Unidos. En 1893 se introdujeron los sistemas de 25 Hz, con convertidor síncrono. Sin embargo, estos sistemas se usaron principalmente para electrificación de los ferrocarriles (y, en la actualidad, muchos salieron de servicio) porque tenían la desventaja de hacer parpadear a las lámparas Incandescentes. En California. El Departamento de Agua y Energía de Los Ángeles operó a 50 Hz, pero fue convertido a 60 Hz cuando, en 1937, entró en operación y se recibió la energía eléctrica de la Presa Hoover. En 1949, la Southern California Edison también se convirtió de 50 a 60 Hz. En la actualidad, las dos frecuencias estándar para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica en el mundo son de 60 Hz (en Estados Unidos, Canadá, Brasil) y 50 Hz (en Europa, las antiguas repúblicas soviéticas, Sudamérica, excepto Brasil, India, etc.). La ventaja de los sistemas de 60 Hz es que, en estos sistemas, los generadores, motores y transformadores en general son más pequeños que el equipo de 50 Hz con las mismas capacidades nominales. La ventaja de los sistemas de 50 Hz es que las líneas de transmisión y los transformadores tienen reactancias menores en ellos que en los de 60 Hz.

1.1.2. Sincronización automática. [2]

Un sistema de energía eléctrica se compone principalmente de un generador, líneas de transmisión que suministran un gran número de cargas ampliamente distribuidas. En muchos casos, existe la necesidad de conectar más de un generador al sistema. Algunos de los beneficios de operar varios generadores en paralelo incluyen el aumento de la fiabilidad, capacidad de ampliación, flexibilidad, servicio y eficiencia. El funcionamiento en paralelo permite que los generadores operen con alta eficiencia.

Paralelar un generador es una operación frecuente y esencial en el sistema de potencia. Para conectar dos generadores síncronos al sistema, los dos generadores primero deben estar sincronizados por un sincronizador automático. Un daño severo a los generadores, así como alteraciones al sistema puede resultar si se permite que los generadores sean conectados al sistema fuera de los niveles establecidos.

Existen muchos métodos disponibles para la medición de los parámetros del generador para su sincronización; la mayoría de ellos se pueden clasificar en métodos basados en hardware o métodos basados en software. Cada método tiene sus propias características. Con el basado con hardware los parámetros del generador se miden por un circuito de hardware especial, mientras que, por el método basado en software, los parámetros se estiman mediante la adquisición de datos y el procesamiento digital.

La pasada filosofía para llevar a cabo la sincronización era efectuada por un relé de verificación de estado sólido. Este relé estaba configurado para evitar que el interruptor del generador se cerrara a menos que el ángulo de fase y el voltaje estuvieran dentro de los niveles aceptables. Sin embargo, el relé de verificación de sincronización no proporcionaba protección de la frecuencia. La protección para la frecuencia se realizaba manualmente por un operador mediante un sincronoscopio, se observaba la diferencia de frecuencias hasta que estuviera adentro de los límites permitidos. El principal inconveniente de este método era que se necesitaba un personal bien entrenado y estaba sujeta a errores humanos.

En la actualidad, los diseños de un dispositivo de sincronización automática adoptan principalmente varios tipos de controladores como PLC, microcontroladores y DSP. Un sistema de sincronización automático digital fue desarrollado usando sensores y un PLC en la unidad de control, pero esto incrementaba el costo del sistema.

Un sistema de sincronización automática basado en microcontroladores, la unidad de control lee, calcula y evalúa la frecuencia, el voltaje, la secuencia de fase de las señales de entrada recibidas y luego proporciona la sincronización para el monitoreo de las condiciones de conexión en paralelo y la operación de los generadores. El programa codificado en el microcontrolador es desarrollado para eliminar eficazmente los circuitos electrónicos de la interfaz del sistema.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Para llevar a cabo el proceso de sincronización de dos generadores se requieren algunas condiciones, las tales son:

- Deben ser iguales los voltajes de línea rms de los dos generadores.
- Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase
- La diferencia de ángulo de fase debe ser 0.
- La frecuencia del generador nuevo denominado “generador de aproximación” debe ser un poco mayor a la frecuencia del sistema en operación.

Si no se cumple alguna de estas condiciones se causarían grandes daños a los generadores que estén en este proceso y al sistema.

Dicho proceso se realizaba por operadores bien entrenados que efectuaban el proceso de sincronización de los generadores. Al paso del tiempo surge la necesidad de realizar este proceso de manera automática, debido a que una sincronización manual efectuada por los operadores en ocasiones se producían fallas al efectuar este proceso, por tal razón es más eficiente llevarlo a cabo mediante un sincronizador automático.

En este trabajo se diseñará e implementará dicho dispositivo, que cumpla con las condiciones para llevar a cabo el proceso de sincronización de los generadores para el equipo de LAB-VOLT. Este dispositivo se realizará con la ayuda de dispositivos digitales tales como microcontroladores y dispositivos electrónicos de potencia.

1.3. Justificación.

En los sistemas eléctricos de potencia es muy raro encontrar un generador eléctrico suministrando independientemente su propia carga, esta situación solo se encuentra en algunas aplicaciones que se salen de lo normal tales como los generadores de emergencia, en todas las demás aplicaciones se requiere de más de un generador que opera en paralelo para suministrar la potencia que requiere una carga, operar múltiples generadores en paralelo nos brinda muchos beneficios al sistema tales como el aumento de la fiabilidad, capacidad de ampliación, flexibilidad, servicio y eficiencia. Para llevar a cabo dicho proceso de interconectar generadores, se requiere de un sincronizador automático que lleve a cabo este proceso y que sustituya la sincronización manual de los generadores, en este trabajo se diseñará e implementará dicho dispositivo para el equipo LAB-VOLT.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo General.

Diseñar e implementar un sincronizador automático para generadores eléctricos para el equipo LAB-VOLT.

1. 4.2. Objetivos específicos.

- Diseño del algoritmo de sensado y acondicionamiento de señales.
- Implementación de la etapa de adquisición de datos.
- Implementación de hardware para el prototipo del sistema
- Realizar pruebas ante condiciones de carga y durante su operación.

1.5. Hipótesis.

Es posible sincronizar dos generadores eléctricos mediante un sincronizador automático digital basado en microcontroladores y dispositivos electrónicos potencia. El sincronizador analiza 3 parámetros para llevar a cabo este proceso de sincronizar dos generadores eléctricos los cuales son: el voltaje, el ángulo de fase y la frecuencia.

1.6 Alcances y limitaciones.

1.6.1. Alcances.

Utilizando componentes electrónicos más robustos, este sincronizador automático podría implementarse para sistemas de generación eléctrica más grandes.

1.6.2 Limitaciones.

El sincronizador automático estará diseñado exclusivamente para el equipo LAB-VOLT. El dispositivo solo sensorá y conectará, no habrá control en la máquina.

REFERENCIAS.

- [1] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, *Sistemas de Potencia, análisis y diseño*, tercera edición, Thompson 2004.
- [2] Ahmad I. Abo Dabowsa, *Design of an Automatic Synchronizing Device for Dual Electrical Generators Based on CAN Protocol*, the Islamic University of Gaza, Junio 2011.

Capítulo

2

Generalidades de la maquinaria eléctrica.

En este capítulo se aborda el tema de la maquinaria eléctrica que se utilizó en este trabajo de investigación, para construir un sistema de generación a escala utilizando el equipo de LAB-VOLT. El sistema de generación propuesto para este trabajo consta de un motor de CD de 175 W, el cual servirá como turbina, acoplado a un generador trifásico síncrono de 120 VA. Primero se toman conceptos básicos sobre la máquina síncrona en función de generador, también la descripción de la misma como su circuito equivalente. Después se habla sobre el motor de corriente directa definición, características y circuito equivalente.

2.1 MÁQUINA SÍNCRONA. [1]

La máquina síncrona es de gran versatilidad, puede funcionar tanto como motor o como generador, por la forma constructiva del sistema de excitación, las máquinas sincrónicas se clasifican en máquina de polos salientes y la máquina de rotor cilíndrico.

La utilización de uno u otro depende fundamentalmente de las velocidades en las cuales trabajan, generalmente las máquinas de bajo número de polos se caracterizan por tener alta velocidad y estas son las máquinas de rotor cilíndrico, ocurriendo lo contrario con las máquinas con elevado número de polos que son de bajas velocidades, este es el caso de las máquinas de polos salientes. El rotor cilíndrico se usa principalmente como generador mientras la mayor parte de motores síncronos son de tipo polos salientes.

Como principio las máquinas rotativas, consta de una parte llamada estator y una parte móvil llamada rotor, que conforman el circuito magnético de la máquina. En el estator está ubicada la armadura y en ella se tiene corriente alterna trifásica.

2.1.1 Generador síncrono. [2]

Los generadores sincrónicos o alternadores son máquinas eléctricas utilizadas para convertir la potencia mecánica en potencia eléctrica de CA; estos son por definición, sincrónicos, lo cual significa que la frecuencia eléctrica producida está fijada o sincronizada con la velocidad mecánica de rotación del generador. En la figura 2.1a cuando la corriente de campo I_f fluye a través del campo del rotor, establece un campo sinusoidal distribuido en el entrehierro. Si el rotor es ahora girado por medio de una máquina prima (la cual puede ser una turbina, máquina de diésel, motor de CD o motor de inducción), un campo giratorio es producido en el entrehierro. Este campo es producido como excitación, porque es producido por la corriente de excitación I_f . Este campo producido cambiará el flujo en los devanados de la armadura aa' , bb' , cc' e inducirá voltajes en los devanados del estator. Estos voltajes inducidos como se muestra en la figura 2.1b, tienen la misma magnitud, pero están desfasados 120° eléctricos.

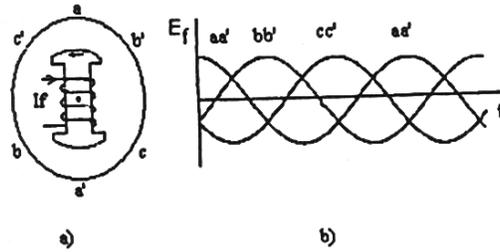


Figura 2.1 a) Devanado de estator. b) Voltajes inducidos en los devanados del estator del generador síncrono.

La velocidad de giro del rotor y la frecuencia del voltaje inducido están relacionadas por:

$$f = \frac{n * p}{120} \quad (2.1)$$

Dónde:

f = frecuencia eléctrica en Hz.

n = velocidad de giro del rotor en rpm.

p = número de polos de la máquina.

Debido a que el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético, esta ecuación relaciona la velocidad de rotación del rotor con la frecuencia eléctrica resultante. La potencia eléctrica se genera a 50 o 60 Hz, por lo que el generador debe girar a una velocidad fija dependiendo del número de polos de la máquina. Por ejemplo, para generar una frecuencia de 60 Hz en una máquina de dos polos el rotor debe girar a 3600 r/min. Para generar una potencia de 50 Hz en una máquina de 4 polos, el rotor debe girar a 1500 r/min. La tasa requerida para cierta frecuencia siempre se puede calcular a partir de la ecuación (2.1).

La ecuación del voltaje generado internamente en el generador es:

$$E_f = 4.44f\phi_fNK_w \quad (2.2)$$

Dónde:

ϕ_f = es el flujo por polo debido a la corriente de excitación I_f .

N = Número de vueltas en cada fase.

K_w = Es un factor del embobinado.

La tensión generada interna, E_f es directamente proporcional al flujo y a la velocidad, pero el flujo depende de la corriente del circuito de campo. La corriente de campo I_f está directamente relacionada con el flujo ϕ_f de la manera mostrada en la figura 2.2a.

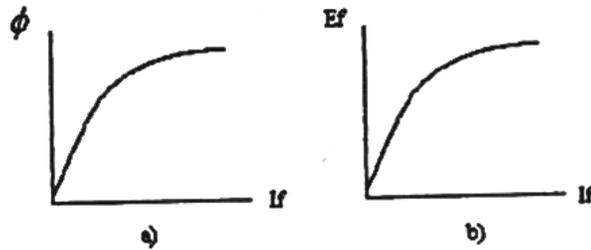


Figura 2.2 a) Grafica de flujo versus corriente de campo del generador síncrono, b) curva de magnetización del generador síncrono.

Como E_f es directamente proporcional al flujo, este se relaciona con la corriente de campo en la forma descrita por figura 2.2b la cual se conoce como curva de magnetización.

La tensión E_f es el voltaje generado internamente, producido en una fase del generador síncrono. Sin embargo, este voltaje E_f normalmente no es igual al que aparece en las terminales del generador.

Hay factores que dan lugar a la diferencia entre E_f y voltaje en las terminales del generador:

- La distorsión del campo magnético del entrehierro causada por la corriente que fluye en el estator llamada reacción del inducido.
- Las autoinductancias de las bobinas de la armadura.
- La resistencia de las bobinas de la armadura.
- El efecto de la forma del rotor de polos salientes.

Por lo general los generadores tienen un rango de capacidad típico que está entre los 20 MVA y 1200 MVA. Están localizados en plantas generadoras como se muestra en la figura 2.3 en un sistema de potencia que puede contener uno o más de estas unidades. [3]

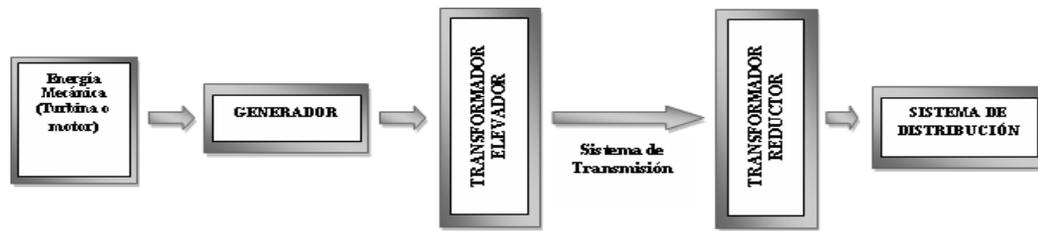


Figura 2.3 Sistema de potencia.

2.1.1 .1 Descripción del generador síncrono.

Las dos partes principales de una máquina síncrona son estructuras ferromagnéticas. La parte estacionaria, que es esencialmente un cilindro hueco, se llama estator o armadura, y tiene ranuras longitudinales en las que hay bobinas del devanado de armadura. Estos devanados llevan la corriente suministrada a la carga eléctrica por el generador, o la corriente recibida por un motor desde una fuente de CA. El rotor es la parte de la máquina que se monta sobre una flecha y rota dentro del estator hueco. El devanado sobre el rotor, llamado devanado de campo se combina con la fmm producida por las corrientes en los devanados de la armadura. El flujo resultante en el entrehierro, o espacio de aire que hay entre estator y rotor, genera voltajes en las bobinas de los devanados de la armadura y da el par electromagnético entre el estator y el rotor [4].

Se suministra la corriente de CD al devanado de campo por medio de un excitador, que puede ser un generador montado sobre la misma flecha y una fuente de CD separada conectada a los devanados de campo por medio de escobillas sobre anillos deslizantes. Generalmente, los grandes generadores de CA tienen excitadores que consisten en una fuente de CA con rectificadores de estado sólido [4].

El par electromagnético desarrollado en el generador cuando entrega potencia, se opone al par de la fuente de energía mecánica. La diferencia entre estos dos pares se debe a las pérdidas en el núcleo de acero y a la fricción. En un motor, el par electromagnético que

se desarrolla en la máquina (excepto por las pérdidas por fricción y núcleo) se convierte en el par de la flecha que impulsa la carga mecánica [4].

En la figura 2.4 se muestra un generador trifásico muy elemental. El devanado de campo (indicado por la bobina f) da lugar a los polos señalados como N y S. El eje de los polos de campo se llama eje directo o eje d , mientras la línea en el centro del espacio entre polos se denomina eje de cuadratura o simplemente eje q . Como se muestra, la dirección positiva a lo largo del eje d adelanta 90° a la dirección positiva a lo largo del eje q . El generador de la figura 2.5 se llama máquina no saliente o de rotor cilíndrico porque tiene un rotor con esta forma. En las máquinas reales, los devanados tienen un gran número de vueltas distribuidas en las ranuras alrededor de la circunferencia del rotor. El intenso campo magnético producido enlaza las bobinas del estator para inducir un voltaje en los devanados de la armadura, en la medida que la flecha es impulsada por la fuente de energía mecánica.

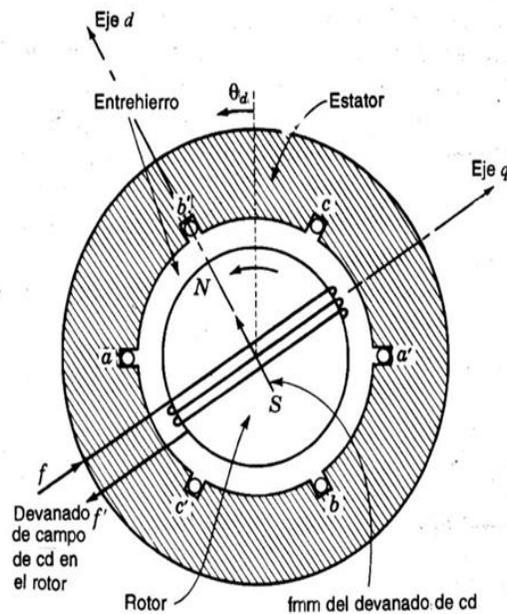


Figura 2.4 Generador trifásico elemental.

La sección transversal del estator se muestra en la figura 2.4. Los lados opuestos de una bobina que casi es rectangular están en las ranuras a y a' separadas 180° . Bobinas similares están en las ranuras b y b' , c y c' . Los lados de las bobinas en las ranuras a , b y c

están separadas 120° . Los conductores mostrados en las ranuras indican una bobina de solo una vuelta, pero puede tener muchas vueltas y, por lo general, está en serie con bobinas idénticas en ranuras adyacentes para formar un devanado con las terminales designadas como a y a' . Los devanados con las terminales designadas $b - b'$ y $c - c'$ son iguales al devanado $a - a'$ excepto por su localización simétrica alrededor de la armadura en los ángulos de 120° y 240° , respectivamente [4].

En la figura 2.5 se muestra una máquina de polos salientes que tiene 4 polos. Los lados opuestos de una bobina de la armadura están separados 90° , así que hay dos bobinas para cada fase. Los lados de las bobinas a , b y c de bobinas adyacentes están separadas 60° . Las dos bobinas de cada fase se pueden conectar en serie o en paralelo. Aunque no se muestra en la figura 2.5 las máquinas de polos salientes tienen devanados amortiguadores que consisten en barras de cobre cortocircuitadas y que son similares, a través de la cara polar, a parte de un devanado de tipo “jaula de ardilla” de un motor de inducción. El propósito de devanado amortiguador es el de reducir oscilaciones mecánicas del rotor hasta la velocidad síncrona, que es determinada por el número de polos de la máquina y la frecuencia del sistema a la que está conectada [4].

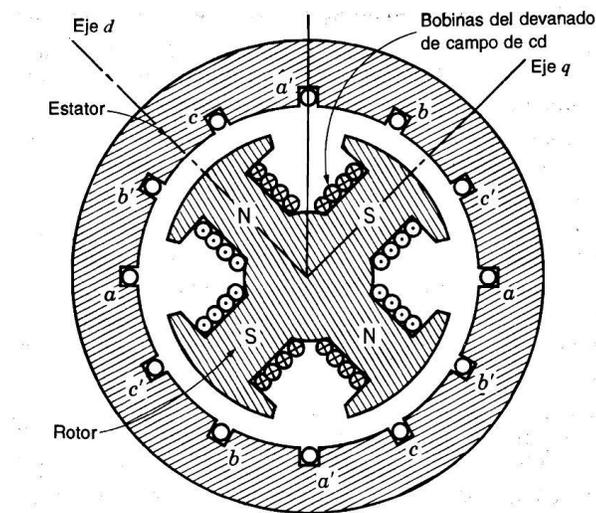


Figura 2.5 Generador trifásico de rotor cilíndrico.

Debido a que un ciclo de voltaje (360° de la onda de voltaje) se genera cada vez que un par de polos pasa por una bobina, se debe distinguir entre los grados eléctricos usados

para expresar el voltaje y la corriente, y los grados mecánicos usados para expresar la posición del rotor.

2.1.1 .2 Circuito equivalente de un generador síncrono. [2]

En la figura 2.6 se puede apreciar el circuito equivalente completo de un generador síncrono trifásico, esta figura muestra una fuente de potencia de cd que suministra potencia al circuito de campo del rotor, que se modela por medio de la inductancia y resistencia en serie de la bobina. Un resistor ajustable está conectado en serie con R_f y este resistor controla el flujo de corriente de campo. El resto del circuito equivalente consta de los modelos de cada fase. Cada fase tiene un voltaje interno generado con una inductancia en serie jX_s (que consta de la suma de la reactancia del inducido y la autoinductancia de la bobina) y una resistencia en serie R_a . Los voltajes y corrientes de las tres fases están separados por 120 grados, pero en todo lo demás son idénticos. Se debe tener en cuenta un factor muy importante cuando se utiliza el circuito equivalente del generador síncrono las tres fases tienen los mismos voltajes y corrientes solo cuando las cargas conectadas a ellas están balanceadas.

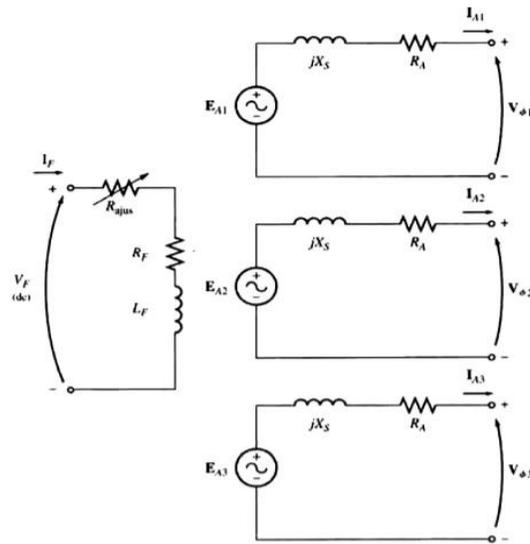


Figura 2.6 Circuito equivalente del generador síncrono trifásico.

La máquina síncrona se puede representar por medio del circuito equivalente monofásico que se muestra en la figura 2.7.

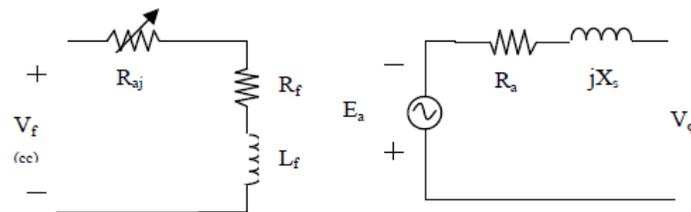


Figura 2.7 Circuito equivalente monofásico de un generador síncrono.

2.1.1.3 Generador síncrono que opera solo. [2]

Todos los generadores son accionados por un motor primario, que es la fuente de potencia mecánica del generador. El tipo más común de motor primario es la turbina de vapor, pero hay otros tipos que incluyen los motores de diésel, las turbinas de gas, las turbinas hidráulicas e incluso las turbinas de viento. Sin que importe la fuente original de potencia, todos los motores primarios tienen a comportarse de manera similar; a medida que la potencia que se toma de ellos se incrementa, la velocidad a la que giran disminuye. Por lo general, este decremento de velocidad es no lineal, pero se incluye algún tipo de

mecanismo regulador para que la disminución de la velocidad sea lineal con el incremento de la demanda de potencia.

