



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

TESIS

**“CONTROL DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA
ELÉCTRICA”**

**Para obtener el título profesional de
INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

PRESENTA

Edgardo Yescas Mendoza

DIRECTOR DE TESIS

M. C. Jacob Javier Vásquez Sanjuan

Huajuapán de León, Oaxaca.

Noviembre de 2003

Tesis presentada ante los siguientes sinodales:

Dra. Irma Salinas Pérez

M. C. Felipe Santiago Espinosa

M. C. Hugo F. Ramírez Leyva

Bajo la dirección de:

M. C. Jacob Javier Vásquez Sanjuan

Dedicatoria

A mis padres, hermanos y
a mi preciosa hija Tania Mónica.

A la memoria de mis abuelos †, a quienes mucho
les hubiera gustado ver llegar este momento.

Agradecimientos

A Dios, por darme la vida y la oportunidad de realizar este sueño.

A mis padres, quienes con tanto sacrificio no dudaron en apoyarme en mis estudios sin esperar otra recompensa más que la satisfacción de verme convertido en una persona de provecho. A mi hija, por iluminar mi camino y ser el porqué de las cosas.

A todos mis tíos y primos, por quienes siempre recibí su apoyo y buenos consejos. A ti, con quien comparto este gran momento de alegría y felicidad.

A mi asesor de tesis, el profesor M.C. Jacob J. Vásquez Sanjuan por haber depositado su confianza en mí para la elaboración de esta tesis y por su paciencia en los momentos de mayor dificultad que conllevaron a la realización de este trabajo.

A los sinodales de tesis: Dra. Irma Salinas Pérez, M.C. Felipe Santiago Espinosa, M.C. Hugo Fermín Ramírez Leyva, por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis y por el interés mostrado para mejorarla.

A mis amigos y familiares que siempre me motivaron para continuar en este camino.

A los profesores que tuvieron que ver con mi formación académica, por haberme brindado sus conocimientos y amistad.

Agradezco también al personal del Departamento de Mantenimiento de la Universidad por haberme apoyado todo el tiempo en la realización de este trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	vi
--------------------	----

1. PLANTAS GENERADORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

1.1 Antecedentes	1
1.2 Generadores eléctricos	1
1.3 Generador básico	1
1.3.1 Funcionamiento del generador	2
1.4 Generador de corriente alterna (Alternador)	4
1.4.1 Tipos de alternadores	4
1.5 Alternadores síncronos	5
1.5.1 Principio de operación del alternador síncrono	5
1.5.2 Frecuencia de un alternador	6
1.5.3 Voltaje de un alternador	6
1.5.4 Parámetros que limitan la potencia de salida del alternador	8
1.6 Conexiones internas del alternador	8
1.7 Características de la planta de energía eléctrica de la UTM	9

2. DISEÑO DEL CONTROLADOR DE VELOCIDAD

2.1 Antecedentes (Controlador de velocidad)	13
2.2 Diseño del controlador de velocidad	13
2.3 Construcción del controlador de velocidad	16
2.3.1 Bloques del controlador de velocidad	16
2.3.1.1 Microcontrolador AT90S2313	16
2.3.1.2 Detector de cruce por cero	17
2.3.1.3 Etapa de potencia para el motor de CD	18
2.3.1.4 Actuador y detector de posición	19
2.3.2 Algoritmo de control para el controlador de velocidad	21
2.3.3 Funcionamiento del controlador de velocidad	30

3. DISEÑO DEL REGULADOR DE VOLTAJE AUTOMÁTICO

3.1 Antecedentes (Regulador de voltaje automático)	32
3.2 Diseño del Regulador de voltaje automático	33
3.3 Construcción del regulador de voltaje automático	34
3.3.1 Bloques del regulador de voltaje automático	34
3.3.1.1 Microcontrolador AT90S8535	34
3.3.1.2 Circuito de conversión de CA a CD	35
3.3.1.3 Circuito de conversión digital a analógico	37
3.3.1.4 Etapa de amplificación	37
3.3.1.5 Seguidor de voltaje para cargas inductivas	38
3.3.2 Caracterización y tiempo de respuesta del alternador	38
3.3.3 Algoritmo de control para el regulador de voltaje automático	45
3.3.4 Funcionamiento del sistema completo	49

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Pruebas y resultados	52
4.1.1 Funcionamiento con regulación de frecuencia y sin regulador de voltaje	53
4.1.2 Funcionamiento con ambos controladores	53
4.2 Tarjeta de circuito impreso del sistema de control	56
4.3 Instalación del sistema de control.....	57

5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones	61
5.2 Perspectivas.....	62

Referencias.....	63
Apéndice A. Diagrama electrónico de la tarjeta de control	65
Apéndice B. Lista de material.....	68
Apéndice C. Diseño del circuito impreso de la tarjeta de control	69
Apéndice D. Manual de operación	I
Sección 1. Introducción.....	II
Sección 2. Especificaciones.....	II
Sección 3. Instalación.....	III
Sección 4. Funcionamiento.....	V
Sección 5. Ajustes	VI
Sección 6. Localización de Averías	VII

