



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**SISTEMA ELECTRÓNICO DE SINCRONIZACIÓN DE
ALTERNADORES**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

LIZBETH PAULINA CHANO CÓRDOVA

DIRECTOR: ING. ARMANDO MÉNDEZ

Quito - julio 2016

© Universidad Tecnológica Equinoccial. 2016

Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO
PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1720246212
APELLIDO Y NOMBRES:	Chano Córdova Lizbeth Paulina
DIRECCIÓN:	Carcelén
EMAIL:	lizpau@live.com
TELÉFONO FIJO:	022479504
TELÉFONO MOVIL:	0987519127

DATOS DE LA OBRA					
TITULO:	“Sistema Electrónico de Sincronización de Alternadores”				
AUTOR O AUTORES:	Lizbeth Paulina Chano Córdova				
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	Junio 2016				
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	Ing. Armando Méndez García				
PROGRAMA	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">PREGRADO</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">x</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">POSGRADO</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>	PREGRADO	x	POSGRADO	<input type="checkbox"/>
PREGRADO	x	POSGRADO	<input type="checkbox"/>		
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Mecatrónica				
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	<p>La presente investigación comprende el desarrollo de un sistema electrónico de sincronización de generadores capaz de ejecutar el proceso de control automático para acondicionar las variables de voltaje, frecuencia, y ángulo de fase de las líneas de un alternador trifásico a los valores nominales que impone el sistema de distribución eléctrica. Las centrales energéticas disponen de tableros de sincronización manuales con instrumentos de medición que permiten al operador observar el comportamiento de las fases del generador y decidir el momento oportuno del cierre del interruptor de conexión cuando el generador entra en fase</p>				

	<p>con la red eléctrica. Al ser un equipamiento supervisado por pura percepción y experiencia del operador, se carece de rigurosidad en la precisión para acoplar el alternador al bus infinito en el instante oportuno.</p> <p>En base en la disponibilidad de la electrónica actual, se diseñaron e implementaron los circuitos de potencia acondicionados por PWM necesarios para el control del banco de pruebas constituido por un motor DC que proporciona la energía mecánica al alternador acoplado a su eje. Inicialmente, fue necesario realizar pruebas de funcionamiento manual sobre las dos máquinas para analizar el comportamiento de generación de electricidad. Las mediciones de voltaje y frecuencia registradas en las pruebas de operación permitieron desarrollar el algoritmo de programación de controladores PID analógicos ejecutados bajo un lenguaje de programación gráfico cargado en un circuito de control embebido constituido por un procesador en tiempo real y un chip FPGA que realiza las tareas de un conversor analógico digital, generación de señales PWM y salidas digitales.</p>
<p>PALABRAS CLAVES:</p>	<p>Sincronización de Fases de Alternador, Control PID, Voltímetro, Frecuencímetro, Detector de Fase.</p>
<p>ABSTRACT:</p>	<p>This research involves the development of a generator synchronization electronic system capable of running the automatic control process to condition variable voltage, frequency, and phase angle of the lines of an alternator to the nominal values imposed by the electrical distribution system. Power plants have boards of manual synchronization</p>

	<p>with measurement instruments that allow the operator to observe the behavior of the phases of the generator and choose the appropriate time to close the switch connection when the generator goes into phase with electric network. Being an equipment supervised by pure perception and experience of the operator, there is a lack of rigor in accuracy for coupling the alternator to the infinite bus at the right moment.</p> <p>Based on the availability of the current electronics, the power circuits required for conditioning by PWM control tested consisting of a DC motor that provides the mechanical energy to alternator coupled to its axis. Initially, it was necessary initially to test manual operation on the two machines to analyze the behavior of electricity generation. Voltage and frequency measurements registered in the operational tests allowed to develop the programming algorithm of analog PID controllers implemented under graphical programming language loaded in an embedded control board which consists of a real-time processor and FPGA chip that performs the digital analog converter tasks, generating PWM signals and digital outputs.</p>
<p>KEYWORDS</p>	<p>Synchronizing Phases Alternator, PID Control, Voltmeter, frequency meter, Phase Detector.</p>

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f: 

CHANO CÓRDOVA LIZBETH PAULINA
1720246212

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **CHANO CÓRDOVA LIZBETH PAULINA**, CI 1720246212 autor/a del proyecto titulado: **SISTEMA ELECTRÓNICO DE SINCRONIZACIÓN DE ALTERNADORES** previo a la obtención del título de **INGENIERA EN MECATRÓNICA** en la Universidad Tecnológica Equinoccial.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad Tecnológica Equinoccial a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 01 de julio de 2016

f: _____



CHANO CÓRDOVA LIZBETH PAULINA
1720246212

DECLARACIÓN

Yo, **LIZBETH PAULINA CHANO CÓRDOVA**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

f: _____



CHANO CORDOVA LIZBETH PAULINA
1720246212

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título "**SISTEMA ELECTRÓNICO DE SINCRONIZACIÓN DE ALTERNADORES**", que, para aspirar al título de **INGENIERA EN MECATRÓNICA**, fue desarrollado por **CHANO CÓRDOVA LIZBETH PAULINA**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 y 28.



ING. ARMANDO MÉNDEZ GARCÍA
DIRECTOR DEL TRABAJO
C.I. 1754140091

ÍNDICE DE CONTENIDO

PÁGINA

RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUCCIÓN	
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 MÁQUINAS ELÉCTRICAS	5
2.2 TRANSFORMADORES	5
2.2.1 TRANSFORMADOR IDEAL	6
2.3 GENERADOR SÍNCRONO	7
2.3.1 PARTES DE UN GENERADOR SÍNCRONO	8
2.3.2 VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO	9
2.3.3 MODELO MATEMÁTICO GENERADOR SÍNCRONO	10
2.4 MOTORES DC	11
2.4.1 MODELO MATEMÁTICO DE MOTOR DC	11
2.5 CIRCUITOS TRIFÁSICOS	13
2.5.1 GENERACIÓN DE VOLTAJES TRIFÁSICAS	13
2.5.2 VOLTAJES Y CORRIENTES EN UN CIRCUITO TRIFÁSICO	14
2.6 SISTEMAS DE REGULACIÓN ELÉCTRICOS	16
2.6.1 REGULADOR DE VOLTAJE	16
2.6.2 REGULADOR DE FRECUENCIA	18
2.7 CONEXIÓN DE UN ALTERNADOR A LA RED ELÉCTRICA	18
2.8 MÉTODOS DE SINCRONIZACIÓN	20
2.8.1 SINCRONIZACIÓN MANUAL	20
2.8.2 SINCRONIZACIÓN AUTOMÁTICA	26
2.9 TRANSFORMADA DE FOURIER	26
3. METODOLOGÍA Y DISEÑO	
3.1 METODOLOGÍA MECATRÓNICA	29
3.2 METODOLOGÍA DEL PROYECTO	29
3.3 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	30
3.4 ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS	31
3.5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN	33
3.5.1 MEDICIÓN DE PARÁMETROS DEL ALTERNADOR	33
3.5.2 DEDUCCIÓN ECUACIÓN DE VOLTAJE GENERADO POR EL ALTERNADOR	34

3.6 OBTENCIÓN DE LAS DIMENSIONES FÍSICAS DEL ALTERNADOR	34
3.6.1 NÚMERO DE POLOS	35
3.6.2 LONGITUD DEL ENTREHIERRO	35
3.6.3 LONGITUD AXIAL DEL HIERRO DEL ESTATOR/ ROTOR	36
3.6.4 RADIO DEL ROTOR	37
3.6.5 VELOCIDAD ANGULAR DE ENTRADA.....	37
3.6.6 FACTORES DEL ESTATOR	38
3.6.7 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO	39
3.7 DISEÑO REGULADOR AUTOMÁTICO DE VOLTAJE	40
3.7.1 VOLTÍMETRO	41
3.7.2 DISEÑO REGULADOR AUTOMÁTICO DE FRECUENCIA	42
3.7.3 FRECUENCÍMETRO.....	43
3.7.4 DETECCIÓN DE FASE	44
3.8 FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN	44
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	
4.1 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO DEL ALTERNADOR	48
4.2 MEDICIONES DE VOLTAJE, FRECUENCIA Y FASE	50
4.3 SOFTWARE DE COMPENSACIÓN DE FASE	52
4.4 DESCRIPCIÓN BÁSICA DE LAS ETAPAS DEL SISTEMA DE CONTROL DE COMPENSACIÓN DE FASE	53
4.4.1 LAZO DE CONTROL DE FRECUENCIA.....	53
4.4.2 LAZO DE CONTROL DE VOLTAJE	54
4.4.3 LAZO DE CONTROL PARA LA COMPENSACIÓN DE FASE.....	55
4.5 GENERACION DE SEÑALES DE CONTROL PARA LA DOSIFICACIÓN DE POTENCIA EN EL MOTOR Y EN LA ARMADURA DEL GENERADOR	56
4.6 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID	57
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES.....	61
Bibliografía	62

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Construcción de un Transformador tipo acorazado	5
Figura 2. Transformador ideal	6
Figura 3. Rotor de dos polos no salientes de una máquina síncrona	7
Figura 4. Estator.....	8
Figura 5. Rotor	9
Figura 6. Circuito eléctrico motor DC controlador por campo	11
Figura 7. Diagrama de bloques de motor DC.....	13
Figura 8. Generador trifásico de fuentes monofásicas desfasadas 120°. ...	14
Figura 9. Tres generadores conectados con un neutro común.....	14
Figura 10. Conexión en Y	15
Figura 11. Generador conectado en Y, con carga resistiva.	16
Figura 12. Esquema de un Sistema de Regulación de voltaje	17
Figura 13. Variables de sincronización	20
Figura 14. Diagrama para la conexión en paralelo de dos alternadores	21
Figura 15. Interruptor de cierre con control de supervisión	22
Figura 16. Fasores con ángulo de fase distintos.....	24
Figura 17. Onda senoidal equivalente a la diferencia de ángulo de fase	24
Figura 18. Secuencia de fases diferentes	25
Figura 19. Secuencia de fases diferentes	26
Figura 20. Señal muestreada	27
Figura 21. Onda compleja como la suma de señales simples	27
Figura 22. Metodología en V del diseño mecatrónico	29
Figura 23. Motor DC.....	31
Figura 24. Alternador de automóvil	31
Figura 25. Partes principales tarjeta cRIO	32
Figura 26. Rotor y sus Polos magnéticos.....	35
Figura 27. Diámetro interno del estator y diámetro del rotor	35
Figura 28. Entrehierro de la máquina.....	36
Figura 29. Estator de Núcleo-longitud.....	36
Figura 30. Radio del Rotor aire-brecha	37
Figura 31. Bobinado de una fase del estator	38
Figura 32. Paso Polar	38
Figura 33. El ángulo mecánico cubierto por un polo	39
Figura 34. Esquema de Regulador Automático de Voltaje.....	40
Figura 35. Diagrama del regulador automático de voltaje.....	41
Figura 36. Diagrama de Voltímetro	42
Figura 37. Módulo EM-3320 1C Magnetic Powder Break	43
Figura 38. Regulador automático de frecuencia.....	44

Figura 39. Diagrama de control de frecuencia, voltaje y fase	45
Figura 40. Diagrama general de sincronización	46
Figura 41. Curva característica de circuito abierto	49
Figura 42. Relación de voltaje vs velocidad	51
Figura 43. Diagrama de bloques del sistema	52
Figura 44. Pantalla principal del sistema de compensación de fase	53
Figura 45. Esquema de control de frecuencia.....	54
Figura 46. Esquema de control de voltaje	54
Figura 47. Esquema de control de compensación de fase	55
Figura 48. Ejecución del sistema automático de sincronización	56
Figura 49. Programación para generar una señal PWM	57
Figura 50. Respuesta al escalón de la planta	58

ÍNDICE DE TABLAS

PÁGINA

Tabla 1. Tolerancia de operación de sincronización.....	22
Tabla 2. Cuadro comparativo entre Arduino Mega 2560 y cRIO 96	33
Tabla 3. Dimensiones de estator y rotor	37
Tabla 4. Prueba de circuito abierto	48
Tabla 5. Prueba de circuito abierto con variación de I_{exc}	49
Tabla 6. Resultados medición con Voltímetro	50
Tabla 7. Relación de velocidad vs voltaje.....	50
Tabla 8. Resultados medición con Medidor de fase	51

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO 1. Circuito de potencia PWM para regulación de frecuencia.....	65
ANEXO 2. Voltímetro.....	66
ANEXO 3. Acoplamiento Motor – Alternador.....	67
ANEXO 4. Banco de Ensayos.....	68
ANEXO 5. Tabla de pruebas de circuito abierto del alternador.....	69
ANEXO 6. Diagrama de flujo sincronización automática del alternador.....	70

RESUMEN

La presente investigación comprende el desarrollo de un sistema electrónico de sincronización de generadores capaz de ejecutar el proceso de control automático para acondicionar las variables de voltaje, frecuencia, y ángulo de fase de las líneas de un alternador trifásico a los valores nominales que impone el sistema de distribución eléctrica. Las centrales energéticas disponen de tableros de sincronización manuales con instrumentos de medición que permiten al operador observar el comportamiento de las fases del generador y decidir el momento oportuno del cierre del interruptor de conexión cuando el generador entra en fase con la red eléctrica. Al ser un equipamiento supervisado por pura percepción y experiencia del operador, se carece de rigurosidad en la precisión para acoplar el alternador al bus infinito en el instante oportuno.

En base en la disponibilidad de la electrónica actual, se diseñaron e implementaron los circuitos de potencia acondicionados por PWM necesarios para el control del banco de pruebas constituido por un motor DC que proporciona la energía mecánica al alternador acoplado a su eje. Inicialmente, fue necesario realizar pruebas de funcionamiento manual sobre las dos máquinas para analizar el comportamiento de generación de electricidad. Las mediciones de voltaje y frecuencia registradas en las pruebas de operación permitieron desarrollar el algoritmo de programación de controladores PID analógicos ejecutados bajo un lenguaje de programación gráfico cargado en un circuito de control embebido constituido por un procesador en tiempo real y un chip FPGA que realiza las tareas de un conversor analógico digital, generación de señales PWM y salidas digitales.

ABSTRACT

This research involves the development of a generator synchronization electronic system capable of running the automatic control process to condition variable voltage, frequency and phase angle of the lines of an alternator to the nominal values imposed by the electrical distribution system. Power plants have boards of manual synchronization with measurement instruments that allow the operator to observe the behavior of the phases of the generator and choose the appropriate time to close the switch connection when the generator goes into phase with electric network. Being an equipment supervised by pure perception and experience of the operator, there is a lack of rigor in accuracy for coupling the alternator to the infinite bus at the right moment.

Based on the availability of the current electronics, the power circuits required for conditioning by PWM control tested consisting of a DC motor that provides the mechanical energy to the alternator coupled to its axis. Initially, it was necessary to test manual operation on the two machines to analyze the behavior of electricity generation. Voltage and frequency measurements registered in the operational tests allowed to develop the programming algorithm of analog PID controllers implemented under graphical programming language loaded in an embedded control board which consists of a real-time processor and FPGA chip that performs the digital analog converter tasks, generating PWM signals and digital outputs.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo se ha incrementado el estudio e interés por los sistemas de alimentación eléctrica y autoabastecimiento tanto en plantas industriales como en todo tipo de empresas que emplean alternadores trifásicos, los mismos que consisten en tener dos o más fuentes de alimentación y dispositivos con la capacidad de seleccionar una u otra.

Actualmente, la mayoría de las empresas han invertido dinero para obtener una fuente alterna y poder realizar mantenimientos sin afectar la carga eléctrica, sin embargo, este no es un punto que cuenta con el interés necesario, debido que al no tener un adecuado sistema de sincronización se afectará considerablemente la carga.

Estos sistemas y equipos se implementan para prevenir conexiones inoportunas e inadvertidas a las fuentes de alimentación normal y de emergencia, provocando accidentes debido a la mala manipulación de los equipos.

La interrupción o corte de energía afecta directamente a la producción y consecuentemente a la economía de los hogares, empresas e industrias. Por esta razón para cualquier central de energía eléctrica es de gran importancia contar con sistemas automatizados de sincronización con tiempos de reacción eficaces para sobrellevar las variaciones de cargas que se presentan de acuerdo al consumo de la población. Junto con ello se prescribe procesos de contingencia donde los sincronizadores automáticos se encuentran en la capacidad de acoplar inmediatamente los generadores necesarios hacia las demás centrales de electricidad que pudieran hallarse en un estado crítico para mantener las condiciones de producción eléctrica.

El objetivo principal de este trabajo consiste en diseñar un sistema electrónico para sincronizar las fases de un alternador trifásico a las fases de la red eléctrica.

Entre los objetivos específicos se tiene:

- Diseñar un circuito electrónico que, conociendo las características del generador, pueda realizar un control sobre la excitación y fuente de energía mecánica.

- Elaboración de un banco de ensayos para simular las condiciones reales de funcionamiento del sistema.
- Validar el funcionamiento del sistema de sincronización en el banco de pruebas creado.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MÁQUINAS ELÉCTRICAS

El electromagnetismo es una de las cuatro fuerzas fundamentales del universo. La comprensión de este fenómeno ha permitido formular matemáticamente su comportamiento y definir las condiciones que lo origina. Existe un gran abanico de aplicaciones donde se aprovecha de esta fuerza. Se lo utiliza para el funcionamiento de parlantes de sonido, electroimanes, trenes de levitación magnética, telecomunicaciones, motores eléctricos, y la una de la más importante: la generación de energía eléctrica.

2.2 TRANSFORMADORES

El propósito principal de un transformador es convertir el voltaje de una onda periódica de un nivel de voltaje hacia un nivel de voltaje superior o menor que el primero, y conservando, además, la frecuencia eléctrica de las tensiones. Los transformadores de potencia se construyen de dos maneras. Un tipo de transformador consta de una pieza de acero rectangular, lo demuestra la figura 1, creada a partir de chapas de hierro, con los devanados enrollados sobre dos de los lados del rectángulo.

Esta construcción se conoce como transformador de tipo acorazado; el núcleo se construye con delgadas láminas aisladas eléctricamente unas de otras para minimizar las corrientes parasitas.

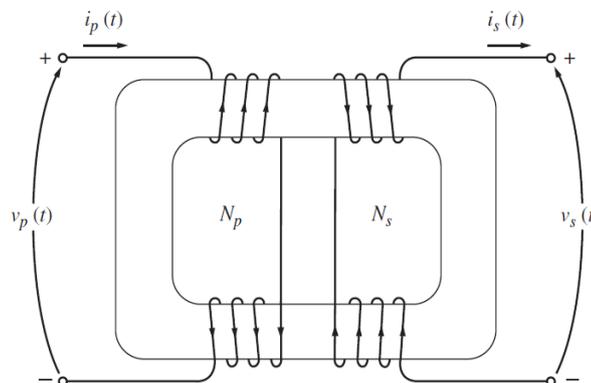


Figura 1. Construcción de un Transformador tipo acorazado
(Chapman, 2012)

En un transformador, las bobinas del primario y del secundario están físicamente enrolladas una sobre la otra; la bobina de menor voltaje está situada en la parte interna (más cerca del núcleo). Esta disposición cumple dos objetivos:

1. Simplificar el aislamiento del devanado de alto voltaje desde el núcleo.
2. Adecuar un menor flujo generado que en caso de disponer los dos devanados en el núcleo separados.