Cualquiera que sea el mecanismo regulador presente en el motor primario, siempre se ajusta para suministrar una característica de caída suave con el incremento en la carga. La siguiente ecuación define la caída de velocidad (SD, por sus siglas en inglés) en un motor primario:

$$SD = \frac{n_{sc} - n_{pc}}{n_{pc}} \quad (2.3)$$

Donde n_{sc} es la velocidad del motor primario en vacío y n_{pc} es la velocidad del motor primario a plena carga. La mayoría de los motores primarios tienen una caída de velocidad de 2 a 4%. En la figura 2.8a se muestra una gráfica típica de la velocidad y la potencia. La potencia de salida de un generador síncrono está relacionada con su frecuencia en la figura 2.8 b se puede ver un ejemplo de una gráfica de la frecuencia y la potencia.

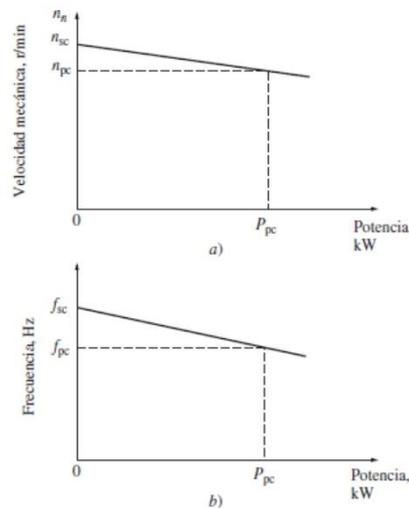


Figura 2.8 a) Curva de velocidad contra potencia en un motor primario. **b)** Curva de frecuencia contra potencia resultante de un generador.

La relación entre la frecuencia y la potencia se puede describir cuantitativamente por medio de la ecuación:

$$P = s_p(f_{sc} - f_{sis}) \quad (2.4)$$

Dónde:

P = La potencia de salida del generador.

f_{sc} = Frecuencia en vacío del generador.

f_{sis} = Frecuencia de operación del sistema.

s_p = Pendiente de la curva, kW/Hz o MW/Hz.

El comportamiento de un generador síncrono con una carga varía mucho dependiendo del factor de potencia y de si el generador opera solo o en paralelo con otros generadores síncronos. Un generador síncrono se arranca inicialmente en vacío, la regulación se realiza a través del potenciómetro que gobierna la velocidad del motor de CD que proporciona la potencia mecánica.

Para entender las características de funcionamiento de un generador síncrono que opera solo, examínese un generador que alimenta una carga. En la figura 2.7 se muestra un solo generador alimentando una carga. ¿Qué pasa cuando se incrementa la carga de un generador?, un incremento de carga es un incremento en la potencia real, reactiva, o ambas, que se obtiene del generador. Un incremento en la carga aumenta la corriente de carga que se obtiene del generador. Debido a que no se ha cambiado el resistor de campo, la corriente de campo es constante y por lo tanto el flujo es constante. Debido a que el motor principal también tiene una velocidad constante la magnitud de voltaje interno generado es constante.

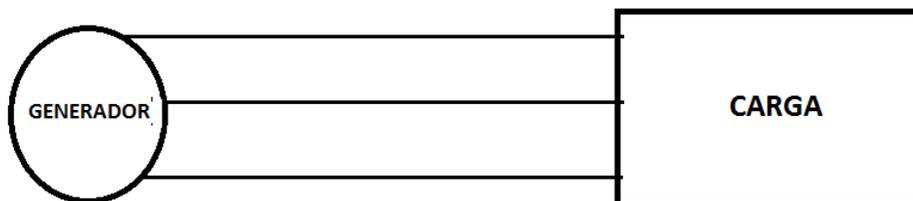


Figura 2.9 *Un solo generador que alimenta una carga.*

Las conclusiones generales de la discusión sobre el comportamiento de los generadores síncronos dependiendo del factor de potencia en el cual operan son:

- Si se añaden cargas en retraso (+Q o cargas de potencia reactiva inductivas) a un generador, el voltaje de las terminales decrece significativamente.
- Si se añaden cargas con factores de potencia unitarios (no potencia reactiva) a un generador, hay una pequeña disminución en el voltaje de las terminales.
- Si se añaden cargas en adelanto (-Q o cargas de potencia reactiva capacitivas) a un generador el voltaje de las terminales aumentara.

Para resumir, cuando un solo generador alimenta las cargas del sistema entonces:

- 1.- Las potencias reales y reactiva que suministra el generador serán la cantidad que demanda la carga conectada.
- 2.- Los puntos de ajuste del mecanismo regulador controlarán la frecuencia de operación del sistema de potencia.
- 3.- La corriente de campo (o los puntos de ajuste del regulador de campo) controlará el voltaje en las terminales del sistema de potencia.

2.2 MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA. [2]

Los primeros sistemas de potencia en Estados Unidos eran de CD, pero a finales de la década de 1890 era claro que los sistemas de potencia de CA estaban ganando terreno. A pesar de esto, los motores de CD siguen siendo una parte significativa de la maquinaria comprada cada año hasta la década de 1960 (esa porción ha disminuido significativamente en los últimos 40 años). ¿Por qué eran tan comunes los sistemas de CD, cuando los sistemas de potencia de CD eran tan poco usuales?

Hay muchas razones para la popularidad de los motores de CD, una es que los sistemas de potencia de CD aún son comunes en los coches, camiones y aviones. Cuando un vehículo tiene un sistema de potencia de CD, es lógico considerar la utilización de motores de CD. Otra aplicación de los motores de CD es la situación en que se requieren variaciones amplias de velocidad. Antes de la creciente difusión de los rectificadores-inversores de potencia electrónicos, no había un mejor motor que uno de CD en las aplicaciones de control de velocidad. Incluso si no había una fuente de potencia de CD disponible, se usaban rectificadores en estado sólido y circuitos recortadores para crear la potencia de CD requerida y se utilizaban motores de CD para suministrar el control de velocidad deseado.

Los motores de corriente directa transforman la energía eléctrica en energía mecánica. Impulsan dispositivos tales como malacates, ventiladores, bombas, calandrias, carros, etc. Estos dispositivos pueden tener una característica de par o momento de torsión-velocidad muy definida (como una bomba o un ventilador) o una extremadamente variable (como un malacate o un automóvil). La característica de par o de momento de torsión-velocidad del motor debe ser adaptada al tipo de carga que tiene que impulsar y este requerimiento ha dado lugar a varios tipos básicos de motores.

Los motores de CD son por supuesto accionados desde una fuente de potencial de CD. Hay 4 tipos de motores de CD de uso general:

1. Motor de CD de excitación separada.
2. Motor de CD en derivación.
3. Motor de CD en serie
4. Motor de CD compuesto.

Los motores de corriente directa rara vez se utilizan en aplicaciones industriales ordinarias ya que todos los sistemas eléctricos suministran corriente alterna. Sin embargo, en aplicaciones especiales, como fábricas de acero, minas y trenes eléctricos, en ocasiones

es conveniente transformar la corriente alterna en corriente directa para utilizar motores de CD. La razón es que las características de par o momento de torsión-velocidad de los motores de CD pueden ser variadas dentro de un amplio intervalo sin perder su alta eficiencia. En este trabajo de investigación se trabajó con un motor de CD en derivación.

2.2.1. Arranque de un motor de CD shunt.

Si aplicamos un voltaje completo a un motor en derivación (shunt) estacionario, la Corriente de arranque en la armadura será muy alta y corremos el riesgo de:

- a. Quemar la armadura.
- b. Dañar el conmutador y las escobillas, a causa de la intensa producción de chispas.
- c. Sobrecargar el alimentador.
- d. Romper el eje a causa de un choque mecánico.
- e. Dañar el equipo impulsado por causa del repentino golpe mecánico.

Por lo tanto, todos los motores de CD deben tener una forma de limitar la corriente de arranque a valores razonables, por lo general entre 1.5 y dos veces la corriente a plena carga. Una solución es conectar un reóstato en serie a la armadura. La resistencia se reduce gradualmente a medida que el motor se acelera, y desaparece por completo cuando la máquina alcanza su velocidad tope.

2.2.2. Circuito equivalente de un Motor de CD. [2]

En la figura 2.10 se muestra el circuito equivalente de un motor de CD. En esta figura el voltaje del inducido se representa por medio de una fuente de voltaje ideal EA y un resistor RA. Esta representación es en realidad el equivalente de Thevenin de toda la estructura del rotor, incluyendo las bobinas, interpolos y devanados de compensación, si es que estos existen. La caída de voltaje en las escobillas se representa por medio de una pequeña batería Vescob en sentido opuesto a la dirección del flujo de corriente en la máquina, las bobinas de campo, que producen el campo magnético en el generador, están

representadas por medio de un inductor L_f u de un resistor R_f . El resistor independiente R_{ajust} representa un resistor variable externo utilizado para controlar la cantidad de corriente en el circuito de campo.

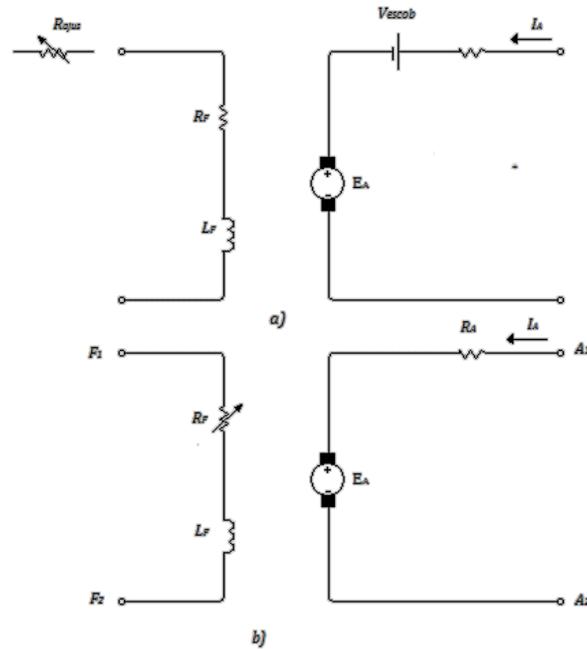


Figura 2.10 a) Circuito equivalente de un motor de CD. b) Circuito equivalente simplificado que elimina la caída de voltaje en las escobillas y combina R_{ajust} con la resistencia de campo.

El voltaje interno generado por esta máquina está dado por la ecuación:

$$E_A = K\Phi\omega \quad (2.5)$$

Dónde:

$$K = \frac{(P/2) \cdot n}{2} = \text{constante para cada máquina}$$

P = número de polos.

a = número de trayectorias en paralelo.

n = número de conductores en la armadura.

Φ = flujo de excitación.

Y el par inducido desarrollado por la maquina está dado por:

$$\tau_{ind} = K\Phi I_A \quad (2.6)$$

2.3 DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO: MOTOR – GENERADOR TRIFÁSICO SÍNCRONO DE LAB – VOLT.

En este trabajo de investigación se implementó un sistema de generación a escala, este sistema se puede observar en la figura 2.11, básicamente el sistema consta de un motor de impulsión (motor primario), acoplado con un generador síncrono. [5]



Figura 2.11 Sistema de generación implementado.

El generador trifásico síncrono utilizado en este trabajo es el modelo 8241 de Lab – Volt, cada fase de los devanados de estator de esa máquina esta independientemente terminada e identificada en la cara frontal del módulo, lo cual permite configuraciones delta o estrella según el criterio del usuario. El rotor de esta máquina está equipado con un

amortiguador de jaula de ardilla. Una excitación de CD variable es alimentada a través de los anillos deslizantes y escobillas las cuales están pre conectadas a un reóstato y a un switch de control todo esto montado en la cara frontal del módulo. [6]



Figura 2.12 *Generador síncrono del equipo de LAB-VOLT.*

Como se ve en la figura 2.12 se muestra el generador síncrono que contamos en el equipo de LAB-VOLT utilizado para realizar este trabajo de investigación.

Referencias.

- [1] Ramírez Medina Hugo Javier, Diseño y construcción de un tablero de transferencia y sincronización de generadores de emergencia con PLC y pantalla táctil, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Noviembre 2012.
- [2] Stephen J. Chapman, Maquinas eléctricas. México: McGraw Hill, 2005.
- [3] Ivonne Paniagua Gómez, Protección diferencial de generadores síncronos usando redes neuronales artificiales, Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
- [4] John J. Grainger, William D. Stevenson Jr, Análisis de sistemas de potencia, McGraw-Hill/interamericana de México, S.A. de C.V., Estado de México, 1996.
- [5] Monreal Herrera Agustín, Manual de Prácticas de laboratorio de Máquinas Eléctricas, Universidad Veracruzana, Facultad de ingeniería, Estado de Veracruz, 2009.

Direcciones electrónicas

- [6] Se puede encontrar en <https://www.labvolt.com/>

Capítulo

3

Sincronización

En este capítulo abordamos los temas relacionados sobre las condiciones y métodos (manual y automático), para poder sincronizar generadores síncronos. También se habla sobre las consecuencias ante una mala sincronización entre generadores efectos y problemas que puede causar en el sistema. Por último, se aborda el tema del comportamiento de estas generaciones cuando están sincronizados a un sistema de potencia grande (bus infinito) y a otro generador del mismo tamaño.

3.1 SINCRONIZACIÓN. [1]

La sincronización, en su forma más simple, es el proceso de conectar eléctricamente dos generadores entre sí. Para ser precisos, la sincronización es el acto de hacer coincidir la magnitud de la tensión, ángulo de fase y la frecuencia de un generador de referencia a los valores de un segundo generador.

Para ilustrar la definición de sincronización, consideremos que la función de componente de voltaje suministrada por cualquier generador es:

$$V = A \cos(\omega t + \theta) \quad (3.1)$$

Sea el voltaje del primer generador $A_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1)$, y el voltaje del segundo generador $A_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2)$, entonces si conectamos los dos generadores, los componentes de voltaje de cada uno deben ser iguales como se mencionó en la definición anterior, esto implica que:

$$A_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) = A_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2) \quad (3.2)$$

De la ecuación 3.2 tenemos que:

$A_1 = A_2$	<i>Amplitud de voltaje</i>
$\omega_1 = \omega_2$	<i>Frecuencia</i>
$\theta_1 = \theta_2$	<i>Ángulo de fase</i>

Esto confirma la definición anterior. En la figura 3.1 se muestra una representación vectorial de las variables asociadas a la sincronización. El voltaje del primer generador E_s y la velocidad (frecuencia) ω_s son establecidos por el sistema de potencia. Durante el proceso de sincronización, las frecuencias de los dos generadores pueden ser diferentes uno del otro.

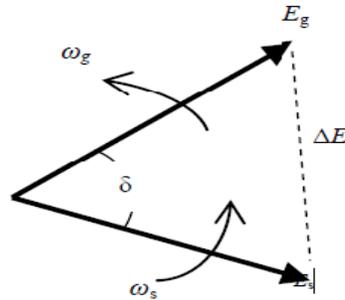


Figura 3.1 Diagrama vectorial de las variables de sincronización.

En conclusión, obtenemos que idealmente, el primer generador y el segundo generador sus voltajes en cada lado del interruptor de sincronización cuando esté abierto deben ser iguales en magnitud, frecuencia y en perfecta alineación de fase en el instante de que cierre el interruptor.

3.2 OPERACIÓN EN PARALELO DE GENERADORES DE CA. [2]

En el mundo actual es muy raro encontrar que un generador síncrono suministre independientemente su propia carga. Esta situación solo se encuentra en algunas aplicaciones que se salen de lo normal, tales como los generadores de emergencia. En todas las demás aplicaciones de generadores hay más de un generador que opera en paralelo para suministrar la potencia que requieren las cargas.

Existen varias ventajas en la subdivisión de un sistema de generación, tanto desde el punto de vista económico como estratégico. [4]

Las principales ventajas de un sistema en paralelo son:

- 1.- Varios generadores pueden alimentar una carga más grande que una sola máquina.
- 2.- Tener varios generadores incrementa la confiabilidad del sistema de potencia, debido a que la falla de cualquiera de ellos no causa pérdida total de potencia en la carga.

3.- Tener varios generadores que operan en paralelo permite la remoción de uno o más de ellos para cortes de potencia y mantenimientos preventivos.

4.- Si se utiliza un solo generador y este no opera cerca de plena carga, entonces será relativamente ineficiente. Con varias máquinas más pequeñas trabajando en paralelo, es posible operar solo una fracción de ellas. Las que están operando lo hacen casi a plena carga y por lo tanto de manera más eficiente.

3.3 CONDICIONES REQUERIDAS PARA OPERAR EN PARALELO. [2]

La figura 3.2 muestra un generador síncrono G1 que suministra potencia a una carga con otro generador G2 a punto de conectarse en paralelo con G1 por medio del cierre del interruptor S1. ¿Qué condiciones se deben cumplir antes de poder cerrar el interruptor y de conectar los dos generadores?

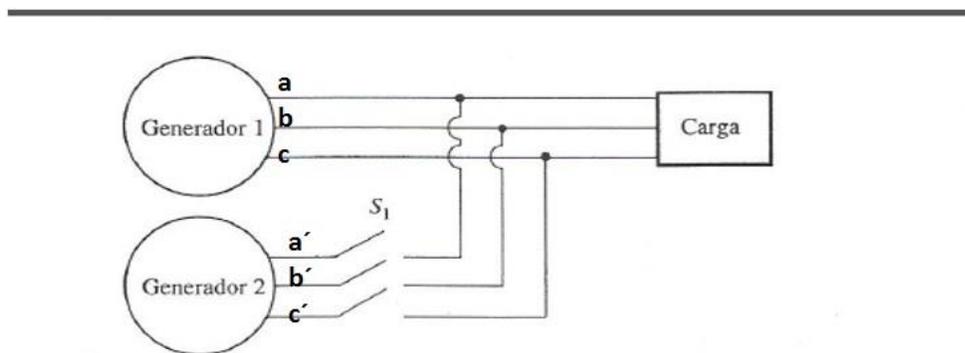


Figura 3.2 *Generador que se sincroniza a un sistema de potencia en funcionamiento.*

Si el interruptor (S1) se cierra de manera arbitraria en cualquier momento, es posible que los generadores se dañen severamente y que la carga pierda potencia. Si los voltajes no son exactamente iguales en cada uno de los generadores que se conectarán juntos, habrá un flujo de corriente muy grande cuando se cierre el interruptor. Para evitar este problema, cada una de las tres fases debe tener exactamente la misma magnitud de voltaje y ángulo de fase que el conductor al que se conectará. En otras palabras, el voltaje

en la fase a debe ser exactamente igual al voltaje en la fase a' y así en forma sucesiva para las fases b-b' y c-c'.

Para lograr lo anterior, se deben cumplir las siguientes condiciones de puesta en paralelo:

- 1.- Deben ser iguales los voltajes de línea rms de los dos generadores.
- 2.- Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase.
- 3.- Los ángulos de fase de las fases a-a', b- b' y c-c' deben ser iguales.
- 4.- La frecuencia del generador nuevo, llamado generador en aproximación, debe ser un poco mayor que la frecuencia del sistema de operación.

3.3.1. Condición de voltajes iguales en los dos generadores. [3]

Esta condición significa que la tensión de la máquina entrante debe ser exactamente igual a la tensión de la línea.

Si la tensión final de la máquina entrante es mayor o menor que la tensión de la línea, resulta una onda instantánea de corriente circulante por el arrollamiento de la armadura de la máquina, las barras colectoras y los otros generadores que alimentan la línea. Los voltajes en los bornes de cada generador deben coincidir con la barra de carga, es decir los valores de voltaje eficaz deben concordar y existir concordancia de fases. En la figura 3.3, se aprecia que los voltajes V_{ga} , V_{gb} y V_{gc} deben ser iguales para que el interruptor (S1) pueda cerrarse, una diferencia entre los voltajes de la barra de carga y del generador en aproximación, produce la motorización del generador que tenga menor voltaje y de igual manera para el resto de las fases.

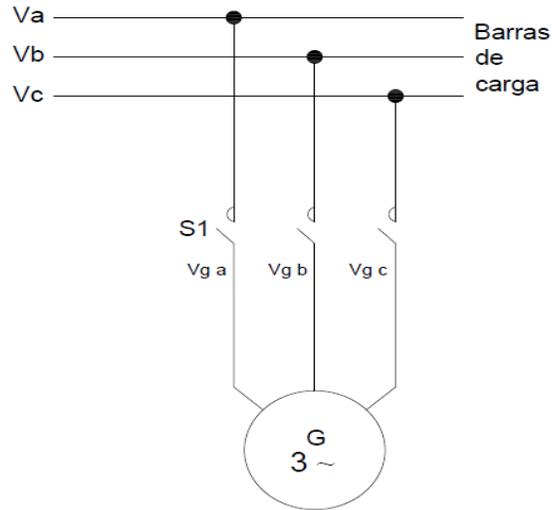


Figura 3.3 Comparación de voltajes en la red.

Mediante el uso de voltímetros y transformadores de potencia, que monitorean las líneas de generación, se envían señales de control para ajustar la corriente de campo del generador por medio de un regulador automático de voltaje (AVR) y de esta manera regular el voltaje que se genera, dando robustez al sistema. [1]

3.3.2. Condición de misma secuencia de fases.

Esta condición asegura que la secuencia en la que el voltaje de fase llegue a su pico en los dos generadores sea la misma. Si la secuencia de fase es diferente (como se observa en la figura 3.4), entonces aun cuando un par de voltajes (los de la fase a) estén en fase, los otros dos pares de voltajes estarán desfasados por 120 grados. Si se conectan los generadores de esta manera, no habrá problema con la fase a, pero fluirán enormes corrientes por las fases b y c, lo que dañará ambas máquinas. Para corregir el problema de secuencia de fase simplemente se intercambian las conexiones en dos de las 3 fases en una de las máquinas. [2]

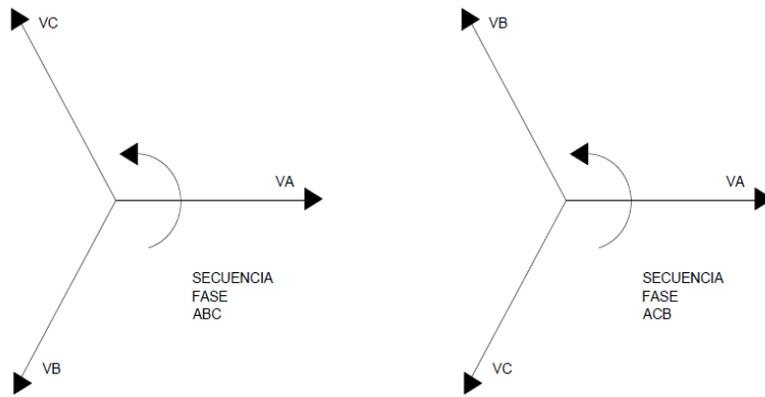


Figura 3.4 Las dos secuencias de fases posibles de un sistema trifásico.