LISTA DE FIGURAS

1.1	Generador de CA de una bobina sencilla	2
1.2	Generación de un ciclo de voltaje con un alternador de una sola espira	3
1.3	Alternador trifásico. A) Estructura básica, B) formas de onda	5
1.4	Circuito equivalente simplificado de una fase de un alternador triásico	8
1.5	Planta de energía eléctrica	10
1.6	Esquema básico del alternador a controlar	11
1.7	Puente rectificador de media onda montado en el eje del rotor	11
1.8	Esquema del acelerador y el pedal del motor de gasolina	12
1.9	Esquema básico de la configuración del motor de gasolina y el alternador	12
1.10	Interruptor de seguridad; a) Aspecto físico, b) Diagrama de conexión	12
2.1	Acoplamiento mecánico del sinfín	14
2.2	Acoplamiento mecánico del motor al sinfín, y el detector de posición inicial	14
2.3	Diagrama a bloques del sistema digital con microcontrolador	14
2.4	Circuito detector de cruce por cero	18
2.5	Configuración básica del Puente H, LM18200	18
2.6	Acoplamiento mecánico del motor al sinfín, y el detector de posición inicial	19
2.7	Acoplamiento mecánico instalado al motor de gasolina	20
2.8	Detector de posición inicial	21
2.9	Señales de sincronismo, a) Señal generada por el alternador, b) Pulsos entregados por el detector de cruce por cero	22
2.10	Señales de sincronismo, a) Señal generada por el alternador, b) Pulsos del detector de cruce por cero y valores de la bandera	22
2.11	Gráfica del T/C1 con divisor de frecuencia igual a 8	23
2.12	Contador de 16 bits, T_{high} y T_{low} .	24
2.13	Diagrama de flujo de la función principal y el RESET del programa	25
2.14	Diagramas de flujo para las interrupciones: a) interrupción por comparación del T/C1, b) Interrupción externa INTO	26
2.15	Diagrama de flujo para la subrutina CTRL_FREQ	27
2.16	Niveles de comparación de banda muerta y la característica de los dos pulsos de accionamiento	28
2.17	Diagramas de flujo para las subrutinas interrupciones: a) Acelerar, b) Desacelerar	29
2.18	Diagrama de flujo para la subrutina Stop_motor	30
3.1	Diagrama a bloques del regulador de voltaje con convertidor digital a analógico, etapa de amplificación y aislamiento (seguidor de voltaje)	33
3.2	Circuito convertidor de CA a CD	36
3.3	Gráfica de la relación V_{cd} vs. V_{ac}	36
3.4	Esquemático para la conversión digital a analógica, la etapa de amplificación y el seguidor de voltaje para cargas inductivas	38
3.5	Conexiones de la fuente de excitación con el alternador	39
3.6	Gráfica del voltaje de excitación y el voltaje de CD con respecto al tiempo	39
3.7	Gráfica de V_{exc} vs. V_{ac}	40
3.8	Diagrama a bloques del regulador de velocidad automático	42
3.9	Gráfica de VOLT vs. V_{exc} (palabra)	44
3.10	Diagrama de flujo de la función principal y el RESET del programa	47
3.11	Diagrama de flujo de la subrutina READ_ADC	48
3.12	Diagrama de flujo de la subrutina REG_VOLT	50
4.1	Diagrama de conexión de las cargas conectadas a la planta	52
4.2	Funcionamiento del alternador con voltaje de excitación fijo y el controlador	

de velocidad	53
4.3 Funcionamiento del alternador 1) Arranque, 2) operación en vacío (sin carga), 3) conexión de cargas	54
4.4 Fluctuaciones del voltaje generado con respecto al tiempo, al momento de conexión y desconexión de cargas	54
4.5 Fluctuaciones del voltaje generado al momento de desconectar las cargas	55
4.6 Gráfica de las variaciones de la frecuencia vs. Tiempo	55
4.7 Tarjeta de control	57
4.8 Vista frontal del gabinete	58
4.9 Vista inferior del gabinete	58
4.10 Interior del gabinete	59
4.11 Instalación completa	59
4.12 Vista general de la planta de energía eléctrica y el sistema de control instalado	60

LISTA DE TABLAS

1.1 Conexiones del alternador para producir los diferentes voltajes	9
1.2 Características de la planta de energía eléctrica	10
2.1 Fuentes de interrupción utilizadas en el controlador de velocidad	17
2.2 Tabla de verdad para el control del puente H	19
2.3 Valores de la bandera, para cada caso del pulso externo recibido	23
3.1 Fuentes de interrupción utilizadas en el regulador de voltaje automático	35
3.2 Relación entre los voltajes V_{cd} y V_{ac}	36
3.3 Caracterización del alternador, V_{exc} , I_{exc} y V_{ac}	40
3.4 Descripción de las señales utilizadas en el regulador de voltaje	42
3.5 Valores obtenidos de la caracterización completa de la planta de energía eléctrica y el regulador de voltaje	43
4.1 Valores de alimentación y consumo de las cargas utilizadas	52
4.2 Valores de alimentación, consumo de las cargas y secuencia de conexión	54
4.3 Consumo de corriente de la carga real	56

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un sistema de control, para regular el voltaje y la frecuencia de salida de una planta de energía, en sus valores nominales (127V/60Hz respectivamente), ante la conexión y desconexión repentina de las cargas, con un tiempo de respuesta de 2.5 segundos.

La planta de energía eléctrica, que se desea controlar está constituida por un alternador trifásico y un motor de gasolina. El alternador tiene una capacidad de 6.66 KW, 4 polos, y el tipo de conexión es delta alta en serie. El accionamiento se realiza por medio de una banda y dos poleas.

El sistema de control, está basado en dos microcontroladores que se encargan de mantener el voltaje y la frecuencia en su valor nominal mediante la implementación de dos controladores, uno de tipo proporcional y el otro de encendido-apagado.

El sistema está dividido en los siguientes bloques: Una tarjeta de control, una etapa de potencia para suministrar y manipular el voltaje de excitación del devanado de campo del alternador, un circuito rectificador del voltaje de corriente alterna, una etapa de potencia para el control del actuador, un detector de cruce por cero, y por último una etapa para la visualización de datos.

En el control de la frecuencia, se utiliza un detector de cruce por cero para medir la frecuencia de la señal generada, comparándola posteriormente con un valor de referencia, de esta manera se determina el error y por medio de un actuador se modifica la velocidad del motor de gasolina que acciona al alternador, hasta obtener el valor de la frecuencia nominal.

Con respecto al control del voltaje, se emplea un lazo de retroalimentación del voltaje proporcional al generado, el cual también es comparado con un valor de referencia, de esta forma la etapa de potencia entrega un voltaje de excitación proporcional a dicho error, manteniendo el voltaje en su valor nominal.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, resulta difícil imaginar un mundo sin electricidad, pues ésta influye significativamente en la vida cotidiana de los seres humanos en cientos de maneras. La electricidad se usa en las casas, oficinas, iluminación pública, en la operación de aparatos electrodomésticos, teléfono, computadoras, equipo electrónico, etc. La electricidad es empleada en la fabricación de la mayor parte de las cosas (vestido, calzado, consumibles, etc.) que se utilizan ya sea directamente o para operar las máquinas que hacen o procesan los productos. Sin la electricidad, la mayor parte de las cosas empleadas hoy en día no serían posibles y se tendría que prescindir de aparatos eléctricos que constituyen parte integral del entorno cotidiano.

Existen diversas formas de generar electricidad, el generador es la máquina elemental, que utiliza el método más común para producirla, empleando el principio del electromagnetismo. Casi toda la energía eléctrica empleada (excepto para equipos de emergencia y portátiles operados con baterías) proviene originalmente de un generador de una planta eléctrica. El generador puede ser accionado mecánicamente por una fuerza hidráulica, una turbina de vapor con calentamiento de carbón, petróleo, gas, energía nuclear o hasta un motor de combustión interna, pero aún así uno de los mayores problemas es encontrar fuentes de energía nuevas y alternas, que son cada vez más limitadas. Pero por ahora se depende casi por entero del generador eléctrico.