Los transformadores de potencia apropian ciertos nombres, de acuerdo a su utilización en los sistemas de potencia. Así, al tener un transformador conectado a las terminales de un alternador, será utilizado para elevar el voltaje hacia niveles de transmisión (110KV o superiores) en ocasiones se denomina transformador de unidad. En último plano, el transformador que reduce el voltaje de distribución al voltaje final que utiliza la potencia (110, 208, 220 V, etc.) es llamado transformador de distribución.

2.2.1 TRANSFORMADOR IDEAL

Un transformador ideal es un dispositivo sin pérdidas, con un devanado de entrada y un devanado de salida como lo muestra la figura 2.

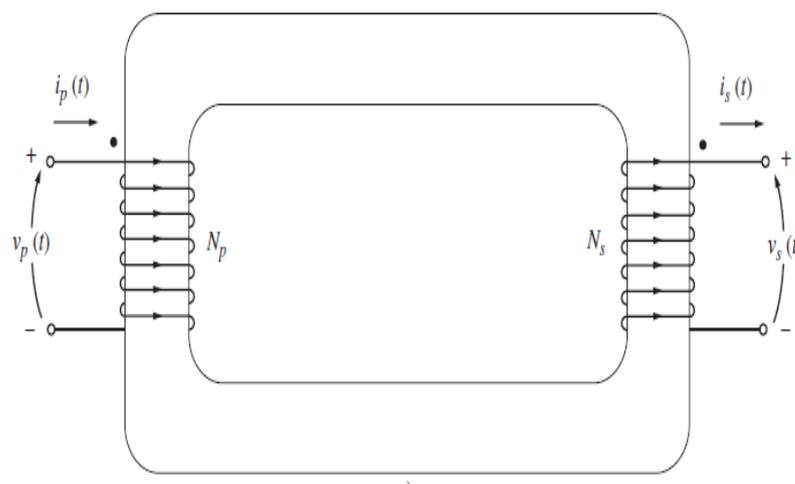


Figura 2. Transformador ideal
(Chapman, 2012)

Las relaciones entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida, y entre la corriente de entrada y la de salida, están dadas por dos sencillas ecuaciones. Un transformador Tiene N_p vueltas de alambre en el lado primario y N_s vueltas de alambre en el secundario.

La relación entre el voltaje $V_p(t)$ aplicado al lado primario del transformador y el voltaje $V_s(t)$ producido en el lado secundario se define en la ecuación 1:

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad [1]$$

La ecuación 2 indica la relación entre la corriente $I_p(t)$ que fluye en el lado primario del transformador y la corriente $I_s(t)$ que sale del transformador por el secundario, que se define a continuación:

$$N_p I_p(t) = N_s I_s(t) \quad [2]$$

2.3 GENERADOR SÍNCRONO

Los generadores o alternadores síncronos son máquinas síncronas cuya principal función es convertir energía mecánica en energía eléctrica pulsante. Los polos magnéticos del rotor graficados en la figura 3 pueden ser de construcción salientes o no salientes.

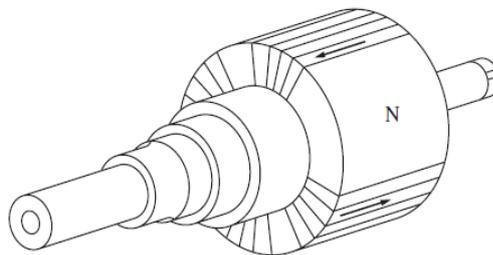


Figura 3. Rotor de dos polos no salientes de una máquina síncrona
(Chapman, 2012)

Para que la máquina síncrona sea capaz de efectivamente convertir energía mecánica aplicada a su eje, es necesario que el enrollamiento de campo localizado en el rotor de la máquina sea alimentado por una fuente de tensión continua de forma que al girar el campo magnético generado por los

polos del rotor tengan un movimiento relativo a los conductores de los enrollamientos del estator.

2.3.1 PARTES DE UN GENERADOR SÍNCRONO

Un generador síncrono se encuentra conformado por partes principales las cuales se detallan a continuación:

Estator

El estator es una parte fija de la máquina síncrona envuelta alrededor del rotor de tal manera que el mismo pueda girar en su interior, como se aprecia en la figura 4. Es construido a partir de un material ferromagnético envuelto en un conjunto de enrollamientos de cobre distribuidos a lo largo de su circunferencia.



Figura 4. Estator
(Aguilar Ríos, 2010)

En los devanados del estator circula un sistema de tensiones alternadas trifásicas debido a que las bobinas se encuentran desplazadas físicamente 120° grados entre sí. El espacio comprendido entre el rotor y el estator, es conocido como entrehierro.

Los elementos más importantes del estator de un generador de corriente alternan, son los siguientes:

1. Núcleo
2. Devanado

Rotor

El rotor puede contener dos o más enrollamientos como se observa en la figura 5. Este realiza el movimiento rotatorio; constituido de un material ferromagnético envuelto en un enrollamiento de campo, que tiene como función producir un campo magnético constante.

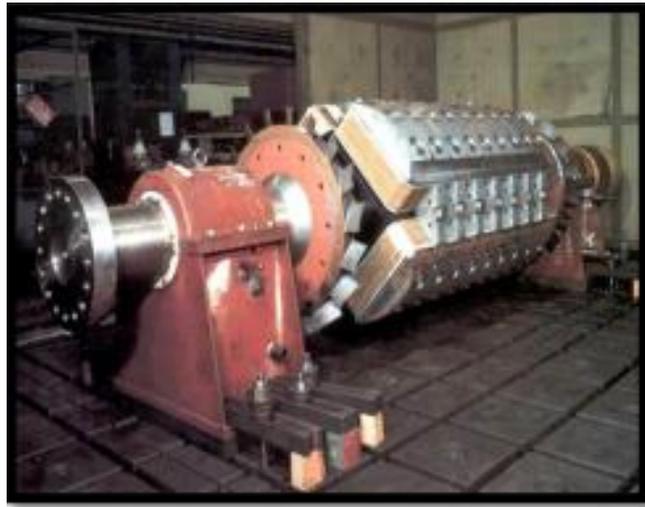


Figura 5. Rotor
(Aguilar Rios, 2010)

El voltaje aplicado en ese enrollamiento es continuo y la intensidad de la corriente soportada por ese enrollamiento es mucho más pequeña que el enrollamiento del estator.

2.3.2 VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO

Un alternador es por definición síncrono cuando la frecuencia eléctrica producida está sincronizada con la velocidad mecánica de rotación del generador. El rotor de un alternador consta principalmente de un electroimán donde se aplica corriente directa.

La frecuencia eléctrica del estator, que se define en la ecuación 3, está relacionada con la velocidad de rotación del campo magnético producido en la máquina:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad [3]$$

Dónde:

f_e = frecuencia eléctrica en [Hz]

n_m = velocidad mecánica del campo magnético en [RPM]

P = número de polos

2.3.3 MODELO MATEMÁTICO GENERADOR SÍNCRONO

Para describir el modelo matemático del generador se considera que la bobina del rotor que es el devanado de excitación del generador tendrá una resistencia R_f y su inductancia será L_f con ello, se puede escribir la ecuación diferencial en el dominio del tiempo para relacionar las variaciones entre el voltaje del devanado de excitación, V_f y la intensidad de excitación resultante, I_f .

La ecuación 4 que agrupa los términos descritos tiene la forma:

$$\Delta V_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad [4]$$

La fuerza electromotriz interna del generador síncrono, E_{rms} , es directamente proporcional a la intensidad del devanado de campo I_f , Las condiciones de funcionamiento del sistema asumidas como normales, y aunque exista mínima diferencia entre la fuerza electromotriz interna E_{rms} su tensión de salida V , en este caso se considerarán aproximadamente iguales. La diferencia de potencial del generador se presenta en la ecuación 5 como sigue:

$$\Delta E_{rms} = \frac{2\sqrt{2}}{15} \left[\frac{\mu_0}{\text{polos}} x n_s k_w N_{ph} K_f N_f I_f \right] \quad [5]$$

Pueden manipularse los términos de la igualdad anterior para reescribir una expresión que se acomode a la forma general de una función de transferencia. La agrupación de términos encerrados en K_g y T_g contempla la igualdad definida como:

$$\frac{\Delta E_{rms}(s)}{\Delta V_f(s)} = \frac{K_g}{1+sT_g} \quad [6]$$

2.4 MOTORES DC

Los motores de corriente directa son máquinas eléctricas utilizadas como fuentes de potencia mecánica para accionar otro tipo mecanismos, como equipos industriales, aparatos domésticos, vehículos, y demás. La dirección del flujo de potencia a través de un motor DC se obtiene suministrando una tensión constante a los devanados del rotor del alternador con el objetivo de producir los polos magnéticos norte y sur.

El estator comúnmente tiene una configuración de imanes permanentes con su respectiva polaridad. Si interacciona un polo del estator y otro del rotor con el mismo signo, se generará un movimiento de repulsión entre sí que hará girar al eje del motor.

2.4.1 MODELO MATEMÁTICO DE MOTOR DC

El modelo matemático lineal representa un motor DC controlador por campo, es decir, la corriente de campo y el flujo magnético se modifican a partir del voltaje e_f aplicado al devanado del rotor. El estator presenta un campo magnético constante. El diagrama eléctrico se muestra en la figura 6.

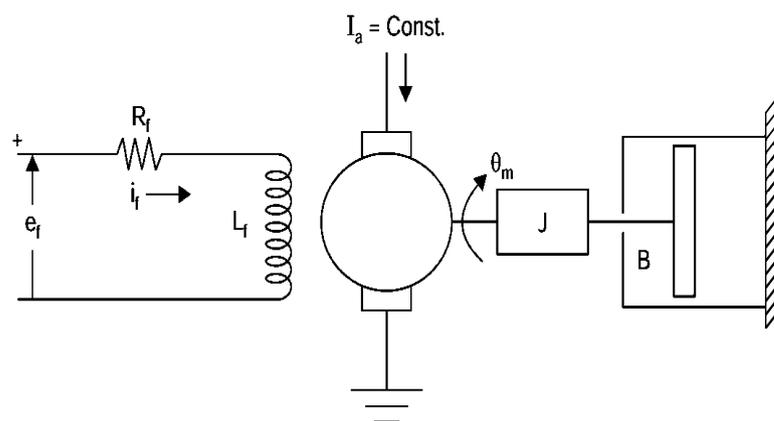


Figura 6. Circuito eléctrico motor DC controlador por campo
(Peña, 2014)

El torque generado por el motor es proporcional al flujo producido por la corriente de armadura es expresado en la ecuación 7 es:

$$\tau = K_T \cdot i_f \quad [7]$$

Donde:

τ = torque desarrollado por el motor

K_T = constante de torque

i_f = corriente de campo

Las ecuaciones eléctricas presentes en el rotor resultado de aplicar la ley de Kirchoff al circuito de campo lo representa la ecuación 8:

$$e_f = L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f \quad [8]$$

Donde:

e_f = voltaje de campo

R_f = resistencia de devanado de campo

L_a = inductancia de campo

El torque desarrollado por el motor DC es empleado para mover una carga inercia J y vencer la fricción viscosa que genera.

Si se desprecia la rigidez torsional del eje, resulta la ecuación 9 expresada así:

$$\tau = J_T \frac{dw_m}{dt} + B_T w_m \quad [9]$$

Donde:

τ = par desarrollado por el motor

w_m = velocidad angular del motor

J_T = momento de inercia

B_T = coeficiente de viscosidad del motor

Al considerar las ecuaciones anteriores, es posible aplicar la transformada de Laplace para obtener el diagrama de bloques del sistema que se muestra en la figura 7 que representa al motor DC controlador por corriente de campo:

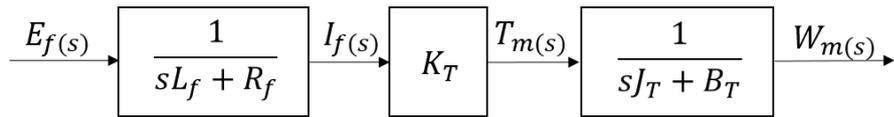


Figura 7. Diagrama de bloques de motor DC
(Peña, 2014)

La variable de entrada es el voltaje aplicado al rotor del motor DC, con lo cual se considera la caída de voltaje en la resistencia del devanado de campo y junto a la corriente de campo genera en torque $T_{m(s)}$.

Finalmente, el motor DC debe vencer el momento de inercia del motor, así como el generado por la fricción viscosa de su eje.

2.5 CIRCUITOS TRIFÁSICOS

2.5.1 GENERACIÓN DE VOLTAJES TRIFÁSICAS

La generación de energía eléctrica en su mayoría es producida por generadores trifásicos que emplean circuitos de tres fases donde están presentes líneas de transmisión y cargas trifásicas (Chapman, 2012). Esta potencia transfiere a una carga trifásica que permanece constante.

Un generador trifásico puede considerarse como tres generadores monofásicos cuyos voltajes son iguales en magnitud, pero difieren entre sí por el ángulo de fases de 120° . Cada uno de estos tres generadores podría estar conectado por un par de hilos a una de tres cargas idénticas y el sistema de potencia resultante sería como el que se muestra en la figura 8. La corriente que fluye en cada carga puede ser hallada a partir de la ecuación 10:

$$I = \frac{V}{Z} \quad [10]$$

Por tanto, las corrientes que fluyen en las tres fases son:

$$I_A = \frac{V \angle 0^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -\theta \quad [11]$$

$$I_B = \frac{V \angle -120^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -120^\circ - \theta \quad [12]$$

$$I_C = \frac{V \angle -240^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -240^\circ - \theta \quad [13]$$

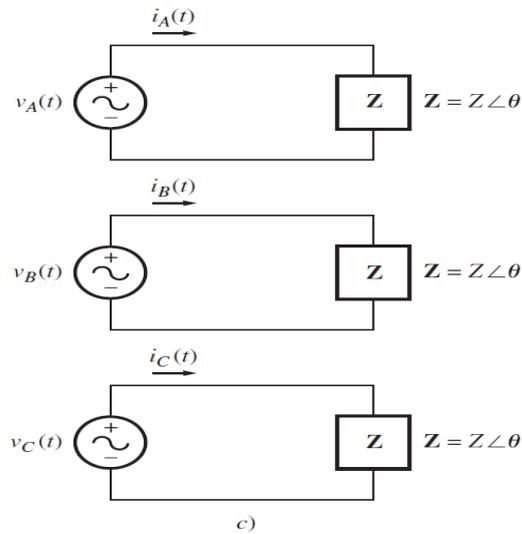


Figura 8. Generador trifásico de fuentes monofásicas desfasadas 120°. (Chapman, 2012)

Una conexión con la tipología de la figura 9 se llama conexión en Y.

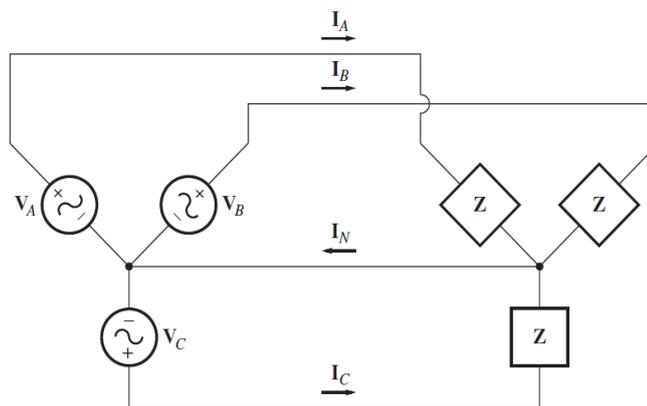


Figura 9. Tres generadores conectados con un neutro común. (Chapman, 2012)

La segunda alternativa es en tipología Δ (triángulo), en la cual los tres generadores están conectados el positivo del uno con el negativo del otro.

2.5.2 VOLTAJES Y CORRIENTES EN UN CIRCUITO TRIFÁSICO

Cualquier número de generadores y cargas conectados en estrella (Y) y en triángulo (Δ) se pueden juntar en un sistema de potencia.

La figura 10 muestra generadores conectados en Y.

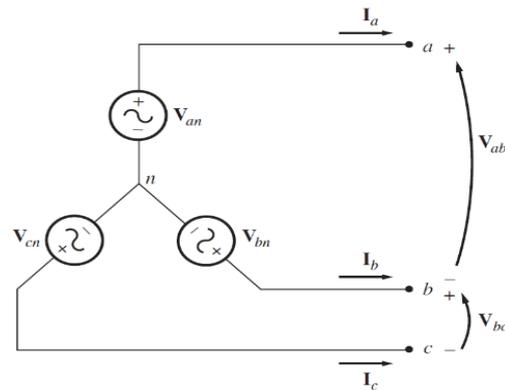


Figura 10. Conexión en Y
(Chapman, 2012)

Para un generador, las relaciones entre las cantidades de línea y las cantidades de fase dependen del tipo de conexión utilizado por ese generador.

Conexión en (Y)

En un generador trifásico conectado en Y a una carga resistiva, como en la figura 11, los voltajes de fase en este generador están dados por:

$$V_A = V \angle 0^\circ$$

$$V_B = V \angle -120^\circ$$

$$V_C = V \angle -240^\circ$$

Puesto que la carga conectada a este generador es resistiva, la corriente en cada fase del generador tendrá el mismo ángulo de voltaje. En consecuencia, la corriente en cada fase estaría dada por:

$$I_A = I \angle 0^\circ$$

$$I_B = I \angle -120^\circ$$

$$I_C = I \angle -240^\circ$$

La corriente en cualquier de las líneas es igual a la de la fase correspondiente. En una conexión en Y $I_L = I_\phi$. Por tanto, según la figura 11 la relación entre las magnitudes del voltaje de línea y el voltaje de fase en un generador o una carga conectados en Y es $V_L = \sqrt{3}V_\phi$. Además, los voltajes de línea están desfasados 30° con respecto a los voltajes de fase.

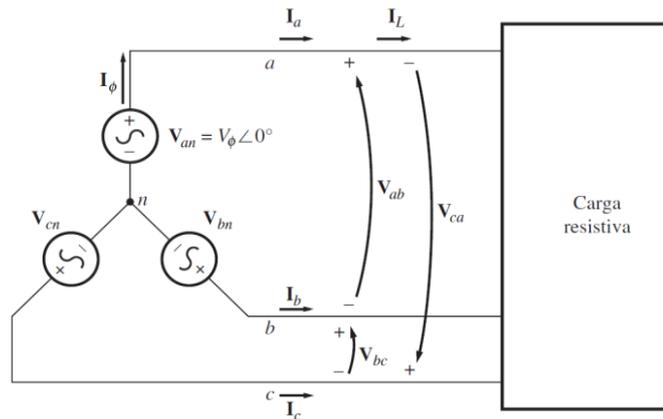


Figura 11. Generador conectado en Y, con carga resistiva.
(Chapman, 2012)

La ventaja de una conexión en estrella para los devanados de armadura del alternador radica en las características de voltaje y corriente de fase y de línea. Para un sistema trifásico en Y, el voltaje de línea es aproximadamente 1,73 veces mayor que el voltaje de fase. En base en la ecuación de voltaje de línea puede concluirse que cada devanado de fase del estator soporta sólo el 57.73% del voltaje total de línea que es suministrado a la carga. Esto es una ventaja al momento de la fabricación de alternadores que deben generar altas tensiones para satisfacer las demandas de consumo.

