

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



Control Electrónico de Generador Móvil Kohler de 15 KW.

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero
en Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Esteban Ramírez González

Cartago, marzo 2009

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

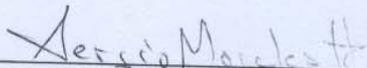
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

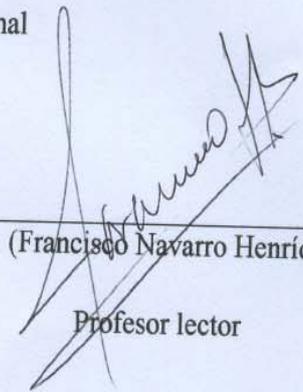
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

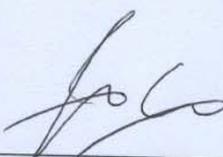
Miembros del Tribunal


Ing. (Sergio Morales Hernández)

Profesor lector


Ing. (Francisco Navarro Henríquez)

Profesor lector


Ing. (Juan Carlos Jiménez R.)

Profesor asesor



Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

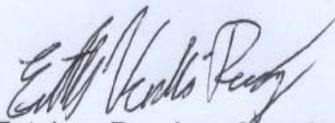
Cartago, 11 de marzo 2009

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 11 de marzo, 2009


Esteban Ramírez González

Céd: 304020338

Resumen

Actualmente la energía eléctrica es indispensable para las actividades cotidianas del ser humano, por lo tanto la producción y distribución de la energía es un tema de alta importancia. Debido a la demanda de energía, la dependencia en procesos de producción y en actividades médicas se ha buscado diversas opciones para obtener energía eléctrica o tener un respaldo en caso de una falla en la línea de distribución.

Con las condiciones de vida actuales la popularidad de los generadores alimentados por un motor de combustión interna ha aumentado, la rama de la electrónica contribuye a este fin modernizando y mejorando los sistemas para obtener una mayor eficiencia de los generadores.

Este informe plantea el desarrollo de un control electrónico para un generador móvil de 15 kW marca Kohler, este control es fundamental para el buen funcionamiento de la máquina. Con este proyecto se pretende mejorar la eficiencia del generador, alargar la vida útil de la máquina y modernizar el generador utilizando componentes electrónicos más confiables, de menor tamaño que los componentes antiguos. Para el diseño de este nuevo control se recurre a técnicas de control automático moderno y a la electrónica de potencia para cumplir con los requerimientos del generador.

Palabras clave: generador, energía, componentes electrónicos, control electrónico, control automático.

Abstract

Nowadays the electric power is indispensable for the daily activities of the human being, therefore the production and distribution of the energy is a topic of high importance. Due to the demand of energy, the dependence in productions processes and in medical activities has looked for diverse options to obtain electric power or to have a support in case of a fault in the distribution line.

With the current living conditions the popularity of the generators fed by an internal combustion engine increases, the branch of the electronics contributes to this purpose modernizing and improving the systems to obtain a major efficiency of the generators.

This report raises the development of an electronic control for a mobile generator of 15 kW brands Kohler, this control performs supreme importance for the functioning of the machine. With this project one tries to improve the efficiency of the generator, to lengthen the useful life of the machine and to modernize the generator using more reliable electronic components, of minor size than the ancient components.

For the design of this new control one resorts to skills of modern automatic control and to the power electronics to expire with the requirements of the generator.

Keywords: generator, energy, electronic components, electronics control, automatic control.

DEDICATORIA

A Dios y a mis padres, por el apoyo incondicional.

Agradecimiento

Agradezco a mis padres por todo su apoyo y esfuerzo.

Al profesor Ing. Juan Carlos Jiménez por toda la ayuda brindada durante este proyecto.

Gracias.

INDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Problema existente e importancia de su solución	1
1.2 Solución seleccionada.....	3
Capítulo 2: Meta y Objetivos	6
2.1 Meta	6
2.2 Objetivo general	6
2.3 Objetivos específicos.....	6
Capítulo 3: Marco Teórico	8
3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar	8
3.1.1 Generador móvil o grupo electrógeno	8
3.1.2 Generador síncrono (fuente de energía eléctrica).....	10
3.2 Antecedentes Bibliográficos	12
3.2.1 PID digital en un sistema de regulación de voltaje	12
3.2.2 Sistemas de excitación modernos para generadores síncronos	13
3.2.3 Control de excitación de máquinas síncronas	15
3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema	20
3.3.1 Inducción electromagnética	20
3.3.2 Tiristor o SCR	21
3.3.3 Rectificador controlado monofásico de onda completa.....	24
3.3.4 Reguladores PID.....	29
3.3.5 Potencia reactiva y su efecto sobre el voltaje de un sistema ..	32
3.3.6 Relaciones de potencia de la máquina síncrona	34
Capítulo 4: Procedimiento Metodológico.....	36
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	36
4.2 Obtención y análisis de información	37
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	37
4.4 Implementación de la solución	38
4.5 Reevaluación y rediseño	39
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución (Explicación de diseño)	40
5.1 Análisis de soluciones y selección final	40

5.2	Descripción del hardware.....	41
5.3	Descripción del software	46
Capítulo 6: Análisis de Resultados.....		49
6.1	Resultados	49
6.1.1	Relación corriente de excitación y voltaje generado.	49
6.1.2	Diseño del control PID	54
6.1.3	Pruebas del generador con distintas cargas	60
6.2	Análisis.....	61
Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones.....		64
7.1	Conclusiones	64
7.2	Recomendaciones.....	65
Bibliografía.....		67
Apéndices		69
A.1	Glosario, abreviaturas y simbología	69
A.2	Información sobre la empresa / institución.....	70
A.2.1	Descripción de la empresa	70
A.2.2	Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto	70
Anexos		71
Anexo B.1	PIC 16F877A	71
Anexo B.2	Regulador de voltaje LM7805.....	74
Anexo B.3	Relé de Estado Sólido Opto22 480 D1512.....	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Generador Móvil Kohler. [8].....	1
Figura 1.2	Diagrama de bloques de la Solución.	4
Figura 3.1	Regulador de voltaje PID para un generador sincrónico. [1]	12
Figura 3.2	Sistemas de excitación modernos para generadores sincrónicos. [6]	14
Figura 3.3	Máquina sincrónica con carga (a) inductiva (b) resistiva (c) capacitiva. [11]	16
Figura 3.4	Sistemas de excitación (a) Excitador rotatorio CD (b) Excitador CA y diodos rotativos (c) excitación por tiristores. [11].....	17
Figura 3.5	Diagrama de bloques para excitación rotativa (a) con (b) sin realimentación transiente; (c) para el caso de excitación estática. La entrada en líneas punteadas representa los limitadores de sobre excitación y baja excitación. [11]	19
Figura 3.6	Símbolo del tiristor y sus uniones pn. [10]	22
Figura 3.7	Circuito y características del tiristor. [10]	23
Figura 3.8	Rectificador monofásico controlado de onda completa con carga resistiva. [2]	24
Figura 3.9	Rectificador controlado monofásico de onda completa. [5]	25
Figura 3.10	Caso 1 modo de operación continua. [5]	26
Figura 3.11	Caso 2 modo de operación continua. [5]	26
Figura 3.12	Caso 3 modo de operación continua. [5]	27
Figura 3.13	Formas de onda del rectificador de onda completa operando en modo discontinuo. [5]	27
Figura 3.14	Regulador PID en dominio de la frecuencia. [7]	30
Figura 3.15	Sistema con regulador PID en dominio de la frecuencia. [7] ..	30
Figura 3.16	Diagrama para un sistema de potencia con dos barras, un generador y una salida de carga. [4]	32
Figura 3.17	Relación entre la potencia reactiva y el voltaje. [4].....	33
Figura 3.18	Diagrama fasorial de un generador de polos salientes, cargado con la corriente atrasada. [4]	35
Figura 5.1	Circuito del módulo Fuente.....	42
Figura 5.2	Diagrama del PIC 16F877A y nombre de los pines.....	43
Figura 5.3	Circuito detector de cruce por cero.....	43
Figura 5.4	Circuito del módulo de Arranque.....	44
Figura 5.5	Relé del módulo de Arranque.....	45

Figura 5.6	Circuito del módulo Rectificador.....	45
Figura 5.7	Circuito del módulo Monitoreo del motor de combustión interna.	46
Figura 5.8	Diagrama de Flujo del software implementado en el control. ...	47
Figura 6.1	Gráfico voltaje generado en función de la corriente de excitación.	51
Figura 6.2	Gráfico voltaje generado en función del ángulo de disparo.....	53
Figura 6.3	Respuesta de la planta ante un escalón.....	55
Figura 6.4	Respuesta del sistema compensado ante un escalón unitario.	58
Figura 6.5	Respuesta al escalón del sistema sin compensador (línea discontinua) y el sistema compensado (línea continua).	59
Figura B.1.1	Diagrama de pines del PIC 16F877A.....	72
Figura B.2.1	Diagrama del regulador de voltaje LM 7805	74
Figura B.3.1	Diagrama del relé de estado sólido opto22 480D1512.	75

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Tabla Ziegler-Nichols para el caso uno. Tabla tomada de [7]	31
Tabla 3.2	Tabla Ziegler-Nichols para el caso dos. Tabla tomada de [7]	31
Tabla 6.1	Valores de corriente de excitación, voltaje de excitación entregado por el control y voltaje generado obtenidos en la prueba de comportamiento del generador móvil Kohler 15 kW.	50
Tabla 6.2	Valores de corriente de excitación y voltaje de excitación entregado para distintos ángulos de disparo.....	52
Tabla 6.3	Valores de voltaje de excitación y generado medidos en el arranque del generador.....	53
Tabla 6.4	Valores de constantes de tiempo y ganancia medidos con el osciloscopio.....	54
Tabla 6.5	Especificaciones en el dominio del tiempo para el modelo matemático de la planta.	55
Tabla 6.6	Especificaciones en el dominio del tiempo requeridas por el compensador PID.....	56
Tabla 6.7	Especificaciones en el dominio del tiempo del sistema con compensador PID.....	58
Tabla 6.8	Valores de voltaje y frecuencia obtenidos al someter el generador a pruebas con distintas cargas.....	60
Tabla B.1.1	Especificaciones del PIC 16F877A dadas por el fabricante.	73
Tabla B.2.1	Especificaciones del regulador de voltaje LM7805 dadas por el fabricante.....	74
Tabla B.3.1	Especificaciones del Relé de Estado Sólido Opto 22 480D15-12 dadas por el fabricante.....	75

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se describe el problema, el entorno y las limitaciones de diseño planteadas en el proyecto. Asimismo se presenta a modo general la solución seleccionada y la importancia de llevar a cabo esta solución.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

Los generadores móviles se componen de un motor de combustión (Diesel), generador eléctrico y un control electrónico como se muestra en la figura 1.1. El motor de combustión hace girar el rotor del generador eléctrico a una velocidad de 1800 r.p.m, el control se encarga de excitar inicialmente el rotor con 12 Voltios de la batería del motor de combustión, una vez generada una diferencia de potencial en el estator del generador eléctrico se alimenta el control electrónico con el potencial generado.

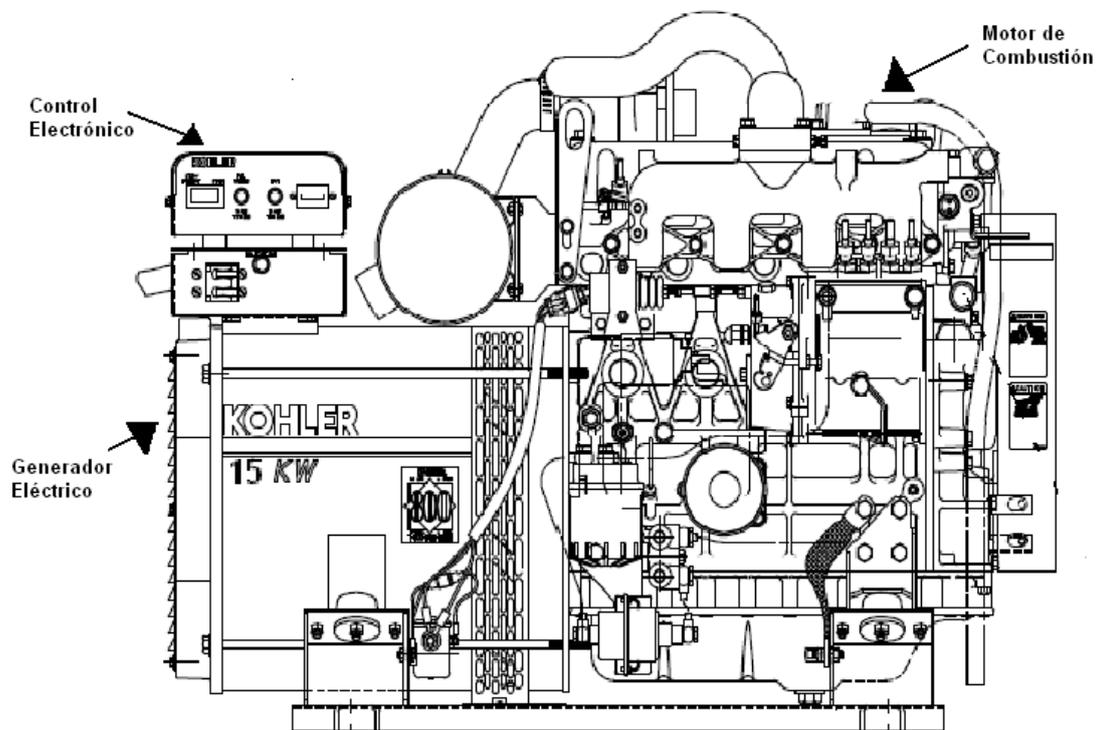


Figura 1.1 Generador Móvil Kohler. [8]

El potencial generado es 220 V Trifásico a 60 HZ en las salidas del generador eléctrico, estas salidas se conectan al control electrónico. El control electrónico tiene como función mantener un voltaje constante en la salida del generador independiente de la carga que se conecte, esto se logra controlando la corriente con la que excita el rotor además de monitorear el estado del motor de combustión y llevar el control de las horas de trabajo.

El monitoreo del motor de combustión se realiza midiendo el estado de la batería, la cantidad de aceite, cantidad de refrigerante y cantidad de combustible. El estado de estas variables es mostrado mediante luces indicadoras.

En las revisiones realizadas por la empresa se determinó que el motor de combustión de este generador está en perfectas condiciones. Se realizaron pruebas en los bobinados del generador eléctrico probando el buen funcionamiento del mismo. Por lo tanto la falla del Generador Móvil es el control electrónico. Anteriormente, personal de la empresa inspeccionó el control electrónico existente y se determinó que no es el original de la máquina, por lo que no se cuenta con documentación alguna.

Se procede a cotizar un control electrónico con los distribuidores de la marca Kohler y el control para esta máquina está obsoleto, la solución propuesta por el distribuidor es comprar un control electrónico de los Generadores Móviles modelo 2008 con un costo de \$2000 en Estados Unidos, más el costo de envío y luego realizar las adaptaciones correspondientes para que trabaje con este modelo de Generador Móvil. El costo de esta solución es elevado, asciende a un 50% del valor del equipo, por lo que se hace importante encontrar una solución adecuada a un menor costo sin que limite el óptimo funcionamiento del generador.

1.2 Solución seleccionada

Pese a la complejidad del proyecto, la empresa solicita dos requerimientos que deben ser tomados en cuenta en el desarrollo de la solución:

- Obtener voltaje constante en las salidas del generador independiente de la carga siempre y cuando este dentro del rango de potencia adecuado para este equipo.
- Proteger el motor de combustión interna.

Tomando en cuenta los planteamientos de la empresa Grúas NAVI, se procede con la solución. Se aplica teoría de Control Automático, Electrónica de Potencia y diseño modular para facilitar la visualización de todas las funciones que conforman el control electrónico. El diagrama de bloques correspondiente a la solución se muestra en la figura 1.2.

Diagrama de la Solución

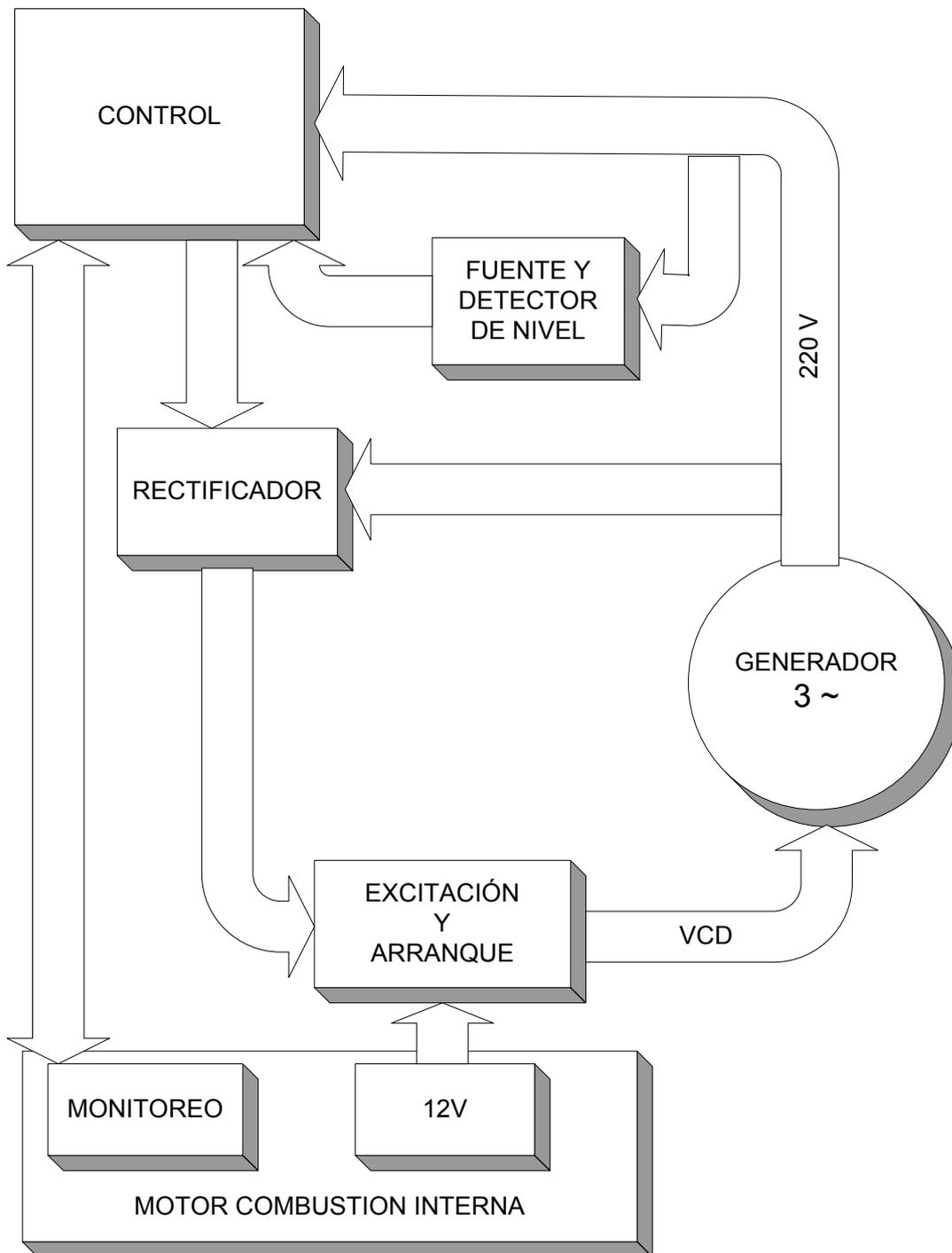


Figura 1.2 Diagrama de bloques de la Solución.