Un generador es una máquina que convierte la energía mecánica en energía eléctrica, utilizando el principio del electromagnetismo y una fuerza externa de accionamiento. Sin embargo, en la operación de un generador; se acentúa la necesidad de diseñar y construir sistemas de control, que sostengan la calidad de energía eléctrica generada, es decir; mantener los niveles de frecuencia y voltaje en sus valores nominales, ya que estas variables dependen fuertemente de la operación del generador y de los cambios de carga [URL 4].

Justificación

En la actualidad, debido a la importancia de las fuentes de energía eléctrica, es imprescindible el estudio de los principios de regulación de las plantas de energía eléctrica, ya que del correcto funcionamiento de éstas depende la operación de los aparatos que alimenta.

Una de las razones por las cuales se aborda un tema de esta índole como tesis es que, se aplican los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería, para la solución de un problema real, y la más importante que se trata de un diseño y construcción de un sistema de control que puede ser utilizado como una base para el desarrollo de algoritmos de controladores más sofisticados (controlador PD, PID), sustentado en el principio de operación y comportamiento de una planta de energía eléctrica ante cambios repentinos en la carga.

Planteamiento del problema

En la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) se cuenta con una planta generadora de energía eléctrica para alimentar a lugares estratégicos, que funciona cuando el suministro de energía es interrumpido, sin embargo esta planta no contaba con un sistema de regulación y el control era realizado manualmente. Por tal razón se consideró el diseño y construcción de un sistema automático digital que mantuviera regulada la frecuencia y el voltaje, independientemente de la carga conectada al generador.

Es importante mencionar que, el trabajo realizado en esta tesis aborda un problema real que tenía el Departamento de Mantenimiento de la UTM, en el cual es que se carecía de un control automático de regulación de la planta de emergencia.

Objetivo

El objetivo del presente trabajo consiste en diseñar y construir un sistema de control automático para la planta generadora de energía eléctrica de la UTM. El control se debe realizar utilizando un sistema electrónico digital, basado en un microcontrolador, empleando técnicas de control retroalimentado para mantener la frecuencia y el voltaje de salida del generador en sus valores nominales de 60 Hz y 127 Vrms.

Una vez planteado el objetivo principal, el ámbito central del trabajo de investigación y el área de la aplicación, se proponen los siguientes objetivos secundarios:

- Analizar el principio de funcionamiento de los controladores existentes para la regulación de los generadores.
- Realizar un estudio del funcionamiento básico de un generador.
- Diseñar y construir un regulador de voltaje automático para un generador.
- Diseñar y construir un controlador de velocidad para un motor de gasolina.
- Realizar pruebas del funcionamiento del sistema de control completo (controlador de velocidad y regulador de voltaje automático) con el generador, utilizando reflectores como cargas ficticias.
- Documentar el desarrollo del diseño y construcción del control del generador, además de realizar un manual de usuario que acompañe al sistema de control, para que el operador tenga los conocimientos de cómo manejar la planta de energía eléctrica.

De esta forma, el sistema de control automático desarrollado permitirá:

- Proveer a la UTM una planta de energía eléctrica controlada, tanto en voltaje como en frecuencia, para estabilizar continuamente el voltaje terminal de CA (corriente alterna) y responder a los cambios repentinos de carga cuando no se cuente con el suministro de energía.
- Emplear sistemas de control digital retroalimentados en una aplicación industrial real.

Hipótesis

Si los niveles de frecuencia y voltaje varían al momento de conectar/desconectar cargas a la planta de energía eléctrica de emergencia de la UTM, entonces es necesario diseñar y construir un sistema de control automático que regule estas variables a sus valores nominales.

Metodología

El diseño y construcción del sistema de control para la planta de energía, consiste en desarrollar un controlador de velocidad y un regulador de voltaje automático. Las etapas en la que se desarrolla el trabajo son las siguientes:

- a. Entender el funcionamiento del generador eléctrico y detección de los parámetros de las variables a controlar.
- b. Realización del diseño de los controladores.
- c. Análisis y elección de los elementos electrónicos a utilizar.
- d. Construcción de los controladores.
- e. Realización de las pruebas del funcionamiento de los controladores.

El controlador de velocidad, encargado de mantener la frecuencia en su valor nominal será diseñado con dispositivos electrónicos, los bloques que lo forman son: un detector de cruce por cero, un microcontrolador, la etapa de potencia y el actuador mecánico. Por medio del detector de cruce por cero, el microcontrolador mide la frecuencia actual y la compara con un nivel de referencia, y determina si debe modificar el aceleramiento del motor de gasolina, con ayuda del actuador mecánico.

Con respecto al regulador de voltaje automático, que es el encargado de mantener el voltaje de corriente alterna (CA) en su valor nominal, será diseñado con dispositivos electrónicos, los bloques que lo forman son: un convertidor analógico a digital (ADC), un microcontrolador (μC), un convertidor digital a analógico (DAC), una etapa de amplificación, una etapa de acoplamiento y un circuito rectificador de CA a CD (corriente directa). El circuito rectificador convierte el voltaje de CA del alternador a un voltaje de CD, por medio del ADC se convierte este voltaje a una señal digital, la cual el microcontrolador compara con el nivel de referencia, encontrando el error con el valor deseado, determina la cantidad de voltaje que debe suministrarse al devanado de campo del alternador (excitatriz). Éste voltaje es aplicado por medio de un DAC, la etapa de amplificación y la etapa de acoplamiento. El DAC convierte la palabra digital del microcontrolador a un voltaje analógico, posteriormente éste voltaje es amplificado con una ganancia igual a tres, con el propósito de cubrir el rango del voltaje de excitación del alternador. El voltaje amplificado es acoplado por medio de un seguidor de voltaje (amplificador operacional de potencia) al devanado de campo. El método utilizado para proporcionar el voltaje de excitación, evita que se utilicen dispositivos de potencia como tiristores. Cabe señalar que las pruebas del sistema deberán realizarse con el alternador, utilizando reflectores como cargas ficticias. Después de probar y hacer los ajustes necesarios al sistema, se debe elaborar la tarjeta de circuito impreso, además de instalarla en un gabinete.