2.6 SISTEMAS DE REGULACIÓN ELÉCTRICOS

En un sistema eléctrico de potencia se puede encontrar varios medios de regulación con el fin de proveer de forma confiable la potencia demandada, respetando un margen de variación de la frecuencia y el voltaje. A continuación, se detallan los reguladores realizados:

2.6.1 REGULADOR DE VOLTAJE

El principal objetivo de un Sistema de regulación de voltaje es realizar un ajuste automático de la corriente de campo en el rotor del generador, de tal manera que se mantenga el voltaje de salida de acuerdo a ciertos valores específicos, (Peña, 2014) afirma que estos valores deben permanecer de

cierta manera constantes ante fallas y perturbaciones transitorias y estacionarias, sin que alteren el funcionamiento del generador (Mendoza, 2003).

Un sistema de regulación de voltaje contiene varios elementos como se observa en la Figura 12.

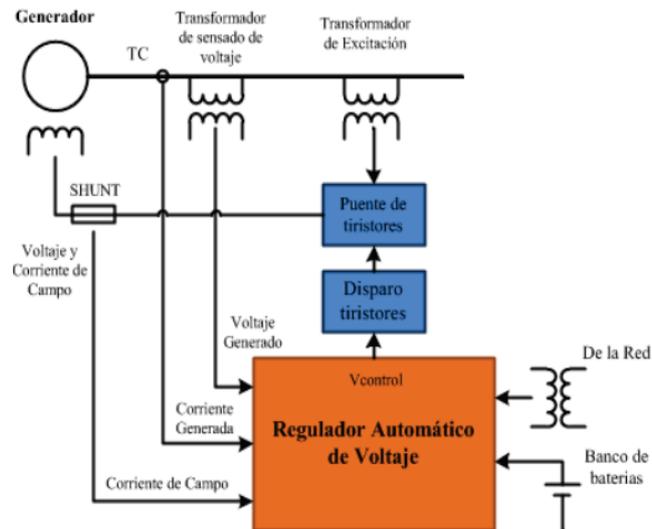


Figura 12. Esquema de un Sistema de Regulación de voltaje (Peña, 2014)

La salida de voltaje de un alternador depende de tres parámetros:

1. Número de bobinas de la armadura
2. Velocidad del rotor
3. Intensidad de campo magnético generado por el rotor.

Los fundamentos electromagnéticos señalan que la corriente de excitación del devanado de campo, varía en función del voltaje aplicado al bobinado del rotor. Como conclusión al manejar el suministro de voltaje (V_{exc}) del devanado en el rotor, se manipula directamente I_{exc} (corriente de excitación). Existen escenarios particulares donde converge el funcionamiento del generador que inciden directamente en la regulación del voltaje.

- Cuando el generador opera sin ninguna carga conectada a sus terminales, el valor de corriente alterna producida alcanza su valor nominal.

- Al realizar la conexión de cualquier carga a las líneas de salida del generador existe una atenuación del voltaje AC del alternador. Este fenómeno se produce cuando a través del devanado del estator circula una corriente que genera un campo magnético que se opone al movimiento del rotor.

Estas condiciones surgen cada vez que aumenta o disminuye la carga que debe alimentar al generador. La corriente de excitación se manipula a través de un controlador proporcional de lazo cerrado definiendo una velocidad de respuesta instantánea a los cambios de tensión. La construcción del alternador presenta anillos rozantes en el eje del rotor para la conexión del voltaje de excitación. Para ello se emplea una fuente del voltaje DC externa.

2.6.2 REGULADOR DE FRECUENCIA

En un sistema de potencia es fundamental que la frecuencia de la onda de voltaje generada por el mismo sistema permanezca dentro de los límites de los valores nominales, al tanto de todo esto con el fin de cumplir condiciones de continuidad del suministro eléctrico (Mendoza, 2003). Los cambios bruscos de frecuencia pueden causar mal funcionamiento y deterioro de los equipos. La principal variable involucrada en la regulación de frecuencia en un generador síncrono es: la velocidad de giro de su eje. Por estas razones es importante la regulación de los parámetros antes mencionados mediante un sistema de regulación de frecuencia con respuesta rápida y confiable. La velocidad de giro del eje surge como resultado de la aplicación de un torque mecánico desde un elemento motriz como una turbina de vapor, un motor de combustión, o en el caso en estudio, un motor de corriente directa.

2.7 CONEXIÓN DE UN ALTERNADOR A LA RED ELÉCTRICA

Un alternador trifásico es una máquina síncrona que puede operar como un aparato que entrega energía a una línea de distribución de un sistema

interconectado de centrales eléctricas. Además, es un componente de un sistema electrógeno de emergencia en casos de corte del suministro eléctrico.

El bus infinito o barra infinita es un sistema tan poderoso que impone su propio voltaje y frecuencia a cualquier aparato conectado a sus terminales. Un generador síncrono se vuelve parte de una red compuesto por cientos de generadores que suministran potencia a miles de cargas.

Los escenarios indicados requieren que el alternador opere según ciertos parámetros establecidos por la línea general (red eléctrica) o los requerimientos de la carga a alimentar. Ambos casos imperan las siguientes condiciones para la sincronización de un generador:

1. El voltaje de la fase del alternador y de la línea deben tener la misma magnitud.
2. El voltaje del generador está en fase con el voltaje del sistema.
3. La frecuencia de tensión del generador debe coincidir o ser algo mayor que la frecuencia del bus infinito.
4. Para el alternador debe asegurarse la misma secuencia de fases que la línea de conexión.

El proceso de sincronización de un alternador se puede establecer al variar dos parámetros de la máquina:

- La corriente de excitación I_x .
- El par o momento de torsión mecánico ejercido por el primo motor.

A continuación, se detalla cómo la modificación de los parámetros de la máquina afecta su desempeño. En la condición de desfase del alternador, para lo cual la figura 13 permite observar los vectores de voltaje del sistema E_R , y el voltaje del generador como E_A .

La frecuencia de los dos componentes se representa por F_A y F_R . Al transcurrir el proceso de sincronización la frecuencia de dos generadores que se desean acoplar a la red presenta diferencia entre ellos.

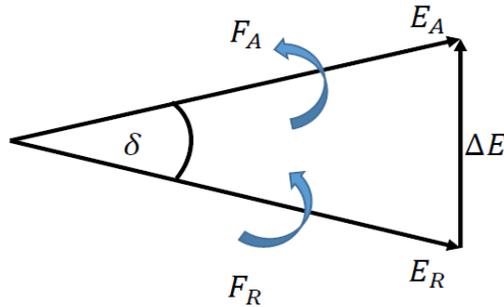


Figura 13. Variables de sincronización (Dabowska, 2011)

A escala industrial, la sincronización se realiza en primer lugar sobre dos generadores que deben conectarse en paralelo. Si el segundo generador gira más rápido que el primero, el vector E_A puede rotar en sentido anti horario con respecto al fasor del voltaje del primero generador. El deslizamiento de la frecuencia ($F_R - F_A$) producirá un ángulo de fase δ y una diferencia de voltaje ΔE entre los dos alternadores.

2.8 MÉTODOS DE SINCRONIZACIÓN

Existen dos métodos generales para realizar este procedimiento:

1. Sincronización Manual
2. Sincronización Automática

En la sincronización manual, un operador controla el voltaje y frecuencia del generador hasta cumplir las condiciones de acoplamiento a la red y cerrar el interruptor de cierre. Este método tiene la desventaja de requerir un alto conocimiento y entendimiento del operador para prevenir daños a los componentes del sistema por un incorrecto comando de sincronización. Estas condiciones de operación deben ser supervisadas por un sincronizador automático que interprete las señales de voltaje y frecuencia eficientemente para el manejo del interruptor de paso.

2.8.1 SINCRONIZACIÓN MANUAL

En este método se emplea un arreglo de lámparas conectadas entre las fases del alternador según el arreglo presentado en la figura 14, y dos

voltímetros para medir la tensión del primer generador y el otro medirá el voltaje del segundo generador

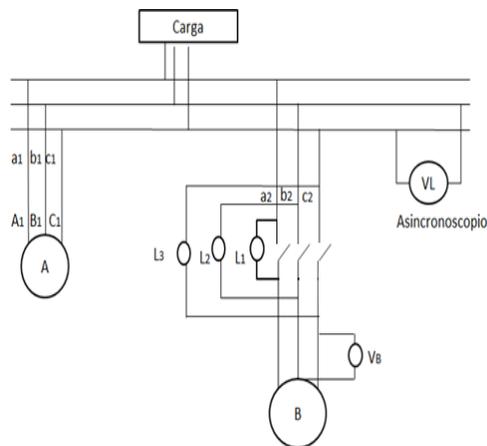


Figura 14. Diagrama para la conexión en paralelo de dos alternadores (Dabowska, 2011)

Las lámparas incandescentes son indicadores que permiten conocer si se satisfacen las condiciones de secuencia de fase, voltaje y frecuencia. Una lámpara tiene su máximo brillo cuando los generadores se encuentran completamente fuera de fase: existe 180° de desplazamiento entre las fases. Al contrario, cuando la lámpara está apagada existe 0° de desplazamiento entre los dos voltajes de igual magnitud.

El procedimiento de puesta en paralelo del generador entrante versus el alternador acoplado es:

PASO 1: se pone en marcha el primo motor de la máquina entrante hasta alcanzar la velocidad nominal de éste.

PASO 2: al ajustar la corriente de campo el voltaje de la máquina que se acoplará, está al mismo nivel del generador en operación. La lámpara parpadeará a una razón proporcional a la diferencia de fase entre los dos generadores. Las fases estarán conectadas correctamente si se presenta un encendido y apagado sincronizado de las lámparas. Pero si ocurre lo opuesto, significa que dos de las líneas están conectadas erróneamente y requieren ser intercambiadas.

PASO 3: es necesario ajustar la velocidad del primo motor del generador entrante hasta que los parpadeos de los focos sean muy pequeños. Así

puede ser evidenciado como el voltaje del generador gira con respecto al voltaje del sistema.

PASO 4: el operador realizará los ajustes finales para iniciar con el cierre del interruptor al momento de apagarse las lámparas. Con este paso se indica la alineación de frecuencia y voltaje. El panel de sincronización contiene medidores para controlar la frecuencia, voltímetros AC independientes para ajustar los valores de tensión, un Asincronoscopio, dos lámparas indicadoras, botones de paro de emergencia, bocinas de alarma e interruptores de conexión.

El manejo del sincronizador manual establece las tolerancias de operación que deben acatarse según la tabla 1.

Tabla 1. Tolerancia de operación de sincronización

Parámetros	Rango
Frecuencia de deslizamiento	0.1 Hz
Ángulo de fase	0° a 10°
Voltaje	4V

(Dabowska, 2011)

Existe un relé de supervisión que se activa al momento de cumplir los parámetros de la tabla anterior y cierra el interruptor de acoplamiento. La disposición de los elementos se encuentra en la figura 15.

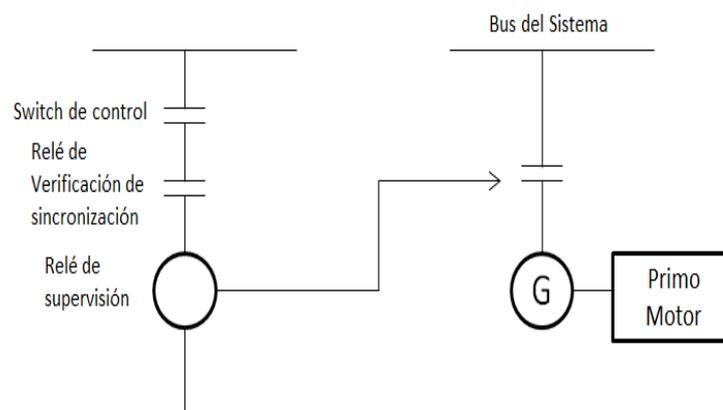


Figura 15. Interruptor de cierre con control de supervisión
(Dabowska, 2011)

El cierre del interruptor de acoplamiento sólo ocurre al cumplirse una de las siguientes condiciones de funcionamiento:

1. El operador ha cerrado manualmente el interruptor.
2. Los contactos del relé de supervisión están cerrados.

FASES ALTERNADOR – RED ELÉCTRICA

Las condiciones de sincronización dejan entrever los posibles escenarios donde deberá actuar el proceso de acoplamiento. Cuando se considera el voltaje, la frecuencia, el ángulo de fase y secuencia de fases, tanto del alternador como de la red eléctrica, se conjugarán en combinaciones donde éstos los parámetros son gobernados por un sistema de control automático. Para entender el comportamiento de los voltajes generados, se adopta la notación de fasores que representa el voltaje de fase del alternador y la red eléctrica. La nomenclatura utilizada para representar los vectores es:

$E_A a$ = voltaje de alternador – fador a

$E_R a$ = voltaje de red eléctrica – fador a

$\Delta E_{A-R} a$ = diferencia de voltaje en ángulo de fase no alineada

ΔE_{RMS-a} = cambio de tensión RMS en amplitud diferente

ΔE_{Aa-Ra} = diferencia de voltaje para fasores con secuencia distinta

Caso 1: la frecuencia de operación del alternador, el voltaje y la secuencia de fases coinciden con la red eléctrica, pero existe un ángulo de fase diferente de cero. El fenómeno que implica tener una variación en el ángulo δ de fase, provoca entre las terminales de conexión una diferencia de potencial que impide la conexión del generador. Si se toma una lámpara y una de sus terminales se conecta a una fase del alternador, y después, la terminal restante se enlaza a la fase de la red eléctrica, se regenera un destello de luz fluctuante debido a que la fase del alternador cambia de voltaje en instantes diferentes a lo que lo hace el voltaje de la red eléctrica. Como se ve en la figura 16 donde los fasores de color negro corresponden al alternador, los vectores de color verde a la red eléctrica, y las flechas en azul indican los voltajes que surgen si se tienen fasores con ángulos de fases distintos. Las lámparas de sincronización se encienden con la misma intensidad y a un patrón equivalente a la diferencia de frecuencia existente entre el alternador y el bus infinito.

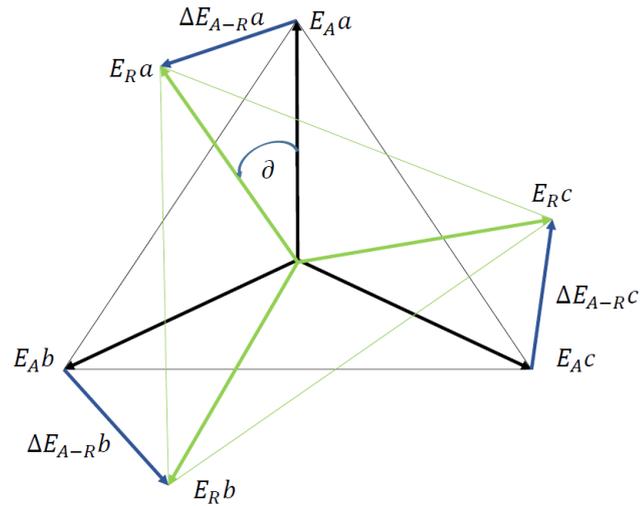
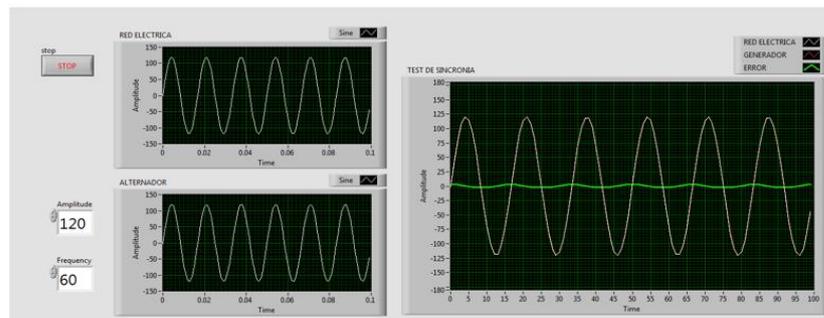


Figura 16. Fasores con ángulo de fase distintos

En una perspectiva diferente, las ondas sinusoidales de la figura 17, corresponden al del alternador y la red eléctrica. En el estado A, el generador se encuentra en adelanto en referencia a la fase de la barra infinita, indica la aparición de la onda en verde igual a restar el voltaje de la maquina síncrona con la fase de la red eléctrica. Luego de aplicar un control al ángulo de deslizamiento δ , el estado B muestra cómo se atenúa la amplitud de la señal en tono verde.

Estado A



Estado B

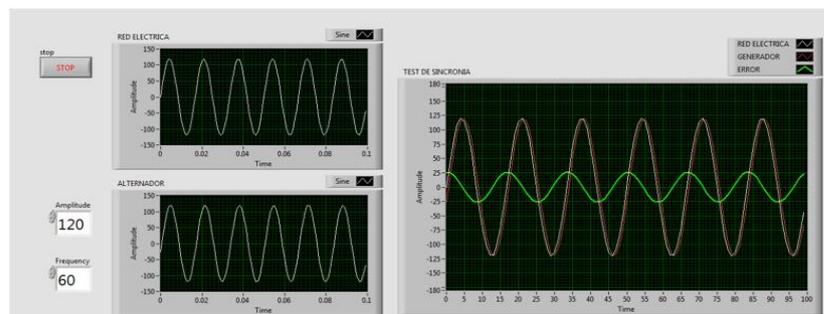


Figura 17. Onda senoidal equivalente a la diferencia de ángulo de fase

Caso 2: La secuencia de fases entre sistemas con distinto sentido de rotación produce efectos equivalentes al caso 1, pero cabe destacar que los cambios de voltajes entre líneas presentan magnitudes elevadas y con posibles efectos destructivos sobre las máquinas que se maximizan al tener distinto orden de secuencia de fases.

Según la figura 18, la diferencia entre las fases Aa – Ra es mínima en relación al vector ΔE_{Ab-Rb} donde la medición de la tensión entre las fases b de los dos sistemas tiene una escala mayor porque la red eléctrica.

En el tablero de sincronización manual, cada una de las lámparas de sincronización brillarán con un tono particular.