A continuación se presenta una descripción de las funciones de cada módulo:

Módulo CONTROL:

Este módulo es el encargado de tomar decisiones, se utiliza un dispositivo programable para el análisis de los datos provenientes de los sensores del motor de combustión y del módulo detector de nivel. Con la variación de las salidas de este módulo se modifica la excitación del generador. También es capaz de detener el equipo en caso de mal funcionamiento.

Módulo FUENTE Y DETECTOR DE NIVEL:

Como la solución implica dispositivos de control que trabajan a menor voltaje, este módulo se encarga de suplir todos los voltajes necesarios para el módulo de control. Además obtiene un valor de voltaje estable que puede ser utilizado por el módulo de control para la toma de decisiones.

Módulo RECTIFICADOR:

Se utilizan tiristores a los cuales se les controla el ángulo de disparo. El control de este ángulo lo realiza el módulo de control, este se comunica con módulo rectificador mediante acopladores ópticos. Este módulo recibe corriente alterna de la salida del generador y la convierte en corriente directa que puede ser utilizada para excitar el generador.

Módulo EXCITACIÓN Y ARRANQUE:

La principal función de este módulo es excitar el rotor del generador con la batería de 12V DC del motor de combustión interna y al percibir voltaje generado en los bornes de salida del generador cambiar la excitación por la proveniente del módulo rectificador.

Módulo MONITOREO:

Este módulo es el encargado de obtener datos de los sensores del motor de combustión interna, además en conjunto con el módulo de control detiene el equipo en caso de un funcionamiento erróneo. Este módulo indica mediante luces el estado de los sensores.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

En este capítulo se mostrará la meta y los objetivos. La meta representa el máximo alcance que tendrá el proyecto, el objetivo general indica la principal tarea a realizar para resolver el problema y los objetivos específicos hacen referencia a todas aquellas actividades y objetos necesarios para cumplir con el objetivo general.

2.1 Meta

Obtener tensión nominal (220V a 60 Hz) en las salidas del Generador Móvil Kohler de 15 KW.

Indicador: Se utiliza un Voltímetro para medir la tensión eléctrica en la salida del generador.

2.2 Objetivo general

Implementar un control electrónico que satisfaga los requerimientos (potencial de arranque, corriente de excitación dependiente de la carga, frecuencia de operación y tensión constante) del Generador Móvil Kohler 15 kW.

Indicador: Se mide potencial nominal (220 V a 60 Hz) en el Generador Móvil Kohler 15 kW con el Control Electrónico.

2.3 Objetivos específicos

1. Obtener un modelo matemático del Generador Eléctrico Kohler de 15 kW que relacione la corriente de excitación en función del voltaje de salida.

Indicador: Ecuación que describe el comportamiento del Generador.

2. Diseñar un módulo de arranque que permita utilizar la alimentación del motor de combustión, y al detectar un potencial generado en el estator, cambiar la alimentación del control electrónico.

Indicador: Visualizar mediante un multímetro el cambio de alimentación en el control electrónico en el momento de arranque del Generador Kohler.

3. Desarrollar un módulo de potencia capaz de alimentar el módulo de control y acoplar mediante dispositivos ópticos el módulo de control con el de potencia.

Indicador: Valor de tensión eléctrica medido con un multímetro a la salida del módulo de potencia.

4. Diseñar un módulo de control capaz de variar la corriente entregada a la excitación del generador según sea la exigencia en las salidas de la máquina.

Indicador: Variación de la corriente en un rango de 0A - 5A, medido por un amperímetro en la salida del módulo de control.

5. Desarrollar un módulo de monitoreo para el motor de combustión que muestre el estado del mismo mediante luces indicadoras.

Indicador: Se simula un comportamiento erróneo en el motor de combustión y se corrobora el estado mediante indicadores lumínicos.

Capítulo 3: Marco Teórico

En este capítulo se presentan los principales conceptos necesarios para resolver el problema. Entre estos conceptos se encuentra teoría electromagnética, teoría de generadores, control automático de voltaje. Además se describe en forma general el funcionamiento de la máquina a la que se le va a agregar el control electrónico.

3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar

3.1.1 Generador móvil o grupo electrógeno

Un generador móvil ó grupo electrógeno es una máquina que mueve un generador eléctrico a través de un motor de combustión interna, en este caso de diesel. Son comúnmente utilizados cuando hay déficit en la generación de energía eléctrica, o cuando hay cortes en el suministro eléctrico.

Generalmente son utilizados en lugares donde no hay suministro eléctrico, zonas apartadas. También son utilizados en locales de pública concurrencia, hospitales, fábricas, que a falta de energía eléctrica de red, necesiten de otra fuente de energía alterna para abastecerse.

El generador móvil consta de las siguientes partes:

- Motor Diesel: El motor diesel que acciona el Generador Móvil ha sido seleccionado su fiabilidad y por el hecho de que se ha diseñado para accionar generadores móviles. Este motor se determina acorde a las exigencias de potencia del generador.
- Sistema eléctrico del motor: El sistema eléctrico del motor es 12 VDC, excepto aquellos motores alimentados a 24 VDC, negativo a masa. El sistema incluye un motor de arranque eléctrico, una batería, sensores y dispositivos de alarma que disponga el motor. Normalmente, un motor dispone de un sensor de presión de aceite, un termo contacto de temperatura y un contacto en el alternador para detectar un fallo de carga en la batería.

- Sistema de refrigeración: el sistema de refrigeración del motor puede ser por medio de agua, aceite o aire. El sistema de refrigeración por aire consiste en un ventilador de gran capacidad que hace pasar el aire frío a lo largo del motor para enfriarlo. El sistema de refrigeración por agua o aceite consta de un radiador, un ventilador interior para enfriar sus propios componentes.
- Alternador: La energía eléctrica de salida se produce por medio de un alternador, protegido contra salpicaduras, auto excitado, autorregulado y sin escobillas acoplado con precisión al motor, aunque también se pueden acoplar alternadores con escobillas para aquellos generadores móviles cuyo funcionamiento vaya a ser limitado y, en ninguna circunstancia, forzado a regímenes mayores.
- Depósito de combustible y bancada: El motor y el alternador están acoplados y montados sobre una bancada de acero de gran resistencia. La bancada incluye un depósito de combustible con una capacidad mínima de 8 horas de funcionamiento a plena carga.
- Aislamiento de la vibración: El Grupo Electrónico está dotado de tacos antivibrantes diseñados para reducir las vibraciones transmitidas por el Grupo Motor-Alternador. Estos aisladores están colocados entre la base del motor, del alternador, del cuadro de mando y la bancada.
- Silenciador y sistema de escape: El silenciador de escape va instalado en el Generador Móvil. El silenciador y el sistema de escape reducen la emisión de ruidos producidos por el motor.
- Sistema de control: Se puede instalar uno de los diferentes tipos de paneles y sistemas de control para controlar el funcionamiento y salida del grupo y para protegerlo contra posibles fallos en el funcionamiento.
- Interruptor automático de salida: Para proteger al alternador, se suministra un interruptor automático de salida adecuado para el modelo y régimen de salida del Grupo Electrónico con control manual. Para grupos Electrónicos con control automático se protege el alternador mediante contactores adecuados para el modelo adecuado y régimen de salida.

- Regulación del motor: El regulador del motor es un dispositivo mecánico diseñado para mantener una velocidad constante con relación a los requisitos de carga. La velocidad del motor está directamente relacionada con la frecuencia de salida del alternador, por lo que cualquier variación de la velocidad del motor afectará a la frecuencia de la potencia de salida.

Otros accesorios instalables en un Grupo Electrónico: Además de lo mencionado anteriormente, existen otros dispositivos que nos ayudan a controlar y mantener, de forma automática, el correcto funcionamiento del mismo. Para la regulación automática de la velocidad del motor se emplean una tarjeta electrónica de control para la señal de entrada "pick-up" y salida del "actuador". El pick-up es un dispositivo magnético que se instala justo en el engranaje situado en el motor, y éste, a su vez, está acoplado al engranaje del motor de arranque. El pick-up detecta la velocidad del motor, produce una salida de voltaje debido al movimiento del engranaje que se mueve a través del campo magnético de la punta del pick-up, por lo tanto, debe haber una correcta distancia entre la punta del pick-up y el engranaje del motor. El actuador sirve para controlar la velocidad del motor en condiciones de carga. Cuando la carga es muy elevada la velocidad del motor aumenta para proporcionar la potencia requerida y, cuando la carga es baja, la velocidad disminuye, es decir, el fundamento del actuador es controlar de forma automática el régimen de velocidad del motor sin aceleraciones bruscas, generando la potencia del motor de forma continua. Normalmente el actuador se acopla al dispositivo de entrada del fuel-oil del motor. [12]

3.1.2 Generador sincrónico (fuente de energía eléctrica)

El Generador Móvil Kohler de 15 kW cuenta con un generador eléctrico sincrónico trifásico, con 12 cables en su salida. El generador sincrónico representa la máquina más comúnmente utilizada en el mundo para la generación de energía.

El generador está compuesto por una armadura ubicada en el estator de la máquina, este contiene un grupo de bobinas por cada fase. El rotor tiene un bobinado que se alimenta con corriente directa, es el encargado de producir el flujo magnético que provoca la inducción en las bobinas del estator. A la corriente del rotor suele llamarse corriente de campo. El rotor puede alimentarse por un sistema de anillos.

La máquina sincrónica suele dividirse por la construcción física de su rotor en:

- Máquina de polos lisos: Es la máquina más simple en cuanto a que su modelo de armadura, considera la reactancia de dispersión, la resistencia del bobinado, una fuente que representa el voltaje inducido en la armadura por la corriente de campo y una reactancia producto del camino que debe tomar el flujo desde el rotor hasta la armadura.
- Máquina de polos salientes: Considera en sus modelos los mismos aspectos que la máquina de polos lisos más una reactancia producto de la diferencia de reluctancia entre el rotor y la armadura por el espacio de aire entre polo de la armadura y el polo del rotor.

Para que una máquina sincrónica trabaje como generador, se hace girar el rotor por medio de una fuerza externa, en este caso un motor de combustión interna. Se llama máquina sincrónica por que esta gira siempre a su velocidad de sincronismo. La relación entre la velocidad de giro del rotor y la frecuencia del voltaje inducido en la armadura está dada por la ecuación:

$$n = \frac{120 * f}{p} \quad (3.1)$$

Donde n es la velocidad de giro del rotor, f es la frecuencia del voltaje en la armadura y p es el número de polos del rotor.

En los generadores sincrónicos se tiene una relación entre la corriente de campo y el voltaje de armadura lo que representa el fundamento de este proyecto.

3.2 Antecedentes Bibliográficos

3.2.1 PID digital en un sistema de regulación de voltaje

Para el estudio de este regulador digital se toma el rectificador como una ganancia y se desprecia la reacción de armadura. Se obtiene un diagrama de bloques como el de la siguiente figura.

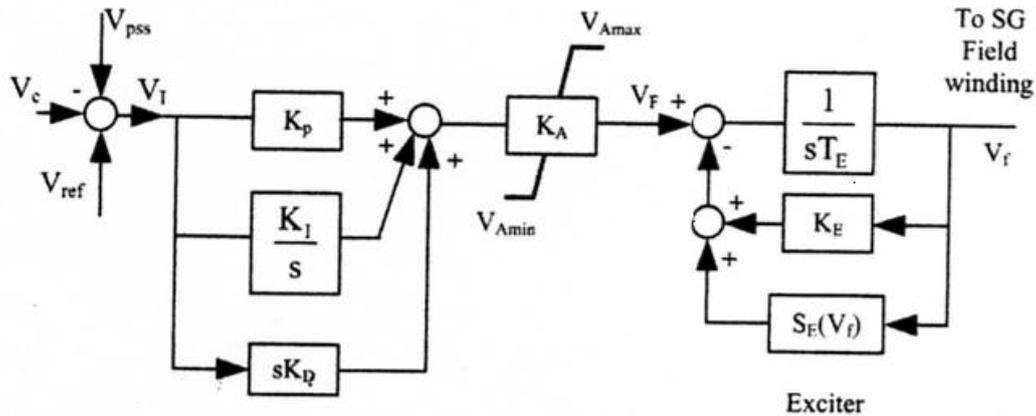


Figura 3.1 Regulador de voltaje PID para un generador sincrónico. [1]

Con una frecuencia más de 20 veces mayor a la frecuencia de lazo cerrado se diseña un controlador PID como si fuera continuo y se muestra en la siguiente ecuación:

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_i}{s} + sK_d \quad (3.2)$$

donde K_P es la ganancia proporcional, K_i la ganancia integral y K_d es la ganancia derivativa.

Como el excitador fue considerado de primer orden, solo una constante de tiempo T_E , el generador sincrónico debe ser modelado como un sistema de primer orden con una constante de tiempo de excitación T_{do} , a velocidad constante y para pequeñas perturbaciones.

Al considerar el excitador más el generador sincrónico se obtiene una función de transferencia de segundo orden:

$$G(s) = \frac{\frac{L_{dm}}{r_f (S_E + K_E)}}{(1 + sT_{do})(1 + sT_e)} \quad (3.3)$$

Donde L_{dm} es la inductancia de magnetización, r_f es la resistencia de campo.

El sistema de lazo cerrado que contiene el controlador PID tiene la siguiente ecuación característica:

$$G(s) * G_c(s) + 1 = 0 \quad (3.4)$$

Simplificando las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$K_D^2 s^2 + K_P s + K_I = -s(1 + sT_{do})(1 + sT_e) \quad (3.5)$$

Como se trabaja con un sistema de segundo orden, desde el principio se escoge un polo negativo $s_3=c$ en el semiplano izquierdo. Los otros dos polos son complejos y conjugados.

Se utilizan técnicas de control para encontrar los valores de las ganancias, luego por prueba y error se procede a ajustar las ganancias.

Pasando a modo discreto el controlador PID obtenemos:

$$\begin{aligned} \Delta F(K) = & \Delta F(K-1) + (K_P + K_I + K_d) \Delta V_i(K) - (K_P + 2K_d) \Delta V_i(K-1) \\ & + K_d \Delta V_i(K-2) \end{aligned} \quad (3.6)$$

La salida del controlador PID es $\Delta F(K)$ y $\Delta V_i(K)$ es la variación de error.

3.2.2 Sistemas de excitación modernos para generadores sincrónicos

Los sistemas de excitación modernos para máquinas sincrónicas se alimentan de las terminales del generador del cual sirven como fuentes del campo.

Existen dos tipos de sistemas de excitación: el estático y el aislado, ambos mostrados en la siguiente figura:

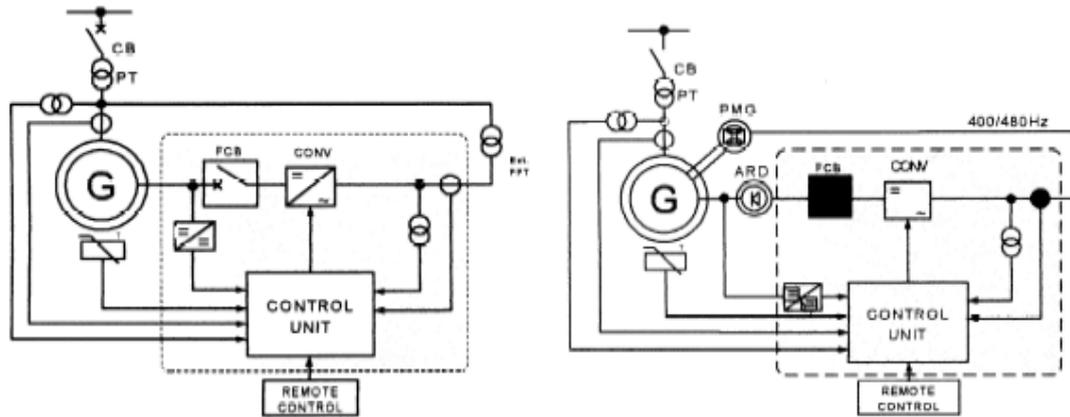


Figura 3.2 Sistemas de excitación modernos para generadores sincrónicos.

[6]

El sistema de excitación estático produce la corriente de campo utilizando un convertidor de tiristores y conduce la corriente hacia el campo a través de anillos rozantes. El convertidor de potencia puede alimentarse de una red auxiliar de la planta de energía o de las terminales del generador a través de un transformador.

En los sistemas de excitación aislados la corriente de campo es producida utilizando una máquina amplificadora rotatoria junto con un diodo rectificador rotatorio. El convertidor de baja potencia controla la corriente de campo de la máquina amplificadora. La forma más utilizada generalmente para suplir de potencia al convertidor es utilizando un generador de imanes permanentes (PMG por sus siglas en inglés) acoplado al rotor de la máquina sincrónica.

Los principales componentes de un sistema de excitación estático son el convertidor de potencia, el sistema de descarga del campo y el intercambiador de polaridad. El convertidor de potencia es un tiristor trifásico de potencia junto con un puente rectificador ajustado a las características de excitación de la máquina sincrónica.

Las protecciones de los tiristores del convertidor son disyuntores contruidos con materiales semiconductores sensibles a sobre voltajes o sobre corrientes en ambas componentes corriente directa o corriente alterna. El sistema de descarga del campo está basado en un circuito electromecánico junto con una resistencia de descarga. El intercambiador de polaridad permite la posibilidad

de equiparar la abrasión de los anillos rozantes al cambiar la polaridad de la corriente de campo cada año por ejemplo.

Los sistemas de excitación modernos poseen diversos dispositivos de control y diagnóstico de las variables controladas por el sistema. Entre ellos se encuentran reguladores manuales de voltaje (MVR), reguladores automáticos de voltaje (AVR), reguladores de potencia reactiva y reguladores del factor de potencia. Poseen además protecciones limitantes de la corriente en el estator, de la corriente de excitación, subexcitación, sobrecalentamiento, y limitadores de frecuencia y voltaje.

Con el fin de repartir la potencia reactiva entre los generadores periféricos conectados a una misma barra de potencia y además amortiguar las oscilaciones en el sistema de potencia, los sistemas de excitación son equipados con compensadores de corriente de campo y estabilizadores de sistemas de potencia.