Alcances y limitaciones

Puesto que el desarrollo de un control de una planta de energía eléctrica es considerado como un proyecto grande de diseño, es imposible realizar al 100% todas las actividades de un equipo profesional, es decir; el sistema a desarrollar no incluirá las características de los controladores comerciales, como lo son: el arranque de la planta de energía no será automático, no se revisarán los niveles de combustible y la temperatura del motor de gasolina, tampoco se realiza la conmutación automática de la carga entre la red de energía eléctrica y el generador, por lo que el trabajo está enfocado al desarrollo de un sistema del control de frecuencia y voltaje, para mantenerlos en sus valores nominales ante los cambios repentinos de carga.

El diseño y construcción de los controladores se realizará con dispositivos electrónicos y el estudio teórico está enfocado exclusivamente a los generadores de CA (corriente alterna), y la solución del problema es utilizando únicamente el tipo de generador que se tiene, que es del tipo rotatorio sin escobillas, con campo giratorio.

Tendencias actuales

Las tendencias actuales que tienen los controladores de velocidad y los reguladores de voltaje automático en el mercado son:

Regulación de velocidad

El regulador de velocidad de un motor de combustión interna (gasolina, Diesel) es un dispositivo mecánico diseñado para mantener la velocidad constante con relación a los requerimientos de carga. Dicha velocidad está directamente relacionada con la frecuencia de salida del generador, por lo que cualquier variación de la velocidad del motor afectará a la frecuencia de la potencia de salida [URL 2].

La rotación de un motor de combustión interna, depende de la cantidad inyectada de combustible y de la carga aplicada (potencia transferida a una maquina accionada).

Un mecanismo de aceleración, por sí solo, no es capaz de controlar la rotación del motor cuando este tiende a caer con el aumento de la carga o aumentar con la reducción de la misma. Es necesario entonces introducir un dispositivo que asegure el control de dosificación del combustible en función de la demanda de la carga, esto significa que; por cada aparato eléctrico que se conecta o desconecta, existe una variación en la velocidad, por lo que un controlador debe corregir la cantidad de combustible inyectada, sin permitir variaciones de velocidad, lo que es casi imposible dado un tiempo necesario para que una corrección se logre. A éste dispositivo se le conoce como regulador de velocidad o controlador de velocidad, y es utilizado en todos los motores de combustión interna. Dependiendo de la aplicación tiene características distintas y bien definidas.

En la actualidad, existen tres tipos de controladores de velocidad, aunque el principio de regulación es el mismo, cada uno se apoya en diferentes formas de manipular el mecanismo de aceleración, las características principales de estos son [URL 2]:

a. Controlador de velocidad mecánico

Constituidos por un sistema de contrapesos, resortes y de empalmes, actúan en el mecanismo de aceleración aumentando o disminuyendo la cantidad de combustible si la

rotación se aleja del valor deseado, en general, 1800 r.p.m. (revoluciones por minuto) para una frecuencia de 60 Hz.

b. Controlador de velocidad hidráulico

Este tipo de controlador ofrece una mayor precisión que el controlador mecánico, está constituido por un sistema de contrapesos giratorios, que hacen el papel de sensor de rotación y una pequeña bomba hidráulica produce la presión necesaria de aceite como accionamiento, ejerciendo de esta manera la función realizada por el pedal del acelerador. Como las variaciones de rotación son "sentidas" por los contrapesos, estas se transforman en salida y presión de aceite para alimentar un pequeño cilindro ligado a la biela de aceleración de la bomba.

c. Controlador de velocidad electrónico

Este controlador ofrece una mayor precisión de regulación y está constituido por tres elementos básicos: Un pick-up magnético utilizado como sensor de velocidad, un regulador electrónico y un actuador. Su construcción puede variar según el fabricante, pero todos funcionan bajo el mismo principio.

Un pick-up magnético es una bobina enrollada sobre un núcleo ferromagnético e instalada en el motor, con la proximidad adecuada de los dientes de cremallera¹. Con el motor en funcionamiento, cada diente de cremallera, pasa próximo al pick-up magnético, e induce un pulso de corriente eléctrica que es captado por el regulador. Una cantidad de pulsos por segundos (frecuencia) es comparada por el regulador con el valor deseado, si existe alguna diferencia, el regulador modifica el flujo de corriente para ser enviado al actuador, el cual efectúa las debidas correcciones de combustible para aumentar o disminuir la velocidad del motor.

Existen actuadores que trabajan ligados a la biela de aceleración de la bomba del inyector, como en los controladores hidráulicos y otros que están instalados en el interior de la bomba y actúan directamente con el flujo del combustible. Es así, como los controladores de velocidad realizan la regulación de combustible de los motores de gasolina.

Con respecto a la regulación del voltaje de los alternadores, existen dispositivos electrónicos que permiten controlar el voltaje de excitación del devanado de campo del alternador, a continuación se describe el principio de funcionamiento:

Regulación del voltaje

La regulación del voltaje de salida de un generador se realiza por medio de un sistema de excitación y su función principal es suministrar energía en forma de voltaje y corriente directa al campo generador, creando un campo magnético [URL 1]. Así mismo, el sistema de excitación comprende el equipo de control y protección, que regula la producción eléctrica del generador.

Para mantener constante el voltaje de salida del alternador, es necesario regular el sistema de excitación, pues la fuerza del campo magnético es quien determina este valor. Por lo tanto, se necesita un regulador de voltaje automático (AVR, Automatic Voltaje Regulator), que

¹ Sistema mecánico que permite convertir el movimiento rotacional en desplazamiento lineal.

es el elemento capaz de sensar las variaciones del voltaje de salida del alternador y actúa directamente en la excitación del devanado de campo para que ésta aumente o disminuya el flujo de corriente en el campo magnético, manteniendo constante el voltaje para cualquier demanda de carga.

Los reguladores de voltaje automático actualmente se diseñan y construyen utilizando electrónica de potencia, empleando tiristores (triacs y SCR's) para la rectificación del voltaje generado, y éste pueda ser aplicado al devanado de campo, convirtiéndose así en un sistema auto-excitado. El control de disparo de los tiristores se realiza digitalmente por medio de microcontroladores o microprocesadores.

El principio de funcionamiento de los reguladores de voltaje automático es el siguiente: realiza una comparación entre el voltaje de salida del generador con el valor establecido en el potenciómetro de ajuste de voltaje y efectúa las correcciones que actúan en el devanado de campo, con el objeto de mantener el voltaje de salida en su valor nominal [URL 2].

Estructura de la tesis

El presente trabajo está estructurado en cinco capítulos y su distribución es la siguiente:

En el capítulo 1, se presentan los fundamentos teóricos del generador de corriente alterna. Se revisan los factores que intervienen en las variables a controlar, por último se presentan las características de la planta de energía eléctrica que se desea controlar.