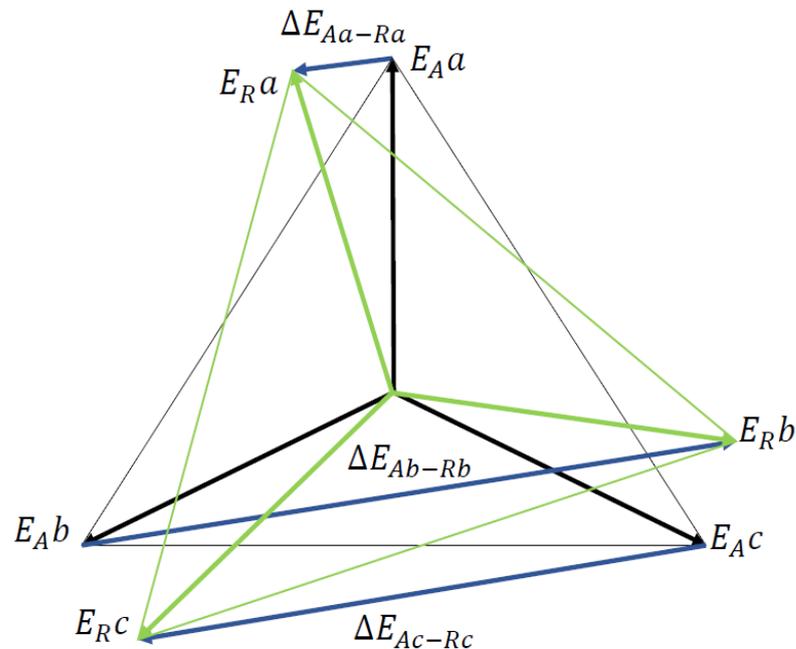


Figura 18. Secuencia de fases diferentes

Caso 3: La igualdad de frecuencia (60Hz) y ángulo de fase ($\theta \approx 0$) conjugada con una amplitud de voltaje fuera del rango de operación del valor impuesto por la red eléctrica, genera una fluctuación del vector ΔE_{RMS-a} hasta alcanzar el equilibrio entre los dos sistemas.

Los fasores en color verde graficados en la figura 19 explican el comportamiento donde cada lámpara muestra una luminosidad idéntica a las demás.

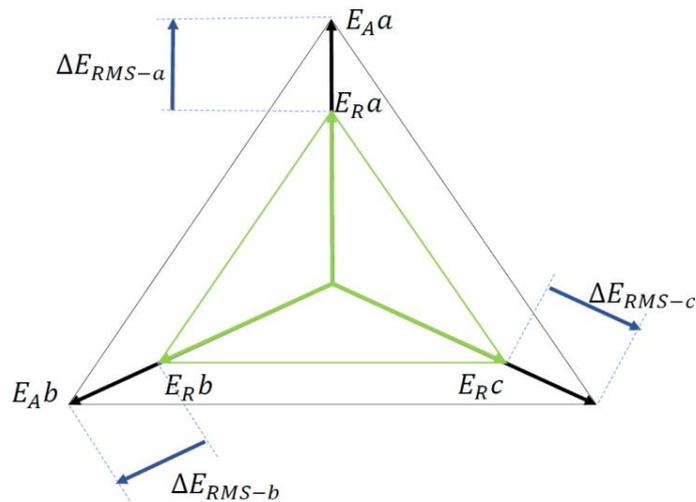


Figura 19. Secuencia de fases diferentes

2.8.2 SINCRONIZACIÓN AUTOMÁTICA

A diferencia de la sincronización manual, cada etapa del proceso es supervisada por un controlador digital que lleva a cabo operaciones de medición y control en tiempo real. Para el acoplamiento del generador al bus infinito, se emplean los mismos dispositivos que en la sincronización manual: frecuencímetro, sincronoscopio, voltímetro, interruptores y relés, pero con la diferencia que su hardware se ha modificado para responder a un accionamiento o medición digital y ser gobernado por un software en tiempo real específico de alto rendimiento.

2.9 TRANSFORMADA DE FOURIER

Es una operación matemática que cambia una señal de dominio de tiempo a dominio de frecuencia y viceversa, su ecuación se detalla a continuación:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad [14]$$

En programas computacionales, se emplea una expresión denominada Transformada Discreta de Fourier (DFT). Su formulación posee la siguiente forma:

$$F\left(\frac{n}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} m(kT)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad [15]$$

Dónde:

N : número de muestras

T : periodo de muestreo

f : frecuencia de muestreo

n : índice de la frecuencia

$m(kT)$: muestra tomada en el instante kt

$X(w)$: señal de dominio en la frecuencia

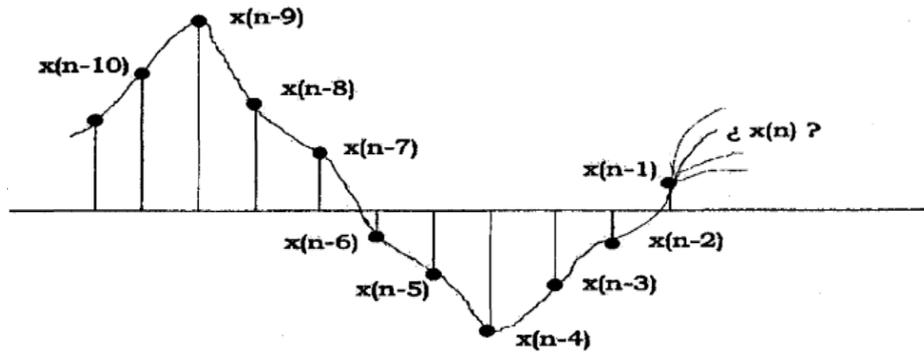


Figura 20. Señal muestreada
(Bobadilla, 1999)

En referencia a la figura 20, n representa la frecuencia específica que se desea analizar. En la figura 21 puede observarse como una onda de forma compleja puede descomponerse en cinco ondas sinusoidales de frecuencias distintas.

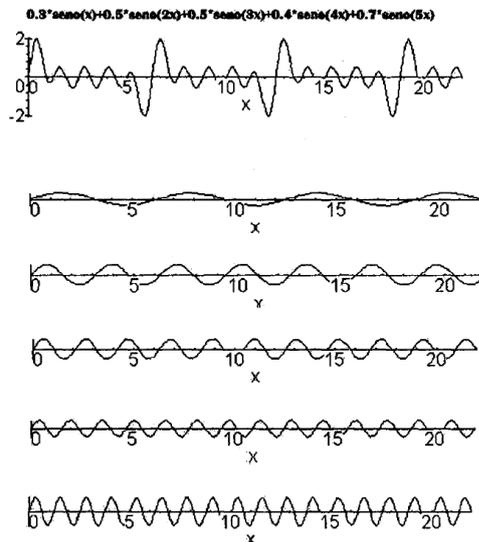


Figura 21. Onda compleja como la suma de señales simples
(Bobadilla, 1999)

Este es una de las aplicaciones de la transformada de Fourier, conocer las frecuencias de las ondas que pueden formar parte de una señal con un orden de complejidad mayor

3 METODOLOGÍA Y DISEÑO

3.1 METODOLOGÍA MECATRÓNICA

El desarrollo de dispositivos tecnológicos demanda la integración de conocimientos de varias ramas de la ingeniería, y con mayor grado en la innovación mecatrónica. Los procedimientos adecuados que permitan llevar a cabo la concepción final de un proyecto deben ser direccionados por una metodología mecatrónica adecuada a lograr resultados eficientes y de calidad. Para la concepción del proyecto de estudio se emplea el modelo en V aplicado a la ingeniería mecatrónica para la ejecución del sistema de sincronización automática del alternador.

3.2 METODOLOGÍA DEL PROYECTO

En base en la figura 22 esquematiza el enfoque, que desde la mecatrónica, debe considerarse como un diseño concurrente desde la idealización del dispositivo, hasta su validación. Las especificaciones del sistema son requerimientos que el sistema debe cumplir en condiciones de funcionamiento normal, debiendo declararse de forma clara y objetiva. El desarrollo de los subsistemas se direccionan se realizan en una sola etapa comprendida entre diseños: mecánico, electrónico y de control, donde se realizan prototipos vituales de los componentes para simular su funcionamiento, depurando de esta forma los posibles errores y fallas de diseño.

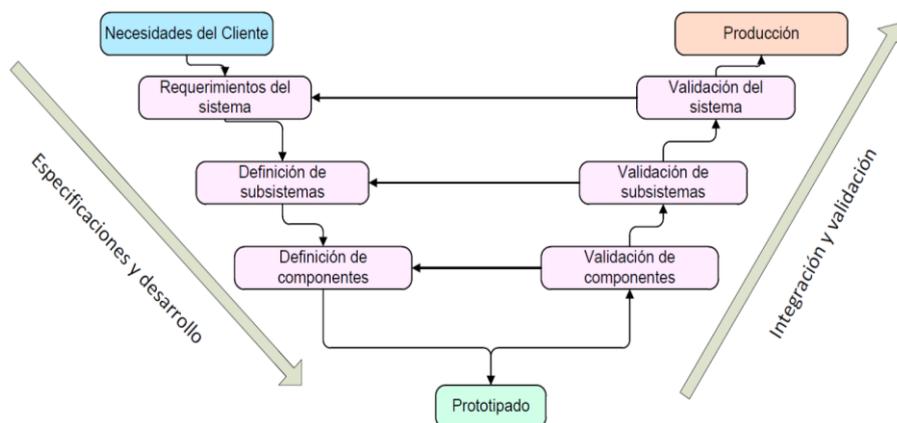


Figura 22. Metodología en V del diseño mecatrónico

3.3 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Los subsistemas que integran el dispositivo en estudio permiten obtener como resultado final la sincronización de las fases del alternador hacia el sistema interconectado de servicio eléctrico. Existen ciertas condiciones que debe cumplirse durante el proceso de sincronización, de las cuales el voltaje, la frecuencia y el ángulo de desplazamiento deben ser aproximadamente iguales a la de la red eléctrica. Como objetivo general, es preciso acatar las siguientes consideraciones:

- La metodología empleada para sincronizar automáticamente un generador, considera necesaria la intervención de un operador para inicializar la puesta en marcha de las máquinas eléctricas, así como los medidores y reguladores, hasta que los parámetros de salida del generador alcancen los niveles donde el dispositivo de sincronización automática entre en funcionamiento.
- El regulador de voltaje y el regulador de frecuencia son indispensables en el control de la corriente de excitación y la velocidad del primo motor, respectivamente. Es así que estos subsistemas de lazo cerrado deben ser de respuesta instantánea ante los cambios de demanda energética.
- La secuencia de fases debe obedecer a una secuencia específica donde la diferencia de fase está en el orden de decimas de unidad.

La implementación del proyecto permite cumplir las condiciones de sincronización hasta el paso previo de su acoplamiento al sistema interconectado de generadores. Por lo que las condiciones de funcionamiento se restringen a:

- El voltaje generado debe establecerse entre los 220v con una tolerancia de error de ± 1 V, mientras que la frecuencia alcanza un nivel de 60 Hz con ± 0.2 décimas de admisión de variación.
- De acuerdo a la secuencia de fases, no debe existir un ángulo de deslizamiento mayor a 0.5 grados con las fases del sistema.

3.4 ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS

A continuación, se detalla las especificaciones de los equipos en las tareas experimentales, de desarrollo, diseño y validación del sistema de sincronización del alternador síncrono.

- **Características motor DC**

- Voltaje: 220V
- Corriente: 1.65A
- Potencia: 1.75W



Figura 23. Motor DC

- **Características Alternador**

- Generador: Síncrono
- Voltaje: 12 V
- Corriente: 50 A
- N° Fases: 3 en conexión Y

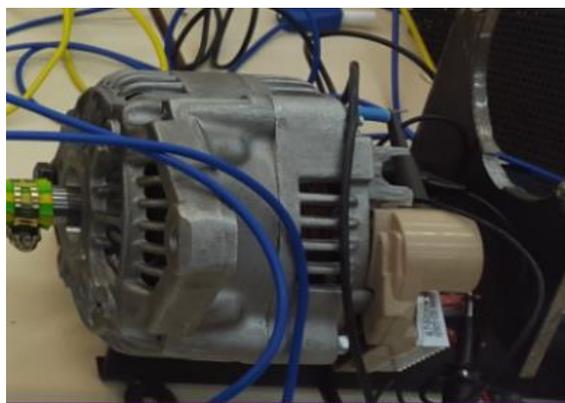


Figura 24. Alternador de automóvil

- **Tarjeta para control y adquisición embebido NI cRIO**

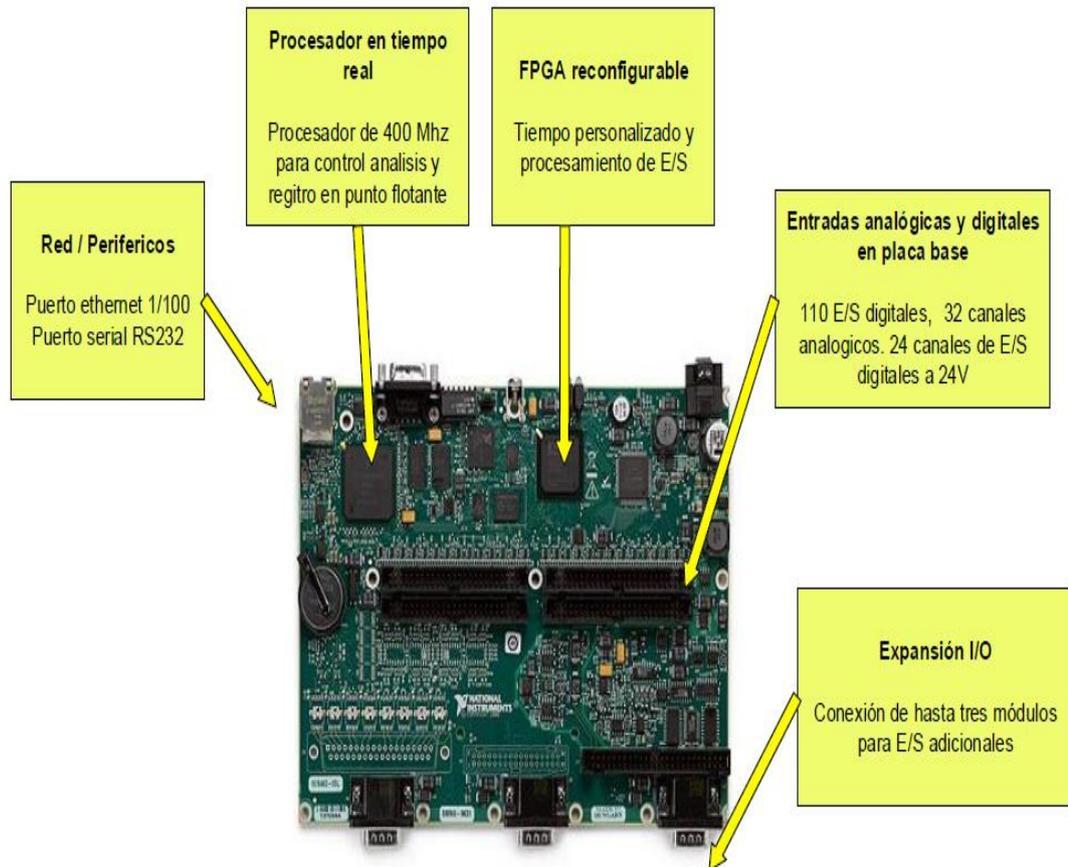


Figura 25. Partes principales tarjeta cRIO
(National Instruments, 2012)

Cabe destacar las cualidades de la tarjeta cRIO con respecto a otras placas dentro del campo de la ingeniería.

Inicialmente, la comparativa de una tarjeta cRIO junto con una placa Arduino resalta sobre el propósito para la cual fueron desarrolladas. Es claro notar que la tarjeta cRIO 9631 posee las especificaciones, dictadas en la tabla 2, que son necesarias para aplicaciones industriales donde se requieren múltiples entradas analógicas y digitales, como el convertor analógico de 16 bits, ideales para digitalizar variables físicas como voltaje y corriente, que pueden representar un cambio de temperatura, la velocidad angular de un motor, o la frecuencia eléctrica.

La respuesta del control implementado generalmente representa el estado lógico de una salida digital que controla un circuito de potencia, por lo tanto, la cRIO cuenta con 110 pines para este propósito.

Tabla 2. Cuadro comparativo entre Arduino Mega 2560 y cRIO 96

Especificaciones	Arduino Mega 2560	cRIO 9631
Microcontrolador/Procesador	ATmega2560	NI cRIO 9631
Frecuencia de reloj	16 MHz	266 MHz
Voltaje de operación	5V	19-30V
Corriente de entrada	40 mA	1,8A
Pines Digitales E/S	54	110
Pines Analógicos E/S	16	50
Voltaje de salida Pines Digitales	5V	24V
Corriente de salida Pines Digitales	40 mA	250mA
Resolución ADC	10 bits	16 bits
SRAM	64 KB	128 MB
EEPROM	4 KB	64 MB
Plataforma de programación	IDE Arduino	Labview

Por otro lado, una tarjeta Arduino Mega 2560 es una plataforma dedicada al aprendizaje de la ingeniería mecatrónica para la aplicación de la electrónica y programación en proyectos de control de código abierto, es decir, la frecuencia de reloj de 16 MHz del microcontrolador ATmega2560, el ADC de 10 bits, o el SRAM de 64 KB son suficientes para la ejecución de las instrucciones del código basado en lenguaje java que se encuentra cargado en el Arduino.

Aunque el IDE para el desarrollo de aplicaciones en Arduino no requiere de la compra de licencias, la cRIO al emplear el software Labview ofrece la potencialidad de tener a disposición un amplio banco de herramientas computacionales predefinidas, por ejemplo, la transformada rápida de Fourier, que asciende la cantidad de tiempo ahorrado al momento de la ejecución de un algoritmo de control.

3.5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN

3.5.1 MEDICIÓN DE PARÁMETROS DEL ALTERNADOR

Es necesario determinar una ecuación válida para un alternador que opera en estado estacionario, permitiéndose medir en primera instancia las

dimensiones geométricas de las partes de interés del alternador, y después realizar la prueba de circuito abierto.

3.5.2 DEDUCCIÓN ECUACIÓN DE VOLTAJE GENERADO POR EL ALTERNADOR

Con las medidas tomadas para conseguir que el alternador funcione de acuerdo a los nuevos parámetros de operación, llega la necesidad de manejar una ecuación con términos que puedan ser calculados o medidos.

El voltaje RMS inducido puede ser medido con un voltímetro, el número de devanados por fase es posible obtenerlo al tomar el estator y contar el número de devanados de la bobina; el factor de devanado del estator es calculado a partir de las dimensiones del estator. El voltaje RMS generado por el alternador se describe en la ecuación 16:

$$E_{rms} \approx \left[\left(\frac{\sqrt{2}}{\text{polos}} \right) \frac{\pi}{15} u_o l r \right] [n_s K_w N_{ph} K_f N_f I_f] \quad [16]$$

Donde:

E_{rms} : voltaje de línea a neutro producido por una maquina AC

polos: número de polos del rotor

N_{ph} : número de vueltas del devanado por fase del estator

n_s : Velocidad de rotación del rotor en rpm

l : Longitud axial de estator/hierro del rotor

r : Radio del rotor

I_f : Corriente de campo del rotor

u_o : $4\pi \times 10^{-7} H \times m^{-1}$ o NA^{-2}

K_f : Factor de devanado de campo del rotor

N_f : Número de vueltas en el devanado del rotor

3.6 OBTENCIÓN DE LAS DIMENSIONES FÍSICAS DEL ALTERNADOR

El orden establecido para obtener las dimensiones del generador debe llevarse según lo indican los siguientes puntos.