3.2.3 Control de excitación de máquinas sincrónicas

Para examinar las características del control de voltaje y potencia no se considera el fenómeno electromecánico. Para hacer una mejor comparación del comportamiento de la máquina síncrona ante diferentes situaciones se consideran tres casos, carga resistiva, inductiva y capacitiva.

Para simplificar la comparación se asume que la carga es directamente acoplada a los terminales del generador como se muestra en la siguiente figura.

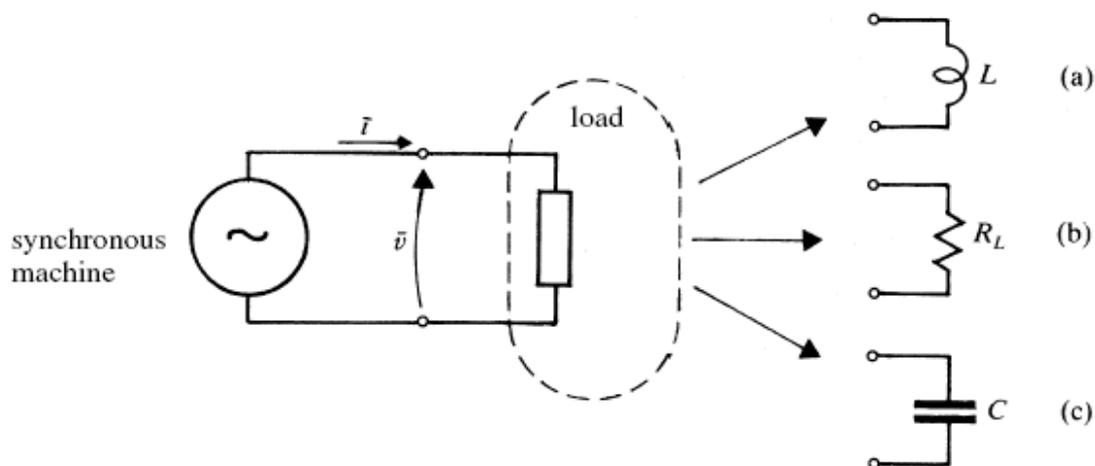


Figura 3.3 Máquina sincrónica con carga (a) inductiva (b) resistiva
(c) capacitiva. [11]

De la comparación de estos casos se obtiene un modelo del generador sincrónico $G(s)$, luego se obtiene un compensador para regular el voltaje $G_V(s)$.

$$G_V(s) = K_A * \frac{1 + sT_2}{1 + sT_1} \quad (3.7)$$

Este compensador es aceptable para cargas resistivas o inductivas, y con mucha precaución para cargas capacitivas. Este compensador es puede cambiar dependiendo del sistema de excitación, el sistema de excitación puede básicamente ser de los siguientes tipos:

- Excitación Rotacional:
 - Por excitador de corriente directa, como se muestra en la parte (a) de la figura 3.4.
 - Por excitador de corriente alterna sincrónico y diodos rotativos, este se muestra en (b) de la figura 3.4. El excitador es excitado por el estator por lo que los anillos rozantes y las escobillas no son necesarias.
- Excitación estática:
 - Por excitador de tiristores, puede ser con fuente dependiente o independiente. Se observa en la parte (c) de la figura 3.4.

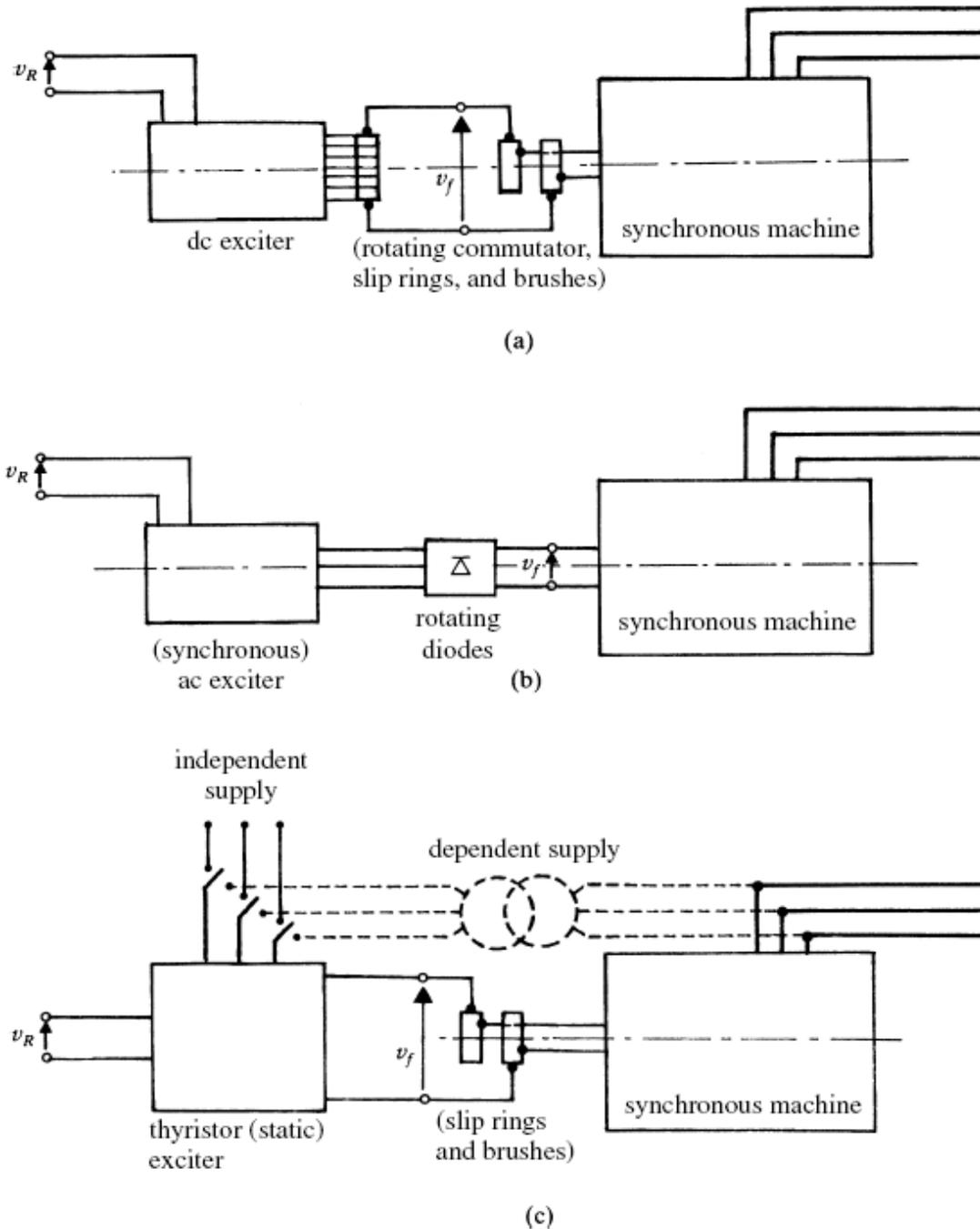


Figura 3.4 Sistemas de excitación (a) Excitador rotatorio CD (b) Excitador CA y diodos rotativos (c) excitación por tiristores. [11]

Más preciso, excitación por rotación:

- El sistema de excitación debe ser representado, independiente de la saturación magnética con la función de transferencia $K_e/(1+sT_e)$ (donde T_e tiene un valor entre 0.5 – 1 segundo), como se muestra en la parte (a) y (b) figura 3.5.

- El sistema de control debe ser del tipo mostrado en (a) con realimentación o como el mostrado en (b).

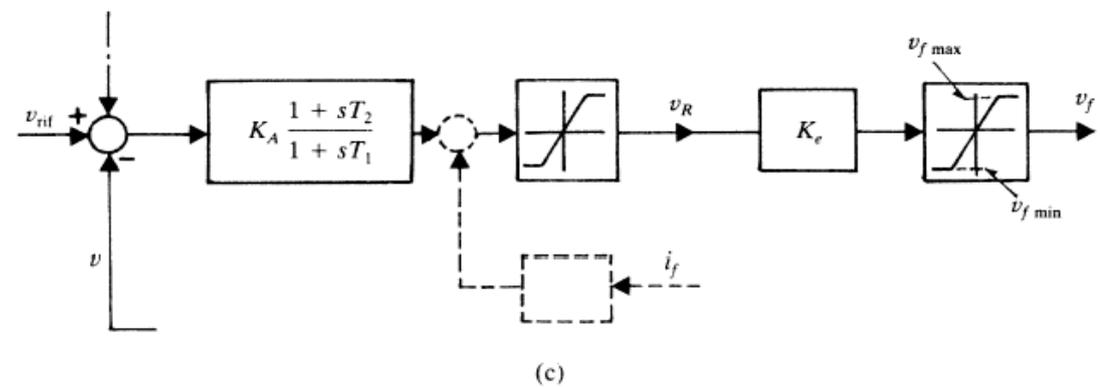
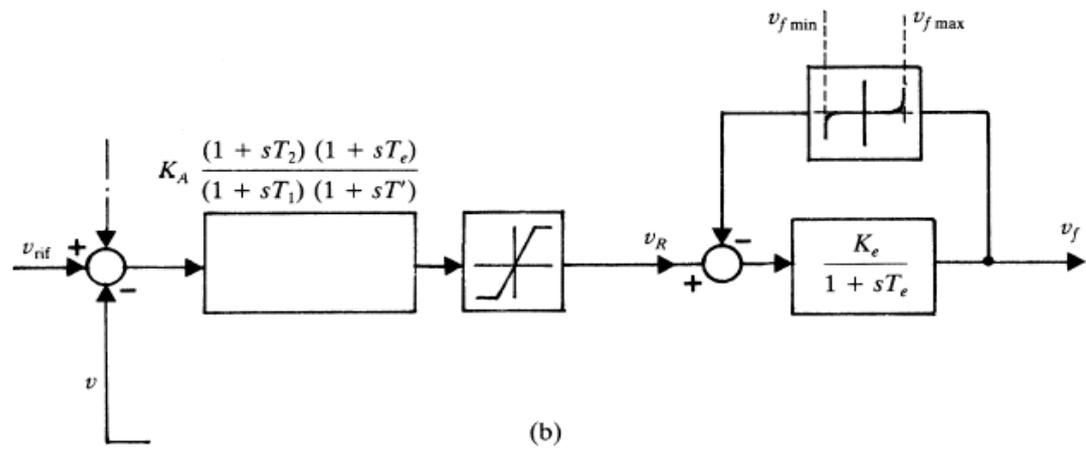
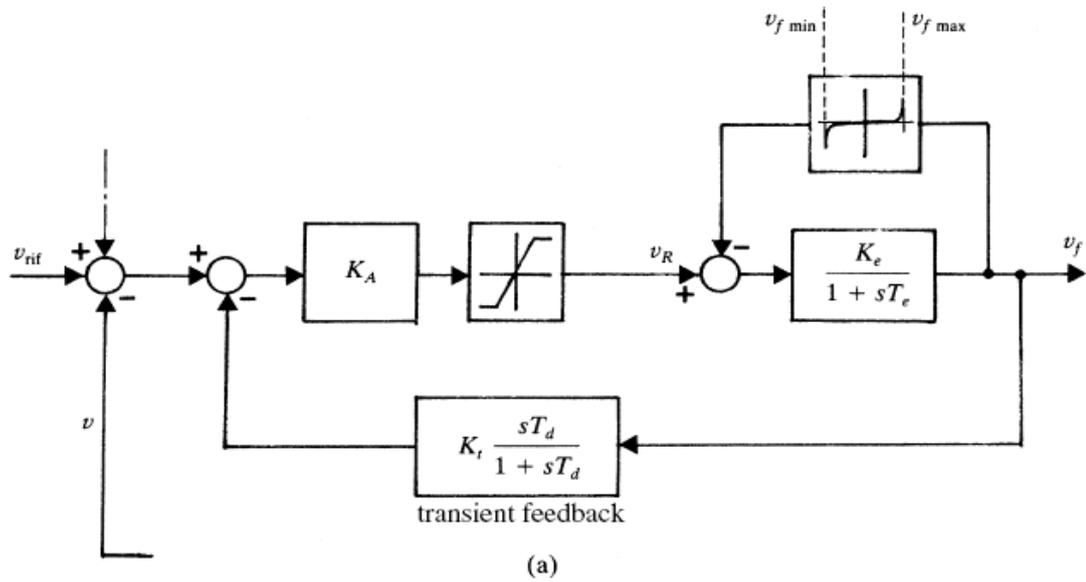


Figura 3.5 Diagrama de bloques para excitación rotativa (a) con (b) sin realimentación transiente; (c) para el caso de excitación estática. La entrada en líneas punteadas representa los limitadores de sobre excitación y baja excitación. [11]

En el caso (a) de la figura 3.5:

- Con el excitador de corriente directa, hay una ganancia K_A , y una realimentación, obteniendo la siguiente función de transferencia:

$$H(s) = \frac{K_t s T_d}{(1 + s T_d)} \quad (3.8)$$

donde la multiplicación $K_A K_e K_t$ es suficiente para obtener:

$$\begin{aligned} G_V(s) &= K_A K_e \frac{1 + s T_d}{(1 + s T_e)(1 + s T_d) + s K_A K_e K_d} \\ &= K_A K_e \frac{1 + s T_d}{(1 + s T_1')(1 + s T_1'')} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Con $T_1' = K_A K_e K_t T_d$ y $T_1'' = T_e / (K_A K_e K_t)$, despreciando T_1'' se obtiene:

$$G_V(0) = K_A K_e, \quad T_2 = T_d, \quad T_1 = T_1' \gg T_2.$$

- Con el excitador de corriente alterna y diodos rotativos, la realimentación debe ser modificada (para no utilizar contactos rozantes), desde el voltaje v_R hasta la salida del amplificador; Para obtener un resultado similar al anterior es suficiente con insertar la función de transferencia $H(s) = K_e / (1 + s T_e)$. Se obtiene la siguiente función:

$$G_A(s) = K_A \frac{(1 + s T_2)(1 + s T_e)}{(1 + s T_1)(1 + s T')} = G_V(s) \frac{1 + s T_e}{K_e (1 + s T')} \quad (3.10)$$

donde de nuevo $G_V(0) = K_A K_e$ y se puede despreciar T_1''

Finalmente, excitación estática (c):

- Este sistema de excitación debe representarse por una ganancia K_e por un lapso de tiempo aproximadamente un ciclo (0.017 segundos para una fuente a 60 Hz) al inicio.

- El sistema de control es similar a (b) con $T_e = T' = 0$ y con una función de transferencia:

$$G_A(s) = K_A \frac{1 + sT_2}{1 + sT_1} = G_V(s) \frac{1}{K_e} \quad (3.11)$$

- Debido a la rápida respuesta del sistema, es necesario y conveniente agregar una realimentación desde la corriente de campo i_f , para acelerar la respuesta y tener una mejor regulación.

De acuerdo a la figura 3.5, también los límites en V_R y V_F deben ser considerados para grandes variaciones. Los límites en V_F son el resultado de:

- Saturación magnética en el caso de excitación rotativa.
- Las características del puente de tiristores en el caso de excitación estática.

Los valores de V_{FMAX} y V_{FMIN} son típicamente:

$$\begin{aligned} V_{FMAX} &\cong (2 - 2.5)V_{F(n)} \\ V_{FMIN} &\cong -(1.5 - 2.5)V_{F(n)} \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema

3.3.1 Inducción electromagnética

La inducción electromagnética es el fenómeno que origina la producción de una fuerza electromotriz (f.e.m o voltaje) en un medio o cuerpo expuesto a un campo magnético variable, o bien en un medio móvil respecto a un campo magnético estático. Es así que, cuando dicho cuerpo es un conductor, se produce una corriente inducida.

Este fenómeno fue descubierto por Michael Faraday quién lo expresó indicando que la magnitud del voltaje inducido es proporcional a la variación del flujo magnético.

Por otra parte, Heinrich Lenz comprobó que la corriente debida a la f.e.m inducida se opone al cambio de flujo magnético, de forma tal que la corriente tiende a mantener el flujo. [2]

Se puede expresar:

$$f.e.m = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} \quad (3.13)$$

Donde:

f.e.m = Fuerza electromotriz en voltios

F= Flujo magnético en weber.

T= Tiempo en segundos.

Y el signo – es de la Ley de Lenz.

3.3.2 Tiristor o SCR

Un SCR o Tiristor es un componente electrónico de estado sólido (sin partes móviles) de tres terminales: ánodo (A), cátodo (K) y un electrodo de control denominado puerta (G, gate), desarrollado por General Electric USA en 1957.

Es un dispositivo unidireccional (es decir, que deja circular la corriente eléctrica en un solo sentido: desde A hacia K como un diodo rectificador semiconductor), pero además del estado ON (conduciendo) del diodo común, tiene un segundo estado estable OFF (sin conducir). Si el voltaje entre G y K es el adecuado, conduce desde A hacia K. Su nombre SCR (silicon controlled rectifier) proviene de ser como un rectificador de silicio, pero controlado a través de G. Es la versión en estado sólido de los antiguos tubos tiratrones, y de ahí su nombre Thyristor.

El tiristor sirve como dispositivo de conmutación de estado sólido en corriente directa y en corriente alterna. Es decir, son como interruptores pero rápidos,

silenciosos, sin partes móviles, sin contactos electromecánicos y que pueden controlarse electrónicamente.

[14]

La estructura pnpn de los tiristores se muestra en la siguiente figura:

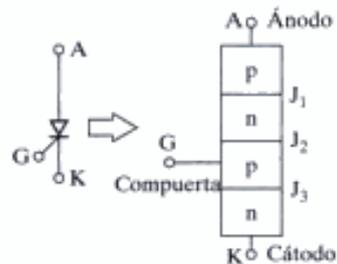


Figura 3.6 Símbolo del tiristor y sus uniones pn. [10]

Cuando el voltaje del ánodo se hace positivo con respecto al del cátodo, las uniones J1 y J3 tienen polarización directa. La unión J2 tiene polarización inversa, y sólo pasa una pequeña corriente de fuga de ánodo a cátodo. En este caso, se dice que el tiristor está en la condición de bloqueo directo o en estado de apagado, y la corriente de fuga se llama corriente en estado de apagado, I_d . Si aumenta el voltaje de polarización inversa VAK de ánodo a cátodo hasta un valor suficientemente grande, se daña en forma permanente la unión J2. A esto se le llama ruptura por avalancha, y el voltaje correspondiente se llama VBO, voltaje de avalancha directo. Ya que las otras uniones J1 y J3 ya están polarizadas directamente, hay un flujo libre de portadores a través de las tres uniones, dando como resultado una gran corriente anódica directa. Entonces el dispositivo está en estado conductor, o estado encendido. La caída de voltaje se debe a la caída óhmica en las cuatro capas, y es pequeña, normalmente de 1V.

En el estado de conducción, la corriente anódica se limita por una impedancia externa, o una resistencia R como se muestra en la figura 3.6. La corriente anódica debe ser mayor que un valor llamado corriente de retención I_L para mantener el flujo necesario de portadores a través de la unión.