En el capítulo 2 se describe el diseño y realización del controlador de velocidad. Presentando las características más importantes del hardware utilizado, los circuitos empleados y las consideraciones que fueron tomadas en el diseño.

En el capítulo 3 se describe el diseño y realización del regulador de voltaje automático. Presentando también las características más importantes del hardware utilizado, los circuitos empleados y las consideraciones que fueron tomadas en el diseño.

En el capítulo 4 se describe la manera en que se realizaron las pruebas de los controladores y los resultados obtenidos, mediante gráficas de fluctuaciones de voltaje del generador. Se realiza una comparativa con el generador funcionando con y sin los controladores, en el momento de conexión y desconexión de las cargas, además se presentan las gráficas del voltaje obtenido durante el arranque en vacío del alternador. Por último se presenta el acabado que tiene la tarjeta de circuito impreso, la forma en como quedó instalado la tarjeta en su gabinete y la instalación de éste último.

Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y las líneas futuras de este trabajo.

En los apéndices A, B, C y D se muestra el diagrama eléctrico de conexión del controlador de velocidad y del regulador de voltaje automático, la lista de dispositivos electrónicos utilizados, el circuito impreso de la tarjeta de control y el manual de usuario para el manejo del sistema completo, respectivamente.

1. PLANTAS GENERADORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos de funcionamiento del generador eléctrico, y las diferentes clasificaciones que existen en la industria. Se mencionan los factores que intervienen en las variables a controlar y los parámetros que limitan la producción de energía eléctrica. Por último, se presentan las características de la planta de energía que se desea controlar.

1.1. Antecedentes

En la actualidad, la principal manera de obtener la electricidad es mediante el uso de grandes centrales termoeléctricas, en las que la energía térmica liberada por una fuente de energía primaria (madera, carbón, petróleo, gas, combustible nuclear, etc.) se transforma en electricidad a través de un proceso que exige el uso de turbinas y generadores, los cuales cubren la etapa final de conversión de energía mecánica en eléctrica. Las centrales hidroeléctricas también son de gran importancia en la actualidad, conceptualmente trabajan bajo el mismo principio al utilizar la energía cinética de una caída de agua para obtener energía mecánica que posteriormente es transformada en energía eléctrica.

En el proceso de conversión de la energía mecánica a energía eléctrica se utilizan generadores de corriente alterna o alternadores, y su funcionamiento básico es el siguiente :

1.2. Generadores eléctricos

La palabra generar significa producir. Un generador eléctrico es una máquina que produce un voltaje por medio de inducción electromagnética. Esto se efectúa por la rotación de bobinas de alambre a través de un campo magnético o por la rotación de un campo magnético en el centro de las bobinas de alambre. El generador moderno es el resultado del trabajo de Michael Faraday y Joseph Henry en 1831, este descubrimiento dió lugar al generador, motor eléctrico, micrófono, bocina, transformador y galvanómetro. En la actualidad más del 95% de la energía eléctrica mundial se suministra mediante generadores [11].

1.3. Generador básico

Un voltaje alterno estacionario es producido al girar una bobina de alambre entre los polos de un imán permanente. La figura 1.1 muestra el esquema de un generador sencillo; la bobina se denomina armadura, sus extremos están conectados a anillos colectores aislados, los cuales están montados en el mismo eje de la armadura. Las escobillas estacionarias presionan los anillos colectores y con ello conectan la armadura rotatoria a un circuito externo. Una

fuerza mecánica acciona (hacer girar) la armadura, y con ello se convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

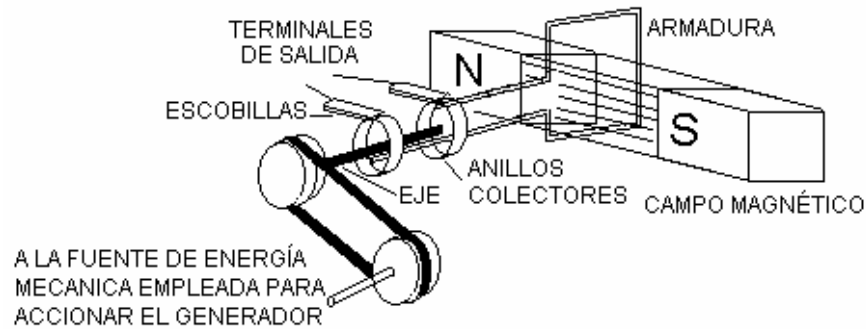


Figura 1.1 Generador de CA de una bobina sencilla

1.3.1. Funcionamiento del generador

El valor del voltaje inducido por el generador en cualquier instante de tiempo, depende de los siguientes factores:

- La densidad de flujo del campo magnético a través del cual se mueve un conductor (cuanto más grande sea la densidad del flujo, mayor será el voltaje inducido).
- La velocidad del conductor en movimiento (el voltaje inducido aumenta cuando aumenta la velocidad del conductor).
- El ángulo con el cual el conductor corta las líneas de flujo.

La figura 1.2 muestra el funcionamiento de una sola vuelta o espira cuando se produce un ciclo completo de voltaje alterno, del lado izquierdo se observa la posición de la espira dentro del campo, y del lado derecho se representa el voltaje de las escobillas, el cual es sinusoidal por cada cuarto de una vuelta completa de la armadura.

El voltaje es generado debido a que los conductores de la bobina cortan el flujo magnético producido por los polos N y S. El voltaje inducido es máximo cuando la bobina está momentáneamente en posición horizontal (paralela a las líneas de campo magnético); cuando la bobina se encuentra momentáneamente en posición vertical (perpendicular a las líneas de campo magnético) no corta las líneas de campo, por lo tanto, el voltaje inducido es cero [15].