Los generadores al conectarse en paralelo deben de contar con el mismo número de fases que la barra de carga y tener correspondencia de voltaje, porque de no ser así se producen un desbalance de potencia en líneas de alimentación provocando un calentamiento excesivo en el conductor afectado. Como se observa en la figura 3.5, los generadores G1 y G2 tienen igual número de fases, aportando de semejante manera al sistema, sin desbalancear la potencia entregada a la carga. A diferencia si se tiene un generador con incompatibilidad de fases produce un desbalance de energía entregada en sus cables de potencia y la barra de carga. [3]

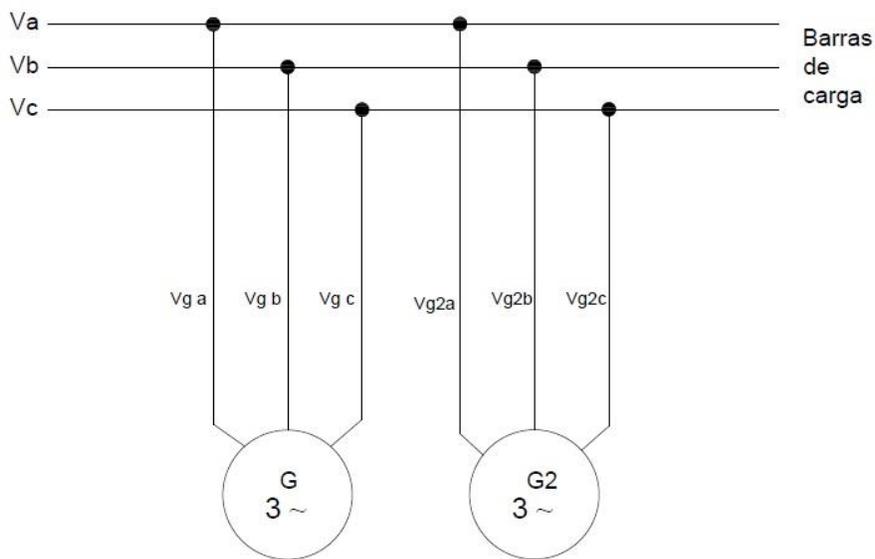


Figura 3.5 Generadores de igual número de fases.

3.3.3. Condición del ángulo de fase de las dos fases a-a', b-b' y c-c' deben ser la misma.

Si ambos ángulos de fase de cada fase de los generadores no tienen el mismo ángulo de fase (la diferencia entre ellos no sea 0°), en el momento de la conexión la diferencia de tensión resultante produce una onda de corriente instantánea, que, en el caso de grandes desplazamientos angulares, pueden dañar los arrollamientos de la máquina.

La diferencia de ángulo de fase y de voltaje entre dos generadores cambia conforme se controle la frecuencia. En el momento del cierre del interruptor el voltaje y la frecuencia deben ser los mismo más y un alineamiento perfecto de los ángulos de fase, esto tendrá como resultado una perfecta sincronización sin transitorios eléctricos o mecánicos en las máquinas. [4]

3.3.4. Condición de la frecuencia en los dos generadores.

Si las frecuencias de los generadores no son muy parecidas cuando se conectan juntos, se presentarán grandes potencias transitorias hasta que se estabilicen los generadores en una frecuencia común. Las frecuencias de las dos máquinas deben ser casi iguales, pero no pueden ser exactamente iguales. Deben diferir por una pequeña cantidad para que los ángulos de fase de la máquina en aproximación cambien de forma lenta con respecto a los ángulos de fase del sistema en operación. De esta manera se pueden observar los ángulos entre los voltajes y se puede cerrar el interruptor cuando los sistemas estén exactamente en fase. [2]

Variando la velocidad del motor primario se tiene como resultado una afección en la frecuencia del generador, esta es la manera de conseguir la igualación de todas las ondas entre el generador y la barra de carga.

La desigualdad de las ondas de frecuencia entre dos generadores, provoca que la tensión resultante sea mayor a la requerida por la red, causando daños en los equipos y la carga conectados. [3]

Lograr una frecuencia deseada significa suministrar al generador una velocidad adecuada, esto se consigue gracias al control de la velocidad en el motor. En generadores a gas, diésel u otro tipo de combustible, el gobernador es el sistema mecánico que regula el acceso de combustible hacia el motor para lograr controlar sus revoluciones de una manera automática. [1]

3.4 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA CONECTAR DOS GENERADORES EN PARALELO. [2]

Supóngase que se va conectar un generador al sistema en operación se deben seguir los siguientes pasos para conectarlos en paralelo.

Primero, utilizando voltímetros se debe ajustar la corriente de campo del generador en aproximación hasta que su voltaje en las terminales sea igual al voltaje en línea del sistema en operación.

Segundo, la secuencia de fase del generador en aproximación se debe comparar con la secuencia de fase del sistema en operación. La secuencia de fase se puede revisar de muchas maneras diferentes. Una de ellas es conectar alternativamente un pequeño motor de inducción a las terminales de cada uno de los dos generadores. Si el motor gira en la misma dirección en ambas ocasiones, entonces la secuencia de fase es la misma en ambos generadores. Si el motor gira en direcciones opuestas, entonces las secuencias de fase son diferentes y se debe invertir dos de los conductores del generador en aproximación.

Otra manera de revisar la secuencia de fase es el método de las 3 lámparas. En este método, se conectan 3 lámparas a través de las terminales abiertas del interruptor que conecta al generador al sistema, como se muestra en la figura 3.6. Conforme la fase cambia entre los dos sistemas, las lámparas lucirán primero brillantes (una gran diferencia de fase) y luego tendrán una luz tenue (una diferencia de fase pequeña). Si las 3 lámparas lucen brillantes y se apagan al mismo tiempo, entonces los sistemas tienen la misma secuencia de fase. Si las lámparas lucen brillantes sucesivamente, entonces los sistemas tienen secuencias de fase opuestas y se debe invertir una de las secuencias.

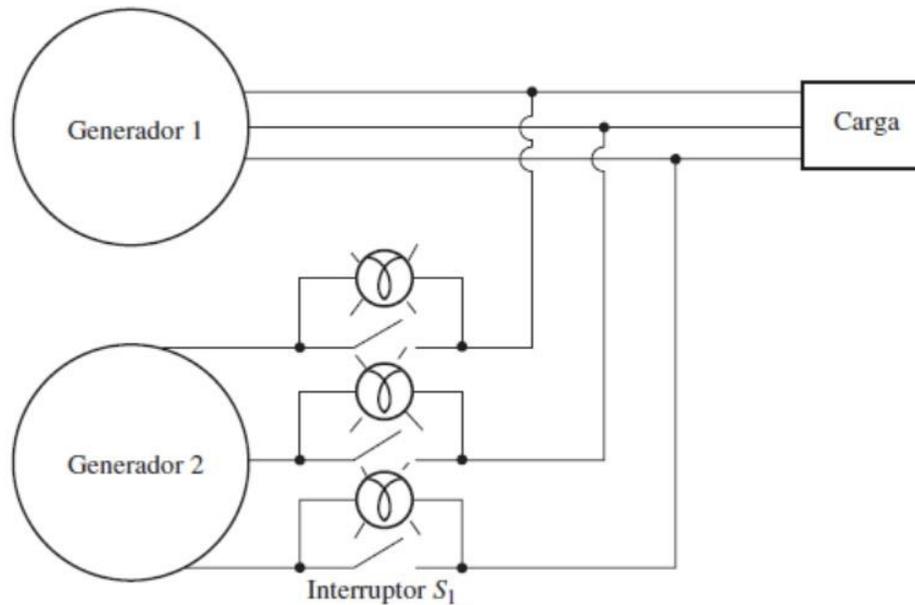


Figura 3.6 Método de las tres lámparas.

A continuación, la frecuencia del generador en aproximación se ajusta para que sea un poco más alta que la frecuencia del sistema en operación. Esto se lleva a cabo primero observando un medidor de frecuencia hasta que las frecuencias sean similares y entonces se observan los cambios de fase entre los sistemas. Se ajusta el generador en aproximación a una frecuencia un poco más alta para que cuando se conecte se incorpore a la línea suministrando potencia como generador en lugar de consumirla como lo hace un motor.

Una vez que las frecuencias son casi iguales, los voltajes en los dos sistemas cambian de fase muy lentamente con respecto al otro. Se observan los cambios de fase y cuando los ángulos de fase son iguales, se cierra el interruptor que conecta a los dos sistemas.

¿Cómo se puede saber cuándo los dos sistemas están por fin en fase? Una manera sencilla es observar las 3 lámparas que se describieron anteriormente en relación con la discusión de la secuencia de fase. Cuando se apagan las tres lámparas, la diferencia de voltajes a través de ella es cero y los sistemas en fase. Este sencillo esquema funciona, pero no es muy exacto. Un método mejor es la utilización de un sincronoscopio. Un sincronoscopio es un medidor que mide la diferencia en los ángulos de fase entre las fases de los dos sistemas.

En la figura 3.7 se puede ver el esquema de la parte frontal de un sincronoscopio, el cuadrante muestra la diferencia de fase entre las dos fases a; el 0 que significa en fase, se ubica en la parte superior y los 180 grados en la parte inferior. Ya que las frecuencias en los dos sistemas son un poco diferentes, el ángulo de fase en el medidor cambiara lentamente. Si el generador o sistema en aproximación es más rápido que el sistema en operación (situación deseada), entonces el ángulo de fase avanza y la aguja del sincronoscopio gira en el sentido de las manecillas del reloj. Si la maquina en aproximación es más lenta, la aguja gira en sentido contrario a las manecillas del reloj. Cuando la aguja del sincronoscopio está en una posición vertical, los voltajes están en fase y se puede cerrar el interruptor para conectar el sistema. En este punto, hay una tarea más para llevar a cabo antes de que el generador se pueda conectar a la red. A pesar de que el generador y la red estén operando a la misma frecuencia, no están necesariamente en el mismo ciclo de rotación, si dos redes eléctricas que operan en dos ángulos de fase diferente, se conectan entre si esto causa un fallo similar a un corto circuito y por consiguiente es más probable que el generador se destruya y dañe la red.

Con este método se puede tener otra visión de lo que sucede respecto a la velocidad y el ángulo de fase de los generadores. El ángulo entre los sistemas es igual a cero cuando la aguja sincronoscopio apunta directamente a la línea entre lento y rápido como se ve en la figura 3.7. [3]



Figura 3.7 Sincronoscopio.

En la siguiente tabla 3.1 se muestra diferentes situaciones que el sincronoscopio puede presentar antes de sincronizar generadores, y como podemos corregir estas situaciones y ventajas y desventajas de usar este método.

Señal Visible	Causa	Corrección	Momento de conexión	Ventaja/Desventaja
Aguja Inmóvil	Las frecuencias de ambos generadores son iguales	Ninguna	Este es el momento preciso para sincronizar los generadores	Este método no detecta secuencia de fase ni diferencia de tensión por lo cual conviene de disponer de mediciones de las tensiones
Aguja gira en sentido de horario	La frecuencia del generador a conectar es mayor	Reducir la velocidad del generador a conectar		
Aguja gira en sentido contrario	La frecuencia del generador a conectar es menor	Incrementar la velocidad del generador a conectar		

Tabla 3.1 Señales de un sincronoscopio.

En los generadores más grandes que pertenecen a sistemas de potencia, todo el proceso de conectar un generador nuevo en paralelo esta automatizado y la computadora lleva a cabo esta tarea. Sin embargo, en generadores más pequeños el operador ejecuta manualmente los pasos antes descritos de conexión en paralelo. [4]

3.5 SINCRONIZACIÓN AUTOMÁTICA.

En los primeros años de la industria de la energía eléctrica, la sincronización fue confiada a la habilidad de un operador bien entrenado, tal responsabilidad no se delegaba a un esquema automático que podría funcionar mal e iniciar un cierre desastroso fuera de fase.

Sin embargo, como los generadores han aumentado de capacidad y los diseños se convirtieron más eficiente, tanto en los sistemas eléctricos y mecánicos se volvió menos efectiva una sincronización manual. Un diseño más eficiente de los generadores se refleja en los límites estrechos de la diferencia de ángulo de fase, diferencia de voltaje y la diferencia de frecuencia de deslizamiento puesta por los fabricantes. [1]

La complejidad de las plantas también se incrementó significativamente, poniendo más demandas en el personal operativo y quitar al operador del acto de sincronización. Estos cambios y algunos daños desastrosos causados por algunos errores de los operadores, llevaron a la evolución de la sincronización de estos equipos controlados por los operadores, a los sistemas de sincronización completamente automatizados que ahora se han convertido en algo común.

La intención es que el sistema automático sea preferido y que el sistema manual sea utilizado sólo cuando el sistema automático no está disponible. Sin embargo, en la práctica, el método implementado para realizar este proceso en realidad depende de la filosofía de la planta y en algunos casos, con el nivel de frustración con el equipo de sincronización automática.

Los sincronizadores automáticos realizan todas las funciones necesarias para sincronizar el generador y cerrar el interruptor sin la participación del operador, en la figura 3.8 se ilustra un esquema de sincronización automática.

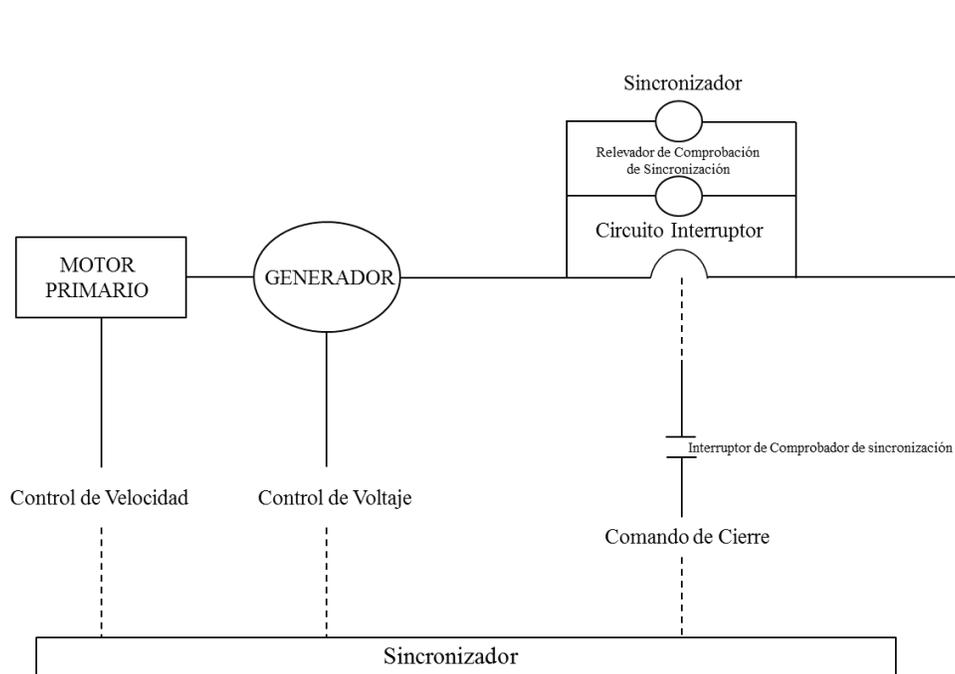


Figura 3.8 Sincronización Automática.

El operador controla el arranque y la aceleración inicial del generador, mientras el generador acelera, el voltaje se eleva. Como al 70% a 80% de la tensión nominal, el sincronizador automático es capaz de medir la frecuencia del generador y tomar el control de la sincronización. [5]

El sincronizador automático acciona el regulador del gobernador y del voltaje para cumplir con los límites de la frecuencia de deslizamiento, la magnitud de voltaje y ángulo de fase establecidos por el sincronizador, los límites de aceptación para cada caso son:

- La diferencia de voltaje no puede exceder la tensión nominal en más de un 5% a 10%.
- La frecuencia de deslizamiento no debe exceder la frecuencia nominal en más de 0.2% a 0.5%.
- Se requiere que la diferencia de ángulo de fase deba ser cero.

Cuando los parámetros de operación están dentro de los límites preestablecidos, el sincronizador emite una orden de cierre al interruptor de sincronización.

La mayoría de los sincronizadores electrónicos son del tipo de anticipación, cuando todos los límites están satisfechos, el sincronizador utilizará mediciones de deslizamiento en tiempo real y el tiempo de cierre del interruptor para calcular el ángulo necesario para producir un cierre en la posición de cero grados. Cuando el ángulo es calculado, el sincronizador emite la orden de cierre.

Los sincronizadores automáticos incluyen una variedad de parámetros para el límite de cierre, ajustables para asegurar una sincronización segura. En caso de que el sincronizador no funcionara correctamente, estos límites son ciertamente inútiles. Para evitar algún tipo de fallo, el interruptor de cierre del sincronizador automático está normalmente supervisado por un relé de comprobación de sincronización, como se muestra en la Figura 3.8. Esto es a menudo el mismo relé de comprobación de sincronización que supervisa la sincronización manual.

3.6 EFECTOS DE UN ERROR DE SINCRONIZACIÓN.

Un fallo en la sincronización puede provenir de un transitorio eléctrico o mecánico que puede a su vez dañar el generador, motor primario y severas perturbaciones al sistema de potencia. Cuando el generador está conectado al sistema de potencia los sistemas eléctricos y mecánicos también están enlazados. Antes de cerrar el interruptor del generador para la sincronización, el ángulo de velocidad de la rotación del campo magnético, la frecuencia y el voltaje inducido en el estator son controlados por la velocidad del rotor. Cuando el interruptor es cerrado la frecuencia del sistema de potencia controla el campo magnético giratorio. Debido a esto el roto y la fuerza motriz estarán forzados a igualar la velocidad y la posición para estar iguales con los del sistema de potencia. [6]

Como hemos visto anteriormente son tres parámetros de importancia en cuanto al ajuste de la tolerancia cuando se cierra un interruptor para sincronizar un generador, los cuales son el ángulo de fase, la magnitud de voltaje y la diferencia de frecuencia entre las máquinas. [3]

Cada uno de estos parámetros causa un efecto en el sistema si no están bajo los límites permitidos para el proceso, estos efectos son los siguientes:

- Efecto de un excesivo ángulo de fase, puede causar un agudo golpe en las máquinas cuando el interruptor se cierra en estas condiciones. Cuando este ángulo es de unos 15° puede causar una oscilación de potencia considerable comparado con un ángulo de fase de 0° ; unos 60° grados de ángulo de fase pueden causar el atornillamiento de la máquina y provoca una excesiva torsión que pueden dañar los cigüeñales y bielas en el caso que sea un motor de combustión interna o doblar los álabes de una turbina y también el acople del motor con el generador, provocando esto un prologado lapso de tiempo de oscilación del sistema. Un cierre a 120° puede ser causa de torques 7 veces mayores al valor de la máquina trabajando a máxima potencia. En algunos casos puede ser causa de un desbalance de los motores.
- Efecto de una excesiva frecuencia, muchos accidentes de operación ocurren con frecuencia son las inversiones de fases, puede que el relé de sincronización automática cierre un interruptor cuando la diferencia de fase es la indicada pero, puesto que el tiempo de cierre del interruptor es constante este puede cerrar fuera del ángulo indicado, hay que recordar también que la energía cinética del generador depende de la velocidad de giro, por tanto en el momento de entrar a la barra común ocurrirá un intercambio de energía considerable puesto que se obliga al generador a mantenerse en la frecuencia de la red, reduciendo la vida útil del generador. Un error de frecuencia puede causar disturbios en un sistema de potencia si la oscilación excede los límites de estabilidad.

- Efecto de un elevado voltaje en el generador, en el momento de cierre es posible que una diferencia de voltaje produzca flujos de potencia reactiva entre los generadores, si el generador entrante tiene un elevado potencial, mayor al del sistema el generador sufre de potencia real, si bien es cierto que diferencias de potencial de hasta un 15% no afectan de forma significativa la sincronización de un generador a una barra común, es posible que el flujo de potencia reactiva del generador dañe el estator por sobrecalentamiento. Una diferencia de potencial de un 2% menor al potencial de la barra común puede aumentar en un 10% el monto de potencia reactiva que el generador aporta a la barra infinita.

En general el costo de una mala sincronización redonda en 4 aspectos:

- Pérdida de horas de trabajo en reparación.
- Pérdida de dinero en reparación.
- Reducción de la vida útil de la máquina.
- Tiempo de indisponibilidad.

3.7 OPERACIÓN DE GENERADORES EN PARALELO CON GRANDES SISTEMAS DE POTENCIA. [2]

Cuando un generador síncrono se conecta a un sistema de potencia, a menudo el sistema de potencia es tan grande que ninguna de las acciones del operador del generador tendrá gran efecto en el sistema de potencia. Este fenómeno se idealiza en el concepto de bus infinito. Un bus infinito es un sistema de potencia tan grande que su voltaje y frecuencia no cambian sin importar que tanta potencia real y reactiva se lo demande o se le suministre. En la figura 3.9 a) se muestra la característica de potencia-frecuencia de un sistema como éste y en la figura 3.9 b) se puede ver su característica de potencia reactiva-voltaje.

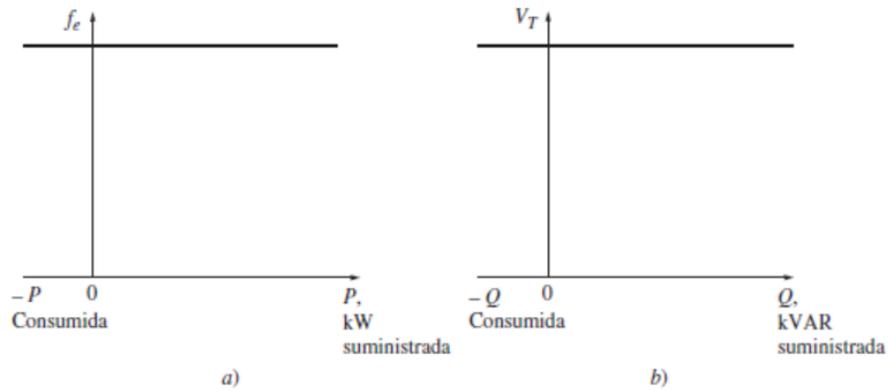


Figura 3.9 Curvas de un bus infinito: a) frecuencia contra potencia y b) voltaje en las terminales contra potencia reactiva.

Para entender el comportamiento de un generador que está conectado a un sistema tan grande, examinemos un sistema que conste de un generador y un bus infinito en paralelo que suministre potencia a una carga como se ve en la figura 3.10a, cuando se conecta un generador en paralelo con otro generador o con un sistema grande, como vimos anteriormente en este capítulo la frecuencia y voltaje en las terminales de todas las maquinas deben ser iguales, debido a que sus conductores de salida están unidos. Por lo tanto, sus características de frecuencia-potencia real y de potencia reactiva-voltaje se puede dibujar en una gráfica espalda con espalda con un eje vertical en común, en la figura 3.10b se muestra esta gráfica que se llama diagrama de casa.

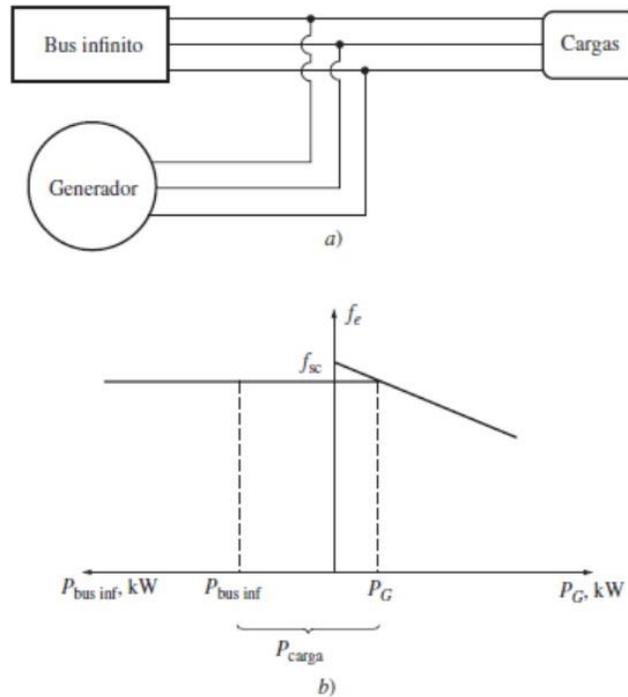


Figura 3.10 a) Generador síncrono que opera en paralelo con un bus infinito y b) Diagrama de frecuencia contra potencia de un generador síncrono en paralelo a un bus infinito.