En la siguiente figura se muestra las características de voltaje y corriente para el tiristor así como el circuito con una resistencia de carga que limita la corriente anódica.

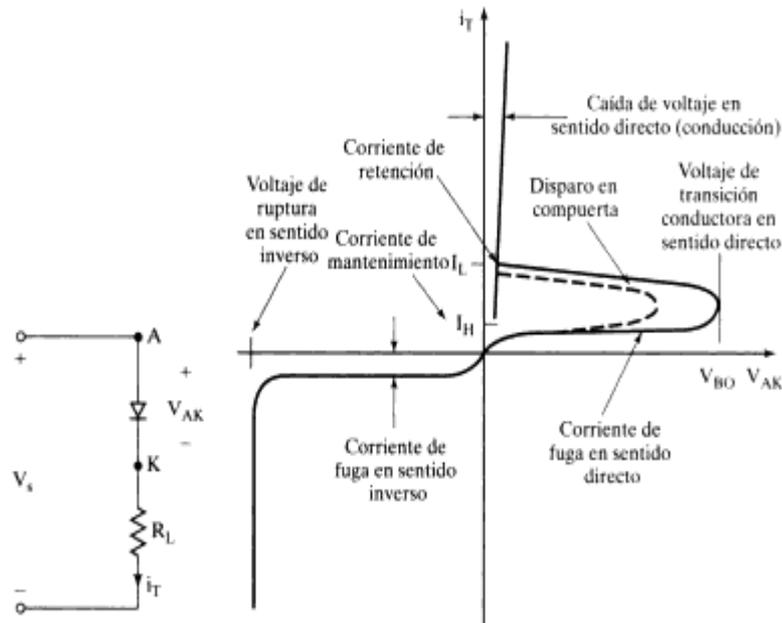


Figura 3.7 Circuito y características del tiristor. [10]

El disparo por corriente en G puede producirse por corrientes inyectadas accidental o intencionalmente. Los casos más importantes son:

- Un cambio muy grande en el voltaje A-K puede disparar accidentalmente el tiristor, debido a la corriente I_T producida por la capacitancia de transición C_t .

$$I_T = C_T * \left(\frac{\Delta V_{AK}}{\Delta t} \right) \quad (3.14)$$

- Cuando una unión semiconductor está polarizada en inversa, hay una fuga de corriente inversa, que depende del material y de la temperatura. Si el voltaje A-K es muy grande, la corriente inversa es mayor, y también podría disparar accidentalmente el tiristor.
- La corriente inversa aumenta al doble cada 14° C aproximadamente. Por lo tanto, un aumento en la temperatura podría producir un disparo accidental.

- Los tiristores diseñados con ventanas transparentes permiten la creación electrón – agujero a partir de los fotones absorbidos por la unión semiconductor polarizada inversamente. Por lo tanto, mediante la luz también pueden dispararse tiristores.

3.3.3 Rectificador controlado monofásico de onda completa

Al sustituir diodos por tiristores en un rectificador de onda completa lo convertimos en un regulador de onda completa controlado. El ángulo de disparo, es ahora el intervalo angular entre la polarización directa del transistor y la aplicación de la señal de puerta.

Funcionamiento con carga resistiva:

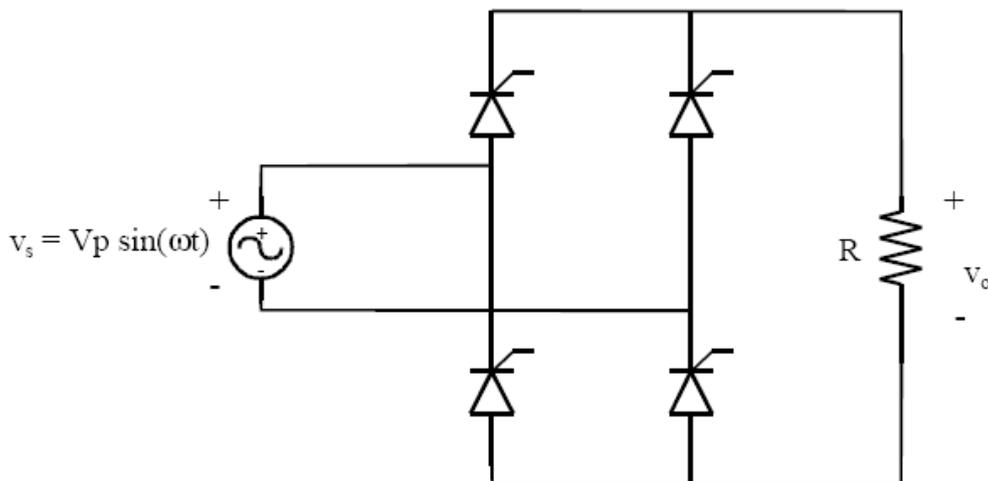


Figura 3.8 Rectificador monofásico controlado de onda completa con carga resistiva. [2]

Para el caso de cargas resistivas tenemos las siguientes ecuaciones para voltaje medio y corriente RMS respectivamente.

$$\langle V_o \rangle = \frac{1}{\pi} * \int_{\alpha}^{\pi} V_p * \text{sen}(\omega t) * d(\omega t) = \frac{V_p}{\pi} * (1 + \cos(\alpha)) \quad (3.15)$$

$$I_{oRMS} = \sqrt{\frac{1}{\pi} * \int_{\alpha}^{\pi} \left[\frac{V_p}{R} * \text{sen}(\omega t) \right]^2 * d(\omega t)} = \frac{V_p}{R} * \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{4\pi} \right)} \quad (3.16)$$

Para mostrar este rectificador se utiliza el caso del control de excitación de un motor de corriente directa. El rectificador controlado de onda completa consiste de cuatro tiristores por lo que puede manipular la corriente cuando el voltaje de alimentación es negativo. En la siguiente figura se muestra como un rectificador de onda completa controla un motor de corriente directa.

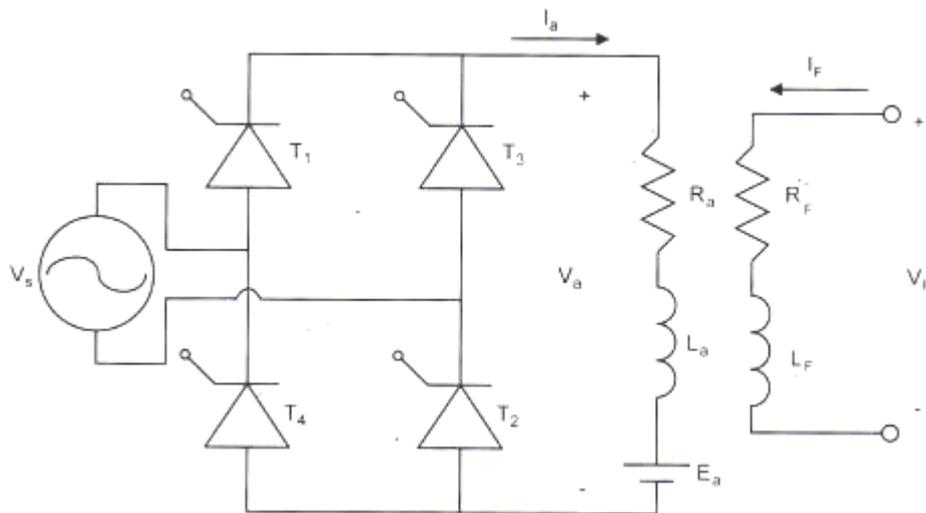


Figura 3.9 Rectificador controlado monofásico de onda completa. [5]

Hay tres modos diferentes de operación para el rectificador. El primero es el modo discontinuo, en este modo la corriente I_a toma el valor de cero y se mantiene en este valor por un periodo de tiempo. El siguiente modo es el continuo. En el modo continuo, I_a no toma el valor de cero en ningún punto durante el periodo. El último modo de operación es el críticamente discontinuo, en este modo la corriente toma el valor de cero e inmediatamente empieza a aumentar.

En el modo de operación continuo se puede encontrar tres casos:

Caso 1: Comienza en $t=0$ y se extiende hasta;. El voltaje $V_a = -E_a$. Este caso se muestra en la siguiente figura:

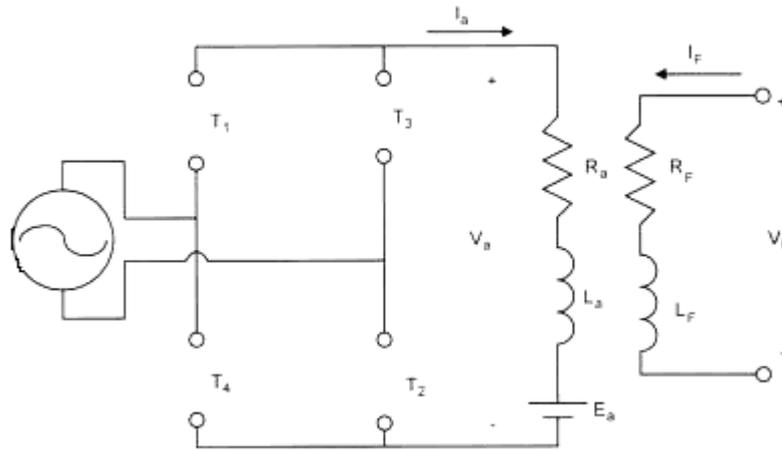


Figura 3.10 Caso 1 modo de operación continua. [5]

Caso 2: El segundo caso se da cuando el voltaje de la fuente V_s es positivo. En este modo T_1 y T_2 están conduciendo y T_3 y T_4 están apagados. V_a es igual a V_s . Este caso se muestra en la siguiente figura.

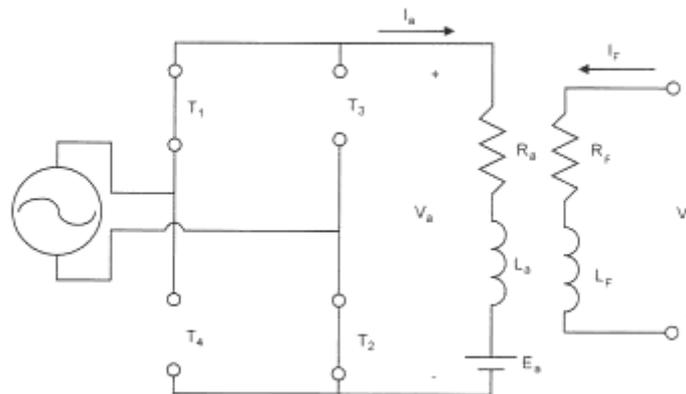


Figura 3.11 Caso 2 modo de operación continua. [5]

Caso 3: Este caso se encienden T_3 y T_4 , T_1 y T_2 están apagados por lo que V_a es igual a la parte negativa de V_s .

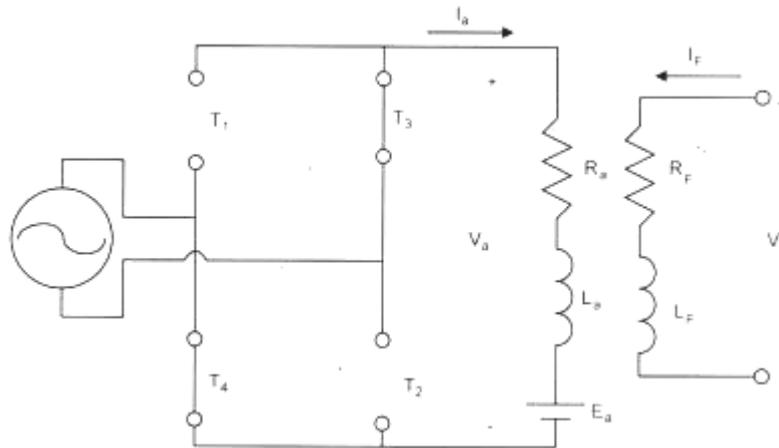


Figura 3.12 Caso 3 modo de operación continua. [5]

En la figura 3.13 se muestran las formas de onda del rectificador operando en modo discontinuo. Como se ve en la figura el disparo ocurre dos veces por periodo, una cuando el voltaje V_s es positivo y otra cuando es negativo.

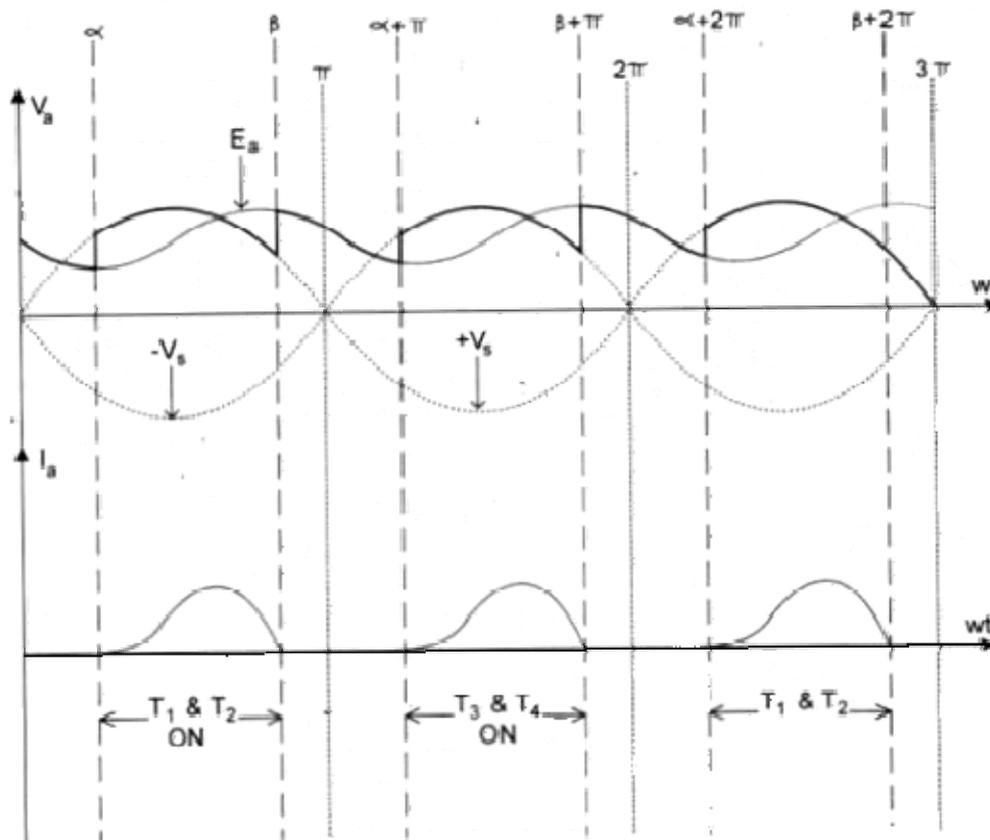


Figura 3.13 Formas de onda del rectificador de onda completa operando en modo discontinuo. [5]

Para la carga R-L y modo discontinuo se muestra la ecuación que describe la corriente:

$$i(\omega t) = \frac{V_P}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}} * \left[\text{sen}(\omega t - \theta) - \text{sen}(\alpha - \theta) * e^{\frac{(\alpha - \omega t)}{\omega \tau}} \right] \quad (3.17)$$

Para el modo continuo se debe hacer uso de la serie de Fourier para expresar la corriente de salida.

$$I_{RMS} = \sqrt{I_o^2 + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (3.18)$$

Las amplitudes de los armónicos están dadas por:

$$I_n = \frac{V_n}{|R + jLn\omega|} \quad (3.19)$$

De la serie de Fourier los armónicos de la tensión de salida vienen dados por:

$$V_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (3.20)$$

$$a_n = \frac{2V_P}{\pi} * \left[\frac{\cos((n+1)\alpha)}{n+1} - \frac{\cos((n-1)\alpha)}{n-1} \right] \quad (3.21)$$

$$b_n = \frac{2V_P}{\pi} * \left[\frac{\text{sen}((n+1)\alpha)}{n+1} - \frac{\text{sen}((n-1)\alpha)}{n-1} \right] \quad (3.22)$$

$$n = 2,4,6,\dots$$

Fuente de las ecuaciones [2]

3.3.4 Reguladores PID

Un regulador PID (Proporcional Integral Derivativo) es un mecanismo de control por realimentación que se utiliza en sistemas de control industriales. Un controlador PID corrige el error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener calculándolo y luego aplicando una acción correctora que puede ajustar el proceso acorde. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros: el proporcional, el integral y el derivativo. El valor proporcional determina la reacción del error actual. El integral determina la reacción basada en la suma de errores recientes y el derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce.

La suma de estas tres acciones es usada para ajustar el proceso vía un elemento de control como la posición de una válvula o la energía suministrada a un calentador, o en como en este caso la excitación de un generador sincrónico. Ajustando estas tres constantes en el algoritmo de control del PID, se puede proveer un control diseñado para lo que requiera el proceso a realizar. La respuesta del controlador puede ser descrita en términos de respuesta del control ante perturbaciones, el tiempo que dura en llegar a la consigna y el grado de oscilación del sistema.

El regulador PID ideal en el dominio del tiempo es de la siguiente forma:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(\tau) * d\tau + K_d * \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.23)$$

Transformando al dominio de la frecuencia se obtiene:

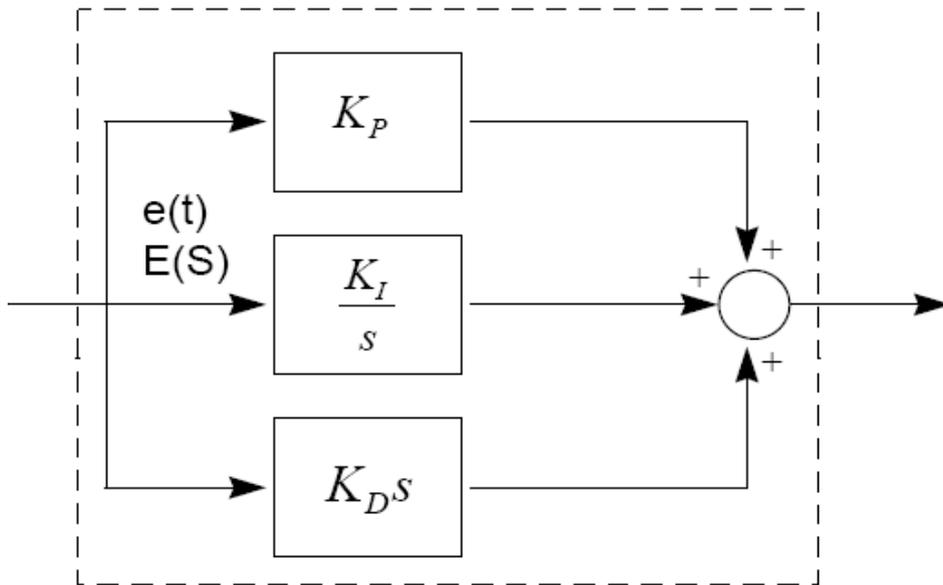


Figura 3.14 Regulador PID en dominio de la frecuencia. [7]

Factorizando se obtiene la siguiente ecuación:

$$K_{PID}(s) = K_p * (1 + \frac{1}{T_i s} + s * T_d) \tag{3.24}$$

Por lo tanto el compensador PID implementado en un sistema con perturbaciones y en dominio de la frecuencia se puede observar en la siguiente figura. En esta figura se observa como la entrada del PID es el error y la salida es la acción correctiva aplicada a la planta.