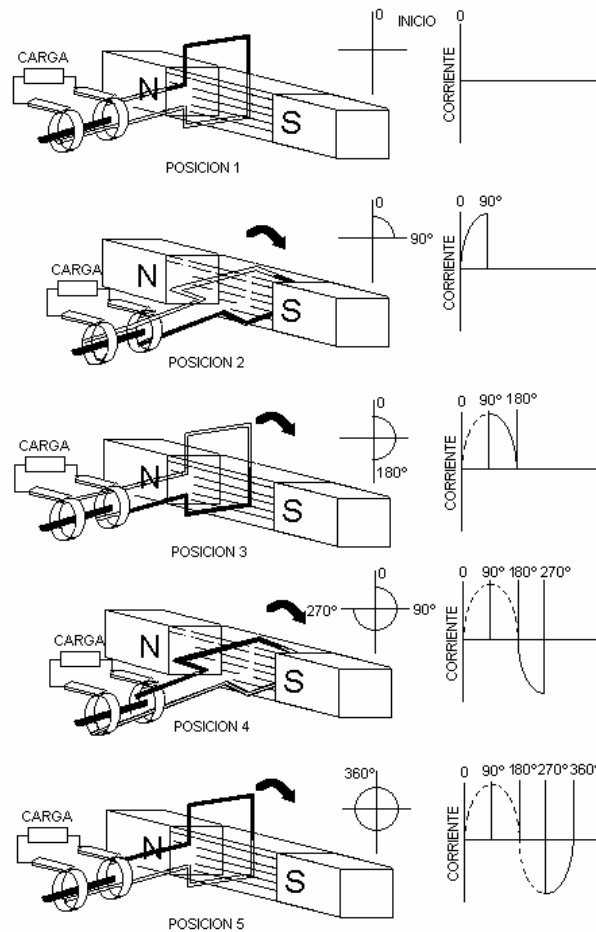


Figura 1.2 Generación de un ciclo de voltaje con un generador de CA de una sola espira

Al girar la armadura de la **posición 1** a la **posición 2**, ésta corta más líneas de flujo, por lo tanto, el voltaje aumenta desde cero hasta el valor máximo. Este incremento en el voltaje causa un aumento en la corriente, el cual se muestra con el primer cuarto de la onda sinusoidal. En la **posición 2** la bobina corta a las líneas de flujo a un ángulo de 90°, de esta forma se produce el voltaje máximo.

Al moverse de la **posición 2** a la **posición 3**, la armadura corta menos líneas de flujo en ángulos más agudos, pero en la misma dirección. Por esta razón, el voltaje disminuye desde su valor máximo hasta cero, esto se muestra con el segundo cuarto de la onda sinusoidal. Debido a que la armadura continúa rotando hacia la **posición 4**, cada uno de sus lados corta el campo magnético en la dirección opuesta, lo cual cambia la polaridad del voltaje y el sentido de la corriente. Una vez más, el voltaje y la corriente aumentan desde cero hasta sus valores máximos durante el tercer cuarto de la onda sinusoidal.

De la **posición 4** a la **posición 5** la armadura regresa al punto inicial, en este lapso, el voltaje y la corriente disminuyen desde sus valores más altos hasta cero y así se completa el ciclo.

1.4. Generador de corriente alterna (Alternador)

Un generador de corriente alterna es también conocido como un alternador. El elemento rotatorio de grandes alternadores se denomina rotor. Lo hacen girar turbinas de vapor, hidroturbinas (turbinas accionadas con caídas de agua) o motores Diesel. Estos alternadores producen la energía eléctrica empleada en las casas y en la industria. Los alternadores pequeños de CA casi siempre son accionados por motores de gasolina y son empleados comúnmente para proporcionar energía eléctrica de emergencia.

1.4.1. Tipos de alternadores

Los alternadores se clasifican según su construcción como:

- *Alternador de armadura giratoria.* Es utilizada en alternadores pequeños, por lo general la armadura es el elemento rotatorio o rotor. El rotor gira dentro del campo magnético producido por los devanados de campo estacionarios, denominados estatores. El rotor cuenta con un colector o anillos colectores que están en contacto con escobillas de carbón, que sirven para la recolección de la energía generada. El alternador de armadura giratoria solo se encuentra en alternadores con potencia nominal baja.
- *Alternador de campo giratorio.* En este tipo de alternador la armadura permanece estacionaria y el devanado de campo es giratorio. La ventaja de tener un devanado de armadura estacionario es que el voltaje generado puede conectarse en forma directa a la carga sin anillos deslizantes. Las conexiones fijas son más fáciles de aislar que los anillos deslizantes en altos voltajes, por esta razón los alternadores de alto voltaje y gran potencia son del tipo de campo giratorio, y éstos se emplean en las centrales generadoras grandes, tales como plantas hidroeléctricas. Como el voltaje aplicado al campo giratorio es de CD (corriente directa) y bajo voltaje, no tiene el problema de arqueado en los anillos deslizantes.
- *Alternador de imán permanente.* Un alternador de imán permanente o magneto es un alternador de CA en el cual, el campo magnético lo producen uno o más imanes permanentes y no electroimanes. En algunos alternadores de este tipo, los imanes permanentes forman parte del rotor [16].

Un alternador con un conjunto de devanados y un par de anillos colectores produce sólo una onda de voltaje, y a éste arreglo se conoce como alternador monofásico. Un alternador trifásico tiene tres conjuntos separados de devanados, un extremo de cada devanado está conectado a un anillo colector (figura 1.3a), de tal manera que; cada vuelta completa del rotor produce tres voltajes diferentes (figura 1.3b), los cuales se aplican a una carga por medio de una línea de alimentación de tres conductores [11].

Un sistema trifásico entrega un suministro de energía eléctrica más estable a una carga balanceada, ya que ésta absorbe la misma cantidad de potencia de cada una de las tres fases. Cuando uno de los voltajes es cero, la relación de fases (figura 1.3b) es tal que el voltaje de las otras dos fases se encuentra a la mitad de su amplitud, por lo cual, el valor instantáneo de la potencia absorbida por la carga total nunca es cero. En máquinas rotatorias esto constituye una ventaja, ya que el par sobre el motor es más constante de lo que sería si se estuviese usando una fuente monofásica, lo que disminuye las vibraciones [19]. Por esta razón, los sistemas trifásicos

son empleados para equipo de gran capacidad, como son grandes motores, máquinas para soldar y unidades calefactores que opera a voltajes de 208 V o más.