Supóngase que el generador acaba de ser conectado en paralelo con la línea, con el procedimiento que se describió en este capítulo, entonces el generador “flotará” en la línea y suministrará una pequeña cantidad de potencia real y muy poca o nada de potencia reactiva esto se muestra en la figura 3.11.

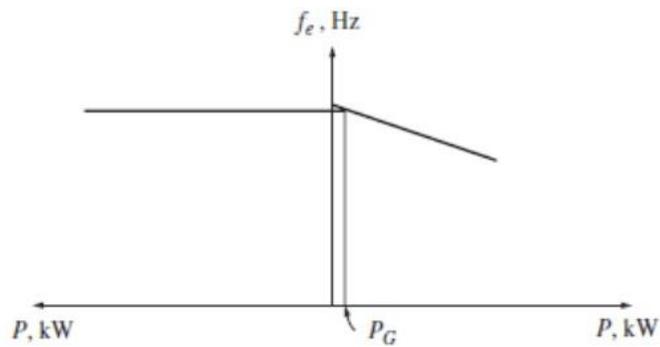


Figura 3.11 Diagrama de frecuencia contra potencia justo después de la conexión en paralelo.

Ahora si el generador está en paralelo con la línea, pero en lugar de tener una frecuencia un poco mayor que la del sistema, tiene una frecuencia un poco más baja, en este caso la situación resultante se muestra en la figura 3.12. A esta frecuencia, la potencia que suministra el generador es en realidad negativa, en otras palabras, el generador en realidad consume potencia eléctrica y funciona como un motor. Muchos generadores reales tienen disparadores de potencia inversa conectados a ellos, por lo que es imperativo que se conecten en paralelo con una frecuencia mayor que la del sistema en operación. Si un generador así comienza a consumir potencia, se desconectará automáticamente de la línea.

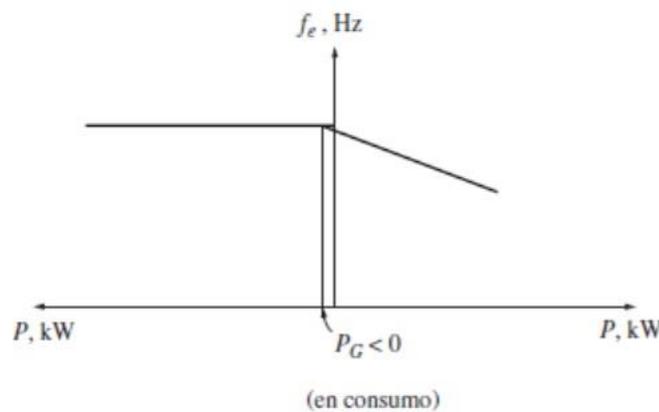


Figura 3.12 Diagrama de frecuencia contra potencia si la frecuencia en vacío del generador es un poco menor a la frecuencia del sistema.

Una vez que se conectó el generador adecuadamente y si se incrementan los puntos de ajuste del mecanismo regulador, el efecto de este incremento es un desplazamiento hacia arriba en la frecuencia en vacío del generador. Debido a que la frecuencia del sistema no cambia (la frecuencia de un bus infinito no puede cambiar), se incrementa la potencia suministrada por el generador. Si la potencia de salida del generador se incrementa hasta que excede la potencia que consume la carga, la potencia extra generada fluye de regreso al bus infinito. Un bus infinito, por definición puede suministrar o consumir cualquier cantidad de potencia sin cambiar la frecuencia, por lo que consume la potencia extra.

Para resumir, cuando un generador opera en paralelo con un bus infinito:

- 1.- El sistema al que se conecta el generador controla la frecuencia y el voltaje en las terminales del generador.
- 2.- Los puntos de ajuste del mecanismo regulador del generador controlan la potencia real suministrada al sistema por el generador.
- 3.- La corriente de campo en el generador controla la potencia reactiva suministrada al sistema por el generador.

3.7 OPERACIÓN DE GENERADORES EN PARALELO CON OTROS GENERADORES DEL MISMO TAMAÑO. [2]

Cuando un generador opera solo, las potencias real y reactiva (P y Q) que suministra el generador son fijas, están restringidas a ser iguales a la potencia demandada por el sistema y los puntos de ajuste del mecanismo regulador y la corriente de campo varían la frecuencia y el voltaje en las terminales. Cuando un generador opera en paralelo con un bus infinito, éste restringe la frecuencia y al voltaje en las terminales ser constantes y los puntos de ajuste del mecanismo regulador y la corriente de campo varían las potencias real y reactiva.

Pero si se conecta un generador en paralelo con otro del mismo tamaño, en este sistema la restricción básica es que la suma de las potencias real y reactiva que suministran los dos generadores deben ser iguales a la P y Q que demanda el sistema. La frecuencia del sistema no está restringida a ser constante ni tampoco la potencia de un generador en este caso, la potencia total es igual:

$$P_{TOTAL} = P_{G1} + P_{G2} \quad (3.3)$$

Y la potencia reactiva total está dada por:

$$Q_{TOTAL} = Q_{G1} + Q_{G2} \quad (3.4)$$

Cuando se incrementan los puntos de ajuste del mecanismo regulador del generador (G_2), la curva de potencia-frecuencia de G_2 se desplaza hacia arriba como se muestra en la figura 3.13.

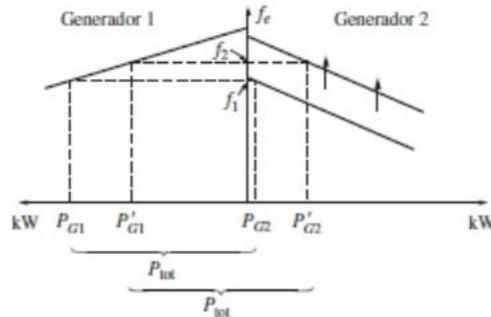


Figura 3.13 Efecto en el sistema debido al incremento de los puntos de ajuste del mecanismo regulador del generador 2 en operación.

Recordemos que la potencia total suministrada a la carga no debe cambiar, la frecuencia original f_1 , la potencia suministrada por G_1 y G_2 será mayor que la demanda de la carga, por lo que el sistema no puede continuar operando a la misma frecuencia de antes. De hecho, sólo hay una frecuencia a la que la suma de la potencia de salida de los dos generadores es igual a la P_{CARGA} . Esa frecuencia f_2 es mayor que la frecuencia original de operación del sistema, a esa frecuencia G_2 suministra más potencia que antes y G_1 suministra menos potencia que antes. Por lo tanto, cuando dos generadores operan juntos, un incremento en los puntos de ajuste del mecanismo regulador de uno de ellos:

- Incrementa la frecuencia del sistema
- Incrementa la potencia que suministra ese generador, a la vez reduce la potencia que suministra el otro.

En la figura 3.14 se muestra lo que pasa cuando dos generadores operan juntos y se incrementa la corriente de campo en el G₂.

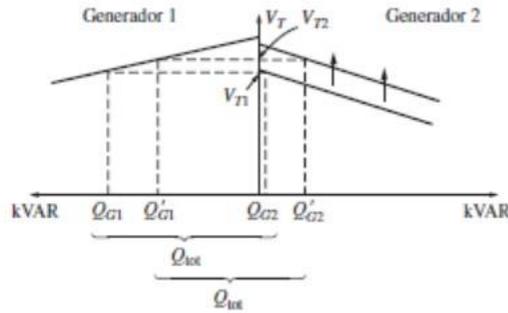


Figura 3.14 Efecto en el sistema debido al incremento de la corriente de campo del generador 2 en operación.

Como se puede ver en la figura 3.14 cuando se incrementa la corriente de campo en el generador 2 se incrementa el voltaje en las terminales del sistema y se incrementa la potencia reactiva suministrada por ese generador, a la vez que disminuye la potencia reactiva suministrada por el otro generador.

Cuando dos generadores de tamaño similar operan en paralelo, el cambio en los puntos de ajuste del mecanismo regulador de uno de ellos cambio tanto la frecuencia del sistema como la repartición de potencia entre ellos. Para poder ajustar la repartición de potencia del sistema independientemente de la frecuencia del sistema y viceversa sin cambiar la frecuencia del sistema se deben incrementar los puntos de ajuste del mecanismo regulador de un generador y simultáneamente disminuir los puntos de ajuste del mecanismo regulador del otro generador esto se puede ver en la figura 3.15.

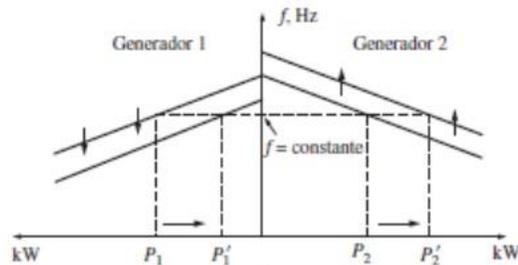


Figura 3.15 Cambio en la distribución de potencia sin afectar la frecuencia del sistema

Los ajustes a la potencia y voltaje en las terminales funcionan de manera análoga. Para desplazar la repartición de la potencia reactiva sin cambiar V_T , se debe incrementar simultáneamente la corriente de campo de un generador y disminuir la corriente de campo en el otro esto se muestra en la figura 3.16.

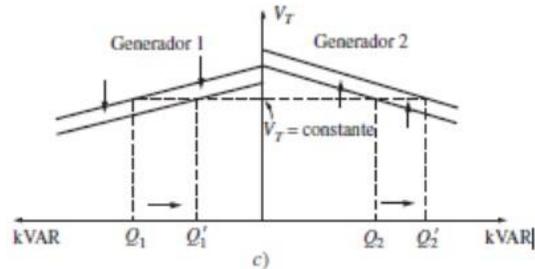


Figura 3.16 Cambio de la distribución de la potencia reactiva sin afectar el voltaje en las terminales.

En resumen, en el caso de dos generadores que operan juntos:

- 1.- El sistema está restringido a que la potencia total que suministran los dos generadores juntos sea igual a la cantidad consumida por la carga.
- 2.- Para ajustar la repartición de potencia real entre los generadores sin cambiar la frecuencia del sistema se deben incrementar simultáneamente los puntos de ajuste de un generador y disminuir los puntos de ajuste del otro generador.
- 3.- Para ajustar la frecuencia del sistema sin cambiar la repartición de potencia real, se deben incrementar o disminuir simultáneamente los puntos de ajuste del mecanismo regulador de los dos generadores.
- 4.- Para ajustar la repartición de potencia reactiva entre los generadores sin cambiar V_T se debe incrementar de manera simultánea la corriente de campo de un generador y disminuir la corriente de campo en el otro. La máquina cuya corriente de campo se incrementa alimentara más carga reactiva.
- 5.- Para ajustar V_T sin cambiar la repartición de potencia reactiva, se deben incrementar o disminuir de manera simultánea la corriente de campo de ambos generadores.

Es importante que cualquier generador síncrono que se pretenda utilizar en paralelo con otras máquinas tenga una característica de frecuencia-potencia descendente. Si dos generadores tienen una característica plana o casi plana, entonces la repartición de potencia entre ellos puede variar ampliamente con los más mínimos cambios en la velocidad en vacío.

Referencias.

- [1] Ahmad I. Abo Dabowsa, Design of an Automatic Synchronizing Device for Dual Electrical Generators Based on CAN Protocol, the Islamic University of Gaza, Junio 2011.
- [2] Stephen J. Chapman, Maquinas eléctricas. México: McGraw Hill, 2005.
- [3] Ramírez Medina Hugo Javier, Diseño y construcción de un tablero de transferencia y sincronización de generadores de emergencia con PLC y pantalla táctil, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,2012.
- [4] IEEE Std. C37.118-2005, IEEE Power Engineering Society, IEEE estándar para sincrofasores para sistemas de potencia,2005.
- [5] Reimert Donald, Protective Relay for Power Generation System, CRC Press, Nueva York,2006.
- [6] Michael J. Thompson, Fundamentals and Advancements in Generator Synchronizing Systems, Power-GEN International, in Las Vegas 2011.

Capítulo

4

Diseño del Prototipo.

En este capítulo se aborda del diseño del prototipo y el funcionamiento del mismo.

4. DISEÑO DEL PROTOTIPO.

El sincronizador automático digital diseñado en este trabajo de investigación consta principalmente en las siguientes partes:

- Etapa de adquisición de datos.
- Gobernador de velocidad para arreglo motor-generator del equipo de LAB-VOLT.
- Interruptor.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO.

Existen muchos dispositivos que pueden sincronizar generadores eléctricos entre sí o a un sistema eléctrico de potencia, estos dispositivos deben primero verificar que los valores de voltaje, frecuencia y diferencia de fase estén adentro de los límites aceptables para después tomar la decisión de conexión entre los sistemas. Es importante mencionar que este prototipo está compuesto por componentes electrónicos y principalmente por microcontroladores MSP430G2553 de TEXAS INSTRUMENTS.

En este capítulo se explicará las etapas que conforman el sincronizador diseñado exclusivamente para el equipo de LAB-VOLT, el cual sincroniza un arreglo propuesto de motor-generator con sistema eléctrico de potencia (CFE). Este dispositivo consta principalmente de 3 etapas, una de ellas la etapa de adquisición de datos la cual contiene 3 sensores uno de voltaje, uno de frecuencia y uno de diferencia de ángulo de fase. La segunda etapa un gobernador de velocidad diseñado para el equipo de LAB-VOLT el cual será ajustado dependiendo de los valores que se obtengan por la etapa de adquisición de datos y un interruptor el cual conectará el sistema de generación propuesto en este trabajo de investigación con el sistema de referencia blindado por CFE, este circuito dependerá si los valores tomados por la etapa de adquisición de datos están adentro de los parámetros necesario para una sincronización correcta.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama a bloques del prototipo realizado para este trabajo de investigación.

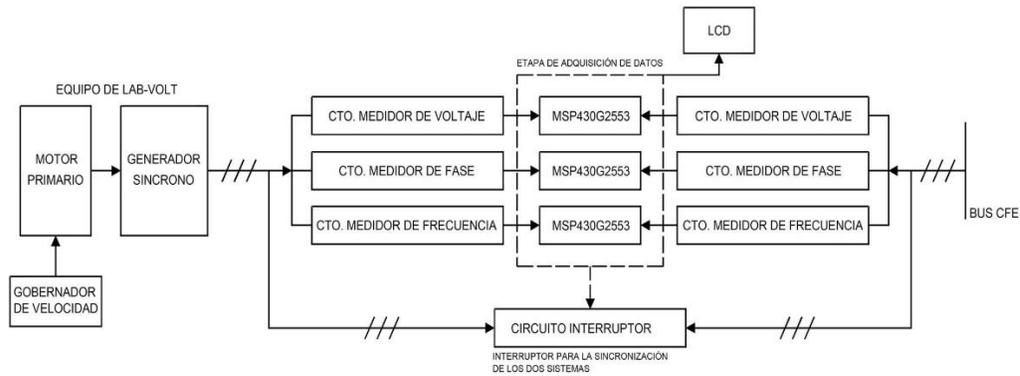


Figura 4.1 Diagrama a bloques del sincronizador automático digital para equipo de LAB-VOLT.

4.2 MICROCONTROLADOR MSP430G.

La familia MSP430 de Texas Instruments son procesadores de ultra bajo consumo que ofrecen diferentes conjuntos de periféricos específicos para diversas aplicaciones. La arquitectura, junto con 5 modos de bajo consumo, se ha optimizado para lograr una vida prolongada de la batería en aplicaciones autosuficientes de medición. El dispositivo cuenta con una poderosa CPU RISC de 16 bits, y generadores de constantes que contribuyen a la eficiencia máxima del código. El oscilador controlado digitalmente (DCO) permite despertar desde los modos de bajo consumo al modo activo en menos de 1 μ s.

Las series MSP430G2x21/2x31 son microcontroladores de ultra baja potencia con un temporizador interno de 16-bits y diez pines de entrada y salida. Los microprocesadores de la familia MSP430G2x31 tienen un convertidor A/D de 10-bits y capacidad integrada de comunicación mediante protocolos sincrónicos (SPI o I2C).

Las aplicaciones típicas a las que están orientadas incluyen sistemas de sensores de bajo coste que captan señales analógicas, las convierten en valores digitales para luego procesar los datos para su visualización o para la transmisión a un sistema anfitrión.

En la figura 4.2 se muestra la configuración de pines del microcontrolador MSP430G2553 el cual fue utilizado para la realización de este proyecto.

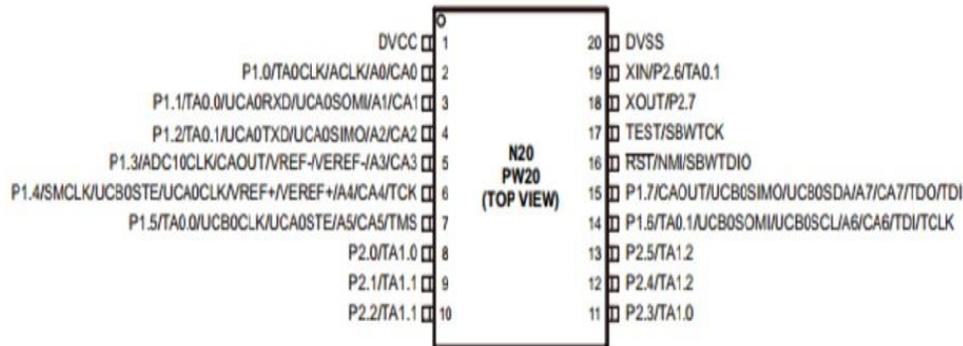


Figura 4.2 Configuración de pines de MSP430G2553.

4.2.1. Principales Características.

- Bajo voltaje de funcionamiento (de 1.8 V a 3.6 V)
- Bajo consumo de energía:
 1. Modo activo: 220 uA en 1 MHz, 2.2 V.
 2. Modo de espera: 0.5 uA
 3. Modo off (detención de RAM) 0.1 uA.
- 5 modos de ahorro de energía
- Ultra rápido despertar del modo de espera, menos de 1us
- Arquitectura RISC de 16-bits, 62.5ns de tiempo de ciclo de instrucción.
- Configuraciones básicas del módulo de reloj:
 1. Frecuencia interna de hasta 16 MHz
 2. Oscilador interno de baja potencia
 3. Cristal de 32 kHz.
 4. Fuente de reloj externa digital.
- Temporizador de 16 bits con 2 registros de captura/compara.
- Interfaz serial universal (USI) soporta SPI y I2C
- Convertidor análogo digital de 10 bits con referencia interna, muestreo y retención y auto escaneo,etc.

4.3 ETAPA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Esta etapa básicamente consta de 3 sensores los cuales son los siguientes:

- Sensor de voltaje.
- Sensor de frecuencia.
- Sensor de diferencia de ángulo de fase.

Los sensores diseñados en este proyecto son exclusivos para un arreglo motor-generador del equipo de LAB-VOLT, en la figura 4.3 se muestra un diagrama a bloques de cada una de las etapas de cada sensor realizado para la etapa de adquisición de datos.

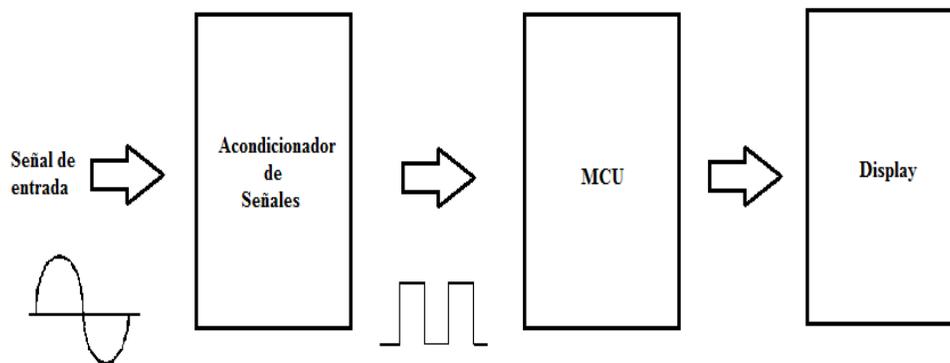


Figura 4.3 Diagrama a bloques de cada sensor de la etapa de adquisición de datos.

En el diagrama a bloques de la figura 4.3, se muestra que primeramente como estamos trabajando con un sistema de generación de energía alterna tenemos que acondicionar esa señal para que pueda ser detectada por el microcontrolador (MSP430G2553), el cual leerá esta señal y podrá calcular la frecuencia, voltaje y ángulo de fase del sistema de generación para después mostrarlas en un LCD (Display de cristal líquido).

El acondicionamiento de la señal es de vital importancia en el diseño de cualquiera de estos sensores, debido a que un mal acondicionamiento de la señal puede causar que el microcontrolador tenga grandes errores al calcular las mediciones. La precisión de los medidores es muy importante debido a que si no cuentan con una gran precisión causarán grandes problemas para sincronizar y se puede provocar grandes daños a los sistemas que están realizando este proceso, estos disturbios se abordarán en el capítulo 3 de este trabajo de investigación. La precisión de los sensores realizados, oscilan entre el 0 al 5% de margen de error el cual es aceptable.

A continuación, se explicará el principio de operación de cada uno de estos sensores, la circuitería eléctrica y el algoritmo de programación del microcontrolador que se empleó para medir el voltaje, frecuencia y diferencia de ángulo de fase de los sistemas de generación.

4.3.1 SENSOR DE VOLTAJE.

Se diseñó un medidor trifásico de voltaje digital, con un circuito acondicionador de señales y con la ayuda de un convertidor analógico-digital integrado en el microcontrolador MSP430G2553 de 10 bits con una referencia de voltaje de 0 a 3.3 V de C.D. Este dispositivo medirá los voltajes de cada fase del generador sincrónico con gran precisión cubriendo un rango de medición de 0 a 140 volts de C.A., este rango es más que suficiente para el proceso de sincronización. Recuérdese que el voltaje de fase nominalmente es de 127 volts rms.

4.3.1.1 Principio de Operación.

El principio de operación de este sensor básicamente se concentra en el convertidor analógico-digital del microcontrolador MSP430G2553, el cual lee voltajes de corriente

directa entre un rango de 0 a 3.3 v, este voltaje es proporcional a una cuenta digital interna. Lo que se realizó es convertir los voltajes de C.A. de las fases del generador síncrono a voltajes de corriente directa proporcionales a estos voltajes y que estuvieran entre el rango que pueda medir el ADC (convertidor analógico-digital) y así calcular los voltajes en las fases del generador.

4.3.1.2 Circuitería del sensor de voltaje.

En la figura 4.4 se muestra el circuito electrónico de un sensor trifásico de voltaje.