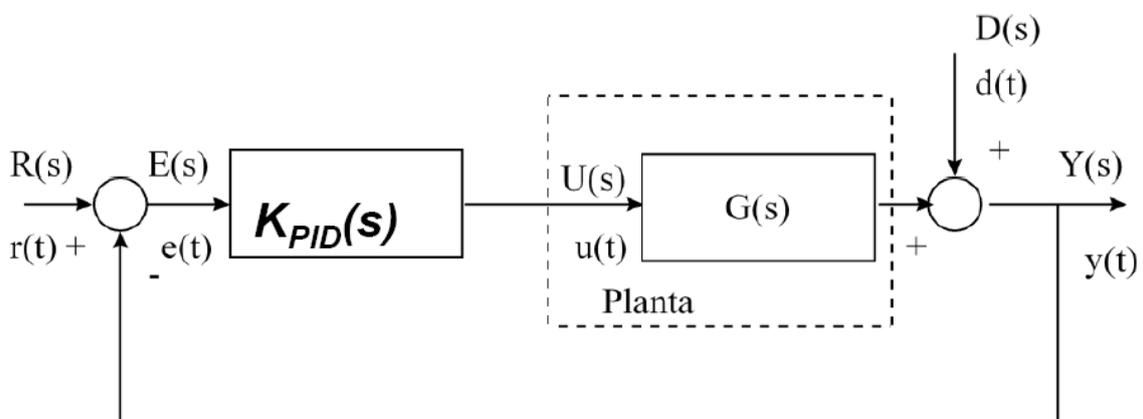


Figura 3.15 Sistema con regulador PID en dominio de la frecuencia. [7]

Los reguladores PID reales deben ser sintonizados para tener un buen comportamiento, para esto se utilizan las tablas de Ziegler-Nichols las cuales requieren que la planta sea lo suficientemente estable como para experimentar con ella. Existen dos tipos de plantas, la primera tiene respuesta de lazo abierto, al escalón en forma de S. Esta planta es de segundo orden al menos o de primer orden con tiempo muerto, no tiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados. El otro tipo de plantas tienen integradores y su respuesta es a lazo cerrado.

La siguiente tabla muestra las aproximaciones de Ziegler –Nichols para plantas de primer tipo:

$$K_{PID}(s) = K_p * (1 + \frac{1}{T_i s} + s * T_d)$$

Tipo de Controlador	Kp	Ti	Td
P	T/L	∞	0
PI	0.9 * T/L	L/0.3	0
PID	1.2 * T/L	2L	0.5L

Tabla 3.1 Tabla Ziegler-Nichols para el caso uno. Tabla tomada de [7]

Para el segundo caso se cuenta con la siguiente tabla:

$$K_{PID}(s) = K_p * (1 + \frac{1}{T_i s} + s * T_d)$$

Tipo de Controlador	Kp	Ti	Td
P	0.5 * Kcr	∞	0
PI	0.45 * Kcr	Tcr/1.2	0
PID	0.6 * Kcr	0.5 * Tcr	0.125 * Tcr

Tabla 3.2 Tabla Ziegler-Nichols para el caso dos. Tabla tomada de [7]

Para el segundo caso se debe seguir el siguiente procedimiento:

Se pone Ti en infinito y Td en cero, se ajusta Kp desde cero hasta que haya oscilación sostenida con la ganancia Kcr. Se determina el periodo Tcr de la oscilación y se ajustan los valores según la tabla.

3.3.5 Potencia reactiva y su efecto sobre el voltaje de un sistema

En un sistema de potencia, cuando en una barra se dan variaciones de voltaje, por debajo del nivel requerido, significa que no existe un balance entre la potencia reactiva producida y la potencia reactiva requerida en ese punto particular del sistema.

Para entender esta situación se muestra el siguiente sistema con dos barras, una línea de transmisión que conecta las barras y un generador conectado a una de ellas.

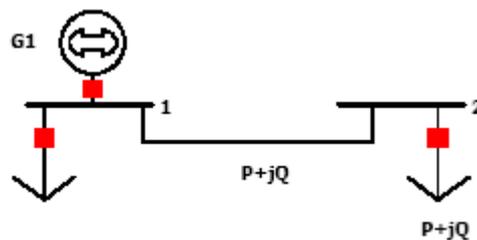


Figura 3.16 Diagrama para un sistema de potencia con dos barras, un generador y una salida de carga. [4]

Se tiene que el voltaje en la barra del generador es de magnitud constante, a causa del control de campo que tiene el generador. También puede considerarse que la línea de transmisión es una impedancia pura.

La caída de voltaje en la línea puede considerarse como lo determina la siguiente ecuación:

$$V_2 = V_1 - IZ \quad (3.25)$$

La potencia aparente transportada a través de la línea es:

$$V_1 I^* \approx P + jQ \quad (3.26)$$

Por lo que despejando la corriente se tiene:

$$I \approx \frac{P - jQ}{V_1^*} = \frac{P - jQ}{V_1} \quad (3.27)$$

Tomando como referencia el voltaje V_1 se puede expresar V_2

$$V_2 = V_1 - \frac{P - jQ}{V_1} = V_1 - \frac{X}{V_1}Q - j\frac{X}{V_1}P \quad (3.28)$$

De la ecuación anterior se observa:

- Un cambio en la potencia real afecta el fasor de caída de voltaje perpendicular a V_1 , sin afectar la magnitud de V_2 .
- Un cambio en la potencia reactiva afecta al fasor de caída de voltaje que esta en fase con V_1 , afectando la magnitud de V_2 . Más detalladamente, un aumento en la potencia reactiva ocasiona una disminución en la magnitud del voltaje V_2 .

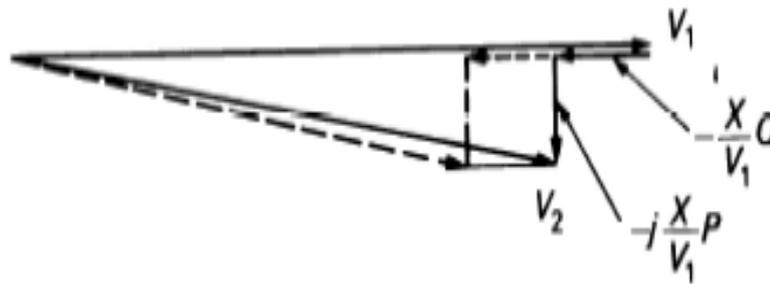


Figura 3.17 Relación entre la potencia reactiva y el voltaje. [4]

En grandes sistemas de potencia, se usan técnicas de compensación de potencia reactiva para mantener el perfil de tensión. Estas consisten en compensación por condensadores en paralelo colocados en la barra de interés, o de igual forma se suele colocar un condensador sincrónico.

Lo descrito anteriormente es lo que sucede comúnmente en los sistemas de potencia, considerando que bajo una operación normal, la carga es del tipo resistivo –inductiva. El aumento de potencia reactiva se da en las horas de carga pico. Por el contrario, en horas de poca demanda de energía como en la madrugada, en lugar de sufrir una caída de voltaje en la barra 2 se tiene una elevación del mismo a raíz de que se tiene un sobrante de potencia aparente lo

que ocasiona que el fasor XQ / V_1 cambie de dirección. Las medidas que se toman es colocar reactores en paralelo a la barra para que consuman el excedente de reactivo.

Las razones para mantener los niveles de tensión en un sistema de potencia son fuertes.

Todos los equipos eléctricos vienen especificados para un voltaje de operación, indicado en sus respectivas placas. Si el voltaje del sistema sufre variaciones tal que se salga del ámbito de operación de dichos equipos, estos sufrirán en cuanto a su desempeño y su vida útil se ve disminuida. Si el nivel de tensión un una barra no es el indicado y no hay compensación o esta falló, los transformadores de potencia cambian sus derivaciones en el primario para mantener el nivel óptimo en el secundario. Dicha operación es automática o en algunos casos podría ser manual.

3.3.6 Relaciones de potencia de la máquina sincrónica

Siendo de nuestro conocimiento como la potencia afecta el voltaje, se procede a establecer las condiciones de potencia de un generador sincrónico.

La potencia de entrada es producida por el torque de la fuente externa y se define como:

$$P_{ent} = \tau * \omega [\text{watts}] \quad (3.29)$$

Donde ω es la velocidad del rotor en rad/s. Luego considerando pérdidas en el núcleo y considerando pérdidas rotacionales se llega a que la potencia que recibe la armadura es:

$$P_a = m * E * I * \cos \psi \quad (3.30)$$

Donde m es el número de fases, E el voltaje inducido en la armadura, I la corriente como se ilustra en el siguiente diagrama fasorial:

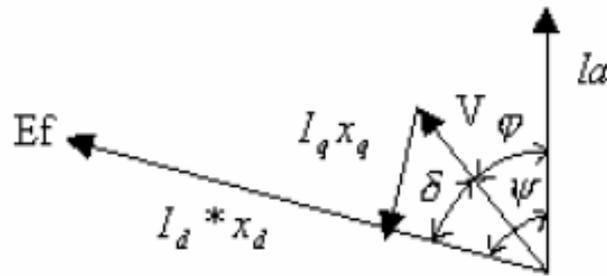


Figura 3.18 Diagrama fasorial de un generador de polos salientes, cargado con la corriente atrasada. [4]

Donde V es el voltaje en los bornes del generador, Ef es el voltaje inducido en la máquina, Ia es la corriente en la armadura $I_q = I_a \cos \psi, I_d = I_a \sin \psi$. Del diagrama anterior obtenemos:

$$I_a \cos \psi = I_d \sin(\psi - \phi) + I_q \cos(\psi - \phi) = I_d \sin \delta + I_q \cos \delta \quad (3.31)$$

Se obtiene una potencia de armadura:

$$P_o = m \frac{VEf}{X_q} \sin \delta + mV^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\delta \quad (3.32)$$

La ecuación anterior demuestra una dependencia de la potencia y el ángulo δ llamada variable fundamental de la máquina. [4]

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

En este capítulo se describen las etapas y actividades necesarias para llegar a la solución del problema planteado.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Para definir el problema y las restricciones de las soluciones, se realizaron las siguientes actividades:

- Reunión con el dueño de la empresa Grúas NAVI. En esta reunión se habló de aspectos generales del proyecto, antecedentes y se plantea la meta del proyecto.
- Reunión con el profesor asesor. En esta reunión se habló sobre la viabilidad del proyecto, limitaciones de diseño y recursos disponibles.
- Visita a las instalaciones de Grúas NAVI. Se realizó una visita para corroborar el buen estado del motor de combustión interna y de los bobinados del Generador.
- Reunión con el profesor asesor Ing. Juan Carlos Jiménez para aclarar dudas sobre el funcionamiento de la máquina, en específico sobre las limitaciones mecánicas existentes.
- Presentación de la meta, objetivos y posible solución del problema al profesor asesor. Se discuten algunos puntos y se realizan las correcciones indicadas por el profesor asesor.
- Presentación del proyecto al encargado de Grúas NAVI. Se presenta el planteamiento de solución. El encargado hace recomendaciones sobre el motor de combustión interna.

4.2 Obtención y análisis de información

La información necesaria para el estudio del problema se obtuvo de la siguiente manera:

- Se buscó el manual técnico del generador en Internet. No fue de mucha ayuda ya que este modelo es antiguo y no cuenta con documentación suficiente.
- Se observaron generadores con controles modernos existentes en la empresa. Se plantea comprar un control de un modelo reciente y adaptarlo, pero el costo es muy elevado.
- Se consultó material bibliográfico, entre esto revistas IEEE que publican las innovaciones.
- Se obtuvo información de entrevistas con el profesor asesor. El profesor indicó temas relacionados que ayudaron a la comprensión del problema.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Para plantear alternativas de solución se realizaron entrevistas con personal de la empresa Grúas NAVI, de estas entrevistas se obtuvo criterio de experto. Además de entrevistas con el profesor asesor quien resolvió algunas dudas sobre el funcionamiento de la máquina y aportó ideas que fueron esenciales en el desarrollo de una alternativa de solución.

Con la información obtenida de las entrevistas y la encontrada en la bibliografía se planteó una alternativa de solución que cumpliera con las especificaciones planteadas. Para escoger la solución adecuada se hizo un análisis de disponibilidad en el mercado de los componentes electrónicos, un análisis de costos y calidad de los componentes.

Además con la información adquirida se planteó un diseño acorde a las especificaciones de la máquina, se verificó que los componentes fueran apropiados para los requerimientos de corriente eléctrica y potencia.

Una vez seleccionados los recursos, se verificó la solución mediante pruebas controladas. Las pruebas controladas ayudaron a modificar las propuestas de solución así como a ajustar los parámetros para obtener el resultado esperado.

Además se uso un simulador para verificar el programa implementado en el microcontrolador, esto ayudo a depurar errores antes de implementar la solución.

4.4 Implementación de la solución

Luego de obtener y analizar la información se planteo una solución. Para implementar la solución se siguió este procedimiento:

- Se realizaron pruebas controladas para determinar el valor de los parámetros del generador. Estos valores se utilizaron en el desarrollo del modelo matemático.
- Se probó el funcionamiento del generador al conectarle diferentes cargas con una fuente externa en la excitación.
- Se obtuvo un modelo matemático que relaciona la corriente de excitación con el voltaje en los bornes de salida.
- Se desarrolló y se probó un circuito capaz de alimentar el microcontrolador utilizado en el módulo de control y de interpretar el voltaje en los bornes del generador (provee el voltaje medido al microcontrolador, se usa para obtener el error).
- Se implementó el hardware del módulo de control del sistema.
- Se corroboró mediante pruebas de campo el buen funcionamiento del hardware del módulo de control.
- Se desarrolló un programa en PICC para el módulo de control, este programa se encarga de procesar los datos y dar los valores adecuados a las salidas.
- Se implementó y probó el circuito del módulo rectificador.

- Se conectó el módulo de control con el módulo rectificador y se realizó una prueba de funcionamiento.
- Se desarrolló el circuito del módulo de arranque. Este módulo interactúa con componentes del motor de combustión interna para generar el voltaje inicial en los bornes de salida del generador.
- Se realizó la conexión entre módulos y se probó el funcionamiento del circuito.
- Se probó y ajustó el valor del compensador digital del módulo de control.

Los resultados obtenidos al ejecutar el procedimiento de implementación de la solución fueron supervisados tanto por el personal de Grúas NAVI, como por el profesor asesor.

Para difundir los resultados del proyecto, se realizó una exposición al personal de Grúas NAVI. En esta exposición se entregó material informativo sobre el proyecto.

4.5 Reevaluación y rediseño

En la etapa de diseño se consultó con el profesor asesor sobre las posibles soluciones, se comentó acerca de los avances logrados y las mejoras que se le pueden implementar.

El control implementado en el generador es sometido a pruebas con diferentes cargas, bajo diferentes condiciones. Los parámetros de estas pruebas fueron sugeridos por el personal de Grúas NAVI para simular el uso normal y frecuente del generador.

Basados en el desempeño del generador ante estas pruebas se consideraría el uso de otras técnicas de control automático que mejoren la respuesta del generador ante situaciones específicas.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución (Explicación de diseño)

En este capítulo se expone detalladamente el diseño de la solución implementada. Los pormenores del diseño de software y hardware se presentan por separado para tener una mejor perspectiva de su función en el proyecto.

5.1 Análisis de soluciones y selección final

La escogencia de la solución final se realizó luego de una serie de análisis y pruebas de los criterios más importantes. Para determinar cual solución era la más adecuada se realizó un análisis a nivel modular, basándose en el diagrama de solución del capítulo 1.

Algunos criterios de diseño se generalizaron para todos los módulos, entre estos, los voltajes y corrientes eléctricas requeridos y suministrados por el control del generador. Con base en las pruebas realizadas al principio del proyecto, se determinaron los valores máximos de estos parámetros. Estos valores son esenciales para la selección de los componentes de cada módulo.

El primer módulo es el Fuente, este tiene la función de proveer el voltaje de alimentación al control. Los principales criterios utilizados para este módulo fueron:

- Relación del transformador a utilizar. La relación de transformación es muy importante ya que con esta se define el valor de voltaje en corriente alterna.
- Rectificador de onda completa. Como los circuitos de control se alimentan de corriente directa fue necesario utilizar un rectificador de onda completa. La corriente y voltaje en el secundario del transformador fueron los criterios evaluados para la selección de un rectificador adecuado.
- Regulador de voltaje. El regulador de voltaje está relacionado directamente con el voltaje necesario para alimentar los dispositivos de control.

El segundo módulo es Control. Este depende del módulo Fuente, ya que estos módulos están conectados directamente. El módulo Control está formado básicamente por un PIC, que fue escogido por sus características como poseer un conversor Analógico – Digital, tener suficientes entradas y salidas, además del tiempo de respuesta y precisión del conteo.

El siguiente módulo es Excitación y Arranque, este módulo se considera de suma importancia por el manejo de voltajes más elevados. La selección de componentes se realizó con base en la corriente necesaria en el rotor del generador. Como primera solución se planteó en realizar un rectificador controlado con tiristores, esta solución funcionó con las primeras pruebas realizadas con carga puramente resistiva, cuando se procedió a conectarlo a la excitación del generador, que es una carga inductiva pura, los tiristores se activaban sin ningún control, por lo que esta solución no funcionó para nuestro propósito. Luego de investigación y trabajo se tomó la decisión de utilizar un relé de estado sólido con características especiales para el manejo de cargas inductivas.

La otra consideración en el módulo de Arranque es el uso de un relé para seleccionar si la fuente de excitación es la batería del motor de combustión o el voltaje suministrado por el control. Para seleccionar este relé se tomó en cuenta el voltaje de la bobina de accionamiento, la corriente y voltaje que soportan los contactos, así como la cantidad de contactos.

El último módulo es Monitoreo del motor de combustión, este consiste de indicadores luminosos por lo que la consideración principal es que el voltaje sea el requerido por los bombillos.

5.2 Descripción del hardware

El sistema implementado para solucionar el problema puede ser descrito en forma modular para una mejor comprensión. En esta sección se describirá específicamente los componentes e interconexiones que forman cada módulo de la solución.

Este controlador de excitación tiene como característica el combinar lógica de control y electrónica de potencia. En los distintos módulos encontramos componentes para niveles bajos de voltaje, normalmente utilizados en el control y componentes de voltaje más elevado utilizados para actuar según lo necesite el control.

El primer módulo es el Fuente, el circuito se muestra en la siguiente figura.