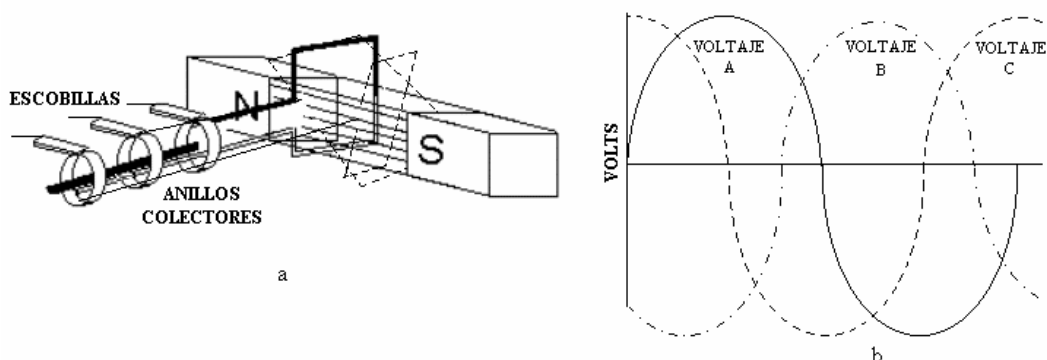


Figura 1.3 Alternador trifásico. a) Estructura básica, b) Formas de onda de voltaje de las tres fases

Comúnmente un alternador trifásico es conocido también como alternador sincrónico, y este debe su nombre a la similitud que tiene con el motor sincrónico, el cual es un alternomotor cuyo rotor gira en sincronismo con el campo magnético rotatorio creado por el arrollamiento de estator, es decir; en un motor síncrono tetrapolar (cuatro polos) alimentado a una frecuencia de 60 Hz, el campo giratorio del estator se desplaza a una razón de 1800 r.p.m., el rotor de dicho motor gira también a esta velocidad. Por lo que, la diferencia porcentual entre ésta y la velocidad real del motor es llamada deslizamiento. Aunque el deslizamiento de un motor síncrono es nulo [URL 13].

1.5. Alternadores síncronos

Un alternador es similar en construcción a un motor síncrono de rotor excitado. Consiste en un estator con arrollamiento trifásico y un rotor de polos salientes excitados con corriente continua. La presencia o ausencia de jaula de ardilla depende del uso a que se destine el alternador.

El alternador es accionado por un motor eléctrico, una turbina de vapor, un motor Diesel, etc. Del arrollamiento del estator, que por lo regular va conectado en estrella, salen al exterior tres hilos o cuatro si la distribución se hace con tres fases y neutro.

1.5.1. Principio de operación del alternador síncrono

El principio fundamental de operación de los alternadores síncronos, es que el movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético induce un voltaje en el conductor. Una fuente externa de energía CD o excitador se aplica a través de anillos colectores en el rotor: La fuerza del flujo, y por lo tanto el voltaje inducido en la armadura se regula mediante la corriente directa y el voltaje suministrado al campo. La corriente alterna es producida en la armadura debido a la inversión del campo magnético a medida que los polos norte y sur pasan por los conductores individuales.

La disposición más común es la de un electroimán cilíndrico que gira dentro de un conjunto de conductores estacionarios. La corriente que se genera mediante los alternadores aumenta hasta un pico, cae hasta cero, desciende hasta un pico negativo y sube otra vez a cero

varias veces por segundo, dependiendo de la frecuencia para la que esté diseñada la máquina. Este tipo de corriente se conoce como corriente alterna monofásica. Sin embargo, si la armadura la componen dos bobinas, montadas a 90° una de otra y con conexiones externas separadas, se producirán dos ondas de corriente, una de las cuales estará en su máximo cuando la otra sea cero, este tipo de corriente es conocida como corriente alterna bifásica. Al agrupar tres bobinas de armadura en ángulos de 120°, se producirá corriente en forma de onda triple, conocida como corriente alterna trifásica. Se puede obtener un número mayor de fases incrementando el número de bobinas en la armadura, pero en la práctica de la ingeniería eléctrica moderna se usa sobre todo la corriente alterna trifásica.

A continuación se describe los factores que determinan el valor de la frecuencia y el voltaje de CA de un alternador.

1.5.2. Frecuencia de un alternador

La frecuencia de la corriente alterna generada por un alternador depende del número de polos magnéticos formados por los devanados de campo y de la velocidad del rotor. (ya sea que la armadura o los devanados de campo estén girando), estas dos variables se relacionan de la siguiente forma (ecuación 1.1) [15].

$$f = \frac{pn}{120} \quad (1.1)$$

donde: p es el número de polos

n es la velocidad del rotor (r.p.m.)

Cuando un rotor ha girado un ángulo lo suficientemente amplio por dos polos opuestos (norte y sur) para pasar un devanado del estator, el voltaje inducido en el devanado habrá pasado a través de un ciclo completo de 360° (grados eléctricos) [16]. Entre más polos existan en el campo giratorio, menos será la velocidad de rotación necesaria para cierta frecuencia. Por ejemplo, un alternador de 8 polos sólo tendrá que girar a 900 r.p.m. para generar una frecuencia de 60 Hz.

Los alternadores de baja velocidad se fabrican hasta con 100 polos, para mejorar su eficiencia y tener un mayor control de la frecuencia. Los alternadores accionados por turbinas de alta velocidad, sin embargo, son frecuentemente máquinas de dos polos.

Cabe señalar que la C.F.E. (Comisión Federal de Electricidad) produce un voltaje nominal de 127 Vrms de CA con una frecuencia nominal de 60 Hz. El valor de tolerancia para el voltaje es de $\pm 10\%$ y para la frecuencia de $\pm 0.8\%$ [12]. Aún así los alternadores de propósito especial pueden tener una frecuencia mayor o menor a la nominal.

1.5.3. Voltaje de un alternador

El voltaje de salida de un alternador depende en mayor parte de la velocidad del rotor, del número de bobinas de armadura y de la intensidad del campo magnético producido por los devanados de campo [13]. Como se puede observar existe una relación directa entre la frecuencia y el voltaje con la velocidad del rotor, por tal razón se dice que estas dos variables están acopladas, cualquier variación de una de ellas se verá reflejada en la otra [6]. Sin embargo, la frecuencia depende únicamente de la velocidad del rotor, ya que el número de

polos en el alternador permanece fijo, por tal razón para controlar la frecuencia generalmente se gobierna la velocidad del rotor, y para el control del voltaje se manipula la intensidad del campo, ya que el número de bobinas de armadura también permanece fijo.

La relación que existe entre los factores que determinan el voltaje de salida de un alternador esta dada por la ecuación 1.2 [16].

$$E = 2.2 f Z \phi \quad (1.2)$$

donde: ϕ es el número de líneas de flujo por polo

Z es el número de conductores en serie por fase

f es la frecuencia [Hz]

Por consiguiente, para cualquier alternador, la salida depende de la densidad de flujo, el número de conductores en el campo y la velocidad con la que se mueven los conductores por el campo.

Cuando cambia la carga eléctrica conectada al alternador, variará el voltaje en sus terminales. La causa de este cambio son la resistencia, la reacción y la reactancia de la armadura. Estos elementos se muestran en el circuito equivalente de una fase de un alternador trifásico de la figura 1.4.