3.6.1 NÚMERO DE POLOS

Corresponde al número de garfios colocados alrededor del rotor. Cada garfio representa un polo norte o un polo sur. La figura 26 muestra los garfios en el rotor. El alternador YAMAHI tiene en total de 12 polos.

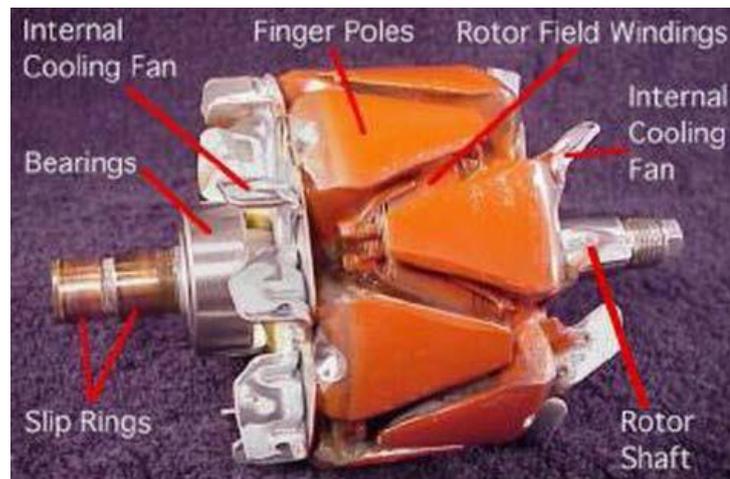


Figura 26. Rotor y sus Polos magnéticos
(Carrillo, 2012)

3.6.2 LONGITUD DEL ENTREHIERRO

Conocer la distancia radial entre la superficie del rotor y del estator, se requiere:

- Medir el diámetro interno del estator
- Medir el diámetro del rotor
- Emplear la ecuación 17 para calcular el entrehierro.

En las figuras 27 y 28 se observa los puntos de medición:

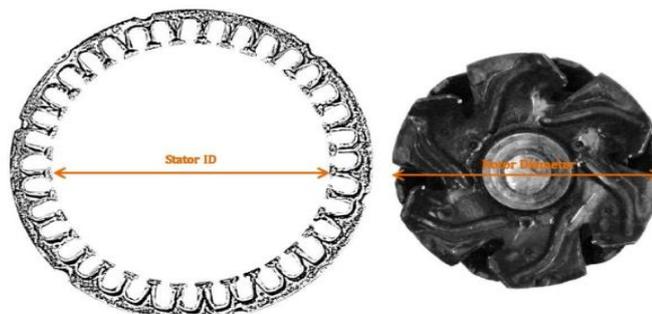


Figura 27. Diámetro interno del estator y diámetro del rotor
(Carrillo, 2012)

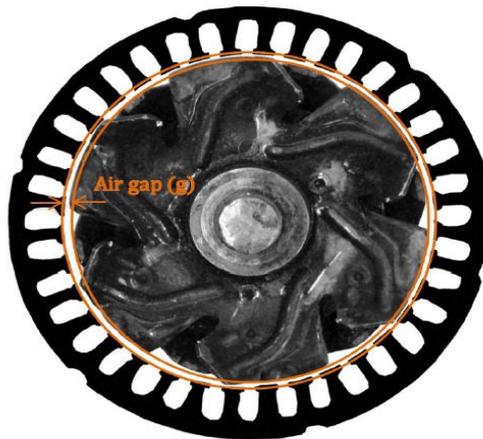


Figura 28. Entrehierro de la máquina
(Carrillo, 2012)

$$g = \frac{D_{\text{estator}} - D_{\text{rotor}}}{2} \quad [17]$$

Dónde:

g= longitud del entrehierro

D_{estator} = diámetro interno del estator

D_{rotor} = diámetro del rotor

El diámetro interno del estator ubicado en el alternador YAMAHI tiene un valor de: 0.0002 metros y el de su rotor es de 0.0001 metros.

3.6.3 LONGITUD AXIAL DEL HIERRO DEL ESTATOR/ ROTOR

Esta medida es igual a la longitud del núcleo de hierro del estator y suele medirse fácilmente con una regla tal como lo indica la figura 29.

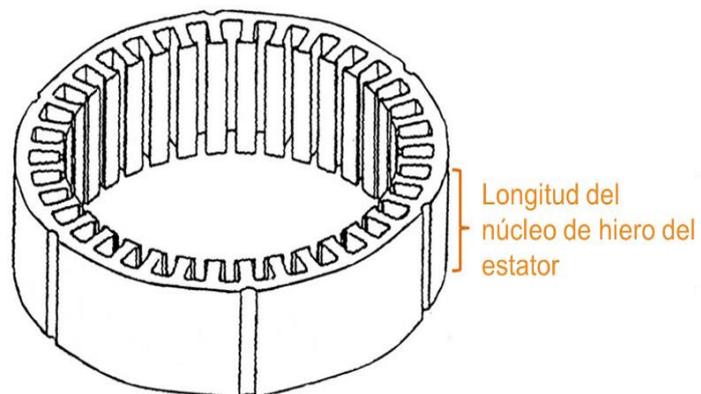


Figura 29. Estator de Núcleo-longitud.
(Carrillo, 2012)

Justamente la medición del núcleo de hierro en el rotor es de aproximadamente 0.0222 metros.

$$l \approx 0.0222 \text{ metros}$$

3.6.4 RADIO DEL ROTOR

Dicha medición comprende el radio desde el centro del eje del rotor hasta el punto de la superficie del rotor; obsérvese la figura 30. como directriz para la toma de la dimensión:



Figura 30. Radio del Rotor aire-brecha
(Carrillo, 2012)

$$r \approx 0.0333 \text{ metros}$$

En resumen, la tabla 3 agrupa las mediciones obtenidas anteriormente:

Tabla 3. Dimensiones de estator y rotor

Polos	g [m]	l [m]	r [m]
12	0.00005	0.0222	0.03333

3.6.5 VELOCIDAD ANGULAR DE ENTRADA

Es un parámetro fundamental directamente relacionado a la generación de voltaje del alternador. Una maquina eléctrica es diseñada para operar bajo cierta velocidad rotacional nominal.

Para un alternador de automóvil esta velocidad es aproximadamente 1800 rpm.

$$n_s \approx 1800 \text{ rpm}$$

3.6.6 FACTORES DEL ESTATOR

El estator posee dos parámetros que deben ser obtenidos: el número de devanados por fase y el factor de devanado. Para obtener el número de devanados por fase, debe contarse el número de vueltas del devanado. El alternador disponible cuenta con cerca de 42 devanados por fase. $N_{ph} \approx 42$. Con base en la figura 31, se verificar la disposición de los devanados del alternador.



Figura 31. Bobinado de una fase del estator
(Carrillo, 2012)

Luego, es conveniente especificar el factor de devanado del rotor al determinar su paso polar, a través de la ecuación 18, que comprende la distancia polar entre dos polos adyacentes en una máquina. El paso polar de una máquina medida en grados mecánicos es:

$$\rho_p = \frac{360^\circ}{p} \quad [18]$$

Dónde:

ρ_p = paso polar en grados mecánicos

p = número de polos de la maquina

Gráficamente en la figura 32 se representa el paso polar del rotor.

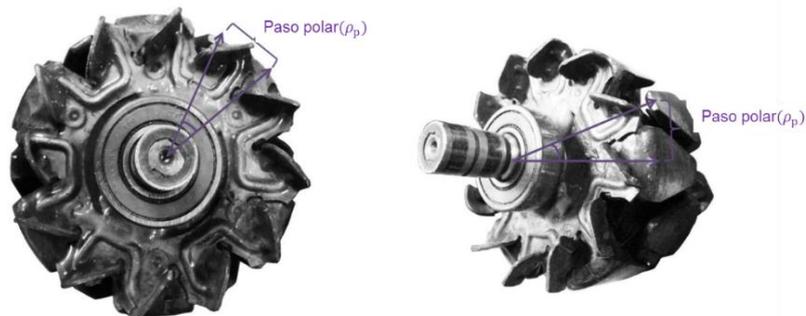


Figura 32. Paso Polar
(Carrillo, 2012)

Independientemente del número de polos de la máquina, un paso polar es siempre 180 grados eléctricos. A continuación, se debe medir con un compás, por ejemplo, el ángulo mecánico cubierto por un núcleo de hierro como lo indica la figura 33.

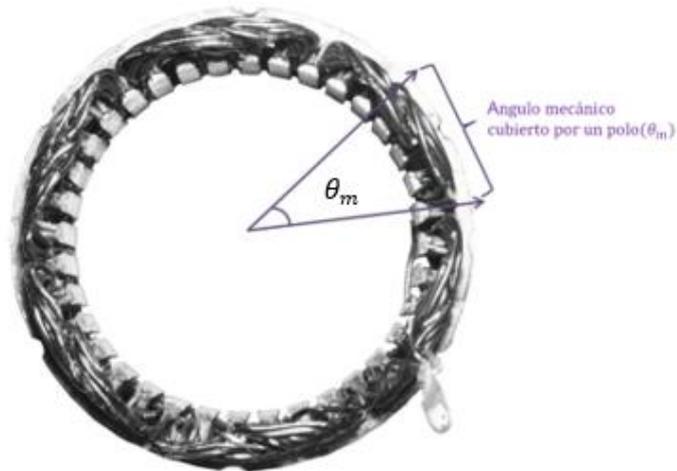


Figura 33. El ángulo mecánico cubierto por un polo
(Carrillo, 2012)

En este caso, θ_m se define como este ángulo mecánico cubierto por el núcleo de hierro. En este momento, cabe realizar una comparación de los ángulos anteriormente recogidos, el paso polar y el ángulo de barrido del núcleo de hierro. Si el ángulo mecánico del núcleo es igual al ángulo de paso polar, se llama bobina de paso pleno o devanado diametral. Si por el contrario el ángulo del núcleo de hierro se extiende menos que un paso polar, se denomina bobina de paso fraccionado.

Actualmente, la situación recae sobre la última bobina al cumplirse esa condición. Por efecto, en grados eléctricos, el paso de un núcleo de hierro de paso fraccionado será:

$$\rho = \frac{20^\circ}{30^\circ} \times 180^\circ = 120^\circ \quad [19]$$

3.6.7 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

Es importante realizar esta prueba para poder parametrizar la máquina síncrona. El test consiste en acoplar una maquina DC al eje del alternador y hacerlo girar a una velocidad de 600 rpm aproximadamente.

3.7 DISEÑO REGULADOR AUTOMÁTICO DE VOLTAJE

El esquema empleado para el diseño del regulador requiere varias etapas de acondicionamiento y procesamiento de señales. En la figura 34 está presente la etapa de potencia que delimita la corriente suministrada a los devanados de campo del alternador. El circuito de potencia realiza la variación de la intensidad de corriente al variar el ciclo de trabajo de la onda PWM. El circuito de control está basado en transistores Mosfet que operan como switch gobernados por una señal PWM. Su esquema general es:

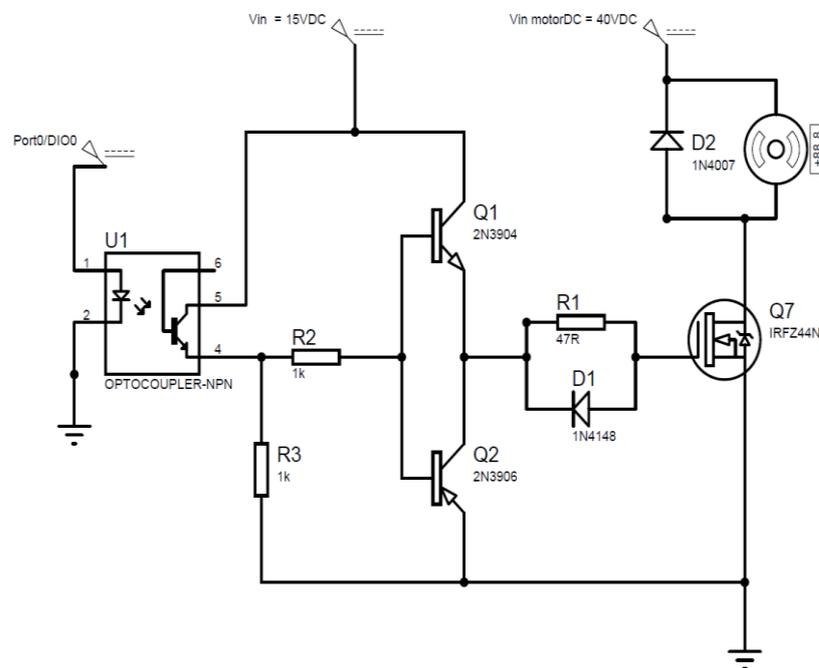


Figura 34. Esquema de Regulador Automático de Voltaje (Palmacas, 2011)

A continuación, se detalla el funcionamiento del control automático de voltaje. Cuando el generador está en operación, el voltaje AC generado es conducido al conversor AC-DC donde se convierte a una señal digital. De la misma manera, se muestrea una fase de la barra infinita.

La onda discretizada del alternador es direccionada a su vez hacia el procesamiento de señales implementado en Labview que mide el valor eficaz de la tensión del alternador, que con la ayuda de un control PID, se varia la corriente de excitación del alternador de acuerdo al error entre el voltaje RMS y el voltaje de referencia correspondiente a la red eléctrica.

3.7.1 VOLTÍMETRO

La frecuencia de muestreo de la señal permite alcanzar las 200 muestras por cada periodo de la señal. El voltaje generado que se encuentra en el orden de los 5V AC, tiene que medirse a través de la tarjeta de adquisición de señales. Para el voltaje de la red eléctrica, la señal es conducida a un circuito que emplea un divisor de tensión comprendido por un arreglo de resistencias. La captura de las mediciones del voltímetro se lo realiza a través de uno de los pines de entrada analógica de la tarjeta cRIO donde las compuertas lógicas del chip FPGA se configuran para obtener la funcionalidad de un conversor analógico digital. El software de lectura de tensión se encuentra implementado en un sistema de tiempo real. Gráficamente, el regulador automático de voltaje comprende los bloques esquematizados en la figura 35.

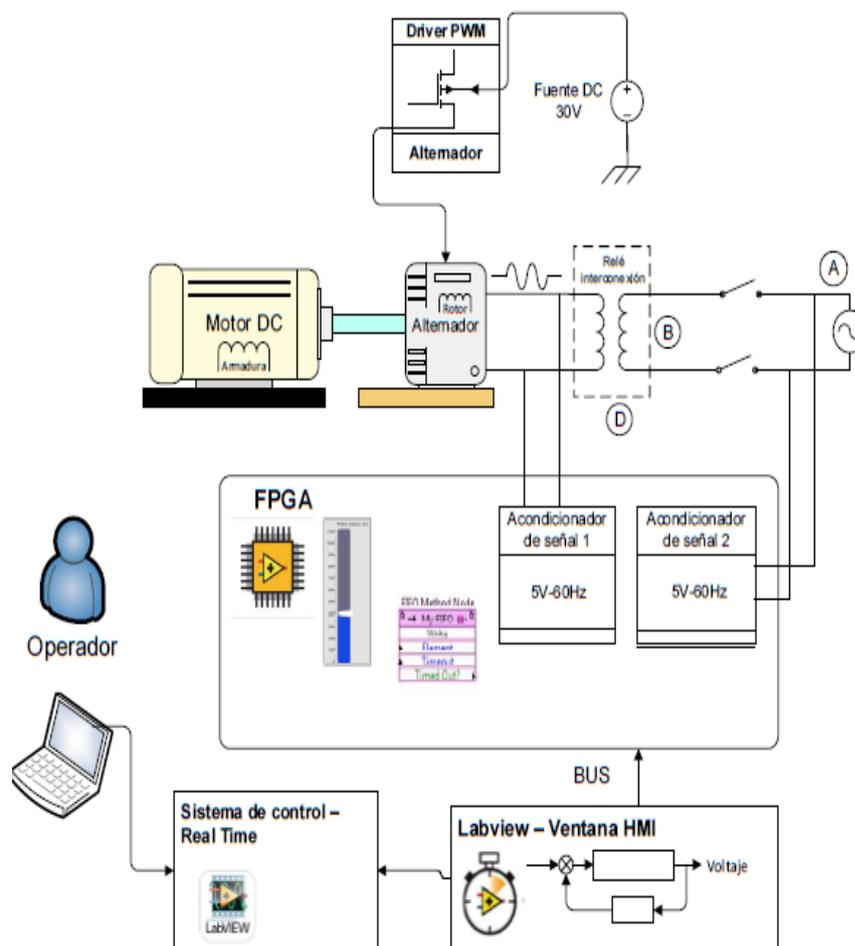


Figura 35. Diagrama del regulador automático de voltaje

DISEÑO DEL VOLTÍMETRO

Para llevar la entrada de 220V de la red eléctrica hacia los niveles de lectura admisibles por la tarjeta cRIO, es necesario un divisor de tensión simple, asumiendo en primer lugar una resistencia R1 de 1MΩ, luego se usará la ecuación 4G para determinar el valor aproximado de R2.

$$V_{in} = V_o \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad [20]$$

Dónde:

V_{in} : voltaje de entrada

V_o : voltaje de salida

R_1-R_2 : resistencias

Después, la señal sinusoidal de voltaje resultante se rectificará al ser conducida a un puente de diodos. Por último, se elimina la forma de onda pulsante mediante el capacitor C igual a 10μf y 22KΩ de resistencia R3.

El esquema del circuito empleado se ilustra en la figura 36.

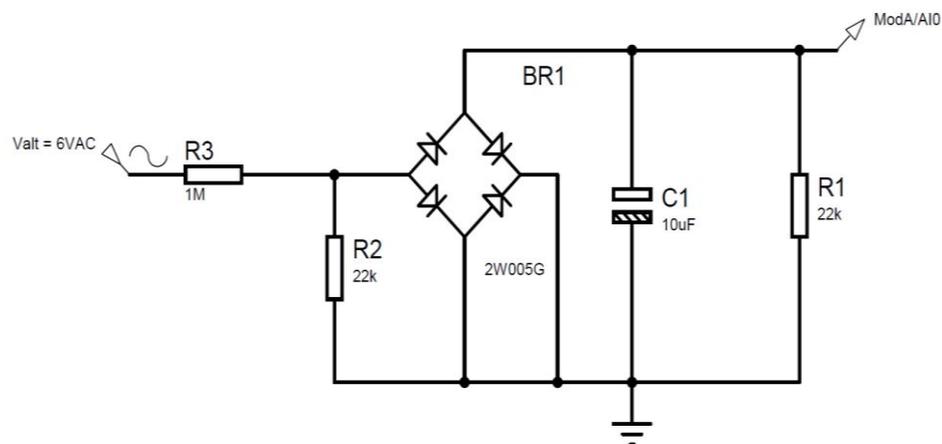


Figura 36. Diagrama de Voltímetro

3.7.2 DISEÑO REGULADOR AUTOMÁTICO DE FRECUENCIA

Este regulador establece la frecuencia de salida de voltaje del alternador en 60Hz de acuerdo a la velocidad de rotación del motor DC acoplado al generador. El regulador consta de un voltímetro que posee los mismos fundamentos de funcionamiento que el presentado en el apartado 3.7.1.