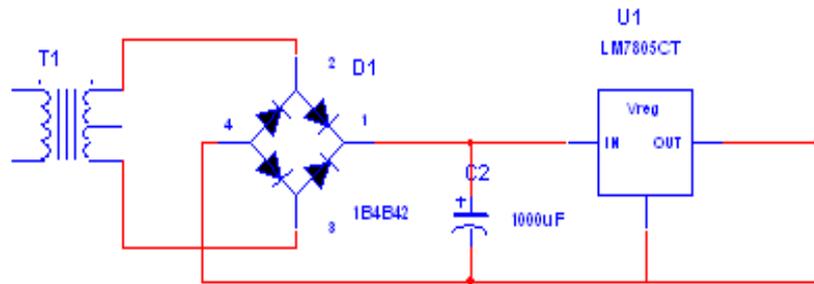


Figura 5.1 Circuito del módulo Fuente.

En el circuito de la figura anterior se muestra un transformador. El bobinado primario se conecta a las salidas del generador móvil, la relación de transformación es de 10:1 y una potencia 0.5 KVA. Lo siguiente es un rectificador de onda completa, este conectado al secundario del transformador. La onda rectificada es filtrada por un capacitor de 1000mF y luego se conecta a un LM7805, este regula el voltaje a 5 voltios corriente directa.

Las consideraciones más relevantes para el circuito fuente son: el voltaje necesario en corriente directa, la corriente entregada al regulador, la corriente que debe suministrar y la relación de transformación del transformador.

El módulo Fuente supe el voltaje de alimentación para el módulo de Control. En el módulo Control encontramos el PIC 16F877A se alimenta a 5VDC. La consideración principal pala elegir este PIC es la existencia de un convertidor Analógico-Digital interno.

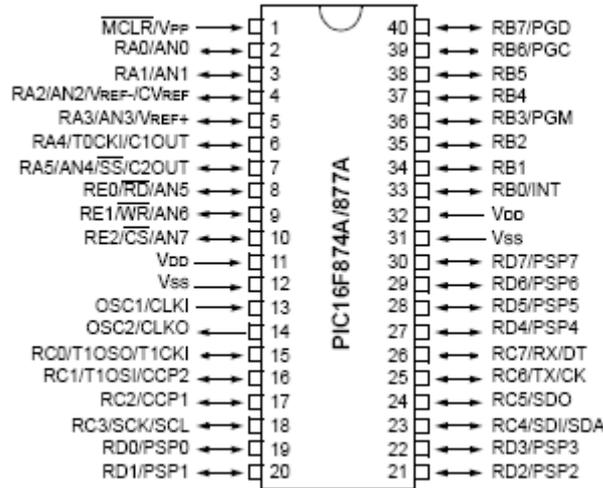


Figura 5.2 Diagrama del PIC 16F877A y nombre de los pines.

Dentro de los datos más importantes este Controlador funciona a una frecuencia de 20 Mhz, el puerto A es el utilizado como entrada para los datos analógicos y el puerto C como salida. En este módulo tenemos un detector de cruce por cero cuya salida TTL se conecta a la patilla INT, el circuito se muestra en la siguiente figura.

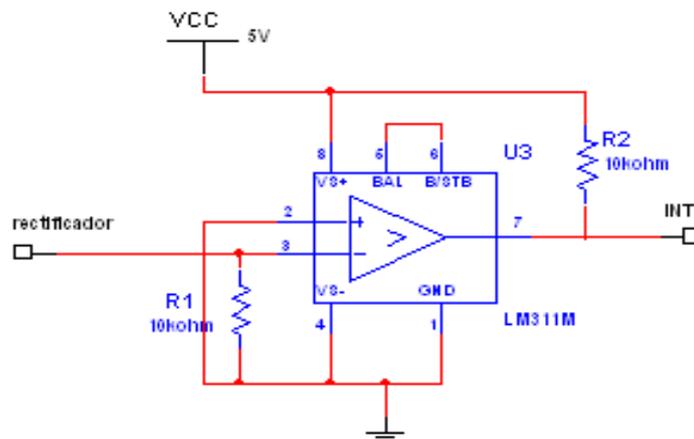


Figura 5.3 Circuito detector de cruce por cero.

Para este detector de cruce por cero se utiliza un circuito comparador de voltaje LM311, este circuito cada vez el nivel de voltaje es cero en la patilla inversora en la salida se obtiene un voltaje de 5V. Este pulso es utilizado para la interrupción del PIC en la patilla INT.

El módulo arranque utiliza relé DPDT para seleccionar si la excitación proviene de la batería del motor de combustión o del control de la planta. Se conecta la bobina del relé a la salida del generador, la batería del motor de combustión al contacto normalmente cerrado, la salida positiva del control al contacto normalmente abierto. Cuando el motor de combustión arranca el rotor tendrá el voltaje de la batería del motor de combustión y cuando se genere un voltaje en la bobina del relé, el relé cambiará la excitación a la proporcionada por el control. Para proteger el circuito se coloca un diodo de rodamiento libre en el rotor. Las consideraciones tomadas para esta parte de la solución fueron la corriente eléctrica en los contactos del relé y el voltaje de la bobina del relé. El circuito se muestra en la siguiente figura.

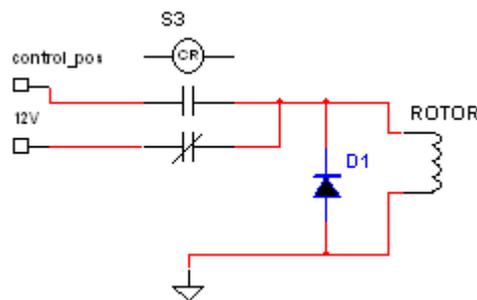


Figura 5.4 Circuito del módulo de Arranque.

El relé utilizado es marca Omron modelo MY4, las características son las siguientes:

- Bobina de 220V
- Dos polos y doble contacto.
- Contactos de 12A @ 270V.



Figura 5.5 Relé del módulo de Arranque.

El siguiente módulo es Rectificador. Este módulo tiene dos componentes esenciales un rectificador de onda completa y un Relé de Estado Sólido. El rectificador de onda completa fue seleccionado por la corriente máxima que requiere el rotor del generador. Se utiliza un rectificador de 15 Amperios a 240 Voltios.

El Relé de Estado Sólido fue escogido por el voltaje de control, este es de 3-32 V corriente directa, por soportar 15 amperios y la detección de cruce por cero. La marca del SSR es opto22 y su modelo es 480 D1512. Además de esto el Relé de Estado Sólido es sellado e ideal para montarlo en un panel. El circuito es opto acoplado, por lo que, la parte de control y potencia quedan aislados. La entrada de este módulo es la salida del Generador móvil y las salidas de este módulo se conectan al módulo de excitación y arranque. El circuito es el siguiente:

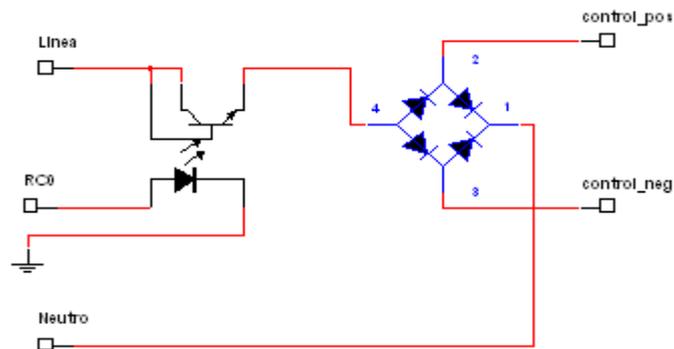


Figura 5.6 Circuito del módulo Rectificador.

El último módulo Monitoreo del motor de combustión interna. Este módulo consiste de indicadores luminosos que reflejan el estado de los sensores de temperatura y presión de aceite. Estos se conectan a un comparador, de forma que si algún sensor se activa, se envíe una señal al PIC y así se detiene la excitación del generador

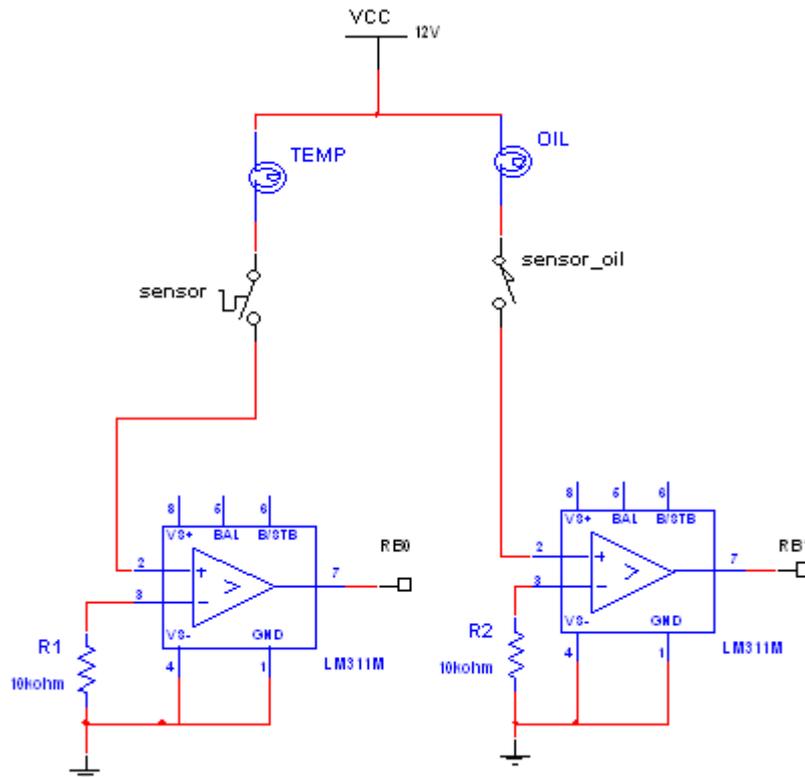


Figura 5.7 Circuito del módulo Monitoreo del motor de combustión interna.

Las salidas de los comparadores se conectan al módulo Control, en caso de activarse se detiene el funcionamiento del generador. La puesta en marcha o reset se logra al quitar y poner ignición.

5.3 Descripción del software

El software para este control de excitación está escrito en PICC, e implementado para un PIC 16F877A. El programa se basa en el compensador PID, por lo tanto, las principales funciones de este software son:

- Adquirir datos.
- Procesar los datos adquiridos.
- Hacer correcciones al sistema según los resultados.

Aunque las tres funciones anteriores describen nuestro software, este además, es el encargado de revisar el estado del motor de combustión interna para decidir si mantiene la excitación o la apaga.

El siguiente diagrama de flujo describe el funcionamiento del software.

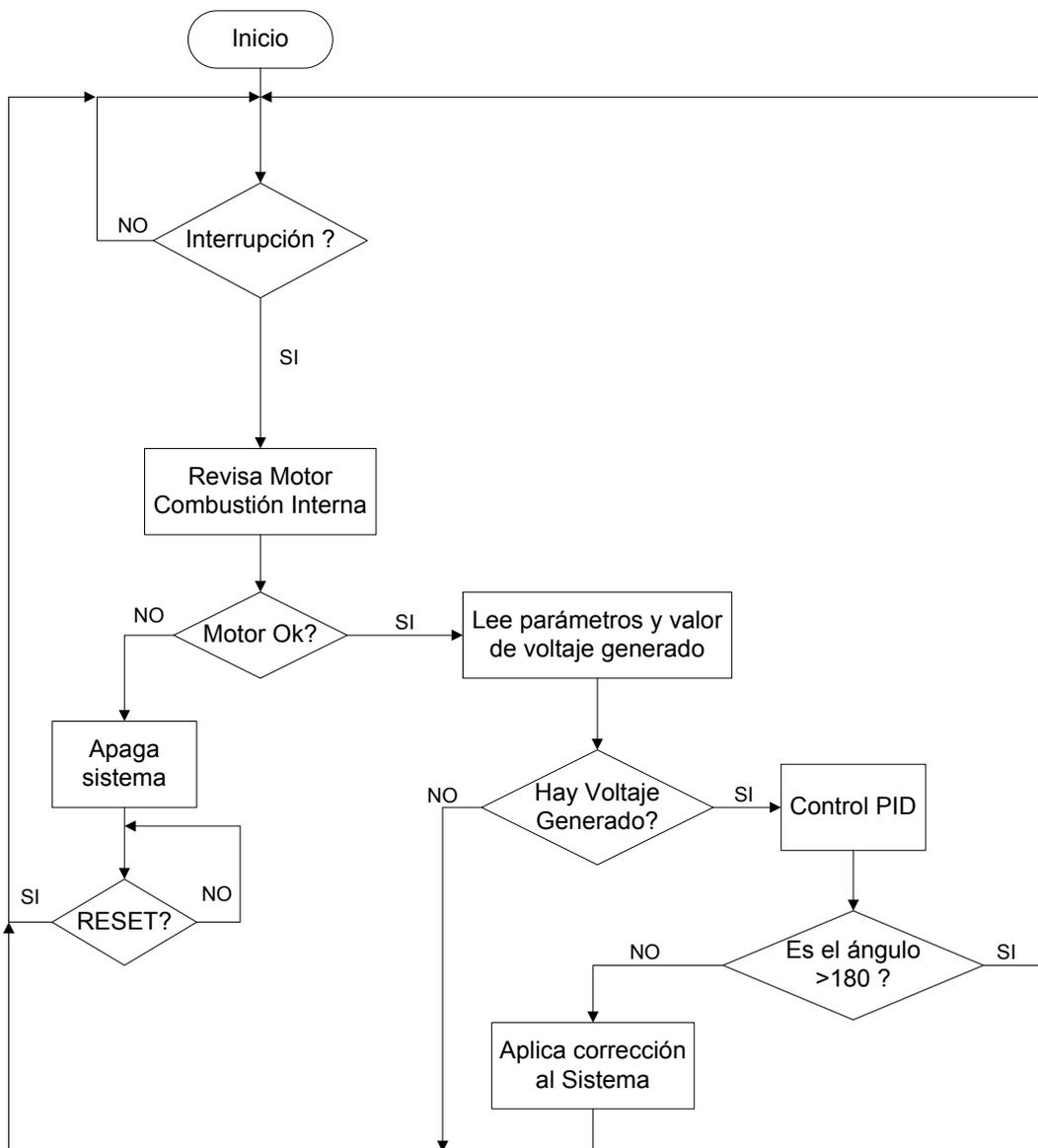


Figura 5.8 Diagrama de Flujo del software implementado en el control.

Como se muestra en el Diagrama de Flujo anterior, el sistema espera por una interrupción para verificar el estado del motor de combustión, si alguno de los sensores está activado, el control detiene el sistema y espera el reset. El reset es quitar y poner ignición. En el otro caso, cuando el motor está en perfectas condiciones se procede a leer los parámetros del control PID y el voltaje generado. El voltaje generado y los parámetros del controlador PID son valores analógicos que son procesados por el convertidor Analógico – Digital del PIC 16F877A.

Teniendo los valores en las variables correspondientes, se pregunta si el valor del voltaje generado es distinto de cero, en caso de no existir voltaje generado el control espera la siguiente interrupción para realizar de nuevo el ciclo. En caso de existir voltaje generado se procesan los datos para obtener el valor del ángulo de disparo necesario para corregir el sistema.

Se pregunta por el valor del ángulo de disparo, si es mayor a 180 el sistema no necesita corrección por lo tanto se devuelve a esperar otra interrupción. Por el contrario, en caso de ser menor a 180 se aplica la corrección necesaria al sistema.

En el programa se utilizan contadores precargados para tener una interrupción en el tiempo equivalente a un grado del ángulo de disparo para una señal a 60 hz.

Capítulo 6: Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas y las simulaciones del sistema. Además se analizan las condiciones y consideraciones en cada prueba para corroborar que la solución cumple con las especificaciones y objetivos del proyecto.

6.1 Resultados

6.1.1 Relación corriente de excitación y voltaje generado.

Para seleccionar la solución adecuada a este proyecto, lo primero que se considero fue el comportamiento del generador móvil. En función de conocer el comportamiento y cumplir con el objetivo de obtener una relación matemática del voltaje generado en función de la corriente de excitación, se realiza una prueba con el control funcionando en modo manual, este se utiliza como una fuente variable de voltaje conectada a la excitación del generador, se midió la corriente entregada al rotor y el voltaje generado. Las condiciones en las que se realizó esta prueba fueron las siguientes: el generador móvil no tiene carga conectada en su salida, la corriente de excitación se mide con un amperímetro digital conectado entre el borne positivo del control y el positivo del rotor, el voltaje generado se midió con un voltímetro digital conectado entre dos líneas de salida del generador móvil, con un voltímetro digital se midió el voltaje en corriente directa entregado por el control. Los valores ajustados en el control se escogieron en forma aleatoria, se realizó un barrido de los valores del voltaje de excitación desde los valores mayores a 12VDC, hasta los valores que generan un voltaje mayor a 220VAC en los terminales de salida del generador móvil. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Medición	Voltaje del control VCD	Corriente Excitación A	Voltaje Generado VAC
1	12.2	0.36	54
2	15.8	0.48	73
3	18.1	0.55	85
4	21.3	0.66	101
5	24.5	0.76	116
6	30.1	0.94	142
7	30.4	0.95	143
8	33.4	1.04	156
9	36.4	1.14	170
10	40.8	1.28	187
11	45.6	1.43	203
12	51.2	1.6	220
13	55.8	1.76	230
14	60.7	1.89	238

Tabla 6.1 Valores de corriente de excitación, voltaje de excitación entregado por el control y voltaje generado obtenidos en la prueba de comportamiento del generador móvil Kohler 15 kW.

Con el fin de observar de forma más clara la variación del voltaje generado con respecto a la corriente de excitación se realizó en siguiente gráfico.

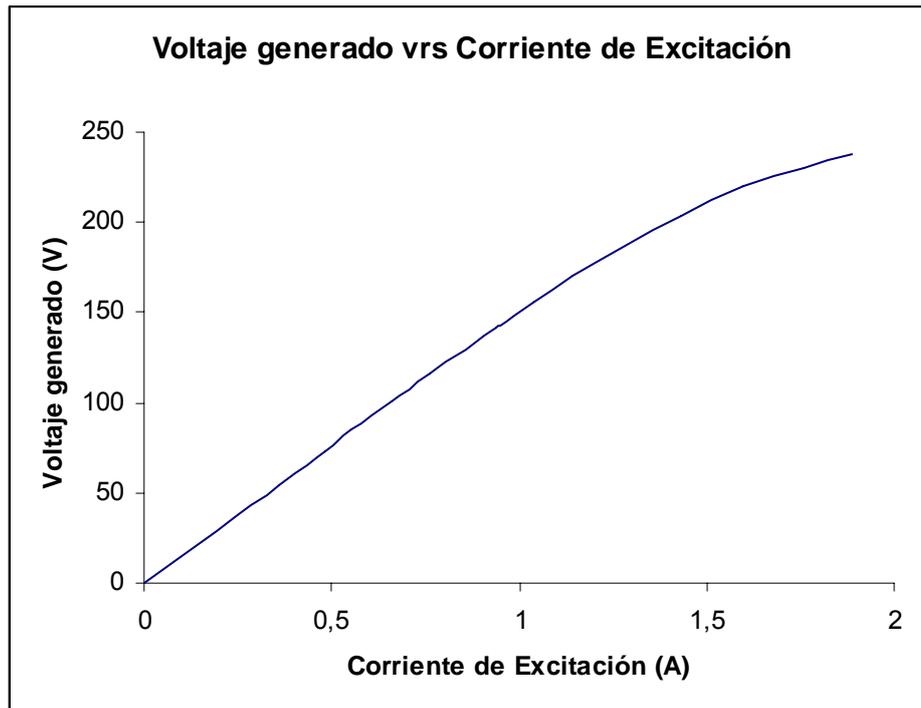


Figura 6.1 Gráfico voltaje generado en función de la corriente de excitación.