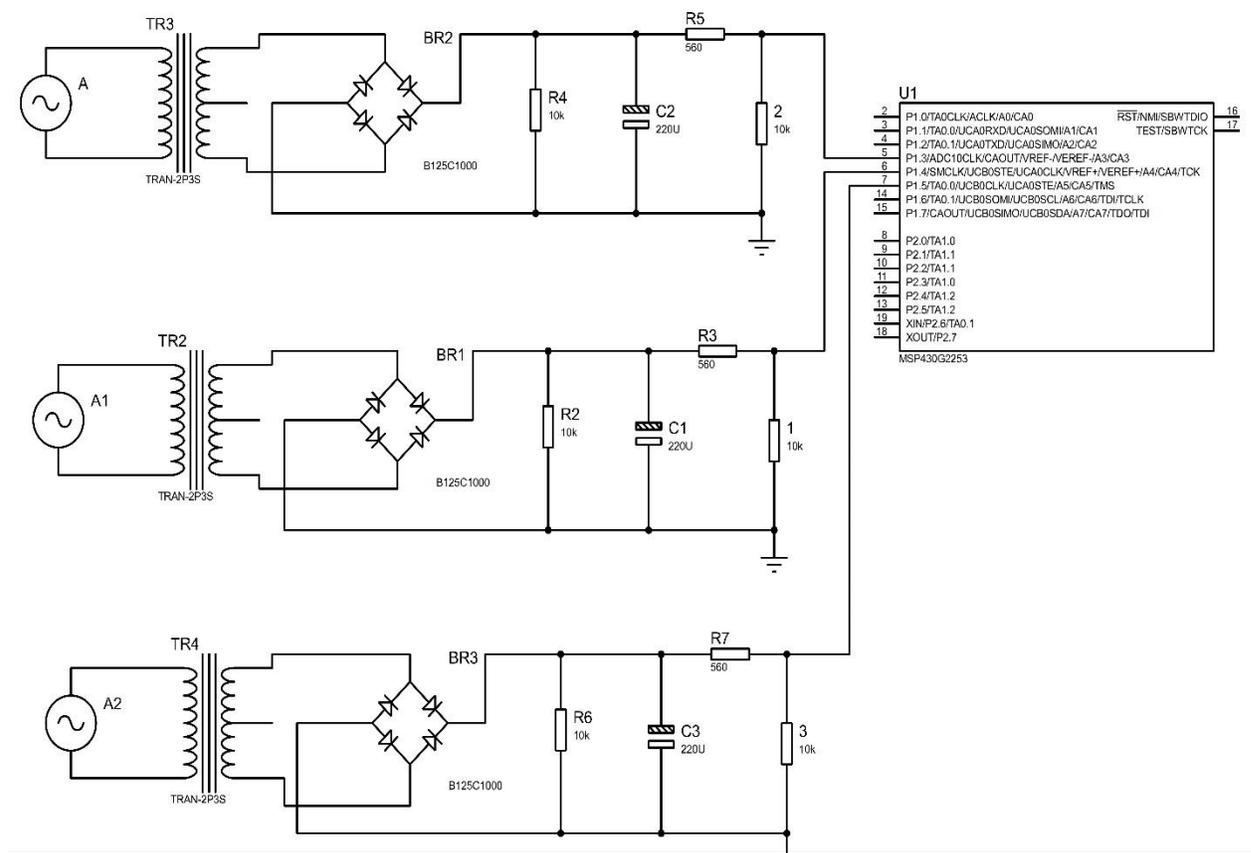


Figura 4.4 Circuito electrónico de un sensor trifásico de voltaje.

Un nivel de voltaje de 127 de VCA que es nominalmente el valor de voltaje en cada fase del generador no puede ser medido directamente por un microcontrolador, porque es un nivel de voltaje mucho mayor al rango de voltaje de operación del microcontrolador,

entonces se necesitó diseñar un circuito que nos brinde un voltaje a escala al voltaje de corriente alterna de las fases del generador.

Como se observa en la figura 4.4 el diagrama comienza con un rectificador de onda completa (convertidor de C.A-C.D) que está compuesto de un transformador de voltaje con derivación central, para reducirlo de 127 V a 6 V y un puente de diodos que convierte la señal de corriente alterna a un voltaje pulsante de CD, después tiene una resistencia en paralelo con un capacitor que funciona como filtro atenuando las variaciones del voltaje rectificado por el puente de diodos, conteniendo una componente de corriente alterna mínima (rizo).

Después del circuito de conversión de CA-CD (rectificador) viene un divisor de voltaje el cual fue necesario debido a que el voltaje de CD resultante del circuito de conversión fue mayor que el voltaje máximo con el cual el ADC del microcontrolador puede operar. Este divisor de voltaje se diseñó para cuando se tuviera un nivel de voltaje en el primario del transformador de 127 VCA, diera un valor de 2.8 VCD dejando un rango de tolerancia de medición aceptable para proteger el ADC del microcontrolador que puede medir hasta 3.3 VCD, los valores de las resistencias para el divisor de voltaje fueron de 560 Ω y 22000 Ω .

4.3.1.3 Descripción de la configuración del ADC10 del microcontrolador MSP430G.

El módulo ADC10 soporta conversiones rápidas análogas a digitales de 10 bits. Este módulo implementa un núcleo SAR de 10 bits, control de selección de muestras, generador de referencias y un controlador de transferencias de datos DTC.

Las características del ADC10 son:

- Tazas de conversiones máximas mayores a 200 ksps (kilo muestras por segundo)

- Convertido monótono de 10 bit sin pérdida de código
- Muestreo y retención con periodos de tiempo programables.
- Inicialización de conversión por software o Timer_A.
- Selección de referencia de voltaje interno (1.5v o 2.5) por software.
- Selección de referencia interna o externa por software.
- Hasta 8 canales de entrada.
- Seleccionable fuente de reloj para la conversión.
- Modos de conversión: un solo canal, un solo canal repetido, conversión secuencial y repetida conversión secuencial.
- Controlador de transferencia de datos para almacenamiento automático de los resultados de conversión.

Las características del ADC10 nos benefició debido a dos cosas principalmente: a que cuenta con 8 canales disponibles y que se puede hacer una conversión secuencial de canales. Esto se ocupará debido a que se medirán los 3 voltajes de fase simultáneamente del generador, el núcleo del ADC convierte una señal de entrada analógica a su representación digital y almacena el resultado en el registro ADC10MEM, pero también debido a que cuenta con un DTC (controlador de transferencia de datos) que permite mandar la conversión a cualquier lugar de memoria sin intervención del CPU.

La fuente de reloj del ADC10 se selecciona usando los bits ADC10SSELx y puede ser dividido de 1 hasta 8 usando los bits ADC10DIVx. Las fuentes de reloj posibles para el ADC10 son SMCLK, MCLK, ACLK y el oscilador interno ADC10OSC. En este sensor se eligió trabajar con el ADC10OSC que trabaja a 5 MHz, pero varía dependiendo del dispositivo, el voltaje de alimentación, la temperatura.

Es importante que al configurar el reloj debemos asegurarnos de que el reloj escogido para el ADC10CLK permanezca activo hasta el final de la conversión. Si el reloj es removido durante la conversión, la operación no se completará y cualquier resultado sería erróneo.

Prácticamente después de dar unas características del ADC10 se usará para medir voltaje, la configuración de este mismo solamente se hace por medio de los siguientes registros de control:

- ADC10CTL0. En este registro se configuró el número de muestras que va tomar para hacer la conversión, en este caso fueron de 64 muestras con el registro ADC10SHTx esto para tener mejor precisión en la medición, también se configuró que se puedan convertir múltiples canales por medio del registro MSC y por último en este registro se activó el ADC10 y la interrupción del mismo (ADC10ON y ADC10IE).
- ADC10CTL1. En este registro se configuró el número de canales y en qué canal empezaría la conversión y estos canales fueron del P1.5 al P1.3, esto se observó en la figura 4.4 y además se activó con el registro CONSEQx, que las conversiones fueran simultáneas (P1.5 al P1.3).
- Por último, mediante el registro ADC10SA y el ADC10DTC1 (controlador de transferencia de datos), se enviaron la cuenta de digital de cada canal convertido a una variable tipo entero.

4.3.1.4 Algoritmo de programación del MCU para el sensor de voltaje.

Una vez que se configuró el ADC10 del microcontrolador a los parámetros correspondientes, se requiere encontrar la relación que existe entre el voltaje de corriente alterna que es dado por las fases del generador síncrono y el voltaje de CD que es capturado por el ADC10 del microcontrolador.

Para esto se excita con una fuente variable al devanado de campo del generador síncrono, se varía el voltaje tomando varias lecturas con la ayuda de un voltímetro de CA y a su vez midiendo también el voltaje de CD que llegaba al microcontrolador con la ayuda de un voltímetro de CD. En la tabla 4.1 se pueden observar los valores obtenidos.

Muestras	VCD	VCA
1	2.138	107.9
2	2.208	109.8
3	2.264	111.7
4	2.326	113.6
5	2.394	115.6
6	2.458	117.7

7	2.508	119.1
8	2.565	121
9	2.63	123
10	2.714	125.3
11	2.77	127
12	2.85	129.8
13	2.923	132
14	2.972	133.7
15	3.004	134.4
16	3.078	136.5
17	3.09	137.2
18	3.125	138

Tabla 4.1 Relación del Voltaje Alterno del generador y el voltaje de CD que captura el ADC.

Una vez obtenidos esta relación entre los voltajes se optó por hacer una regresión lineal simple, para conocer el factor que relacionará estos datos, empleando la ecuación 4.1.

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (4.1)$$

Donde de la ecuación 4.1:

n= número de muestras tomadas.

Xi= la sumatoria de los valores de los voltajes de CA.

Yi= la sumatoria de los valores de los voltajes de CD.

m= la pendiente de la recta.

b= una constante.

La ecuación 4.2 muestra la ecuación de la recta que tiene la relación de los voltajes de CA con los voltajes de CD que obtenidos.

$$V_{ac} = m V_{cd} + b \quad (4.2)$$

Empleando la ecuación 4.1 se obtiene que la pendiente es igual a 30.73 y b es igual a 42.074, para que el micro controlador calcule el valor de Vcd de la ecuación 4.2 se obtuvo primero la resolución del ADC que es igual al voltaje máximo que puede capturar

el microcontrolador (3.3 V) entre el número máximo de cuentas digitales que puede hacer el ADC, y como es de 10 bit la cuenta digital máxima que pueda hacer es de 1024, obteniendo la resolución del ADC se multiplica por la cuenta digital que tenga almacenado en su memoria(ADC10MEM). Una vez sacando estos valores los reemplazamos en la ecuación 4.2 y queda de la siguiente manera.

$$V_{ac} = 30.73 \left(\frac{3.3 \text{ v}}{1024} \right) (\text{cuenta digital}) + 42.074 \quad (4.3)$$

Con la ecuación 4.3 se puede calcular el voltaje de CA de las fases del generador implementándola en la lógica de programación del microcontrolador MSP430G2553. En la figura 4.5 se puede ver la gráfica resultante de la regresión lineal simple que empleamos para sacar la relación entre VCA (voltaje alterno en las fases del generador) y VCD (voltaje directo capturado por el ADC).

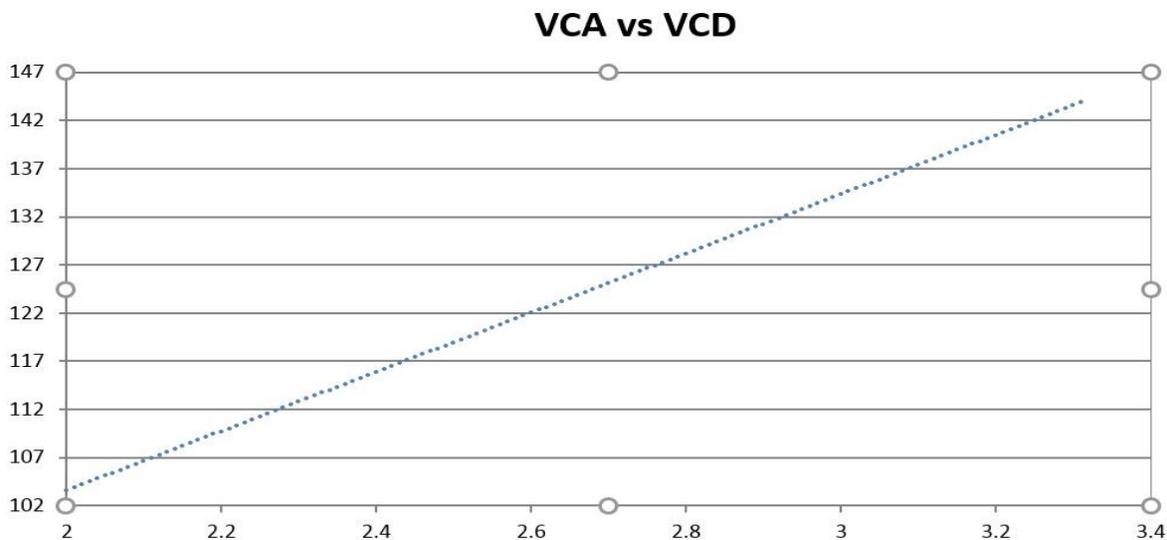


Figura 4.5 Gráfica de regresión lineal de VCA y VCD.

La precisión de este sensor de voltaje no es 100 % confiable debido que lógicamente existen pérdidas en la rectificación y también en los componentes pasivos empleados para este diseño (resistencias), pero aun con esas pérdidas el sensor brindó una tolerancia del 5 % en las mediciones efectuadas. En la tabla 4.2 se muestra algunas mediciones que se hicieron con este sensor y comparándolo con mediciones hechas por un osciloscopio y un voltímetro de CA.

Número de muestras	Osciloscopio	Voltímetro CA	Sensor de voltaje
1	124	124.8	126.1
2	125	124.88	125.6
3	125	124.89	126.1
4	126	124.92	127.8
5	124	124.89	126.3
6	126	124.92	127.7
7	124	124.87	127.3

Tabla 4.2 *Tabla de comparación.*

En la figura 4.6 se muestra el diagrama de flujo del sensor de voltaje.

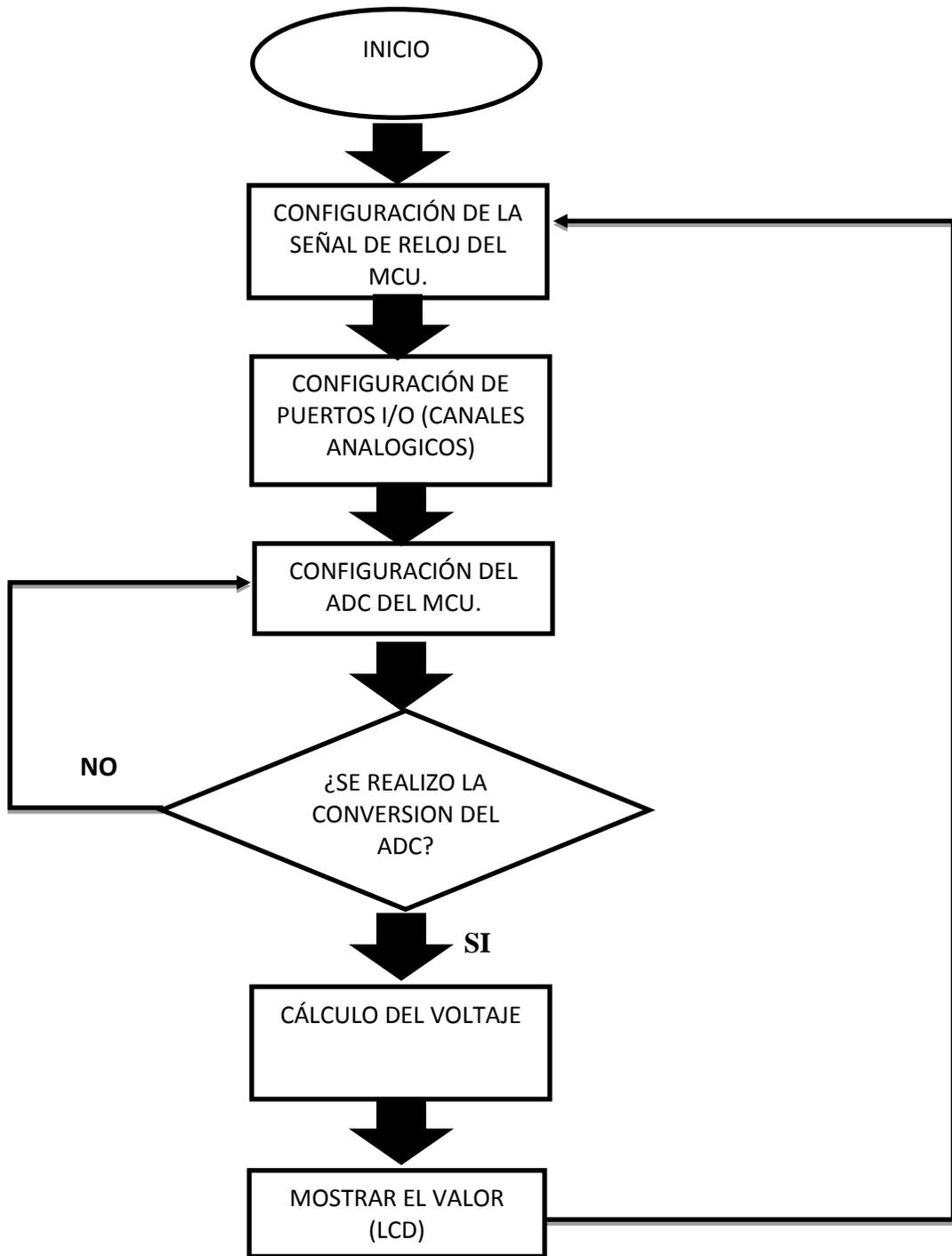


Figura 4.6 Diagrama de flujo del programa contenido en el microcontrolador del sensor de voltaje.

4.3.2 SENSOR DE FRECUENCIA.

Existen en la actualidad varios tipos de medidores de frecuencia, que pueden tener formas analógicas o digitales para medir la misma, algunos de los instrumentos que comúnmente usamos para medir rangos de frecuencia son los osciloscopios, medidores de frecuencia por cruce por cero y diversos dispositivos más. En este trabajo de investigación se desarrolló un sensor de frecuencia digital con la ayuda del microcontrolador MSP430G2553 y una etapa de acondicionamiento de la señal. El medidor de frecuencia diseñado cuenta con gran precisión y un rango operación de 0-90 Hertz, lo cual es más que suficiente debido a que un sistema de generación nominalmente tiene una frecuencia de 60 Hertz.

Se debe recordar que este sensor obtendrá la frecuencia en el sistema de generación propuesto en este trabajo de investigación (arreglo motor-generator del equipo de LAB-VOLT) y es exclusivo de este sistema.

4.3.2.1 Principio de Operación.

El principio de funcionamiento del medidor de frecuencia diseñado, principalmente se basa en una salida de velocidad del motor de impulsión del sistema de generación la cual brinda un voltaje de corriente directa proporcional a las revoluciones por minutos (RPM) que está operando el sistema de generación. Con este voltaje proporcional a las Rpm del sistema de generación se puede relacionar la frecuencia del sistema y este factor se nota en la ecuación 4.4.

Dónde:

f= frecuencia eléctrica (Hz)

n=la velocidad en RPM

p=número de polos de la máquina.

$$f = \frac{n * p}{120} \quad (4.4)$$

Con la ecuación 4.4 vemos la relación que existe entre la frecuencia del sistema y la velocidad del mismo. Teniendo en cuenta que esta salida del motor primario del sistema brinda un voltaje de CD como se mencionó antes, se optó por utilizar el convertidor analógico digital con que cuenta el microcontrolador, para capturar este voltaje y calcular la frecuencia a partir del mismo y relacionándolo con la ecuación 4.4.

Se optó por este principio de funcionamiento para el diseño del medidor de frecuencia debido a que se obtuvieron resultados con alta precisión, ya que utilizando un método de cruces por cero nos brindaba mediciones con baja precisión, debido a eventos (variaciones que se presentaban en las fases del generador) y debemos recordar que es muy importante una correcta toma de lectura de la frecuencia debido a que si se manda a cerrar el interruptor a una frecuencia que no sea medida correctamente se pueden causar grandes daños al sistema. Por todas estas razones se eligió trabajar con la salida de voltaje directo que brinda el motor de impulsión.

4.3.2.2 Circuitería del sensor de frecuencia.

En la figura 4.7 se puede ver la circuitería del sensor de voltaje diseñado para este trabajo de investigación.

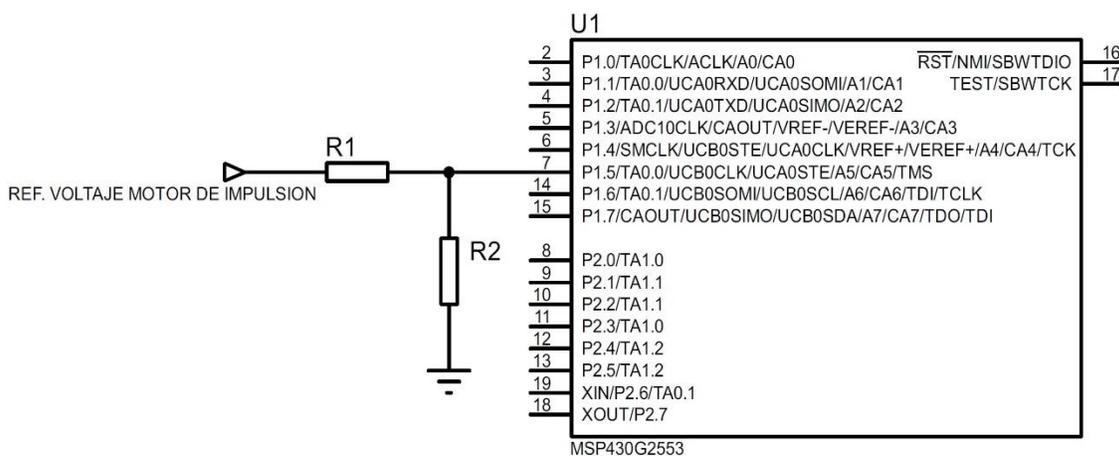


Figura 4.7 Circuitería del sensor de frecuencia.

En la figura 4.7 se puede ver un sencillo divisor de voltaje, como se explicó en el tema anterior la salida de velocidad del motor de impulsión brinda un voltaje proporcional a la velocidad en que esté operando el sistema. Este voltaje resulto mayor al voltaje máximo que puede soportar el ADC del microcontrolador (3.3 voltaje máximo de corriente directa), por eso se diseñó un sencillo divisor de voltaje para que nos proporcionara un voltaje máximo de 2.9 v cuando tuviera una velocidad de 1800 RPM que esto es equivalente a 60 Hertz.

Los valores que se propusieron para este divisor fueron $R1= 1000 \Omega$ y $R2=5600 \Omega$, y el voltaje que existe entre $R2$ y la tierra va conectado a un puerto del microcontrolador (P1.5) que es un puerto configurado para leer entradas analógicas.

4.3.2.3 Algoritmo de programación del MCU para el sensor de frecuencia.

La configuración del ADC10 del microcontrolador MSP430G es la misma que se empleó para el sensor de voltaje. Lo único que cambio fue la ecuación para relacionar el voltaje obtenido de la salida del módulo del motor de impulsión, las RPM y la frecuencia del sistema.

Para esto se llevó a cabo el mismo procedimiento que con el sensor de voltaje, se tomaron varias lecturas de las revoluciones por minuto del motor del motor de impulsión que cuenta con un display donde marca las RPM del motor contra el voltaje de corriente directa que es proporcional a las RPM del sistema.

En la tabla 4.3 se muestra las lecturas tomadas para proceder aplicar una regresión lineal simple, con esto obtuvimos un factor que relaciona las RPM y el voltaje de corriente directa de una de las salidas que tiene el motor de impulsión.

Muestras	RPM	VCD
1	1902	3.270
2	1870	3.219
3	1835	3.155
4	1813	3.122
5	1794	3.085
6	1774	3.051
7	1753	3.014
8	1736	2.986
9	1710	2.944
10	1679	2.889
11	1655	2.843
12	1628	2.8
13	1600	2.751
14	1581	2.719
15	1556	2.676
16	1528	2.628
17	1514	2.6
18	1483	2.55
19	1463	2.51
20	1416	2.436
21	1394	2.395
22	1377	2.36

Tabla 4.3 Tabla de lecturas tomadas de las RPM vs VCD.