Además, posee un control de velocidad mediante la utilización de PWM que varía el voltaje promedio de excitación de los devanados del rotor del primo motor. La velocidad angular del motor DC regula proporcionalmente la frecuencia de las fases del generador. El control automático se logra con una etapa de potencia que ajusta la tensión DC conectada al actuador motriz.

3.7.3 FRECUENCÍMETRO

La prueba de funcionamiento del frecuencímetro conlleva el uso del modulo EM-3320 1C, indicado en la figura 37, para obtener un voltaje DC equivalente a la velocidad del motor acoplado

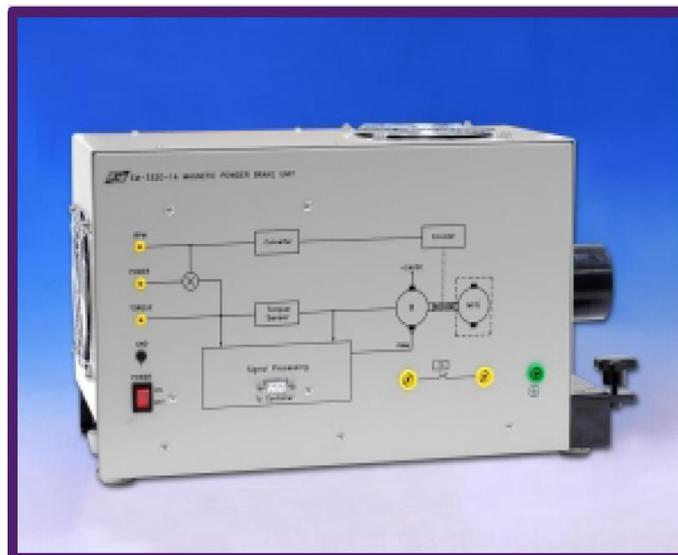


Figura 37. Módulo EM-3320 1C Magnetic Powder Break (EM, 2015)

DISEÑO DEL FRECUENCÍMETRO

El hardware para convertir de una onda senoidal en un arreglo de datos digitales, posee características equivalentes al voltímetro implementado en el apartado anterior. El conversor analógico digital con resolución de 16 bits de la tarjeta cRIO son suficientes para procesar y trazar los tramos de la onda senoidal tanto del generador como de la red eléctrica. La tensión de la red eléctrica es regulada a niveles adecuados de lectura mediante el divisor de voltaje del circuito esquematizado en la figura 38.

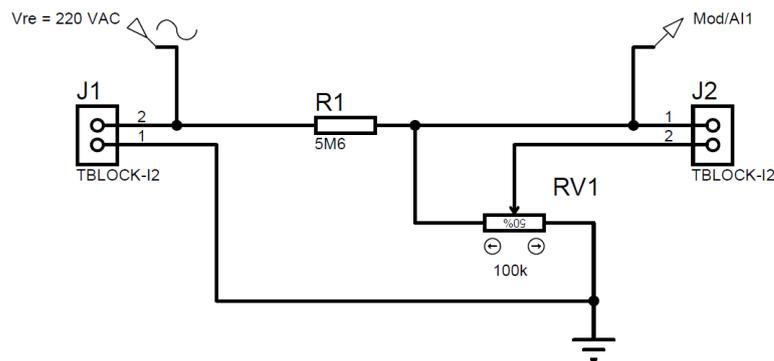


Figura 38. Regulador automático de frecuencia

3.7.4 DETECCIÓN DE FASE

Es un software que permite medir la diferencia del ángulo de fase entre dos señales continuas correspondientes al generador y la red eléctrica. El algoritmo de medición inicia con la captura de las ondas sinusoidales mediante las entradas analógicas de la tarjeta cRIO. Luego, se emplea un conversor analógico digital que permite obtener los puntos del tramo de la tensión de la señal para luego ser almacenados en una memoria temporal que posteriormente exporta los datos hacia las siguientes etapas de procesamiento. El siguiente paso consiste en realizar la operación de la diferencia entre la onda de voltaje del alternador y la señal de la red eléctrica. La operación de restar los voltajes de alternador y la barra infinita presentan valores fluctuantes creando una onda resultante correspondiente a la diferencia de ángulo de fase existente. Como condición de funcionamiento, el sistema de control debe llevar esta onda resultante hacia un valor o amplitud aproximadamente igual a cero que se entiende como la entrada en fase del alternador con respecto al sistema interconectado de generadores.

3.8 FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN

El sistema de sincronización es un conjunto de aparatos y mecanismos que ejecutan una tarea conjunta para cumplir las especificaciones de

funcionamiento del sistema. Los sensores y medidores son unos de los componentes fundamentales para el control de las máquinas eléctricas y deben verificarse y monitorearse continuamente durante la maniobra de puesta en marcha del sistema y son:

- Medidor de voltaje o voltímetro
- Frecuencímetro
- Medidor de fase
- Protecciones contra sobre corrientes

Luego de la verificación de funcionamiento de estos aparatos se procede a arrancar el sistema hasta su capacidad nominal, es decir, el voltaje y la frecuencia generados deben permanecer dentro del rango especificando, como lo indica la figura 39.

Al momento de cumplir esta primera etapa, el sistema cumple las condiciones necesarias para ser acoplado al control de sincronización automática.

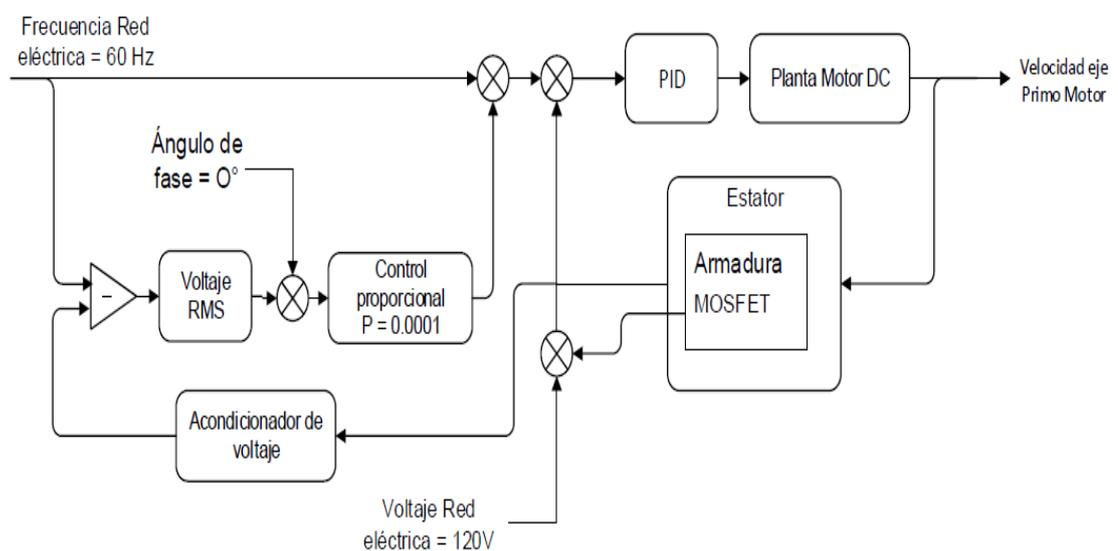


Figura 39. Diagrama de control de frecuencia, voltaje y fase

El sistema automático de sincronización obedece al diagrama de la figura 40 donde se incluyen los dispositivos de medición, las máquinas eléctricas y los diagramas generales de control analógico que actúan sobre el motor DC y el generador a través de los drivers basados en regulación PWM

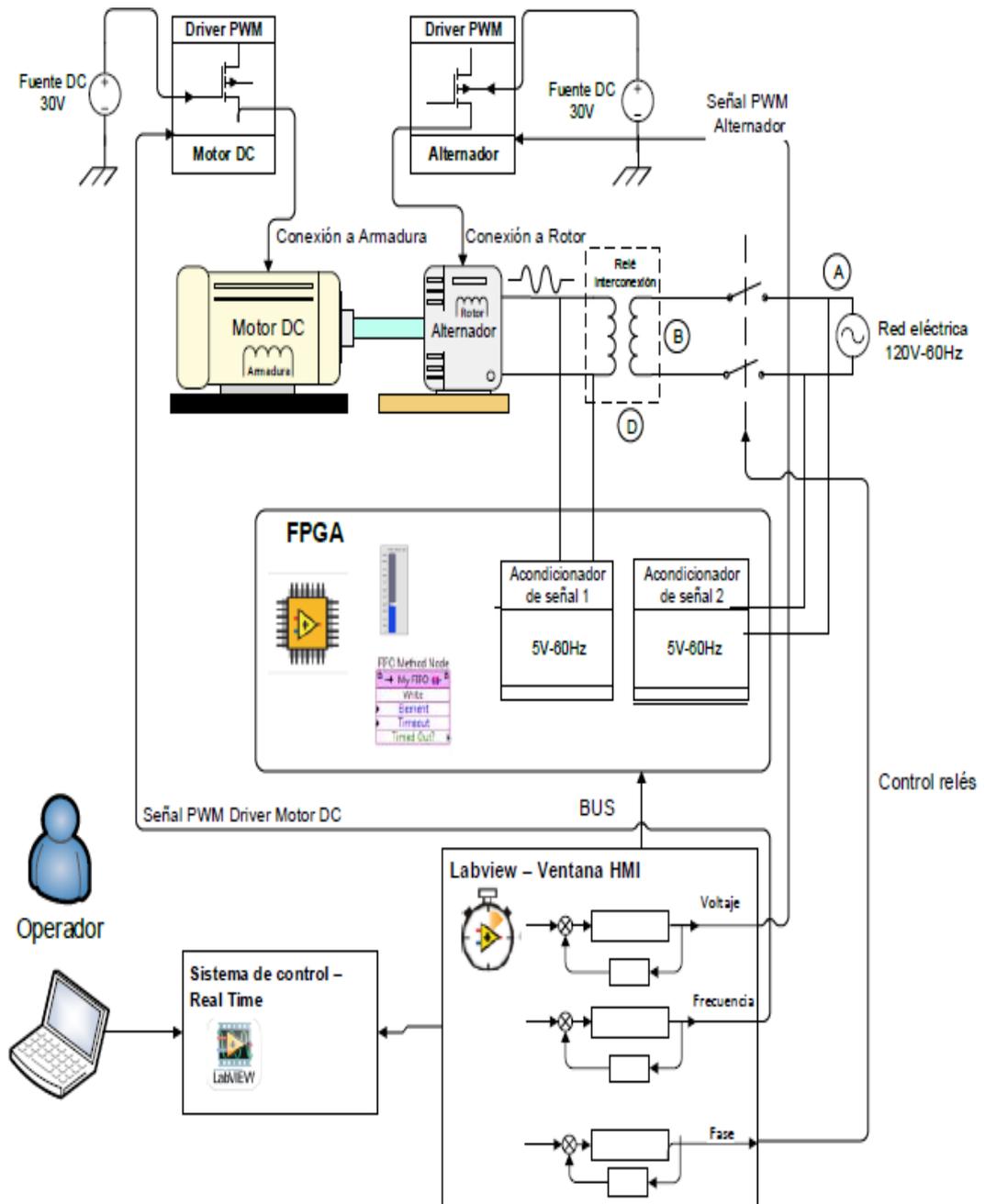


Figura 40. Diagrama general de sincronización

4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO DEL ALTERNADOR

En la tabla 4 se detalla la lista de valores obtenidos en la prueba de circuito abierto para los parámetros de interés: velocidad de motor DC, voltaje del módulo EM3320, la corriente de excitación, el voltaje de salida del alternador y su frecuencia. En esta primera ejecución de la prueba ha tratado de mantenerse como constante la corriente de excitación de tal manera que la velocidad de rotación del alternador se modifica para observar el cambio en la frecuencia de la tensión de salida.

Tabla 4. Prueba de circuito abierto

Velocidad motor DC [RPM]	Vo EM 3320 [V]	I _{ext} [A]	Vo alt [V]	Frecuencia [Hz]
600	142,8	2,065	6,997	60,01
582	136,5	2,035	6,268	58,09
561	132,7	2,019	6,028	56,07
552	131	2,019	5,924	55,05
540	128,2	2,016	5,803	54,02
521	123,3	2,015	5,597	52,08
501	118,7	2,009	5,377	50,04
480	112,5	2,006	5,159	48,07
460	108,3	2,003	4,937	46,02
440	105,1	2,002	4,723	44,02
400	95,5	1,999	4,282	40,01

La corriente de excitación es un parámetro relevante dentro de la operación de generación eléctrica del alternador.

Es así que la amplitud del voltaje generado es directamente proporcional al incremento o disminución de la corriente de campo. Según las características constructivas del devanado de campo, dicha corriente podrá incrementarse hasta la zona de saturación del hierro donde se observa que su reluctancia aumente de manera notoria y que el flujo magnético se incremente a intervalos menores.

Para la segunda parte de la prueba de circuito abierto, se ha mantenido, en lo posible, la velocidad del motor DC y la frecuencia resultante en sus valores ideales: el registro de medición de la tabla 5 demuestra las consideraciones definidas.

Tabla 5. Prueba de circuito abierto con variación de I_{exc}

$V_o \text{ ext[V]}$	$V_o \text{ alt[V]}$
0	0
0,309	1,963
0,401	3,168
0,997	4,085
1,201	4,749
1,396	5,265
1,594	5,738
1,803	6,203
2,007	6,413
2,084	6,496
2,096	6,497
2,102	6,513

La representación gráfica de los datos de la tabla 5. valida la teoría de saturación al magnetizar el devanado del rotor.

La porción de la gráfica de la figura 41 para corrientes de excitación superiores a 2.40 A resultan en un aumento mucho menor de tensión de salida en su armadura.

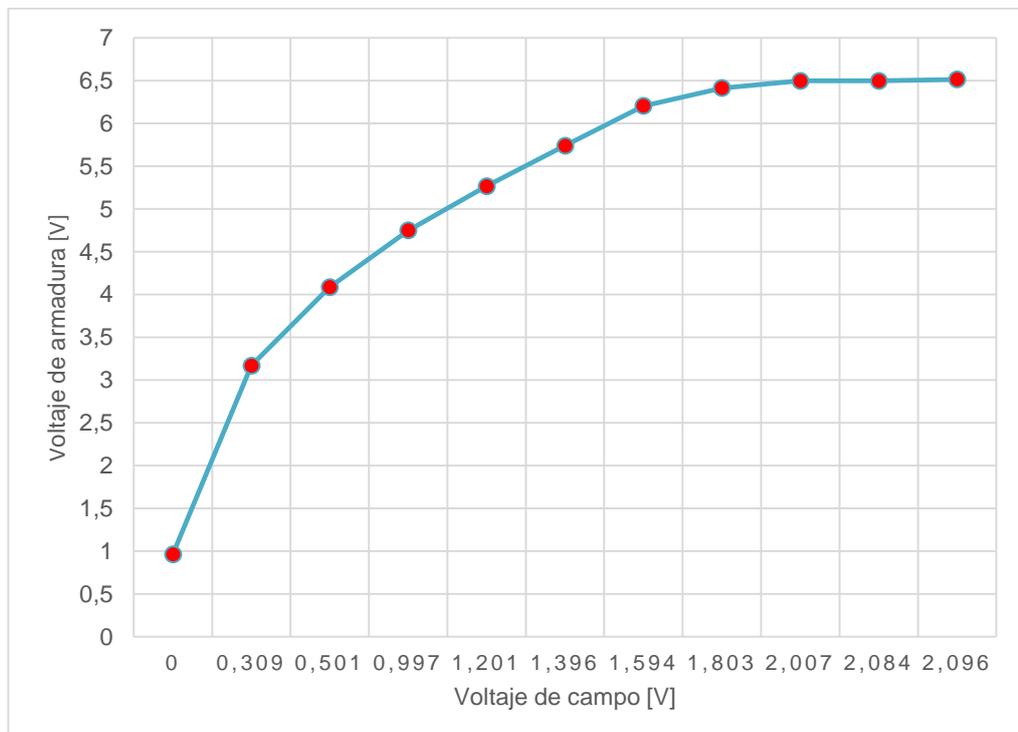


Figura 41. Curva característica de circuito abierto

4.2 MEDICIONES DE VOLTAJE, FRECUENCIA Y FASE

El voltímetro diseñado en la sección anterior validó su funcionalidad al realizar las pruebas de la generación de tensión con el alternador para diferentes niveles de voltaje. Según lo indica en la tabla 6, los valores obtenidos se compararon con los datos arrojados por un multímetro, concluyendo que los valores medidos son adecuados para su utilización en las etapas subsecuentes de control.

Tabla 6. Resultados medición con Voltímetro

Nº medición	Medición Voltímetro	Medición Multímetro
1	2,0	2,2
2	2,0	2,2
3	2,0	2,1
4	2,5	2,4
5	3,5	3,4
6	3,0	3,0
7	3,0	3,1
8	3,0	3,8
9	4,5	4,4
10	4,5	4,5
11	4,0	4,9
12	4,0	4,1

El frecuencímetro implementado en el chip FPGA tiene la característica de obtener una lectura adecuada gracias a la resolución y la frecuencia de muestreo definidas en el software para la conversión analógico - digital. En la tabla 7, las magnitudes del frecuencímetro versus las mediciones de un osciloscopio, están dentro del rango de tolerancia para un control preciso.

Tabla 7. Relación de velocidad vs voltaje

Velocidad(rpm)	Voltaje(mv)
300	0,0760
400	0,0940
500	0,1160
600	0,1360
700	0,1570
800	0,1760
900	0,2020
1000	0,2210
1100	0,2450
1200	0,2640
1300	0,2860

La figura 42 generada según los valores de la tabla 6, indican la linealidad entre el voltaje y la velocidad. Luego de analizar los datos de campo registrados, la resolución es adoptar el diseño del dispositivo gracias a la tolerancia que se encuentra en los niveles permisibles.

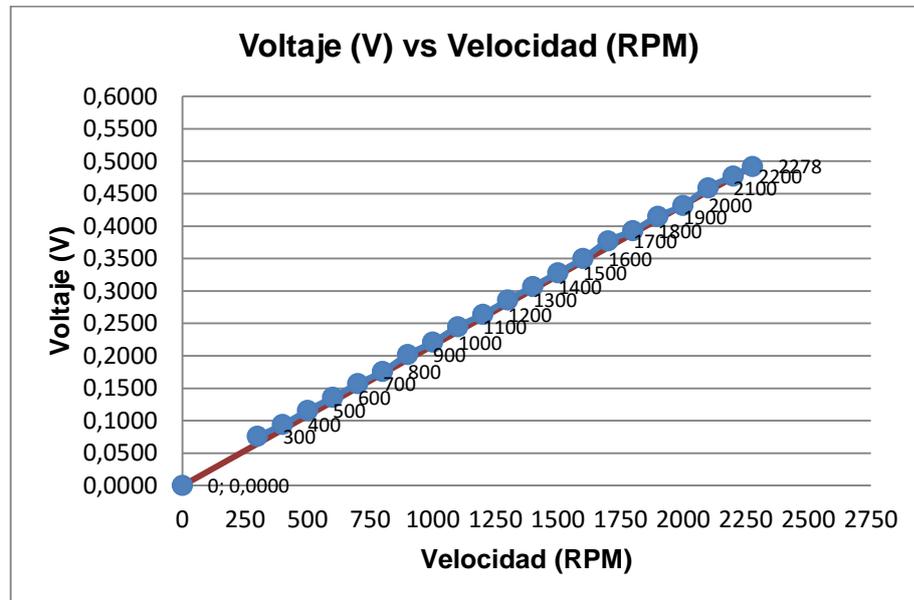


Figura 42. Relación de voltaje vs velocidad

El detector de fase tiene un rol fundamental en la sincronización automática, este se encarga de realizar la medición del desplazamiento o diferencia de fases entre las fases del alternador y las fases de la barra infinita.