Trazando la línea de tendencia para este gráfico, obtenemos una relación aproximada que describe como varía el voltaje generado en función de la corriente de excitación. La ecuación es la siguiente:

$$V_g = 128.19 * I_E + 14.38 \quad (6.1)$$

Donde:

V_g = voltaje generado.

I_E = corriente de excitación.

Haciendo uso de la ecuación anterior y de la ecuación 17 que describe la variación de la corriente en función del ángulo de disparo, obtenemos el comportamiento del generador además de la forma en la que se debe corregir el sistema. Esta forma de corregir el sistema se refiere a que se controla el voltaje generado en las terminales del generador móvil con la corriente que se entrega a la excitación. El valor de la corriente de excitación puede variar dependiendo del ángulo de disparo que el controlador determine.

Con los siguientes datos: frecuencia de la señal de salida es 60hz, el tiempo de un ciclo en segundos es 0.01667, el voltaje suministrado al control es 120 VAC, la resistencia del rotor es 32 Ω . Se sustituye los valores anteriores en las ecuaciones 17 y 33, se obtiene la relación entre el ángulo de disparo α y el voltaje generado en la salida del generador. Esta relación es 1° equivale a 0,014 A. Para demostrar esta relación se muestra una tabla con valores de ángulo de disparo y el respectivo voltaje generado.

Angulo de disparo α ;°	Corriente Excitación (A)	Voltaje Generado(V)
1	0,02	16,68
10	0,14	32,19
20	0,28	49,99
30	0,42	67,78
40	0,56	85,57
50	0,69	103,36
60	0,83	121,16
70	0,99	138,95
80	1,11	156,74
90	1,25	174,53
100	1,39	192,33
110	1,53	210,12
120	1,67	227,91
130	1,80	245,71
140	1,94	263,50
150	2,08	281,29
160	2,22	299,08
170	2,36	316,88
180	2,50	334,67

Tabla 6.2 Valores de corriente de excitación y voltaje de excitación entregado para distintos ángulos de disparo.

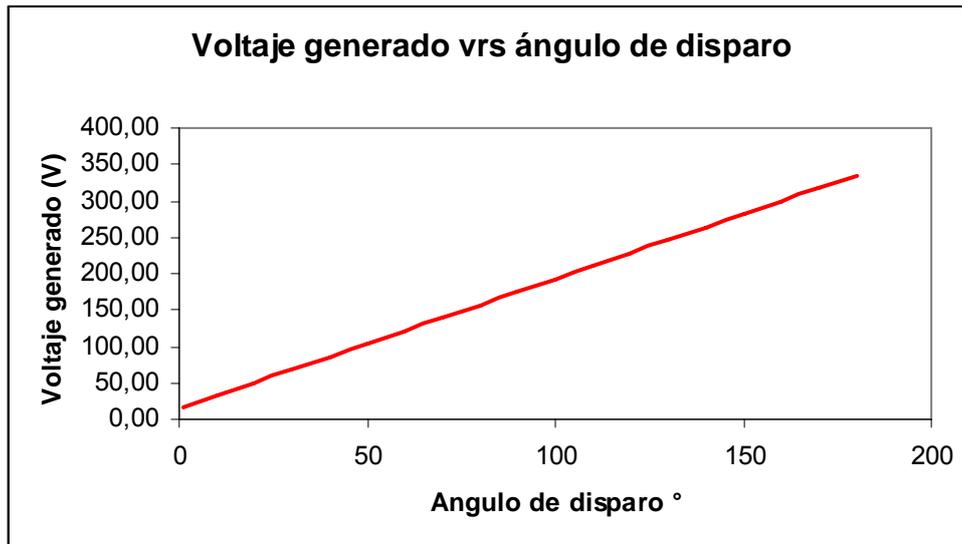


Figura 6.2 Gráfico voltaje generado en función del ángulo de disparo.

Los resultados anteriores se toman en consideración a la hora de diseñar el control y su programación. Con la relación entre el ángulo de disparo y el voltaje generado se conoce la forma en la cuál debe actuar el control en caso de tener la necesidad de ajustar el sistema.

Otro aspecto importante es el voltaje generado en la salida del generador en el momento de arranque. Para esto se conectó un voltímetro digital a la salida del generador y otro en la excitación. Los valores de voltaje medidos se encuentran en la siguiente tabla.

Voltaje de excitación (VCD)	Voltaje generado (VAC)	Frecuencia (hz)
12.93	60	60

Tabla 6.3 Valores de voltaje de excitación y generado medidos en el arranque del generador.

6.1.2 Diseño del control PID

En un generador móvil hay muchas variables que se pueden tomar en cuenta en el momento de obtener un modelo matemático de la planta. Para este caso despreciamos las consideraciones de la parte mecánica, aunque hay pequeñas variaciones en la frecuencia esta también se desprecia. Se utilizó un modelo muy simple de segundo orden que toma en cuenta dos aspectos: el tiempo de estabilización de la máquina y el tiempo de la excitación. Para obtener los valores se procedió con un osciloscopio conectado a las salidas del generador y la batería de 12VDC a la excitación. La respuesta de la planta es muy rápida, por lo que se realizaron varias mediciones con el fin de obtener un valor más exacto. En la siguiente tabla se muestra el valor de las constantes de tiempo.

Constante	Valor (s)
Tiempo de estabilización T_s	1,5
Tiempo del excitación T_E	0,5
Ganancia K_E	4.7

Tabla 6.4 Valores de constantes de tiempo y ganancia medidos con el osciloscopio.

La ganancia K_E se obtiene de la excitación de la planta, es la relación entre el voltaje de excitación y el voltaje generado. Esta ganancia junto con las constantes de tiempo se utilizan para obtener el modelo matemático de la planta.

$$G(s) = \frac{K_E}{(1 + T_s s)(1 + sT_E)} = \frac{13.6667}{(s + 3,333)(s + 1)} \quad (6.2)$$

Una vez que se obtuvo el modelo matemático de la planta, se realizó una simulación en Matlab para ver el comportamiento de la planta ante un escalón unitario. La siguiente figura muestra el resultado.

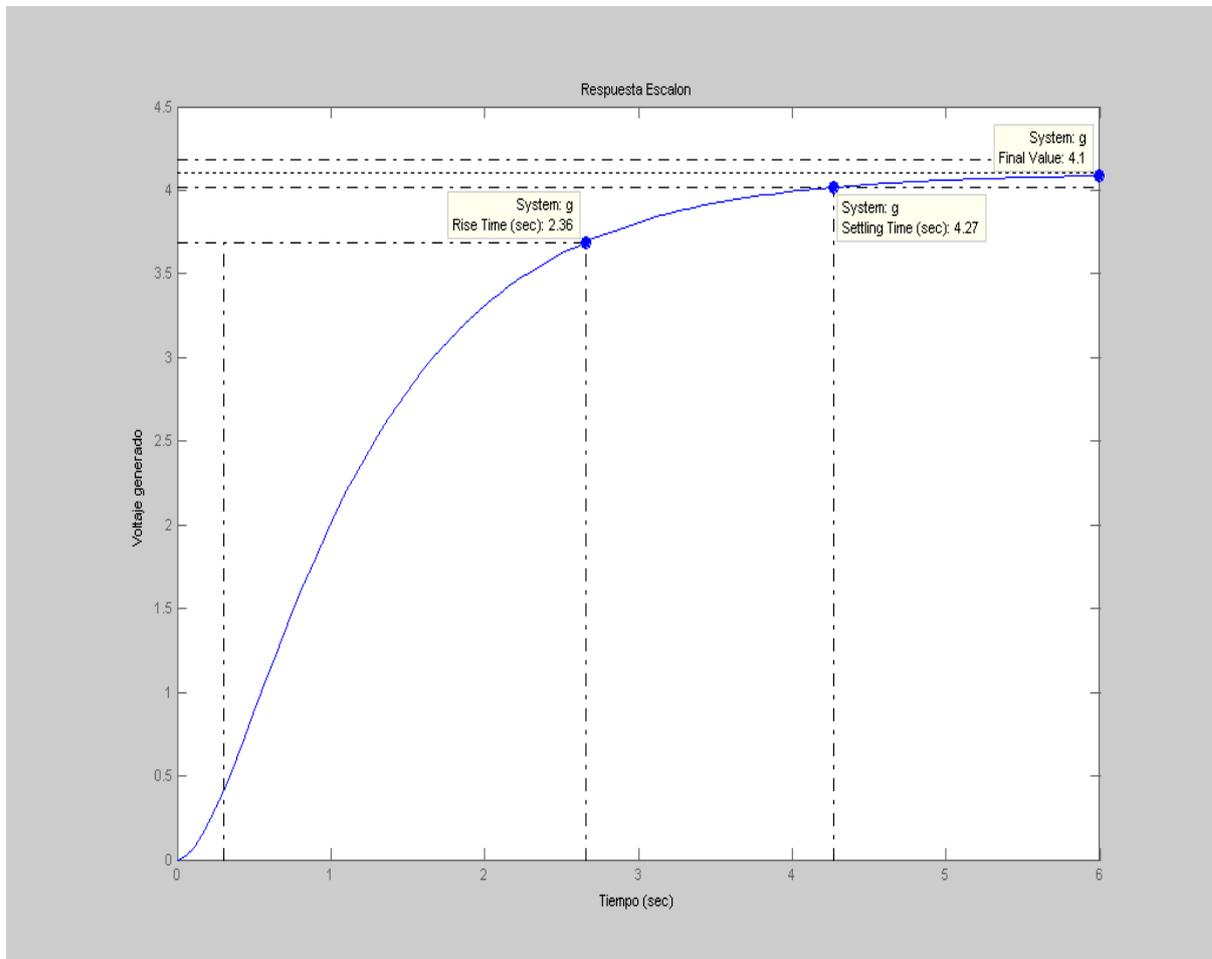


Figura 6.3 Respuesta de la planta ante un escalón.

De la simulación realizada en Matlab se observa que el modelo matemático de la planta tiene las siguientes especificaciones en el tiempo:

Especificación en el dominio del tiempo	Valor (s)
Tiempo de estabilización	4.27
Tiempo de subida	2.36

Tabla 6.5 Especificaciones en el dominio del tiempo para el modelo matemático de la planta.

Con el modelo matemático de la planta y la simulación en Matlab, se procede al cálculo del compensador. En este caso utilizamos un compensador derivativo, integral y proporcional (PID real) que tiene la siguiente ecuación:

$$K_{PID}(s) = K * \frac{(s + z_1) * (s + z_2)}{s * (s + p_0)} \quad (6.3)$$

La diferencia entre el PID real y el ideal es cero en el origen que se agrega en el real. Este cero se agrega ya que el ideal es impropio y presenta problemas de simulación e implementación. El PID real es similar a un compensador de adelanto en serie con un compensador de atraso, y en este caso se calculó de la siguiente manera:

Lo primero que se debe saber para calcular el compensador son las especificaciones requeridas, estas se muestran en la siguiente tabla:

Especificación en el dominio del tiempo	Valor (s)
Tiempo de estabilización 2%	< 2
Tiempo de subida	<1.5
Sobre impulso	<5%
Error de estado estacionario	0

Tabla 6.6 Especificaciones en el dominio del tiempo requeridas por el compensador PID.

Las condiciones de la tabla 6.5 se transforman a dominio del tiempo para obtener:

$$\omega_n \xi \geq 4$$

$$\xi \geq 0,69$$

De donde tenemos:

$$\xi = \cos \vartheta$$

Por lo tanto para este compensador se escogió un punto $s_1 = -3.2139 -3.8302*j$ que esta dentro del lugar de las raíces donde se cumplen las especificaciones del compensador.

Se calculó el compensador por el método de la bisectriz, por lo tanto se debe evaluar la planta en el punto s_1 y obtener su ángulo. Luego se obtiene el valor del ángulo faltante ϕ que se utilizó para calcular el compensador.

$$\angle G(s_1) = 168,55^\circ.$$

$$\phi = 180 - 168,5 = 11,45^\circ$$

Utilizando las fórmulas del método de la bisectriz mostradas a continuación, se calcularon los valores del compensador.

$$Z_0 = -|s_1| * \frac{\cos\left(\frac{\theta + \phi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta - \phi}{2}\right)} \quad (6.4)$$

$$P_0 = -|s_1| * \frac{\cos\left(\frac{\theta - \phi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta + \phi}{2}\right)} \quad (6.5)$$

$$Z_0 = -4,65 \text{ y } P_0 = -5,4909.$$

Teniendo estos valores, lo siguiente es calcular la ganancia y se utiliza la siguiente fórmula:

$$K = \frac{1}{\left| G(s) * \frac{(s + Z_0)}{(s + P_0)} \right|_{s=s_1}} \quad (6.6)$$

$$K = 0,311.$$

Lo siguiente es calcular el compensador de atraso, este tiene un polo en el origen por lo que un cero en $s = -0.95$, a la derecha del polo en $s = -1$.

Por lo tanto el compensador PID calculado es:

$$K_{PID} = 0.311 * \frac{(s + 4.65) * (s + 0.95)}{s * (s + 5.6)} \quad (6.7)$$

Con Matlab se realizó una prueba del sistema compensado, el resultado se muestra en la siguiente figura.

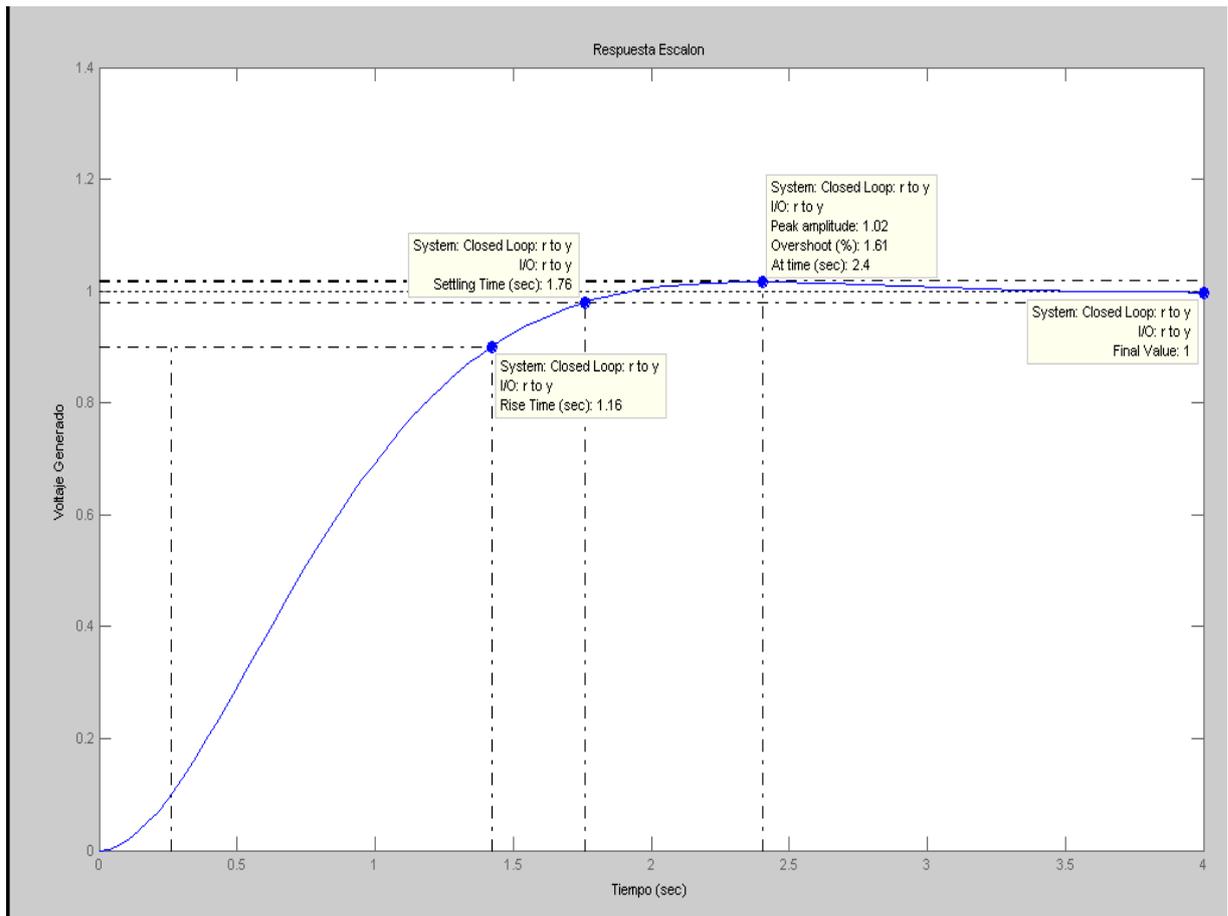


Figura 6.4 Respuesta del sistema compensado ante un escalón unitario.

De la figura anterior se observa los valores de las especificaciones en el dominio del tiempo del sistema con el compensador.

Especificación en el dominio del tiempo	Valor
Tiempo de estabilización 2%	1.76 s
Tiempo de subida	1.16 s
Sobre impulso	1.6 %
Error de estado estacionario	0

Tabla 6.7 Especificaciones en el dominio del tiempo del sistema con compensador PID.

Con el compensador PID real calculado, se compara el comportamiento del sistema con el PID y sin él. En la siguiente figura se muestra en línea discontinua la respuesta de la planta sin compensador y la línea continua

muestra el sistema compensado. Esta gráfica se obtuvo de la simulación en Matlab.