Con los datos de la tabla 4.3 se aplica la ecuación 4.5.

Dónde:

n=número de muestras.

X_i =sumatoria de RPM.

Y_i =sumatoria de VCD

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

(4.5)

En la ecuación 4.6 se tiene la ecuación de la recta la cual relaciona las revoluciones por minutos del sistema y el voltaje de corriente directa que se entrega por una de las salidas de este motor.

$$Rpm = m \text{ VCD} + b \quad (4.6)$$

En la figura 4.8 se muestra la gráfica que representa la regresión lineal entre las Rpm y el voltaje de corriente directa.

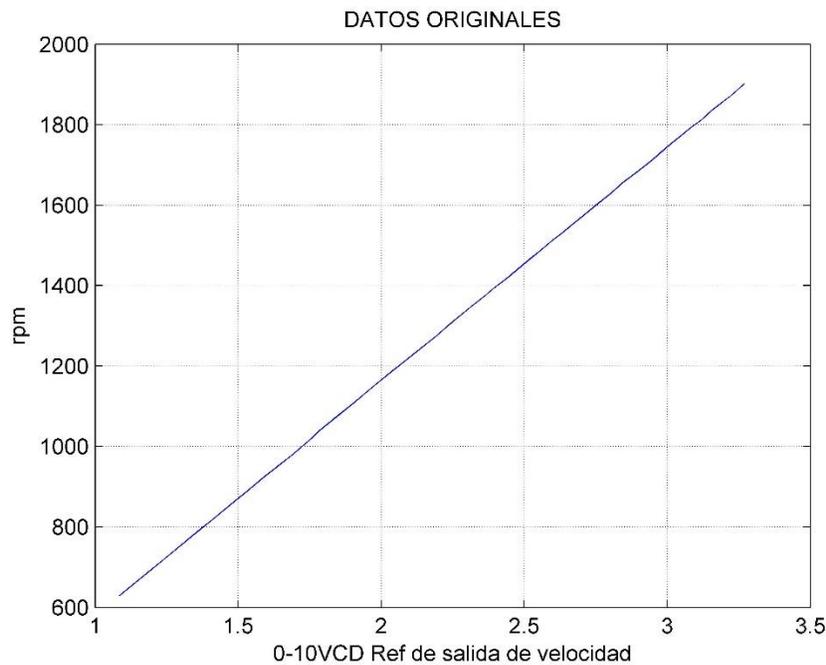


Figura 4.8 Gráfica de linealidad de Rpm vs Vcd.

Una vez que se obtuvo con la ecuación 4.5 la pendiente de la recta (m) y la constante (b), podemos sustituir estos valores en la ecuación 4.6, recordemos que VCD es voltaje que recibe el ADC del microcontrolador y este es igual a la resolución de ADC por la cuenta digital que obtenga el microcontrolador de la conversión. El valor de la pendiente fue de 582.2 y el de la constante de -1.88. Una vez que se tenga toda la información se sustituye en la ecuación 4.6 y que de la siguiente manera:

$$Rpm = 582.2 \left(\frac{3.3 * cuenta\ digital}{1024} \right) - 1.88 \quad (4.6)$$

La ecuación 4.6 es la relación que existe con las revoluciones por minuto en que el sistema está operando con la salida del voltaje de corriente directa de la salida del motor primario del sistema. Con esta ecuación se calculó las Rpm y a partir de se obtuvo la frecuencia del sistema con la ecuación 4.7.

$$f = \frac{Rpm * p}{120} \quad (4.7)$$

Con la ecuación 4.7 se pudo calcular la frecuencia implementándola en la programación del microcontrolador dando una medición con buena precisión. Recuérdese que p en la ecuación significa el número de polos con los que cuenta el motor en este caso es de 4 polos.

La precisión de este sensor de frecuencia, aunque no es 100 % preciso si tiene una alta precisión, aunque si hay pérdidas debido a las resistencias del divisor, pero aun así es altamente confiable. En la tabla 4.4 se muestre unas lecturas de frecuencia comparando la precisión del sensor diseñado contra un osciloscopio y un frecuencímetro integrado en un fluke del laboratorio de eléctrica.

Número de muestras	Osciloscopio	Frecuencímetro	Sensor de frecuencia
1	60.07	60.11	60.20
2	60.12	60.10	60.21
3	60.13	60.10	60.18
4	60.09	60.12	60.21

Tabla 4.4 *Tabla de comparación del sensor de frecuencia.*

En la figura 4.9 se muestra el diagrama de flujo del sensor de frecuencia.

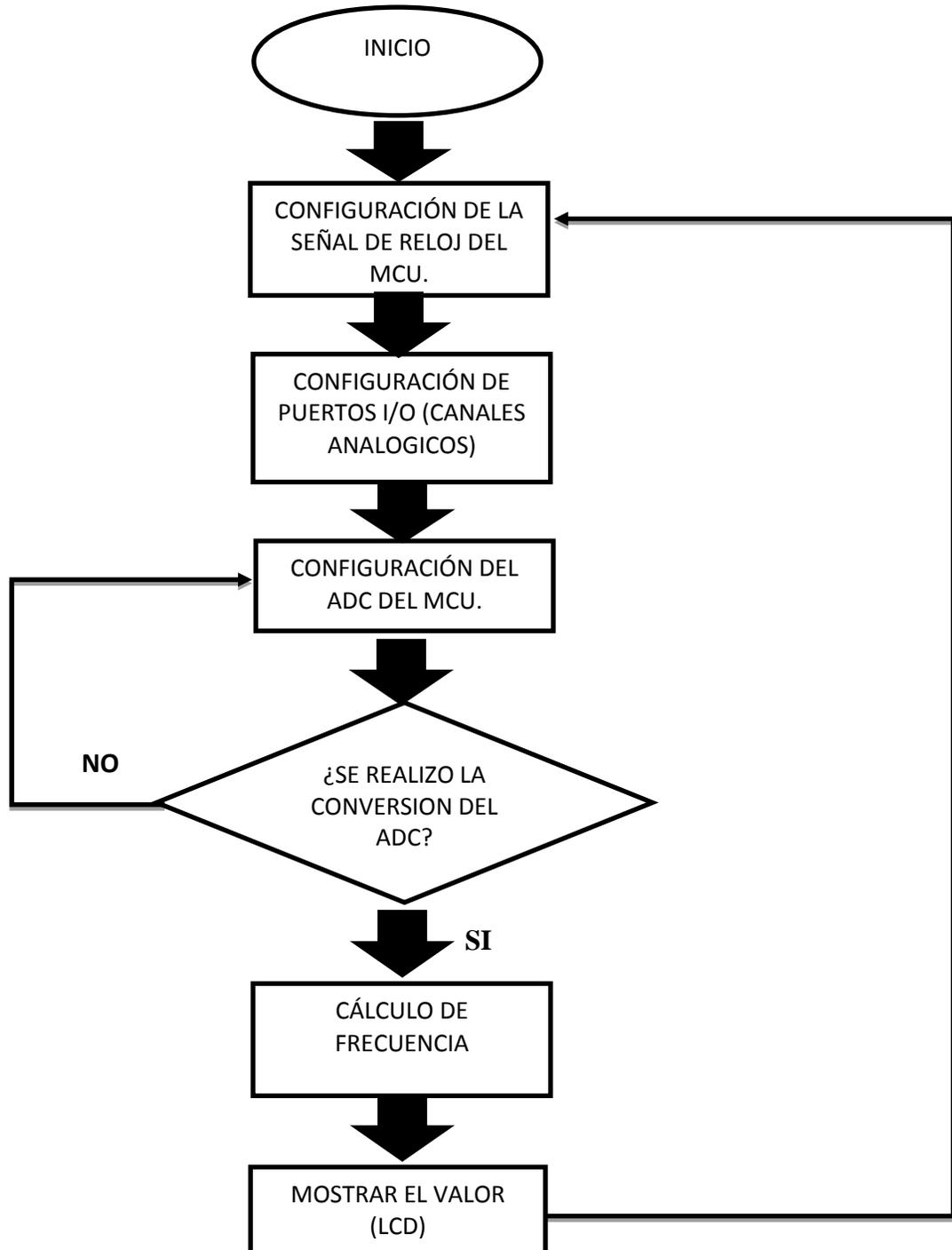


Figura 4.9 Diagrama de flujo del programa contenido en el microcontrolador del sensor de frecuencia.

4.3.3 SENSOR DE DIFERENCIA DE ÁNGULO DE FASE.

El sensor de diferencia de ángulo de fase tiene una gran importancia en este trabajo de investigación tiene que contar con una gran precisión, debido a un mal cierre en el interruptor provocado por una mala medición de la diferencia de ángulo entre dos fases puede causar daños severos en los dos sistemas. Estos disturbios se abordaron en el capítulo 3 de este trabajo de investigación.

Se diseñó un sensor que mide la diferencia de ángulo entre las 3 fases del sistema de generación referencia (CFE) y el sistema de generación compuesto por un arreglo de motor-generador del equipo de LAB-VOLT. Esto se logró con la ayuda de un circuito de acondicionamiento de señales y un temporizador A que pertenece a nuestro microcontrolador MSP430G2553, este sensor estará comparando la diferencia de ángulo de las 3 fases del sistema de generación de referencia con las 3 fases del sistema de generación propuesto en este trabajo de investigación.

Este sensor fue diseñado exclusivamente para el equipo de LAB-VOLT y tiene una alta precisión y mide diferencia de ángulos de hasta 360 grados eléctricos.

4.3.3.1 Principio de Operación.

El principio básico que se llevó a cabo para poder medir la diferencia de ángulo entre dos señales de corriente alterna, es capturar el tiempo en el que tardan las dos señales en cruzar por cero, esto se logra a través de un circuito que convierte la señal senoidal a una señal cuadrada. Para después con la ayuda de un temporizador integrado en el microcontrolador calcular esta diferencia entre las dos señales.

Se tiene que recordar que se medirá la diferencia de ángulo entre fases que tengan la misma secuencia de fase es decir la fase A del generador de referencia con la fase A' del sistema de generación del equipo de LAB-VOLT y así consecutivamente con las otras 2 fases.

En la ecuación 4.8 se muestra como calcular la diferencia de fase entre dos señales que se implanto en la lógica de programación del microcontrolador.

Dónde:

ϕ = la diferencia de fase en grados.

td=el retardo de las 2 señales en el cruce por cero (ms).

$$\phi = \left(\frac{td}{T}\right) * 360 \quad (4.8)$$

T= el periodo de la señal de referencia (16.666 ms).

En la figura 4.10 se muestra el principio de lo que se busca medir para sacar la diferencia de ángulo de fase entre dos señales.

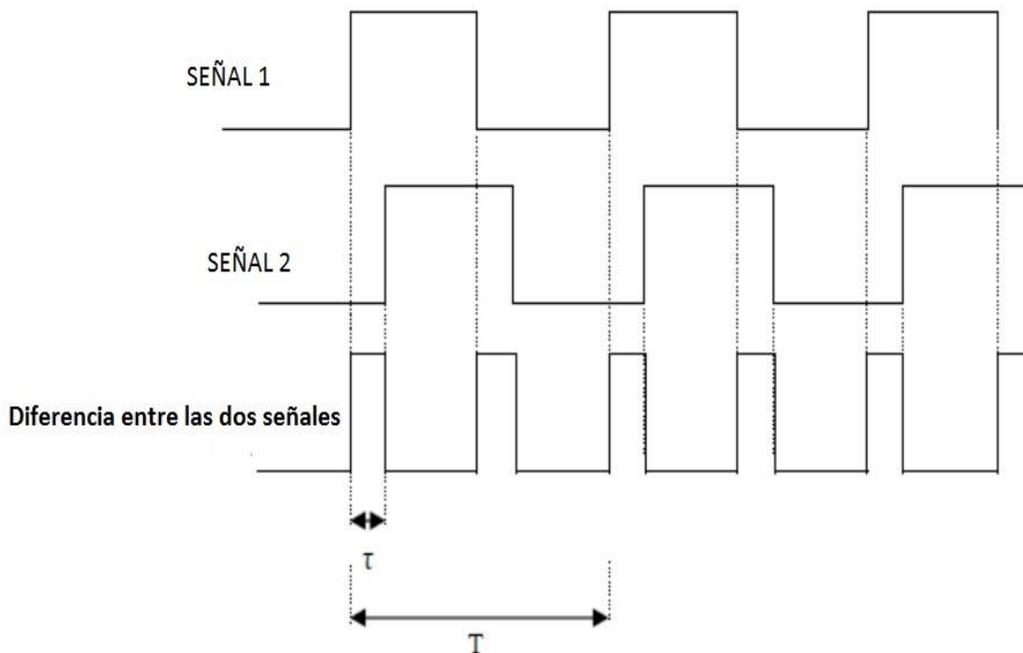


Figura 4.10 Diferencia de ángulo de fase entre dos señales.

4.3.3.2 Circuitería del sensor de diferencia de ángulo de fase.

En la figura 4.11 se muestra una parte del circuito de acondicionamiento de señales para poder medir la diferencia de fase, esta parte es un convertidor de onda senoidal a una señal cuadrada.

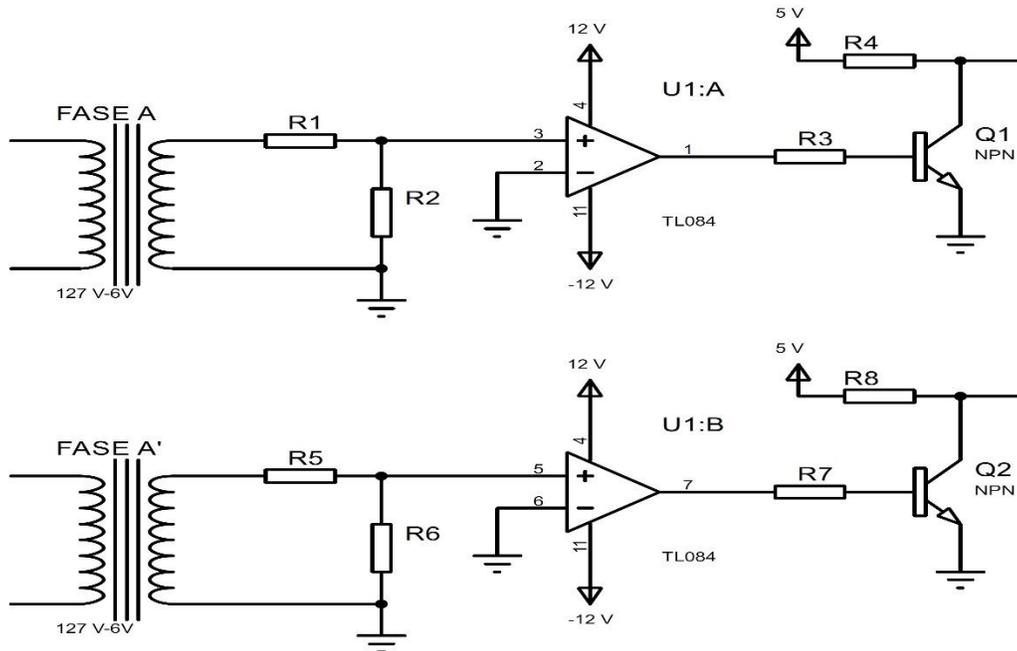


Figura 4.11 Convertidor de onda senoidal a onda cuadrada.

Como se puede observar en la figura 4.11 se tiene la primera parte de la circuitería del sensor que es convertidor de onda senoidal a onda cuadrada, está compuesto básicamente por un transformador reductor de 127 v a 6 v, el cual su función es reducir la amplitud de voltaje del suministro eléctrico (primario) a uno más pequeño y aislado del primario (secundario), un amplificador operacional (TL084) y un transistor BJT 2N2222 (NPN).

En esta parte el amplificador operacional está configurado como comparador, esto quiere decir que necesita dos entradas para funcionar y hacer una comparación

internamente para verificar de qué lado saldrá saturada la salida, ya sea positivo o negativo y esto dependerá del nivel de las entradas.

En la entrada no inversora (+) se conectó la señal senoidal del secundario y en la entrada inversora (-) se conectó a tierra. Después la salida del operacional va conectada a la base un BJT 2N2222. El transistor BJT 2N2222 funciona como un interruptor y nos ayuda a bajar el nivel de voltaje a 5 v, debido a que la señal de salida del operacional era de 12 v en la figura 4.12b se muestra la señal de salida que se obtiene del colector del transistor BJT 2N2222.

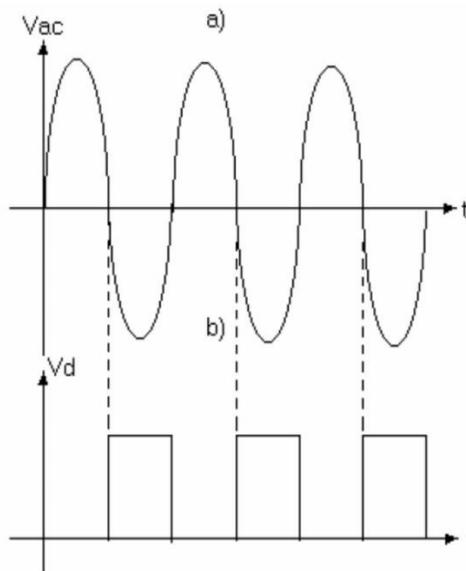


Figura 4.12 a) Señal alterna del secundario del transformador b) Señal de salida del convertidor de onda senoidal a onda cuadrada.

Como se observa en la figura 4.12 esta parte del circuito se encarga de entregar un pulso cada vez que el generador cruce por cero, durante el semiciclo positivo de la señal alterna nos dará un "0" lógico y durante el semiciclo negativo nos entregará un "1" lógico. Este pulso que se obtuvo es de la misma frecuencia que la señal de generador, aunque no está en fase con la señal del generador. En la figura 4.13 se muestra la segunda parte de este

circuito en donde se obtiene un pulso que es igual a la diferencia de fase entre las dos señales.

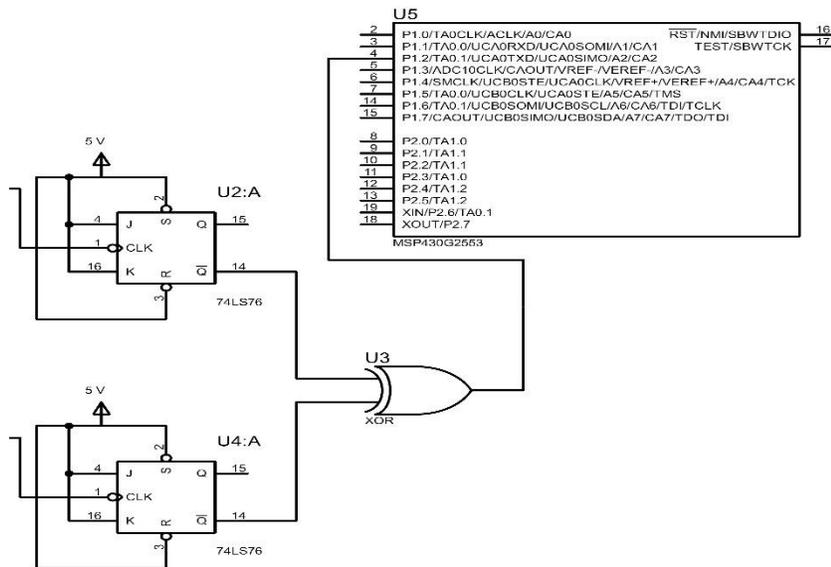


Figura 4.13 Parte del circuito para la obtención de diferencia de fase entre dos señales.

En esta etapa del circuito que se muestra en la figura 4.13, está compuesta básicamente de 2 flip-flops J-K y una compuerta XOR. En la figura 4.14 se muestra la configuración de pines del flip-flop empleado 74LS76AN que cuenta con 2 flip-flops J-K, el cual se alimenta con 5 Vcc y está conectado en la configuración toggle.

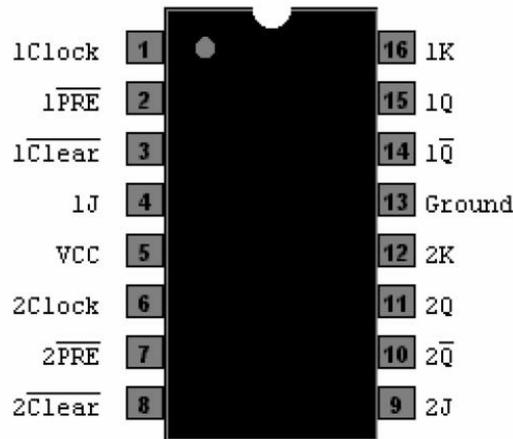


Figura 4.14 Configuración de pines del flip-flop 74LS76AN.

La compuerta XOR empleada fue la 74ls86 que cuenta con 4 compuertas y es alimentada con 5 Vcc se muestra en la figura 4.15a y en la figura 4.15b se encuentra su tabla de verdad.

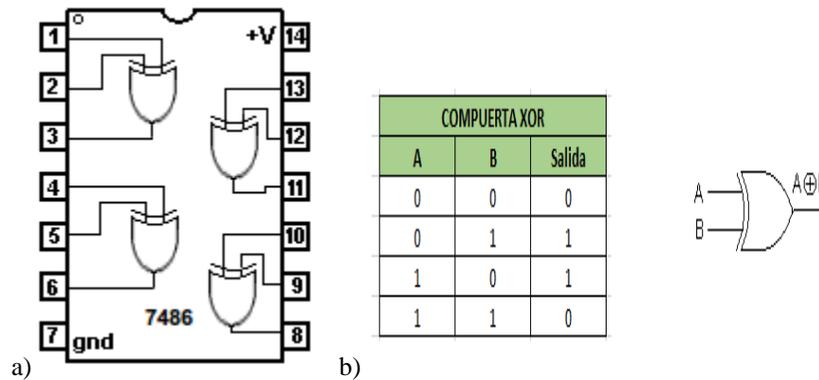


Figura 4.15 a) Configuración de pines de la compuerta XOR, **b)** Tabla de verdad de la compuerta XOR.

La señal que entra en el flip-flop es la señal que viene del colector del BJT 2N2222, la función del flip-flop es convertir la señal recibida a una señal con la mitad de la frecuencia de la original, esto nos ayuda debido a que se conectó directamente la señal que sale del colector a la compuerta XOR, se pudo obtener un pulso que sería igual a la diferencia de ángulo de fase de las dos señales pero con el problema que no sería proporcional, porque si una de las dos diferencias de fase es debajo de los 180 grados y la

otra mayor a esta pueden tener la misma diferencia, esto se solucionó conectando un flip-flop antes de la compuerta XOR con esta la señal de entrada a la compuerta era de la mitad de frecuencia que la original y esto hace que la diferencia de ángulo de fase cambie linealmente esto se muestra en la figura 4.16b.

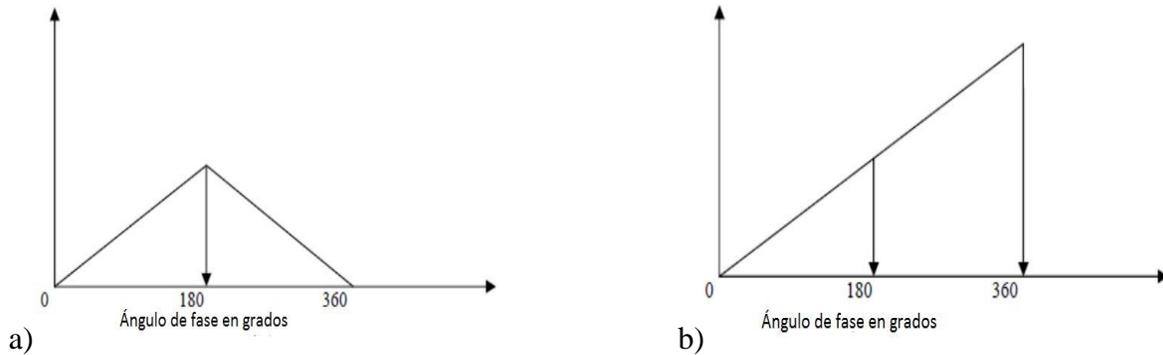


Figura 4.16 a) Gráfica de ángulo de fase sin flip-flop, **b)** Gráfica de ángulo de fase con flip-flop.