Tabla 8. Resultados medición con Medidor de fase

Nº medición	Medición Detector de fase	Medición Osciloscopio
1	20,4	20,5
2	20,4	20,4
3	20,3	20,4
4	20,4	20,4
5	20,4	20,4
6	20,5	20,6
7	20,4	20,3
8	21,9	22,1
9	22,0	22,0
10	24,5	24,3
11	24,5	24,5
12	20,5	24,4

4.3 SOFTWARE DE COMPENSACIÓN DE FASE

El sistema de compensación de fase se basa en la manipulación de tres lazos de control para conseguir la sincronización:

1. Lazo de control de frecuencia.
2. Lazo de control de voltaje.
3. Lazo de control para la compensación de la frecuencia.

Los tres lazos de control son comandados por un lazo principal que recibe las señales de referencia y entrega la señal de control hacia la tarjeta cRIO. El software global de control trabaja sobre el procesador de la tarjeta cRIO la cual a su vez se encuentra conectada a los periféricos de entrada y salida para censar los lazos de control. En la figura 43, puede apreciarse el diagrama de bloques del software principal de control para la sincronización automática.

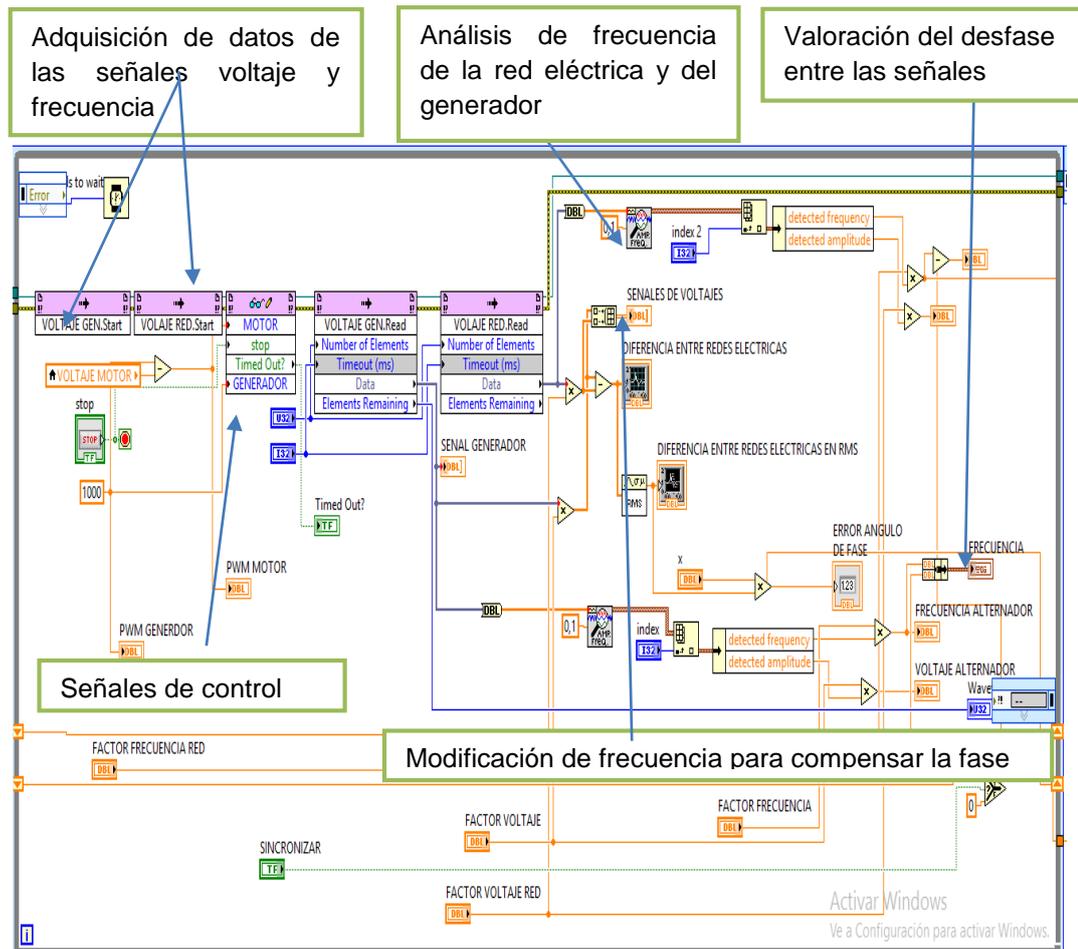


Figura 43. Diagrama de bloques del sistema

En la figura 44 se muestra la pantalla de control para la sincronización de las fases, como resultado de la programación mostrada en la figura anterior.

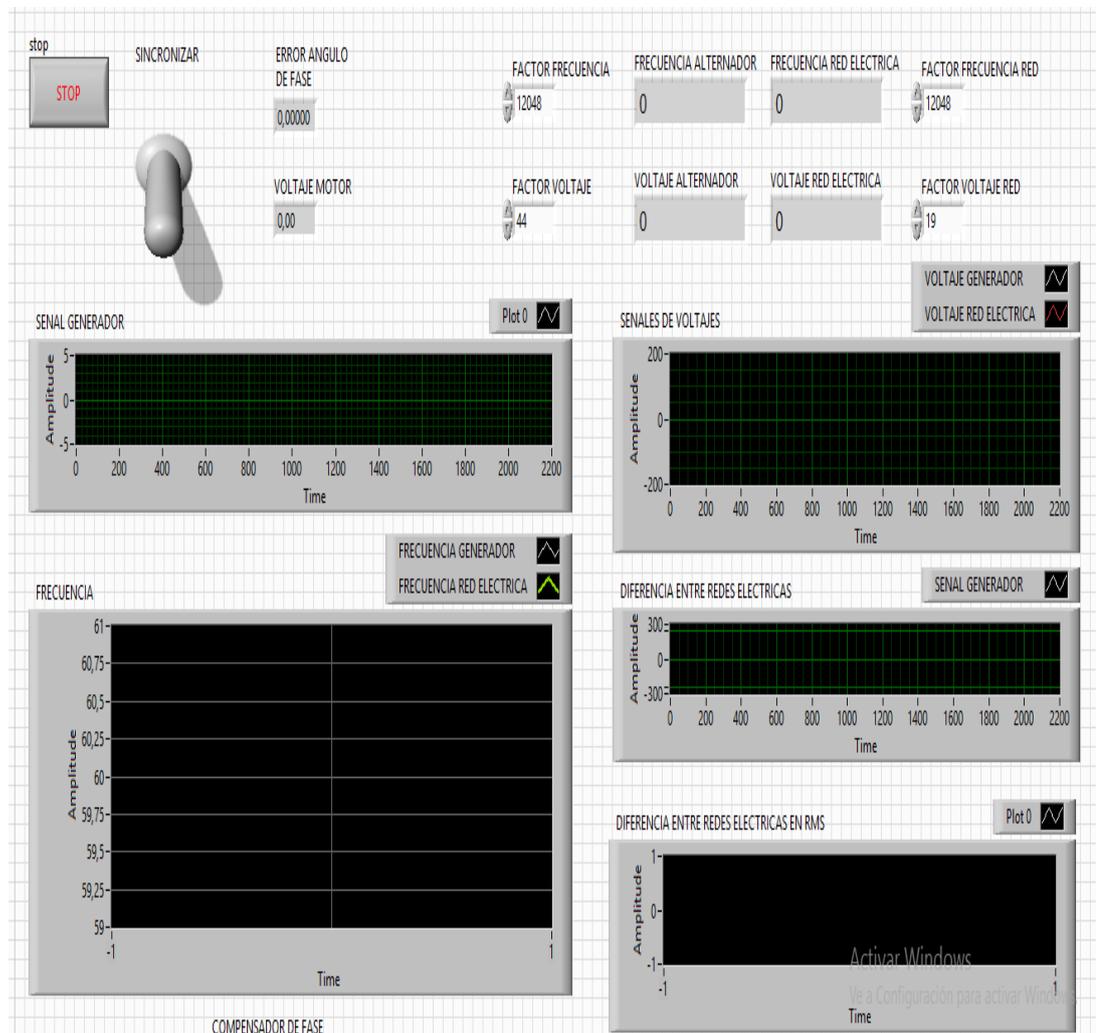


Figura 44. Pantalla principal del sistema de compensación de fase

4.4 DESCRIPCIÓN BÁSICA DE LAS ETAPAS DEL SISTEMA DE CONTROL DE COMPENSACIÓN DE FASE

4.4.1 LAZO DE CONTROL DE FRECUENCIA

El regulador automático de frecuencia, en su concepción fundamental, consta de un controlador PID que recibe los parámetros de medición de frecuencia de la red eléctrica como valor referencial para el control. Este valor de referencia es tomado para que el control PID manipule el voltaje en

el motor de la planta y así cambiar la velocidad angular del generador hasta conseguir controlar la frecuencia del generador. La figura 45 es el esquema de la programación para el control de la frecuencia:

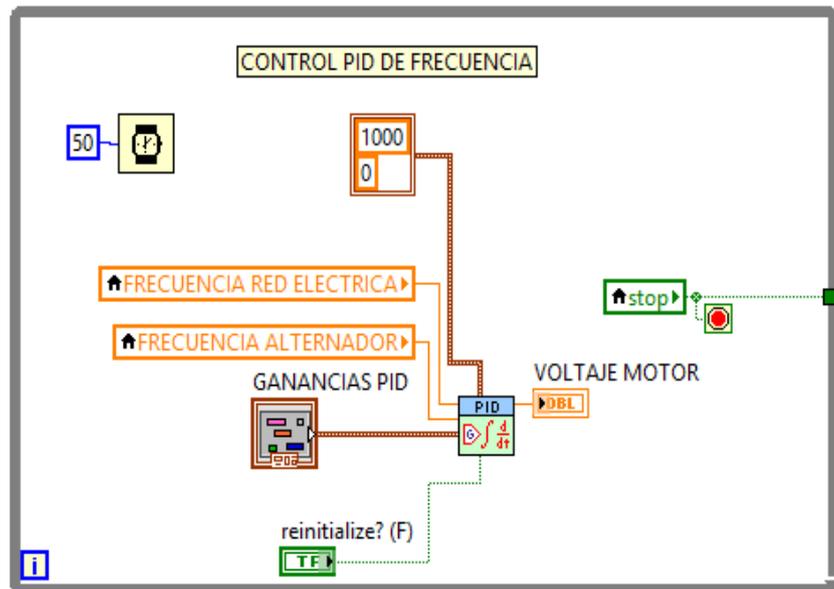


Figura 45. Esquema de control de frecuencia

4.4.2 LAZO DE CONTROL DE VOLTAJE

El regulador automático de voltaje de la misma manera está basado en un control PID, como se observa en la figura 46.

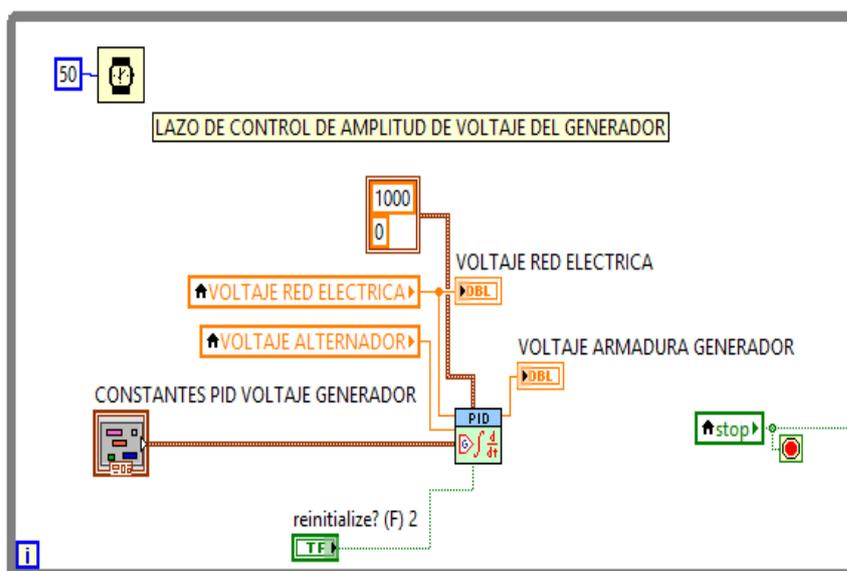


Figura 46. Esquema de control de voltaje

El control toma como referencia la amplitud de voltaje de la red eléctrica para que así el controlador PID manipule el voltaje en la armadura del generador obteniendo una variación de amplitud de voltaje en los terminales del mismo.

4.4.3 LAZO DE CONTROL PARA LA COMPENSACIÓN DE FASE

El regulador automático de fase consiste en modificar de manera proporcional la referencia de frecuencia de la red eléctrica en el lazo de control de frecuencia, como se muestra en la figura 47.



Figura 47. Esquema de control de compensación de fase

El objetivo es que el motor cambie su velocidad lo suficiente como para hacer que las dos señales tanto de la red eléctrica y la del generador igualen sus fases. Esta operación es delicada debido a que el sistema no debe cambiar su velocidad significativamente como para perder el valor de frecuencia. El controlador PID realiza la compensación de la fase al disminuir la diferencia de tensión que se genera entre dos fases con niveles de voltaje distintos, que el caso de estudio lo constituye el alternador y la red eléctrica. El sistema de sincronización automática permite visualizar las gráficas de las variaciones de los parámetros medidos, como frecuencia de la red eléctrica, señales de voltaje generado por el alternador, el cambio de la diferencia de

instrucciones dentro del bucle infinito indicadas en la figura 49. Las señales de entrada se adquieren a través del puerto entradas y salidas digitales Port0. Para el control de frecuencia se emplea el pin DIO0 y el voltaje del alternador puede ser gobernado mediante el pin DIO1.

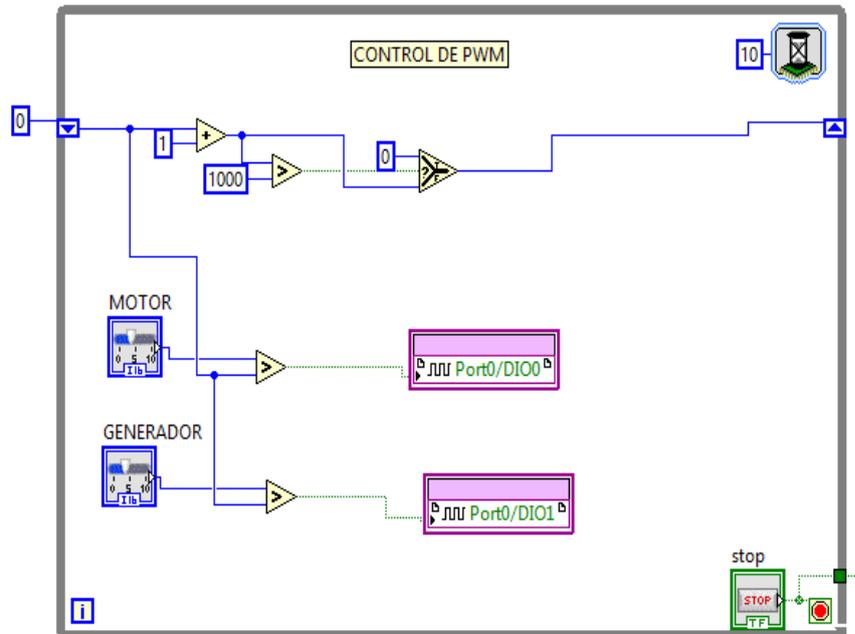


Figura 49. Programación para generar una señal PWM

La generación de la señal PWM es el resultado de la comparación entre un contador y el valor ingresado desde un slider que especifica el ciclo de trabajo del PWM. En este caso el contador inicia en 0 y llega hasta 1000, es decir, la onda modulada por ancho de pulso puede entregar un voltaje con variaciones de centésimas de voltio.

4.6 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID

El método heurístico permite determinar los coeficientes del controlador PID realizando pruebas de ensayo y error si se cuenta con plantas donde la función de transferencia se desconoce o es muy compleja de modelar.

Los pasos empleados para obtener los parámetros del controlador PID son:

1. El sistema es puesto en marcha al aplicar una entrada escalón al motor DC. La figura 50 demuestra la respuesta de la planta al realizar

una prueba de medición de la frecuencia de fase del alternador al aplicar la señal de control PWM al primo motor.

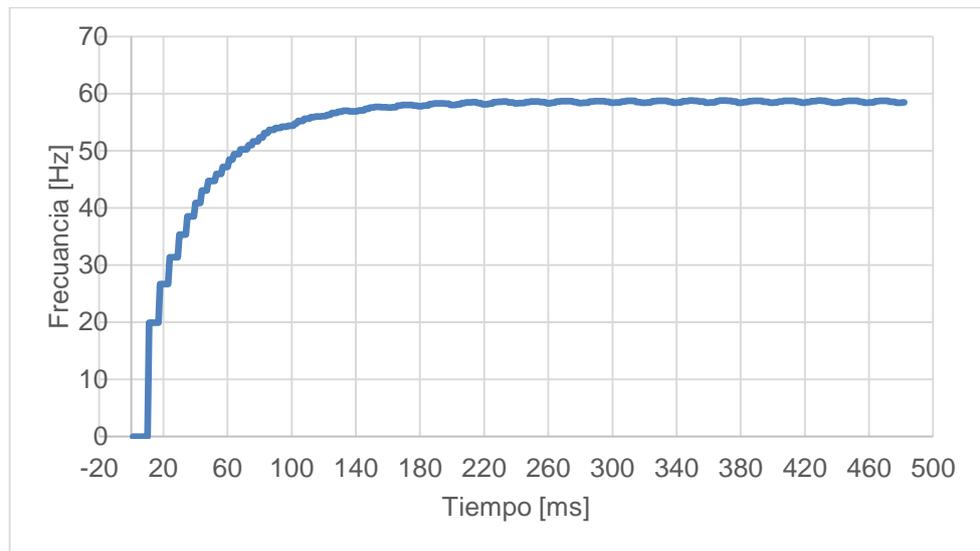


Figura 50. Respuesta al escalón de la planta

Según la respuesta de la planta al escalón, los datos de la gráfica generada permiten establecer que se trata de un sistema de primer orden con un tiempo muerto. Puede modelarse la función de transferencia según la ecuación 21:

$$G(s) = \frac{Ke^{-t(s)}}{\tau s + 1} \quad [21]$$

2. Añadir un control proporcional para mejorar el tiempo de subida. Inicialmente se asume la constante proporcional k_p igual a 0.5 y luego se varía de acuerdo a la respuesta del sistema
3. Añadir un control derivativo K_d para mejorar el desplazamiento fuera del valor de consigna
4. Adicionar un control integral K_i para eliminar el error en estado estable.
5. Realizar el ajuste de las constantes k_p , k_i y k_d hasta obtener la respuesta deseada

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Con los reguladores automáticos construidos y el banco de pruebas creado, se logró sincronizar las fases del alternador trifásico a las fases de la red eléctrica tomando en cuenta condiciones de trabajo tanto del motor y alternador adecuados para un funcionamiento eficaz.
- Para la sincronización automática se requiere emplear sensores analógicos y digitales con el objetivo de monitorear y controlar los parámetros de sincronización, es decir mantener las frecuencias, las amplitudes y las fases dentro del rango permitido para la interconexión.
- El acoplamiento entre el alternador y el motor DC contempla la utilización de bases adecuadas donde las maquinas eléctricas evidencian una alineación precisa entre sus ejes con el objetivo de disminuir las vibraciones originadas al poner en marcha el motor eléctrico. Del mismo modo, este acoplamiento se conjuga con la distribución ordenada del cableado etiquetado y la colocación de las placas en lugares estratégicos para su fácil manipulación para la prevención de cortocircuitos y desajustes de las conexiones eléctricas.
- Los reguladores de voltaje y de frecuencia son sistemas de control de lazo cerrado que para la estabilización y respuesta a cambios de las condiciones de funcionamiento y demanda de energía eléctrica, requieren ser gobernados por controladores PID analógicos sintonizables según el tipo de planta empleado.
- El alternador debe girar a la velocidad nominal, y sus tensiones eficaces, frecuencia y secuencia de fases de línea deben estar ajustadas a los valores de la barra de potencia infinita con ayuda de un regulador de voltaje que actúa sobre la corriente de excitación del rotor del alternador, un regulador de frecuencia permita regular la velocidad del par motor, y un detector de fase que permita sincronizar el voltaje trifásico con la red eléctrica.
- La plataforma de sincronización automática permite expandir la automatización del sistema mediante el acoplamiento de módulos HMI con lo

cual se descarta la dependencia de un computador conectado a la tarjeta NI cRIO 9631.