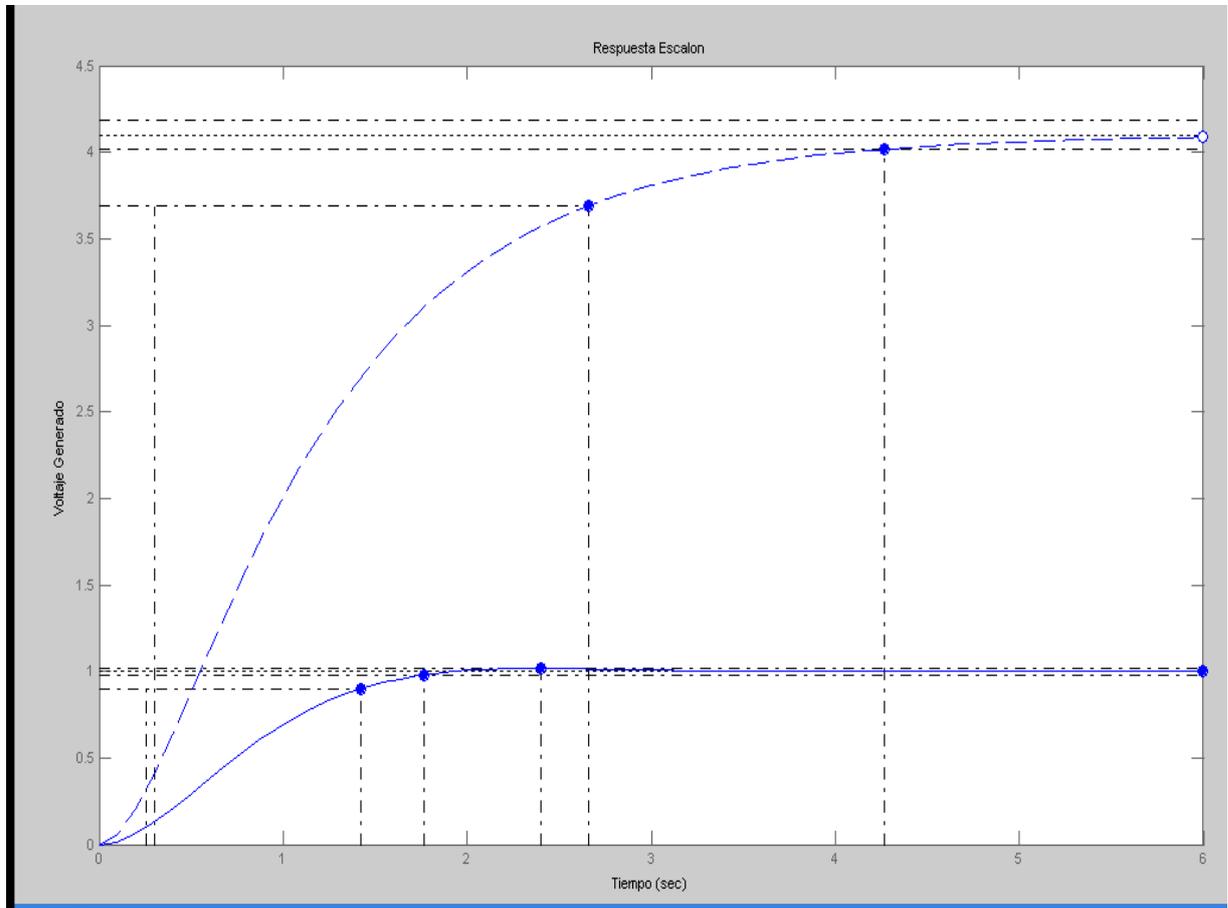


Figura 6.5 Respuesta al escalón del sistema sin compensador (línea discontinua) y el sistema compensado (línea continua).

Como el compensador se debe implementar en el módulo de control, se transforma a tiempo discreto con un tiempo de muestreo de 1 s. La transformación se realizó en Matlab, el compensador en tiempo discreto es el siguiente:

$$C(z) = 0.027875 * \frac{(z - 5.455) * (z - 9.091)}{(z - 1) * (z - 6.296)} \quad (6.8)$$

Se transformó el compensador $C(z)$ a ecuaciones de diferencias para programarlo en el controlador.

$$C(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{0.027875 * (z^2 - 14.54 * z + 49.55)}{(z^2 - 7.296 * z + 6.296)}$$

Dividiendo entre z^2

$$M(z) * (1 - 7.296 * z^{-1} + 6.296 * z^{-2}) = E(z) * (0.027875 - 0.40 * z^{-1} + 1.38 * z^{-2})$$

Se realizó la transformada inversa de Z y se despeja $m(k)$

$$m(k) = 7.296 * m(k-1) - 6.296 * m(k-2) + 0.027875 * e(k) - 0.40 * e(k-1) + 1.38 * e(k-2)$$

La ecuación de diferencias anterior es la que se programa en el PIC.

6.1.3 Pruebas del generador con distintas cargas

Para comprobar el buen desempeño del controlador, el generador es sometido a pruebas con diferentes cargas, además se apaga el controlador y se mantiene una excitación fija para observar la variación del voltaje generado. El voltaje se midió con un voltímetro digital en los bornes de salida del generador y los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tipo de Carga	Voltaje con controlador (VAC)	Voltaje sin controlador (VAC)	Frecuencia (hz)
Motor 2HP	220,40	189.32	59,9
Motor 2HP+2 motores 1,5 HP	221,86	174.62	60
Lámpara 0,5 kw	220,25	215,89	60
Motor 2 HP + Lámpara	220,91	180,47	60,1

Tabla 6.8 Valores de voltaje y frecuencia obtenidos al someter el generador a pruebas con distintas cargas.

6.2 Análisis

En la primera sección de resultados experimentales, se encuentra mediante las pruebas realizadas al sistema la relación voltaje generado en función de la corriente de excitación. Esta relación se muestra en la ecuación 6.1. Aunque en la figura 6.1 se observa que el comportamiento no es completamente lineal, utilizamos la ecuación de la línea de mejor ajuste para describir el comportamiento.

La relación anterior junto con los resultados expuestos en la tabla 6.2 que relacionan el ángulo de disparo con la corriente de excitación muestran la forma en la que debe corregir el control el comportamiento del sistema. De los resultados se obtiene que un grado de variación en el ángulo de disparo equivale a 0,014A en la corriente de excitación. Con la información obtenida se ajusta la salida del compensador para relacionar el ángulo de disparo con la corrección del sistema.

En la tabla 6.1 se muestran los distintos valores de voltaje de excitación y de corriente de excitación medidos con un multímetro digital con lo que se demuestra el funcionamiento de los módulos de potencia y de control. Con los resultados expuestos en la tabla 6.1 se comprueba el cumplimiento de los objetivos específicos correspondientes al módulo de potencia y el módulo de control.

En la tabla 6.3 se muestra el voltaje generado y el voltaje en la excitación medidos por el voltímetro en el momento de arranque del generador móvil. Se tiene un voltaje de excitación de 12,93 V proveniente de la batería del motor de combustión interna. El voltaje generado es de 60 V suficiente para activar la bobina del relé del módulo de arranque. Al activar la bobina el voltaje de excitación cambia al suministrado por el control. Con esto se cumple el objetivo específico del módulo de arranque.

En la segunda parte de los resultados se realizan pruebas a la planta ante una función escalón y se determinan las especificaciones en el dominio del tiempo mostrados en la tabla 6.4. Con las especificaciones de la planta se obtiene un modelo matemático que se muestra en la ecuación 6.2. El modelo matemático de la planta se simuló ante un escalón unitario, el resultado se muestra en la figura 6.3 y en la tabla 6.5 se muestran las especificaciones en dominio del tiempo. Con las relaciones obtenidas en la primera parte de los resultados y el modelo matemático de la planta se cumple con el objetivo de obtener un modelo matemático del generador móvil.

Como se observa en la figura 6.3 la planta tiene una respuesta rápida, el voltaje se eleva hasta un valor donde se estabiliza debido a las limitaciones físicas del generador, en este caso al tener como excitación un escalón unitario la planta genero un voltaje de salida de 4.1 V.

Las condiciones que se desean corregir al implementar un compensador para esta planta se muestran en la tabla 6.6. Aunque la respuesta de la planta es rápida, se desea mejorar el tiempo de respuesta por lo que se plantean las condiciones del compensador y se utilizan para su cálculo. Con respecto al voltaje generado, al implementar un control se desea que este varíe según lo requiera el generador y no que éste sufra variaciones según las características físicas. Con la implementación de un compensador se trata que el rotor o excitador del generador no se le suministre más corriente de la necesaria para mantener un voltaje constante en las salidas del generador.

Debido al tipo de sistema se escoge un regulador PID, y para su implementación este debe ser real, por lo que se utiliza la ecuación 6.3. Este compensador es calculado por el método de la bisectriz, los valores obtenidos se observan en la ecuación 6.7. Luego se simula el sistema compensado ante un escalón unitario y la respuesta se encuentra en la figura 6.4 donde se observa un como mejoran las condiciones del sistema al agregar el compensador, el comportamiento dinámico y estático del sistema se mejoran como se muestra en la tabla 6.7.

Para observar en forma más clara, la figura 6.5 compara el comportamiento del sistema ante un escalón unitario. La respuesta del sistema compensado es mejor tanto en los tiempos de subida y de estabilización como en el error de estado estacionario por lo que logra el objetivo de controlar el sistema.

Lo siguiente es implementar el compensador en nuestro control, lo que se hace es expresar el compensador en ecuaciones de diferencias para poder programarlo en el PIC 16F877a. Es necesario utilizar las relaciones obtenidas al principio de los resultados para saber a cuanto equivale una variación en el voltaje de excitación con respecto al ángulo de disparo.

Al conectar todo el sistema y realizar pruebas de funcionamiento se encontró un pequeño error de estado estacionario, este se debe a que nuestro control corrige el sistema con una precisión de un grado y los valores intermedios no se toman en cuenta. En la tabla 6.8 se muestran los voltajes generados con diferentes cargas para la prueba realizado al sistema compensado y luego se muestran los valores de voltaje generado al ajustar el sistema en vacío a 220V y luego conectar la carga. Por lo tanto, al comparar estos valores de voltaje comprobamos el funcionamiento del control electrónico cumpliendo con el objetivo general del proyecto.

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Se logró implementar un controlador electrónico que cumple con los requerimientos del Generador móvil Kohler de 15 kW.
- Se expresó matemáticamente la relación entre la corriente de excitación del generador y el voltaje generado.
- Se obtuvo un compensador que puede programarse en el PIC por ecuaciones de diferencias a partir del modelo matemático del generador.
- Se logró controlar el voltaje generado mediante la corriente de excitación del generador.
- La corriente de excitación del generador varió en función del ángulo de disparo indicado por el módulo de control.
- Con el uso de dispositivos ópticos se logró combinar circuitos de potencia con un módulo de control de bajo voltaje.
- Se logró implementar un control electrónico con un presupuesto del 15% del valor de la máquina.

7.2 Recomendaciones

- Si se desea mejorar el sistema se debe colocar sensores de corriente en las líneas de salida que indiquen al control de excitación que debe detener el generador en caso de sobrepasar sus capacidades.
- Como se utiliza un PIC 16F877a se podría aprovechar todas sus funciones y comunicarlo a una PC, desde donde se puede ajustar el compensador y tener reportes del funcionamiento de la máquina.
- Se recomienda el uso de un Relé de Estado Sólido en lugar de un tiristor o triac, ya que, el SSR posee un encapsulado que protege y aísla tanto el circuito óptico como el de potencia. Por la forma del SSR es ideal para montajes expuestos.
- Aunque para este generador móvil la variación de la frecuencia es mínima se recomienda utilizar una protección. En caso de detectar un cambio significativo en la frecuencia apagar la excitación y detener el motor de combustión interna.
- En caso de utilizar el control de excitación en otros generadores móviles se puede implementar un circuito que permita sintonizar el control para cada generador.

Bibliografía

- [1] Boldea Ion, Nasar S.A. “**Electric Drives**”. Ed.2, T&F informa,2006.
- [2] Carrasco, Juan. “**Rectificador onda completa**”
<http://metis.umh.es/jacarrasco/docencia/ei/Tema7/Tema7.pdf> [En línea]
- [3] Coughlin, Robert F/ Driscoll, Frederick F. “**Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales.**” 5ª Ed. Prentice Hall, México, 1999.
- [4] Elgerd,O. “**Electric Energy System Theory**”. Prentice Hall, 1971.
- [5] Emadi Ali. “**Energy- Efficient Electric Motors**”, Ed.3, Marcel Dekker,2005.
- [6] Ganz Transelektro “**Excitation Systems for Synchronous Generators and Motors**”, Ganz Transelektro Traction Electrics LTD, Budapest, Hungría, 2000
- [7] Interiano, Eduardo. “**Control Automático**”.
<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/> [En línea]
- [8] Kolher. “**Power Systems**”
<http://www.Kohler.com/power systems/> [En línea]
- [9] Kuo, Benjamín C. “**Sistemas de Control Automático**”, Ed.7, Prentice Hall, 1996, México.

[10] Rashid, H. “**Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones.**” Pearson Educación. México 2004

[11] Saccomanno Fabio. “**Electric Power Systems Analysis and Control**”, IEEE Press,2003.

[12] Wikipedia, “**Grupo Electrogeno**”

http://es.wikipedia.org/wiki/Grupo_electrógeno [En línea]

[13] Wikipedia,” **Inducción Electromagnética**”

http://es.wikipedia.org/wiki/Inducción_electromagnética [En línea]

[14] Wikipedia.”**Tiristor**”

<http://es.wikipedia.org/wiki/tiristor> [En línea]

[15] William, Hayt Jr./ Back, John A .”**Teoría electromagnética**” , Ed. 6, MacGraw Hill, 2001.

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

Hz:	Hertz.
kW:	Kilo Watt
Rpm:	Revoluciones por minuto
V:	Voltaje
I:	Corriente
VAC:	Voltaje corriente alterna.
VCD:	Voltaje corriente directa
SCR:	Rectificador controlado del acrónimo en inglés silicon controlled rectifier
SSR:	Relé de estado sólido, del acrónimo en inglés: Solid State Relay
W:	Watts.
PID:	Proporcional, integral y derivativo
DPDT:	Dos polos, dos pasos del acrónimo en inglés double pole double touch
INT:	Interrupción.
Grupo electrógeno:	Máquina que mueve un generador eléctrico a través de un motor de combustión interna.
Matlab:	Matrix Laboratory. Software matemático.
PIC	Microcontrolador. Dispositivo programable

A.2 Información sobre la empresa / institución

A.2.1 Descripción de la empresa

Grúas NAVI está ubicada en la Lima, Cartago. Esta empresa se dedica al transporte de mercadería, servicio de grúa de plataforma, alquiler y venta de equipo industrial especializado. Equipo especializado se refiere a montacargas, compresores móviles, plantas generadoras, máquinas de soldar, andamios eléctricos y otros equipos que facilitan el trabajo en la industria.

Grúas Navi se divide en dos áreas:

1. venta y alquiler de equipo.
2. taller de mantenimiento.

El proyecto se desarrolla en el área de mantenimiento.

A.2.2 Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto

El proyecto se desarrolló en la sección de mantenimiento. La función principal de esta área es reparar, modificar y restaurar equipo. En este taller se da mantenimiento correctivo y preventivo para asegurar al cliente que alquila el equipo un buen funcionamiento.

El proyecto surge debida a la necesidad de restaurar el generador móvil. Se plantea la implementación de un nuevo control luego de que el personal de taller verifica el buen estado del resto de la máquina.

Anexos

Anexo B.1 PIC 16F877A

Los datos suministrados por el fabricante son:

High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory,
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM),
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during Sleep via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master mode) and I2C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference

(VREF) module

- Programmable input multiplexing from device inputs and internal voltage reference
- Comparator outputs are externally accessible

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash/EEPROM technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

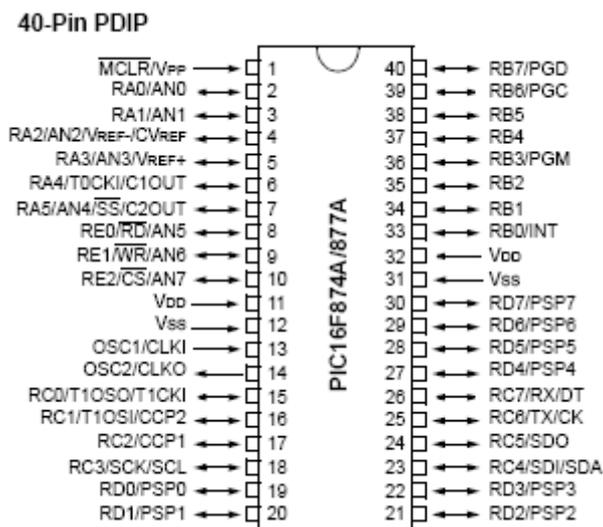


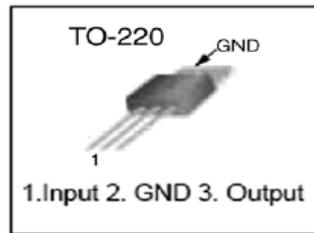
Figura B.1.1 Diagrama de pines del PIC 16F877A

En la siguiente tabla se presentan las principales características del PIC.

Descripción	PIC 16F877A
Frecuencia de operación	DC-20Mhz
Reset (and Delays)	POR, BOR
Memoria de programa	8K
Memoria de datos	368 bytes
EEPROM memoria de datos	256 bytes
Interrupciones	15
Puertos entrada-salida	Puerto A,B,C,D,E
Temporizadores	3
Módulo PWM	2
Comunicación Serie	MSSP, USART
Comunicación Paralela	PSP
10-bit Módulo Analógico Digital	8 canales
Comparadores Analógicos	2
Set de instrucciones	35 instrucciones

Tabla B.1.1 Especificaciones del PIC 16F877A dadas por el fabricante.

Anexo B.2 Regulador de voltaje LM7805



Internal Block Diagram

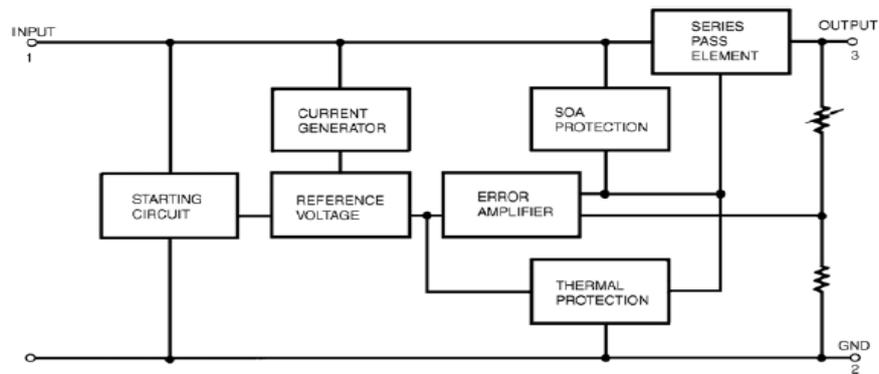


Figura B.2.1 Diagrama del regulador de voltaje LM 7805

Lo siguiente que se muestra es la tabla de características dada por el fabricante.

Característica	Valor
Voltaje de entrada	35 V
Voltaje de salida	$4,8 < V < 5,2$
Corriente de salida	$I < 1A$

Tabla B.2.1 Especificaciones del regulador de voltaje LM7805 dadas por el fabricante.