En la figura 4.17 se muestra las dos señales originales que salen del convertidor de onda senoidal a onda cuadrada, la salida de la señal del flip-flop con la mitad de la frecuencia de la original y por último la señal de la salida de la compuerta XOR, que es proporcional a la diferencia de ángulo de fase que existen entre la fase A del sistema de generación de referencia (CFE) y la fase A' del sistema de generación del equipo de LAB-VOLT.

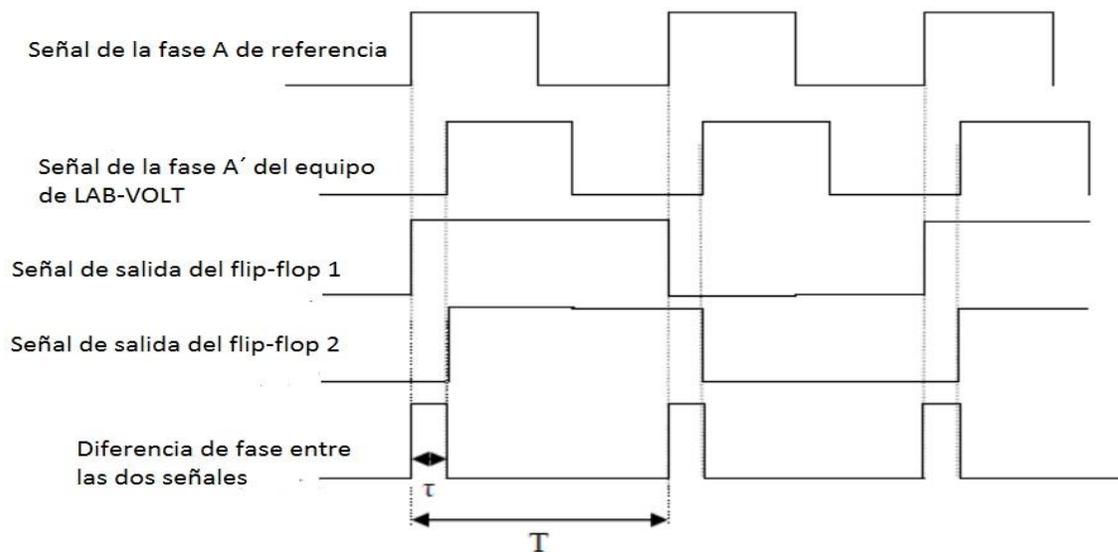


Figura 4.17 Gráfica de cada una de las señales obtenida.

En la figura 4.18 se muestra el circuito con las dos partes juntas explicadas anteriormente.

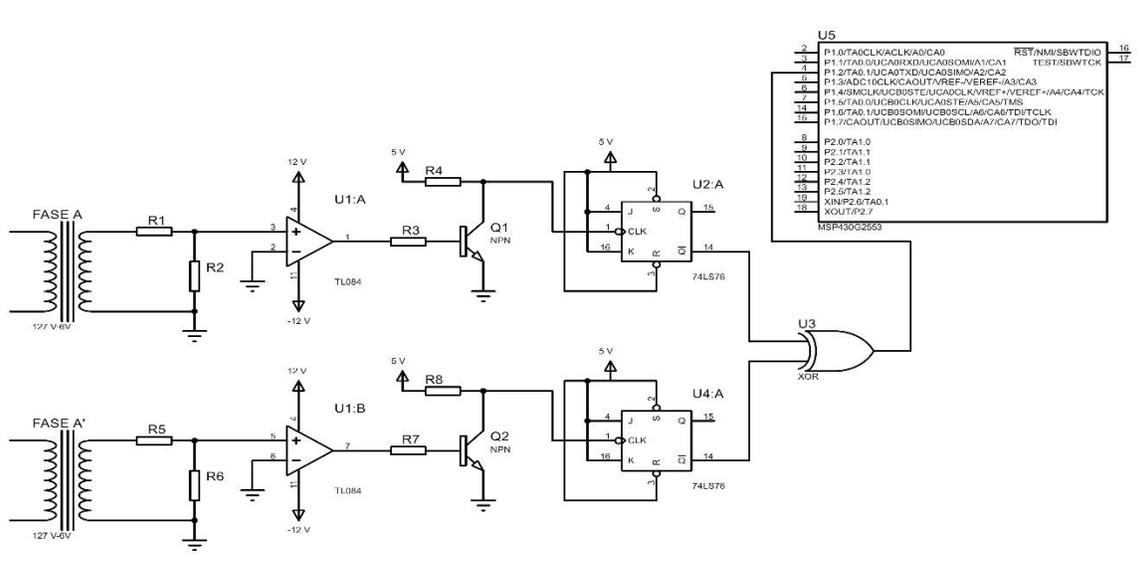


Figura 4.18 Circuitería completo para el sensor de diferencia de ángulo de fase.

Es importante mencionar que el circuito mostrado en la figura 4.18 para obtener la diferencia de fase de dos señales se triplico para sacar la diferencia de fase de las demás señales.

4.3.3.3 Descripción de los modos de operación del TIMER A del microcontrolador MSP430G.

Los microcontroladores de la familia MSP430G de Texas Instruments tienen al menos 1 timer de 16 bits de resolución, el cual es esencial para implementar el sensor de diferencia de ángulo de fase. En este caso el microcontrolador MSP430G2553 cuenta con dos timer de 16 bits de resolución los dos.

El timer_A del microcontrolador tiene los siguientes registros de 16 bits cada uno:

- 1.-TACTL: Registro de control del timer_A.
- 2.-TACCTLx: Registro de control de los modos captura/compara.
- 3.-TAR: Contador del timer_A.
- 4.-TACCRx: Registro de captura/compara.

El timer_A del microcontrolador puede operar de dos modos:

1.-Modo de comparación: se utiliza para generar señales PWM (modulación de ancho de pulso).

2.-Modo de captura: se utiliza para la medición de tiempo.

De los modos de funcionamiento del timer antes mencionados, el modo de captura es el que se utiliza para medir la diferencia de fase debido a que pueden medir el tiempo de duración del pulso que es la diferencia de fase entre las dos señales.

El modo captura funciona de la siguiente manera:

1.-La señal a procesar se debe conectar a los pines CCIxA o CCIxB del microcontrolador cuyas entradas anteriores se seleccionan configurando los bits CCISx del registro TACCTLx.

2.-Los bits CMx del registro TACCTLx seleccionan las transiciones (positivas, negativas o ambas) en el cual el timer va operar.

3.-Una captura ocurrirá cuando se presente alguna transición seleccionada previamente y pasará lo siguiente:

4.-El valor de la cuenta del timer_A se copiará al registro TACCRx. y la bandera de interrupción CCIFG se pondrá en 1.

Además, se debe configurar el bit SCS=1 del registro TACCTLx para que la señal a capturar este sincronizada con la fuente de reloj del timer_A.

4.3.3.4 Algoritmo de programación del MCU para el sensor de ángulo de fase.

Después de una breve explicación del funcionamiento del modo captura del timer_A, el timer del microcontrolador empezará a capturar el tiempo cuando ocurriera una transición positiva y se detendrá cuando ocurra una transición negativa, por medio de configuración de los bits CMx del registro TACCTLx. El timer captura el tiempo en forma de cuenta digital, como el registro del contador del timer (TAR) es de 16 bits de resolución este puede llegar hasta una cuenta de 65536, el valor a donde llegue la cuenta se almacenará en el registro TA0CCR0. Para convertir esta cuenta en unidades de tiempo (milisegundos) se utilizó la ecuación 4.9.

$$td = \frac{TAOCCRO}{frecuencia\ del\ timer_A} \quad (4.9)$$

Como se ve en la ecuación 4.8, se define que td es el retardo que tienen las dos señales entre sí, con la ecuación 4.9 se puede calcular este parámetro que es el pulso generador por la compuerta XOR y es capturado por el timer_A del microcontrolador y se puede sustituir la ecuación 4.9 en la 4.8 y obtendríamos la siguiente ecuación.

$$\phi = \frac{TAOCCRO}{frecuencia\ del\ timer_A} * \left(\frac{360}{T}\right) \quad (4.10)$$

La ecuación 4.10 fue la que implanto en la programación del microcontrolador para calcular el ángulo de diferencia de fases en grados. Es importante mencionar que la frecuencia con la cual operar el timer_A se puede configurar ya sea que trabaje con los siguientes relojes:

- 1.-MCLK. Este reloj es llamado el main clock o reloj principal tiene un rango de frecuencia que varía entre los 13 Mega Hertz a 16 Mega Hertz.
- 2.-SMCLK. Este reloj es llamado el submain clock o el reloj secundario tiene un rango de frecuencia que oscila el 1.1 Mega hertz.
- 3.-ACLK. Este reloj es llamado reloj auxiliar, es un reloj externo, se implementa físicamente al microcontrolador, y cuenta con una frecuencia de 32768 Hertz.

Para este medidor se configuró el timer_A opere con un reloj interno (SMCLK) calibrado internamente a 1 Mega Hertz, debido a que nos brinda mayor precisión en la medición debido a que esté operando a una frecuencia fija, en tanto si trabajáramos con los otros relojes su frecuencia cambia constantemente y eso daría como resultados mediciones con gran rango de error.

El sensor implementado y diseñado para medir la diferencia de ángulo de fase entre las señales del sistema de generación de referencia (CFE) y el sistema de generación del equipo de LAB-VOLT resultó altamente confiable y con buena precisión.

En la figura 4.19 se muestra el diagrama de flujo de programación del sensor de ángulo de fase.

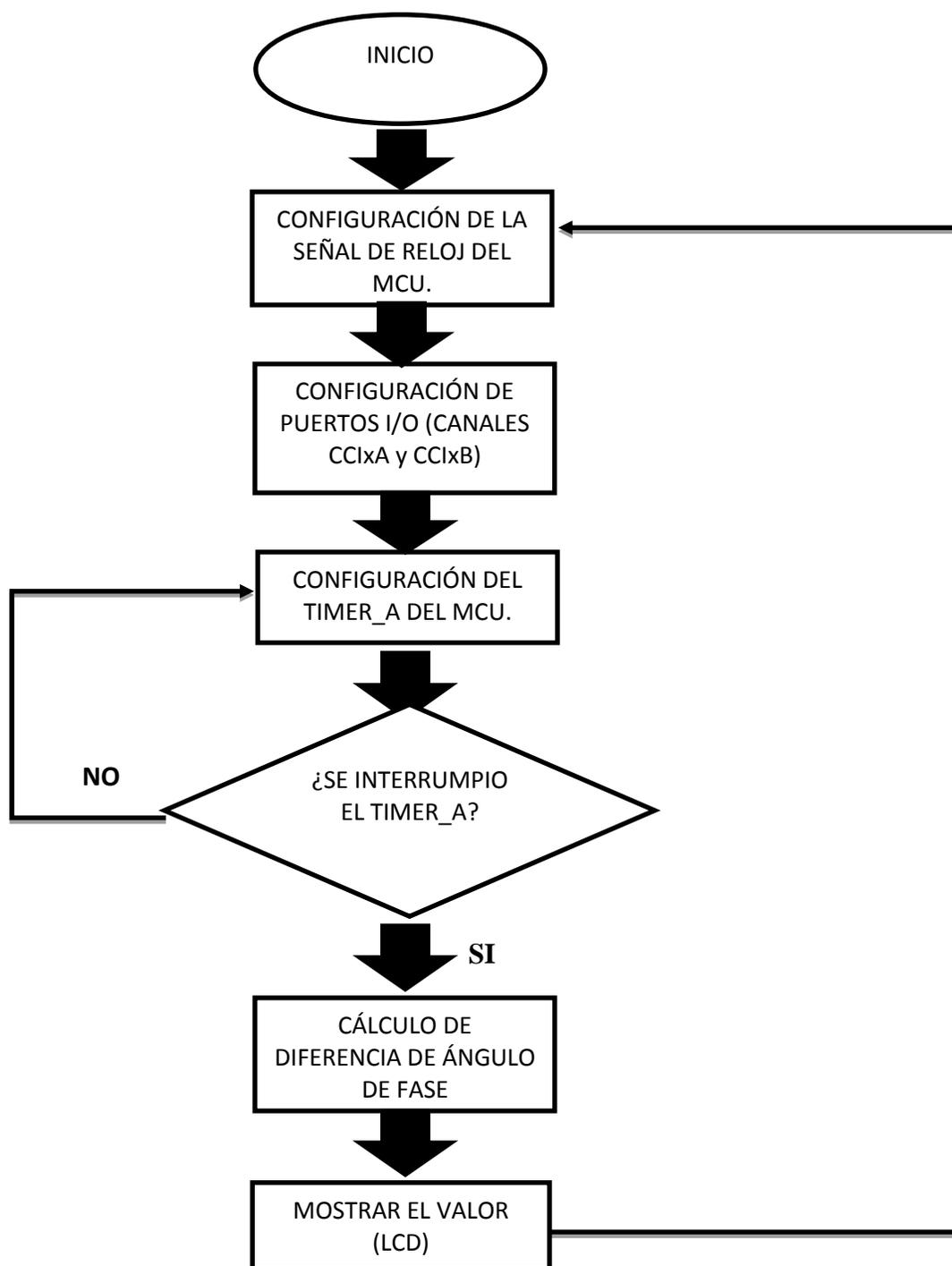


Figura 4.19 Diagrama de flujo del programa contenido en el microcontrolador del sensor de diferencia de ángulo de fase.

4.3.4 COMUNICACIÓN UART.

Una vez terminando de diseñar e implementar cada uno de los sensores en la etapa de adquisición de datos, se configuró los microcontroladores para que puedan transferir los datos de las mediciones a un microcontrolador que se encargará de mostrarlos en un LCD. En la figura 4.20 nos muestra el launchpad del microcontrolador MSP430G2553 el cual nos brinda dos protocolos de comunicación para poder transferir y recibir datos entre estos dispositivos los cuales son el protocolo UART y el protocolo i2c.

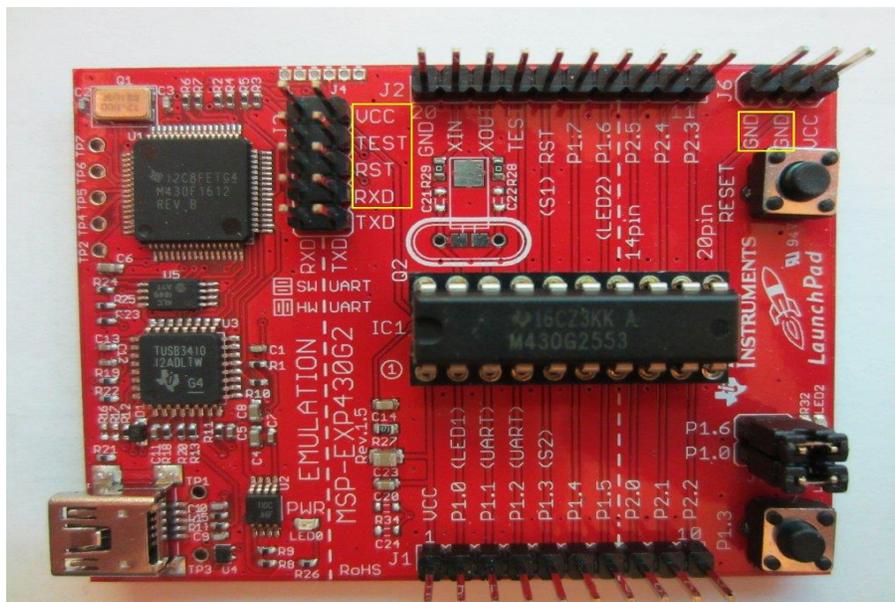


Figura 4.20 Launchpad MSP430G2553

Analizando los dos protocolos con los que se cuenta para comunicarnos, se optó por escoger la comunicación UART debido a su facilidad de configurar los registros y conexión entre microcontroladores. El microcontrolador MSP430G2553 cuenta con dos pines especializados para comunicarse por medio del protocolo UART que son el P1.1 que en este protocolo es el encargado de transmisión de datos (Tx) y el P1.2 es el encargado de recibir datos (Rx). En la figura 4.21 se observa la conexión que se debe hacer entre dos microcontroladores para poder utilizar este protocolo de comunicación.

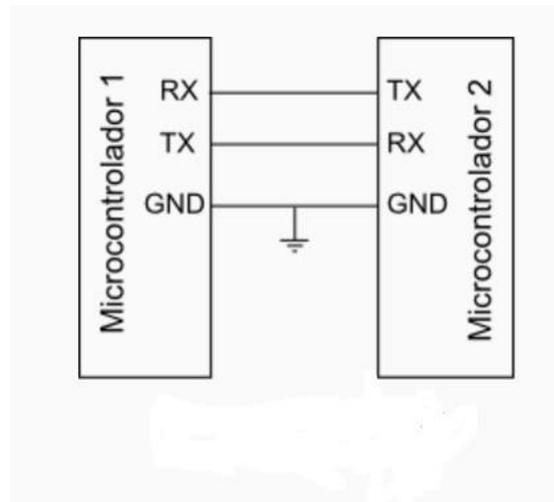


Figura 4.21 Conexión entre microcontroladores MSP430G2553 utilizando el protocolo UART.

Para usar este protocolo de comunicación se siguen los siguientes pasos:

- 1.-Primeramente, el Launchpad MSP430G2553 se debe de colocar los jumpers a 90 grados, para activar el protocolo de comunicación como se muestra en la figura 4.22.

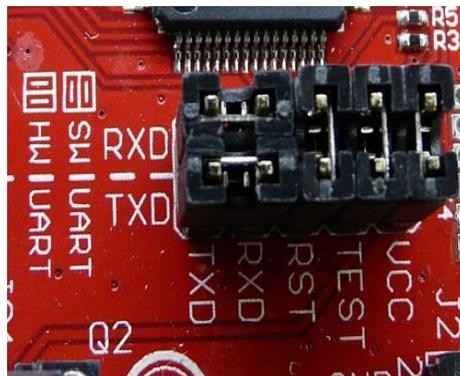


Figura 4.22 Conexión de jumpers para operar con el protocolo UART.

- 2.-Como se mencionó anteriormente los pines P1.1 y P1.2 del puerto 1 del microcontrolador esta diseñados para trabar en este protocolo como transmisión de datos (Tx) y recepción de datos (Rx) respectivamente. Estos se configuran con la ayuda de la instrucción PxSEL2, que nos permite habilitar su función especial de los pines para trabajar con la comunicación UART.

3.-El protocolo de comunicación cuenta con 2 registro de control de 8 bits cada uno. Con el registro de control UCAXCTL1 se configuró el reloj con el que trabajara la comunicación con los bits UCSSELx y también se activó la comunicación con los bits UCSWRST de este registro de control. En nuestro trabajo de comunicación decidimos utilizar el reloj principal que tiene una frecuencia que oscila a los 16 Mega Hertz.

4.-Después de configurar el reloj y la activación de la comunicación UART por medio del registro UCAXCTL1, se configuro los registros de control del baud rate que son UCAXBRO y UCAXBR1. Recuérdese que el baud rate indica el número de bits por segundo que se transfiere y se mide en baudios, para configurar estos dos registros nos apoyamos en la tabla 4.5 se obtuvo del manual de programación del MSP430G. En esta tabla nos indica que con la frecuencia de operación que escogimos (16 Mega Hertz) y si se requiere un baud rate de 9600 baudios por segundos, se necesita cargar el registro UCAXBRO con 104 y el registro UCAXBR1 cargarlo con 0.

BRCLK Frequency [Hz]	Baud Rate [Baud]	UCBRx	UCBRsx	UCBRFx	Maximum TX Error [%]		Maximum RX Error [%]	
1,048,576	9600	8	0	13	-2.3	0	-2.2	0.8
1,048,576	19200	3	1	6	-4.6	3.2	-5.0	4.7
1,000,000	9600	6	0	8	-1.8	0	-2.2	0.4
1,000,000	19200	3	0	4	-1.8	0	-2.6	0.9
1,000,000	57600	1	7	0	-34.4	0	-33.4	0
4,000,000	9600	26	0	1	0	0.9	0	1.1
4,000,000	19200	13	0	0	-1.8	0	-1.9	0.2
4,000,000	38400	6	0	8	-1.8	0	-2.2	0.4
4,000,000	57600	4	5	3	-3.5	3.2	-1.8	6.4
4,000,000	115200	2	3	2	-2.1	4.8	-2.5	7.3
4,000,000	230400	1	7	0	-34.4	0	-33.4	0
8,000,000	9600	52	0	1	-0.4	0	-0.4	0.1
8,000,000	19200	26	0	1	0	0.9	0	1.1
8,000,000	38400	13	0	0	-1.8	0	-1.9	0.2
8,000,000	57600	8	0	11	0	0.88	0	1.6
8,000,000	115200	4	5	3	-3.5	3.2	-1.8	6.4
8,000,000	230400	2	3	2	-2.1	4.8	-2.5	7.3
8,000,000	460800	1	7	0	-34.4	0	-33.4	0
12,000,000	9600	78	0	2	0	0	-0.05	0.05
12,000,000	19200	39	0	1	0	0	0	0.2
12,000,000	38400	19	0	8	-1.8	0	-1.8	0.1
12,000,000	57600	13	0	0	-1.8	0	-1.9	0.2
12,000,000	115200	6	0	8	-1.8	0	-2.2	0.4
12,000,000	230400	3	0	4	-1.8	0	-2.6	0.9
16,000,000	9600	104	0	3	0	0.2	0	0.3
16,000,000	19200	52	0	1	-0.4	0	-0.4	0.1
16,000,000	38400	26	0	1	0	0.9	0	1.1
16,000,000	57600	17	0	6	0	0.9	-0.1	1.0
16,000,000	115200	8	0	11	0	0.9	0	1.6
16,000,000	230400	4	5	3	-3.5	3.2	-1.8	6.4
16,000,000	460800	2	3	2	-2.1	4.8	-2.5	7.3

Tabla 4.5 *Tabla de los baud rate más utilizados para el microcontrolador MSP430G.*

1. Por último, se configuró la modulación de comunicación UART por medio del registro UCA0MCTL cargando con un 1 en el bit UCBSR0 y se activó las interrupciones de transmisión de datos UCA0TXIE y recepción de datos UCA0RXIE con el registro IE2 de 8 bits de resolución. Estas interrupciones se activan cuando el buffer de transmisión UCAxTXBUF o el buffer de recepción de datos UCAxRXBUF contiene información que transmitir o recibir respectivamente.

El microcontrolador encargado de recibir los datos de los sensores de la etapa de adquisición de datos los mostrará en una LCD de 20x4 programada para trabajar con el método de 4 bits y 2 líneas, la LCD se muestra en la figura 4.23 y su configuración de pines.