RECOMENDACIONES

- Los interruptores de paso deben contar con un mando manual de emergencia si existen fallas en el control automático.
- El sistema de sincronización debe contar con relés de protección térmica para el alternador en casos de sobrecarga cuando existe una sobreexcitación de corriente en el rotor.
- Los circuitos diseñados para el control de la frecuencia y voltaje del alternador emplean una etapa de amplificación para la señal PWM mediante transistores NPN y PNP que eleva el nivel de voltaje de la señal de control que activa un transistor MOSFET en configuración de switch para drenar el voltaje equivalente aplicado al devanado del motor DC y al rotor del alternador.
- Al tratarse de un sistema de control que involucra la sincronización de fases, es necesario recurrir a un sistema de control en tiempo real de alto desempeño.
- Para hacer la sincronización es necesario tener identificados las líneas tanto de la red eléctrica como las líneas del generador, debido a las interconexiones son entre las líneas con la misma secuencia.
- Al momento de realizar la interconexión, la sincronización de fase entre la red eléctrica y el generador es necesario tomar como referencia la fase R1 de la red eléctrica con la fase R1 del generador con el objetivo de evitar una confusión entre líneas y provocar un corto circuito.
- Un sistema de acoplamiento de dos generadores en paralelo conlleva la tarea de ejecutar la sincronización sobre cada alternador con las directrices desarrolladas en este proyecto, con lo cual el procedimiento de la conexión en paralelo constituirá el siguiente paso a seguir.

Bibliografía

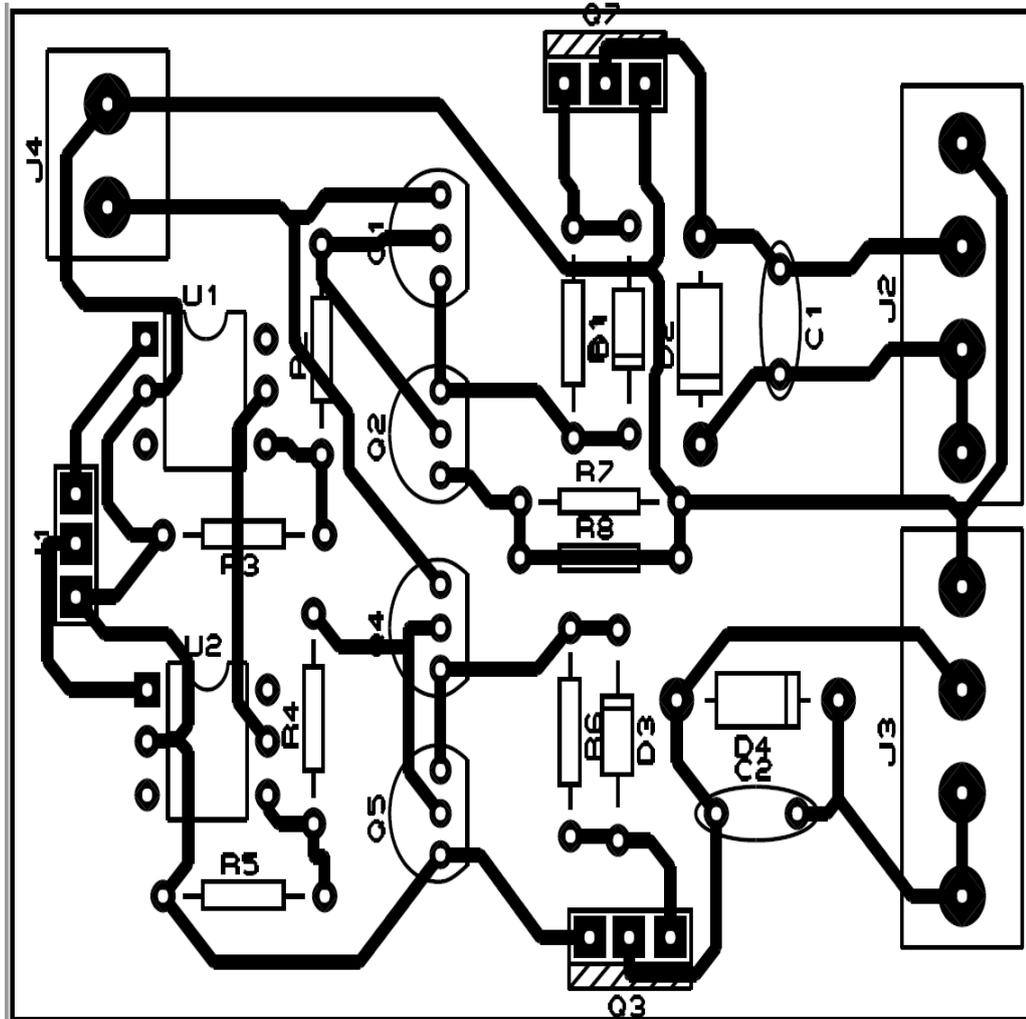
- Abdelati. (2011). Desing of an Automtic with the Generated Voltage Equation.
- Aguilar Rios, A. R. (2010, Febrero 16). Diapositivas de Clase de Máquinas Eléctricas III. México D.F.
- alternador, C. e. (2011, Febrero 6). Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control. Retrieved from http://www.ieec.uned.es/Web_docencia/Archivos/material/Libro%20de%20centrales%202011.pdf
- Bobadilla, J. (1999). La transformada de Fourier: una visión pedagógica. Estudios de fonetica experimental.
- Carrillo, E. (2012). Equating a Car Alternator with the Generated Voltage Equation. California: Universidad Politécnica de California.
- Chapman, S. (2012). Máquinas Eléctricas. Nueva York, Estados Unidos: Mc Graw Hill.
- Cruz, L. (2008). Implementación de un sicrinoscopio virtual para el acoplamiento automático de generadores a la red para el laboratorio de máquinas eléctricas. Latacunga: ESPE.
- Dabowsa, A. (2011). Desing of an Automatic Synchronizing Device for Dual-Electric Generators Based on CAN Protocol. Gaza: The Islam University of Gaza.
- Durango, G. (2009). Modelado del generador síncrono y curva de capacidad.
- EM. (2015, Marzo 19). Producto: EM-3000 Máquina de Sistema Eléctrica. Retrieved from Sitio web K&H MFG CO., LDTA: http://www.kandh.com.tw/products_2.php?prod=54#
- Esteba Dillon, P. P. (2014). Diseño de un sistema automático de regulación de voltaje y frecuencia generados por una Micro-central Hidroeléctrica. Quito: EPN.

- Gallardo, F. (2010). Automatización de una unidad móvil de generación eléctrica con un panel de control EGCP-2 para grupos electrógenos, en la empresa RS ROTH S,A. Latacunga: ESPE.
- Juan Bernal, M. S. (2010). COonstruccion de un sistema de control de voltaje y frecuencia del generador síncrono SIEMENS DM-SN/DG2240.Q4-R3. Cuenca: UPS.
- Mendoza, E. (2003). Control de una Planta generadora de Energía Eléctrica. Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- National Instruments. (2012, Octubre 19). Retrieved from ftp://ftp.ni.com/pub/branches/northern_region/fpga_kit_feb14/what_is_ni_s_ingleboardrio.pdf
- Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderno. España : Pearson Education S.A.
- Palmacas. (2011). Control PID para Motor DC - Lectura y Potencia.
- Peña, B. &. (2014). Modelo Matemático del Motor DC. Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Wildi, T. (2007). Máquinas Eléctricas y Sistemas de potencia. Mexico DF: Pearson Education.
- Yamile del Valle, J. R. (2006). Conversión Electromecánica de la Energía. Santiago: Universidad de Chile.

ANEXOS

ANEXO 1.

Circuito de potencia PWM para regulación de frecuencia



Especificaciones

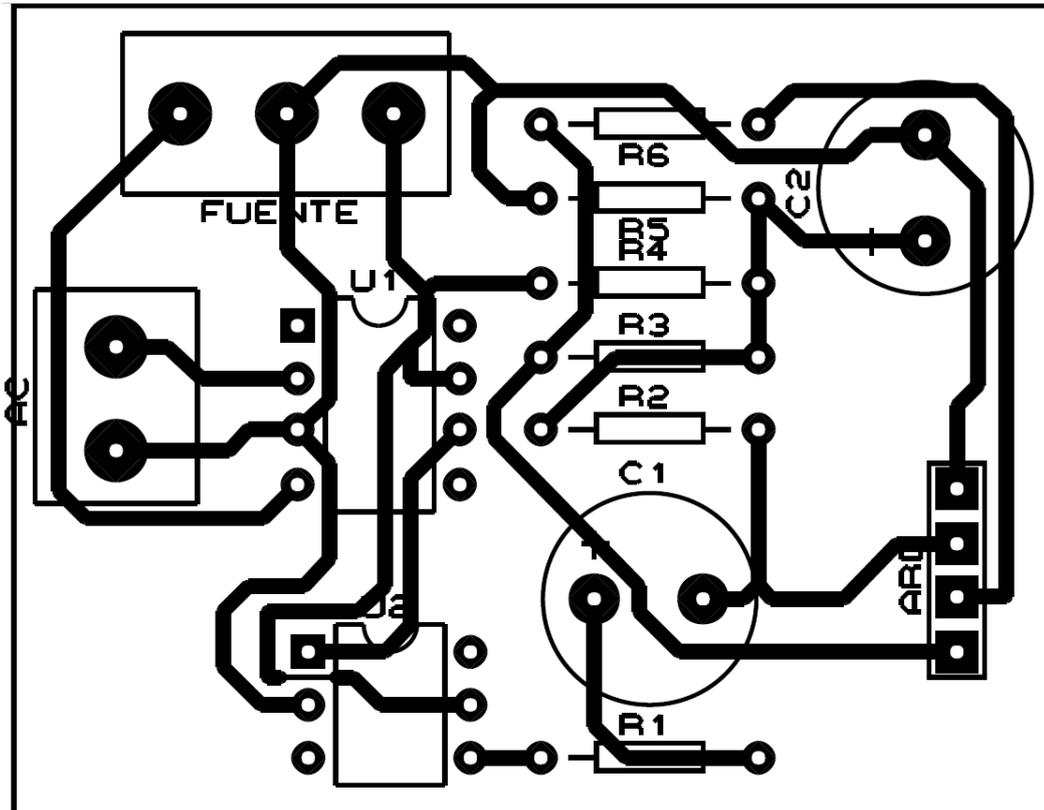
Señal de control por PWM

Voltaje de alimentación: 15 VDC

Voltaje de entrada: 50 VDC (máx.)

ANEXO 2.

Voltímetro



Especificaciones

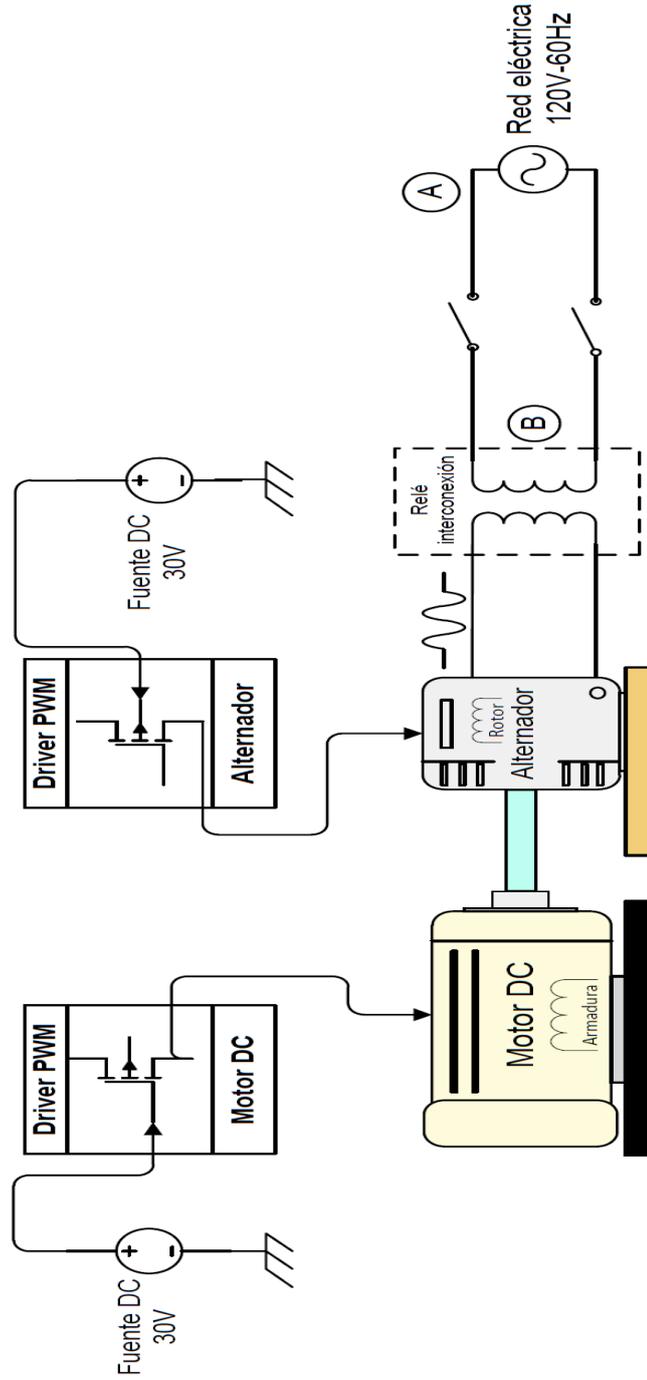
Rectificador de onda completa con filtro capacitivo

Voltaje de entrada: 220VAC

Voltaje de salida: 5VDC

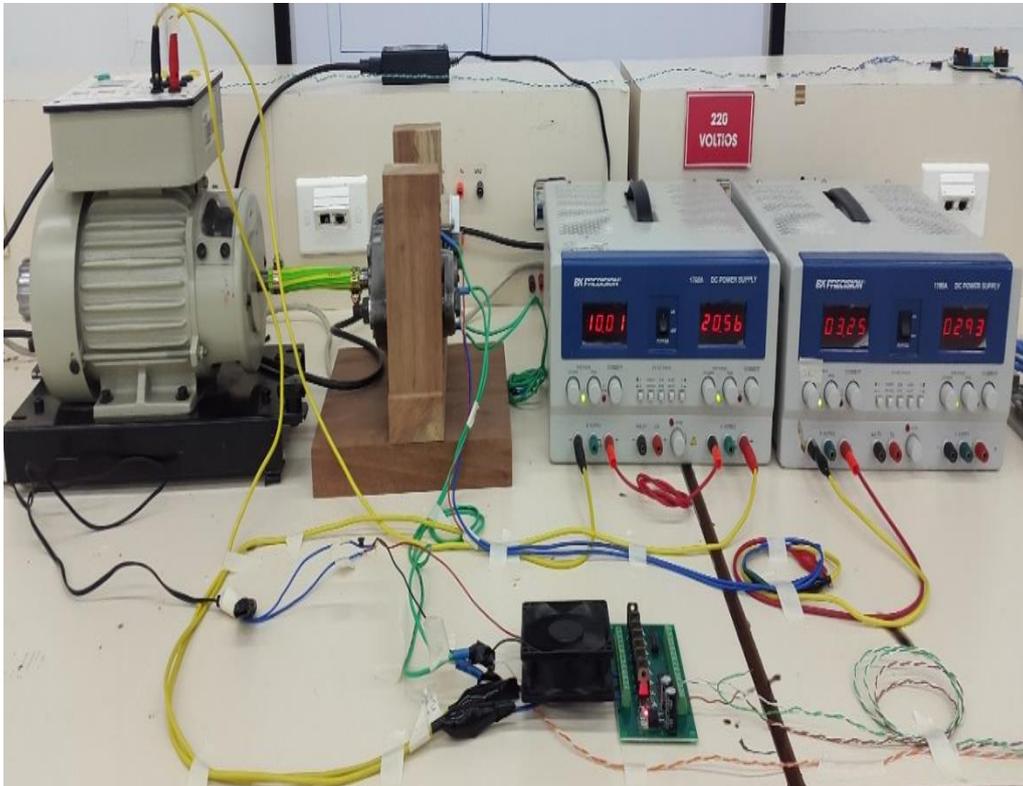
ANEXO 3.

Acoplamiento Motor – Alternador



ANEXO 4.

Banco de Ensayos



ANEXO 5.

Tabla de pruebas de circuito abierto del alternador

Vel Motor DC [RPM]	Vo EM 3320 [mV]	I ext [A]	Vo alt[V]	f [Hz]
600	142,8	2,065	6,997	60,01
600	142,5	2,05	6,997	60,07
602	143,1	6,864	6,977	59,87
582	136,5	2,035	6,268	58,09
561	132,7	2,019	6,028	56,07
552	131	2,019	5,924	55,05
540	128,2	2,016	5,803	54,02
521	123,3	2,015	5,597	52,08
501	118,7	2,009	5,377	50,04
480	112,5	2,006	5,159	48,07
460	108,3	2,003	4,937	46,02
440	105,1	2,002	4,723	44,02
400	95,5	1,999	4,282	40,01

ANEXO 6.

Diagrama de flujo sincronización automática del alternador