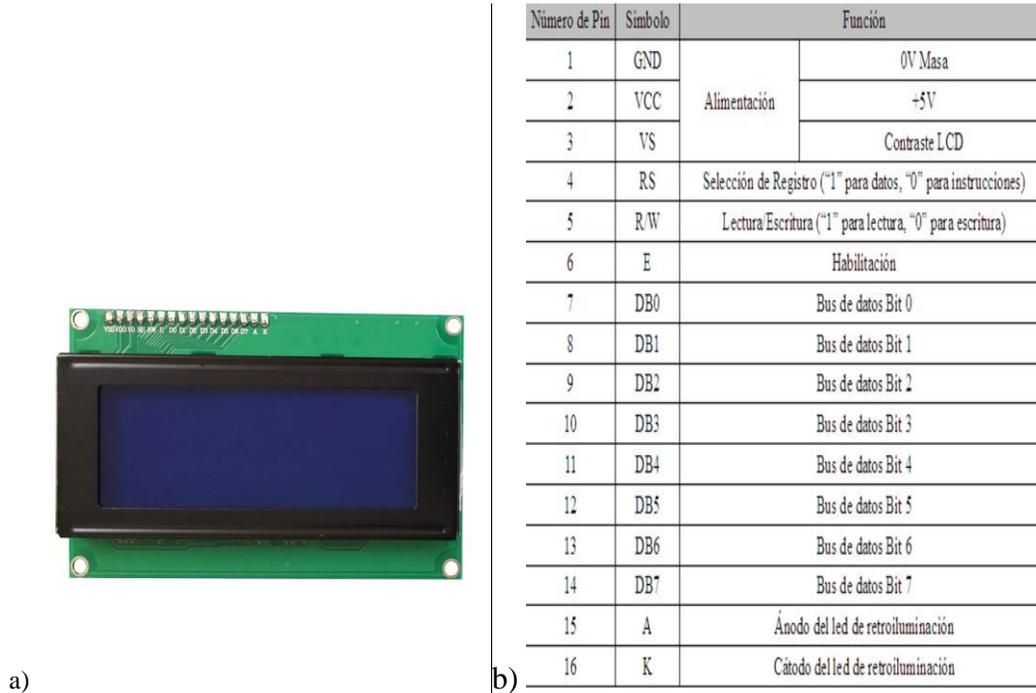


Figura 4.23 a) Pantalla LCD 20x4, b) Configuración de pines de la pantalla LCD.

4.4 DISEÑO DEL GOBERNADOR DE VELOCIDAD.

El gobernador de velocidad que se implementa para el presente trabajo tiene la finalidad de controlar las revoluciones del primo-motor, para este caso se utilizó un motor de impulsión que se alimenta de 120 VCD. El control que se le aplica al primo-motor debe estar en función de la maquina síncrona con la que se está trabajando.

El generador trifásico síncrono utilizado en este trabajo es el modelo 8241 de Lab-Volt, el cual es de cuatro polos en los cuales se genera dos ciclos en cada bobina por revolución. Como el número de ciclos por revolución es igual al número de pares de polos, la frecuencia del voltaje generado es:

$$f = \frac{P}{2} * \frac{N}{60} = \frac{P}{2} * F_m \quad 4.1$$

Dónde:

f = frecuencia eléctrica en Hz

P = número de polos

N = velocidad del rotor en revoluciones por minuto (rpm).

F_m = N/60, frecuencia mecánica en revoluciones por segundo (rps)

De la ecuación 4.11 despejando el número de revoluciones por minuto para un sistema que trabaja a 60 Hz, se obtiene que se necesita una velocidad de 1800 rpm para obtener la velocidad de sincronismo.

Introduciéndonos al tema del gobernador de velocidad, este se implementará con RTAI que es una herramienta de desarrollo de software y control de sistemas en tiempo real, su principal virtud es el desarrollar diagramas de bloques elementales y generar automáticamente ejecutables. El control de las revoluciones del motor de impulsión se llevará a cabo por medio de la variación de su alimentación vía modulación de ancho de pulso (PWM), mientras que la adquisición de datos y la ejecución de la lógica de control es por medio de la tarjeta PCI6024E de National Instruments implementada en una computadora con sistema operativo Linux. En la figura 4.24, se muestra la tarjeta de adquisición de datos que se monta en un ordenador.



Figura 4.24 Tarjeta PCI6024E National Instrument.

Es importante mencionar que se desconoce algunos datos internos del motor de impulsión, esto para realizar un control completo de sus variables que forman parte de un sistema dinámico invariante en el tiempo, debido a la restricción anterior con la tarjeta de adquisición de datos obtendremos la respuesta de la velocidad del motor en lazo abierto con un escalón de voltaje y observar si esta respuesta puede ser controlada. En la figura 4.25 se muestra el diagrama de conexión utilizado para la realización de la adquisición de la señal antes mencionada, y a su vez también la del controlador.

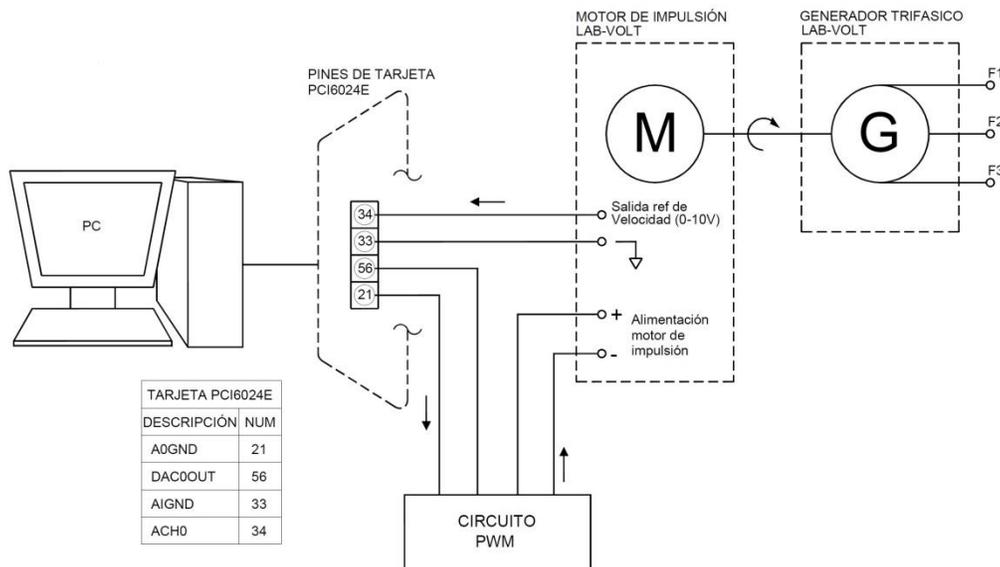


Figura 4.25 Diagrama de conexiones del controlador.

Para realizar la respuesta en lazo abierto del sistema y capturarla adecuadamente se realizó un levantamiento de 40 muestras del voltaje que se le aplica al motor de impulsión contra el voltaje que se mide a su salida de voltaje de 0-10VCD que es proporcional a la velocidad en revoluciones por minuto. Lo antes mencionado se muestra en la tabla 4.6 mismas que se le aplican una regresión lineal para obtener una respuesta más uniforme y reducir el error en la captura de la señal de salida.

RPM	VCD	RPM	VCD	RPM	VCD	RPM
55	0.12	556	1.137	1054	2.148	1559
104	0.224	601	1.23	1102	2.247	1601
153	0.32	656	1.344	1151	2.347	1653
209	0.434	702	1.435	1208	2.463	1704
253	0.524	756	1.544	1255	2.559	1759
307	0.633	803	1.642	1306	2.661	1811
351	0.723	853	1.742	1356	2.763	1855
401	0.823	903	1.844	1405	2.864	1901
451	0.925	954	1.947	1454	2.955	1956
502	1.028	1005	2.051	1509	3.067	2006

Tabla 4.6 Muestras de RPM de Motor impulsión-referencia de velocidad 0-10 VCD.

La respuesta en lazo abierto que arroja la tarjeta PCI6024E y el programa en tiempo real (RTAI) es la que se muestran en la figura 4.26 el programa ejecutable nos proporciona archivos .dat que son compatibles con MATLAB.

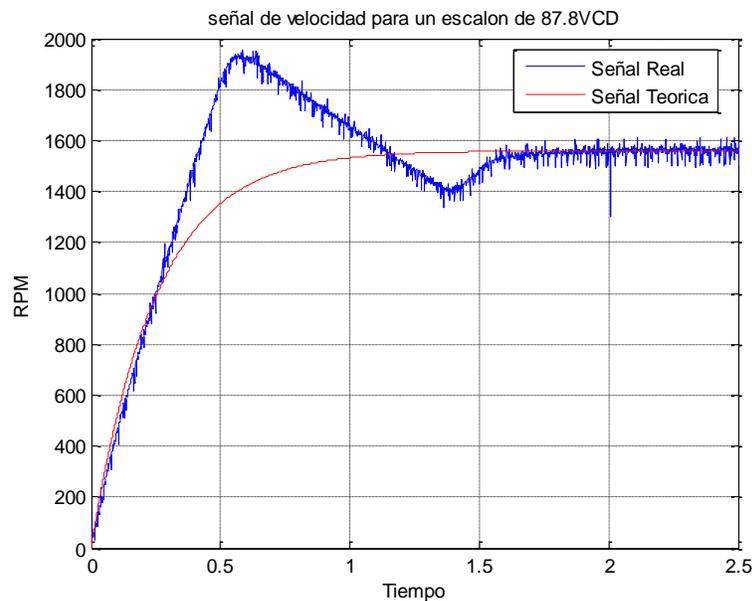


Figura 4.26 Señal de velocidad en lazo abierto ante un escalón de voltaje.

De acuerdo a la respuesta obtenida de la velocidad en lazo abierto se realiza una aproximación teórica de primer orden, la cual de la misma manera es presentada en la figura 0.0. La señal teórica puede ser controlable y con un método numérico se realiza la simulación de un control proporcional integral (PI), la técnica para calcular las ganancias de control es por asignación de polos en forma arbitraria. En la ecuación 4.12 se muestra el modelo matemático simulado del sistema aumentado planta-controlador

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} XI \\ wr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -BKI & A - BK \end{bmatrix} \begin{bmatrix} XI(t) \\ wr(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [r] \quad 4.1$$

La implementación del controlador en el sistema RTAI permite interactuar con el controlador en tiempo real, por lo cual se puede variar los puntos de consigna en cuanto a la velocidad del primo motor, esto es muy importante debido a que la variación de velocidad afecta directamente a la frecuencia y el ángulo de fase del sistema de generación a sincronizar, en la figura 4.27 se muestra el sistema realizado en dicha plataforma.

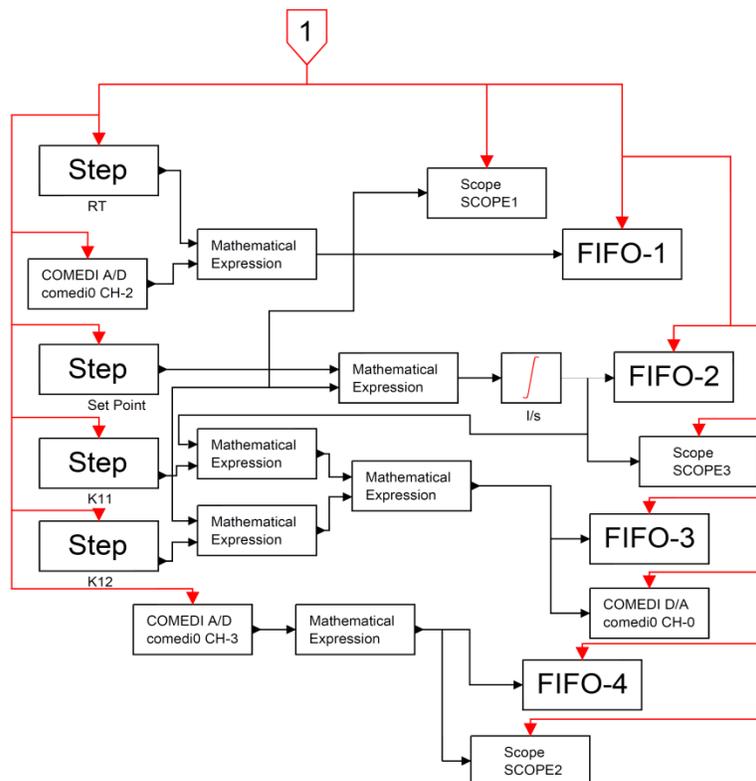


Figura 4.27 Programación a bloques del gobernador de velocidad implementado en RTAI.

4.5 DISEÑO DE UN INTERRUPTOR TRIFÁSICO.

Se diseñó un interruptor trifásico que pueda conectar el sistema de generación del equipo de LAB-VOLT con un sistema de referencia brindado por CFE. En la figura 4.28 se muestra un diagrama de general del interruptor trifásico que se implementó para este trabajo de investigación.

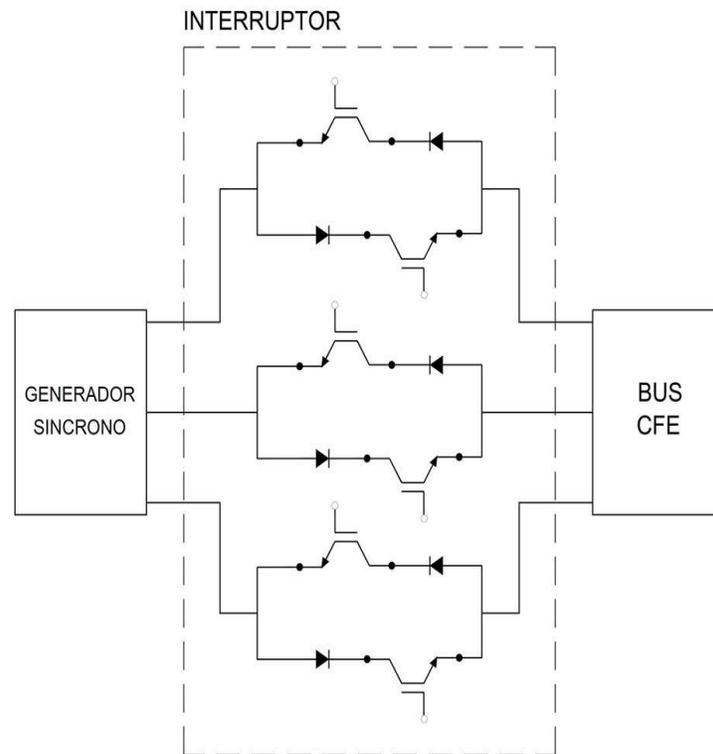


Figura 4.28 Diagrama general del interruptor diseñado.

Básicamente el interruptor en cada fase del generador síncrono está compuesto por dos MOSFET's de potencia conectados en antiparalelo para poder conducir en los dos sentidos de la señal alterna (tipo N de enriquecimiento), el modelo utilizado fue IRF840, los cuales consultando la hoja de datos pueden soportar 8 Amperes entre sus terminales de drenaje(drain) y fuente (source), además de soportar un voltaje de ruptura inverso entre estas terminales de hasta 500 v. Por estas características se eligió este modelo debido a que la corriente máxima que transcurre por el sistema de generación propuesto es de 1.2 Amperes y su voltaje de generación máximo es 127 VCA, con esto se puede ver que el MOSFET IRF840 cumple ampliamente con estos parámetros.

Esta etapa también cuenta con dos diodos IN5408 por fase, los cuales soportan 600 V de voltaje inverso entre ánodo y cátodo además de 3 amperes de corriente directa entre estas terminales.

Recordemos que el MOSFET al igual que el transistor BJT es un dispositivo de 3 terminales (compuerta, drenaje y fuente), la compuerta en caso del MOSFET es la que controla el flujo de corriente entre las terminales de salida, drenaje y fuente. En aplicaciones de potencias el MOSFET trabaja como interruptor, este entra en funcionamiento cuando se le aplica una diferencia de potencial en la compuerta. Esta diferencia de potencial apoyándonos con la hoja de datos del mismo nos debería ser de 12 Vcc para que las terminales de salida, drenaje-fuente cierren completamente sin ningún problema.

Para activar los MOSFET's por medio de voltaje se utilizó un convertidor de CD-CD como fuente flotante la cual nos brinda una fuente aislada de 12 Vcc y un optoacoplador que activará cada uno de los MOSFET's. En la figura 4.29 se muestra el convertidor de CD-CD empleado modelo RI-1212S y el optoacoplador modelo 4N25.



Figura 4.29 a) Configuración Fuente flotante RI-1212S, b) Configuración del optoacoplador 4N25.

El optoaclopador 4N25 como se mencionó anteriormente activara el MOSFET de potencia cuando reciba un 1 lógico en el pin 1 de este dispositivo. Esta señal de control para activar los MOSFET de potencia será mandada por la etapa de adquisición de datos, cuando los parámetros de voltaje, frecuencia y ángulo de fase se encuentren dentro de los límites permitidos, estos valores se explicaron en el capítulo 3.

En la figura 4.30 se muestra la circuitería electrónica de uno de los 3 interruptores de diseñados.

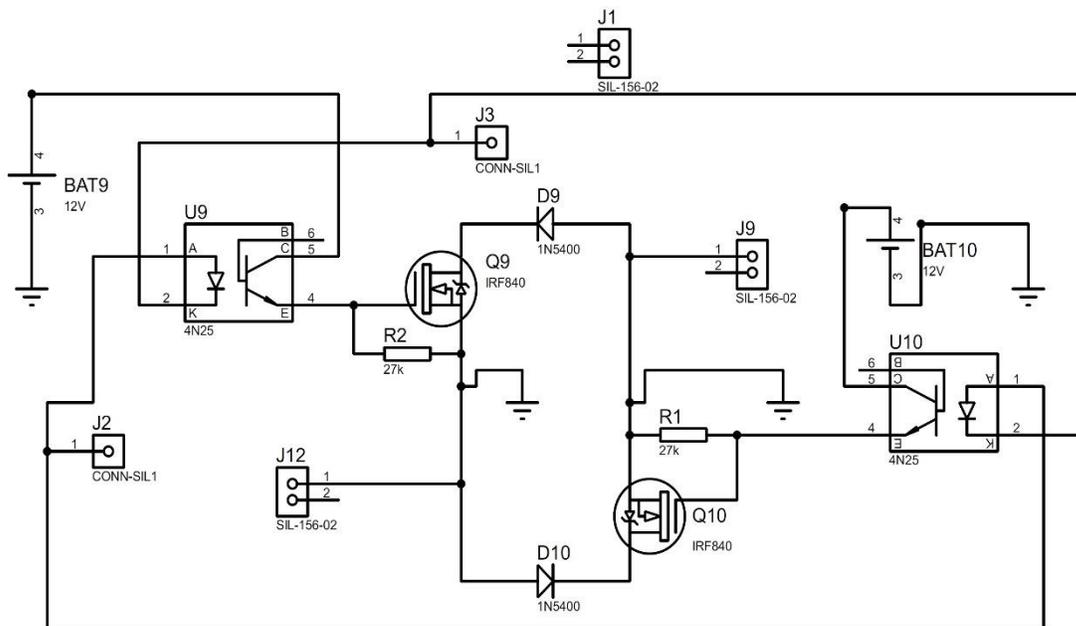


Figura 4.30 *Circuitería de uno de los 3 interruptores diseñados.*

Capítulo

5

Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se muestra las conclusiones del trabajo de investigación y algunas recomendaciones para trabajos futuros.

5.1. Conclusiones.

Este trabajo explica el diseño y construcción de un sincronizador automático digital con el que se sincronizo un arreglo motor-generator del equipo de LAB-VOLT con el sistema trifásico brindado por CFE. Algunas contribuciones que se presentan a lo largo de los capítulos fueron las siguientes:

- En el primer capítulo se plantearon la justificación, objetivos, alcances y limitaciones para el desarrollo del proyecto.
- En el segundo capítulo se abordaron algunos conceptos básicos de la maquinaria eléctrica empleada para el arreglo motor-generator del equipo de LAB-VOLT.
- En el tercer capítulo se proporcionó una explicación sobre los pasos para llevar a cabo la sincronización automática, límites de los parámetros para ejecutar este proceso y daños que se pueden causar debido a una mala sincronización.
- En el cuarto capítulo se abordó el diseño de cada una de las etapas que componen el prototipo. Además de mostrar tablas que verifican la precisión de los medidores diseñados para verificar su optimo desempeño.

Las conclusiones generales son las siguientes:

- El sincronizador automático digital diseñado en este proyecto está basado en la familia de microcontroladores MSP430G.
- El sincronizador mide los 3 parámetros necesarios para llevar a cabo el proceso de sincronización por medio de una etapa de adquisición de datos, los cuales son el voltaje, la frecuencia y la diferencia de fase entre los dos sistemas de generación planteados en este trabajo y los conecta entre si cuando estos parámetros se encuentren adentro de los limites aceptados.

- El gobernador de velocidad desarrollado regula la velocidad del motor primario del equipo de LAB-VOLT para llevarlo a la velocidad síncrona del motor (1800 rpm).
- El interruptor que conecta los dos sistemas, es controlador por la etapa de adquisición de datos y está compuesto por dispositivos electrónicos de potencia (MOSFET).

5.2. Recomendaciones para trabajos futuros.

El sincronizador automático digital desarrollado para este trabajo de investigación requiere añadirle un controlador de voltaje (AVR) y un controlador de frecuencia (ALFC) para su propio control, el cual proporcionará la capacidad de ajustar el voltaje y la frecuencia adentro de los límites del proceso de sincronización y obtener el total control del generador. En el dispositivo se dejó habilitado dos pines para que un controlador de voltaje y de frecuencia pueda comunicarse con este dispositivo ya sea por medio de comunicación UART o I2C y funcionen como esclavos del sincronizador.

Se recomienda generalizar el dispositivo para poder sincronizar generadores con mayor capacidad. Todo esto esperando que este trabajo de investigación sea completado con las recomendaciones mencionadas anteriormente.

BIBLOGRAFIA.

- [1] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Sistemas de Potencia, análisis y diseño, tercera edición, Thompson 2004.
- [2] Ahmad I. Abo Dabowsa, Design of an Automatic Synchronizing Device for Dual Electrical Generators Based on CAN Protocol, the Islamic University of Gaza, Junio 2011.
- [3] Ahmad I. Abo Dabowsa, Design of an Automatic Synchronizing Device for Dual Electrical Generators Based on CAN Protocol, the Islamic University of Gaza, Junio 2011.
- [4] Stephen J. Chapman, Maquinas eléctricas. México: McGraw Hill, 2005.
- [5] Ramírez Medina Hugo Javier, Diseño y construcción de un tablero de transferencia y sincronización de generadores de emergencia con PLC y pantalla táctil, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,2012.
- [6] IEEE Std. C37.118-2005, IEEE Power Engineering Society, IEEE estándar para sincrofasores para sistemas de potencia,2005.
- [7] Reimert Donald, Protective Relay for Power Generation System, CRC Press, Nueva York,2006.
- [8] Michael J. Thompson, Fundamentals and Advancements in Generator Synchronizing Systems, Power-GEN International, in Las Vegas 2011.
- [9] Ramírez Medina Hugo Javier, Diseño y construcción de un tablero de transferencia y sincronización de generadores de emergencia con PLC y pantalla táctil, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Noviembre 2012.
- [10] Stephen J. Chapman, Maquinas eléctricas. México: McGraw Hill, 2005.
- [11] Ivonne Paniagua Gómez, Protección diferencial de generadores síncronos usando redes neuronales artificiales, Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.

- [12] John J. Grainger, William D. Stevenson Jr, Análisis de sistemas de potencia, McGraw-Hill/interamericana de México, S.A. de C.V., Estado de México, 1996.
- [13] Monreal Herrera Agustín, Manual de Prácticas de laboratorio de Máquinas Eléctricas, Universidad Veracruzana, Facultad de ingeniería, Estado de Veracruz, 2009.

Direcciones electrónicas

- [14] Se puede encontrar en <https://www.labvolt.com/>