La reacción de armadura es definida como el efecto producido por la fuerza magnetomotriz creada por la armadura, dicha fuerza distorsiona y debilita el flujo que proviene de los polos electromagnéticos. El cambio de voltaje debido a la reacción de la armadura depende del factor de potencia de la carga (adelantado o atrasado), y los efectos que produce son:

- Cuando la carga es inductiva (atrasada), la reacción de la armadura se opone al campo de CD debilitándolo y causando una reducción del voltaje en terminales.
- Cuando la carga es capacitiva (adelantada), el campo de CD se refuerza e incrementa el voltaje en terminales.

En cuanto a la reactancia de un alternador, se tiene que; cada una de las fases del devanado del estator posee una resistencia R y una inductancia L. La inductancia se manifiesta como una reactancia X_s , dada por la ecuación 1.3:

$$X_s = 2\pi f L \quad (1.3)$$

donde: X_s es la reactancia sincrónica, por fase [Ω]

f es la frecuencia [Hz]

L es la inductancia aparente del devanado de estator, por fase [H]

La reactancia de armadura de un alternador es una impedancia interna, el valor de X_s es típicamente de 10 a 100 veces mayor que R [15]. El efecto que ocurre con el aumento de la carga es que la resistencia aumenta, haciendo que el voltaje de salida disminuya.

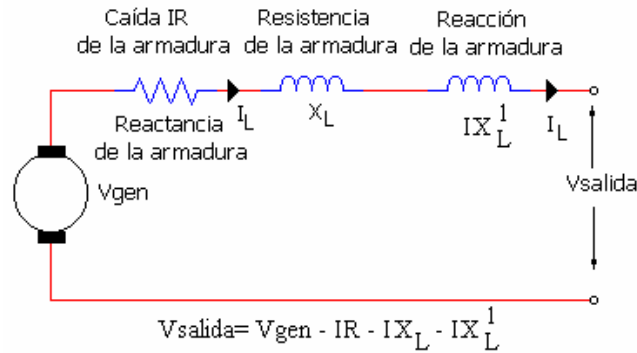


Figura 1.4 Circuito equivalente simplificado de una fase de un alternador trifásico

La corriente máxima (I_{max}) que un alternador puede suministrar depende de las pérdidas de calor que pueda disipar la armadura, las cuales (pérdidas de potencia I^2R) calientan los conductores y si son excesivas, pueden destruir el aislamiento. Los alternadores se especifican en términos de I_{max} como también del voltaje de salida. El valor nominal de los alternadores está expresado en volt-amperes (o en el caso de máquinas grandes en kilovolt-amperes) de potencia aparente que puede suministrar el alternador [16].

El voltaje y la corriente nominal máxima que proporciona un alternador, se especifican en su placa de identificación, que por lo regular esta fija al chasis de éste. El voltaje de línea a neutro siempre es el voltaje más bajo y el voltaje interlineal (entre fase y fase) es el más alto.

1.5.4. Parámetros que limitan la potencia de salida del alternador

En cualquier tipo de alternador existen dos parámetros que limitan la producción de energía eléctrica, estos son [URL 1]:

1. *Saturación de la densidad de flujo.* A medida que se incrementa la corriente de excitación del campo, existe un punto donde la densidad del flujo no aumenta más debido a la saturación del hierro en el núcleo. Lo normal es que la capacidad del alternador esté cerca de este punto de saturación de flujo.
2. *Elevación de la temperatura en el devanado y en el aislamiento debido a las pérdidas.* Esto comprende a las pérdidas debidas a la corriente de excitación en el devanado del campo, la corriente alterna en el devanado de la armadura, el circuito magnético y cualesquiera corrientes parásitas o campos magnéticos que se generen. Dichas pérdidas pueden llegar a ser del 1 al 5% o más de la cantidad de energía que es transformada.

Una característica muy importante que contienen los alternadores, es el conexionado interno de las terminales del bobinado de estator, es decir; las distintas conexiones internas que el alternador puede tener para producir diferentes niveles de voltaje o para obtener una frecuencia distinta a los 60 Hz, esta característica se describe a continuación:

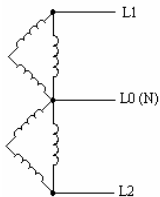
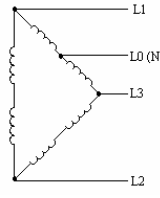
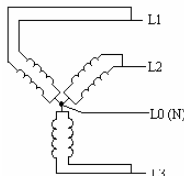
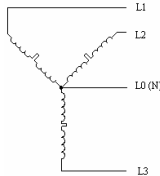
1.6. Conexiones internas del alternador

Los alternadores se clasifican como reconectables o no reconectables. El alternador del tipo reconectable puede conectarse para producir uno de muchos voltajes posibles. Los alternadores del tipo no reconectable son conectados en la fábrica para producir solamente un

voltaje específico y no puede hacerse modificación alguna para producir otro voltaje. Por otro lado los alternadores con código de voltaje L (60 Hz) y Z (50 Hz) son del tipo reconectable y pueden producir los voltajes indicados en la tabla 1.1 [14].

Los alternadores del tipo reconectable, normalmente tienen seis bobinas de estator, las doce terminales de estas pueden ser conectadas para producir los valores de voltaje y frecuencia como se muestra en la figura del lado derecho de la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Conexiones del alternador para producir los diferentes voltajes

VOLTAJE	FASES	F (Hz)	CONEXIÓN	DIAGRAMA ESQUEMATICO
120 /240	1	60	ESTRELLA ALTA (EN SERIE)	
240/480	3	60	ESTRELLA ALTA (EN PARALELO)	
120/240	3	60		
110/220 115/230	3	50		
120/208 127/220 139/240	3	60	DELTA ALTA (EN SERIE)	
110/290 115/220 120/208	3	50		
220/380 240/416 254/440	3	60		
220/480 230/400	3	50	DELTA DOBLE	

Con toda la información anterior es posible determinar las características de la planta de energía eléctrica a controlar, las cuales se presentan a continuación:

1.7. Características de la planta de energía eléctrica de la UTM

La planta de energía eléctrica consta de un alternador trifásico y de un motor de gasolina, la cual se muestra en la figura 1.5, y sus características más importantes son:

Tabla 1.2 Características de la planta de energía eléctrica

Tipo de alternador	Reconectable rotatorio sin escobillas
Conexión	Delta alta en serie
Polos	4
Velocidad (60 Hz)	1800 r.p.m.
Accionamiento	Motor de gasolina (Banda / polea)
Numero de fases	3
Voltaje	127 V / 254 V
Corriente máxima	65.6 A / 32.8 A
f.p.	0.8
Potencia nominal	6.66 KW
Capacidad nominal (potencia aparente)	8.33 KVA

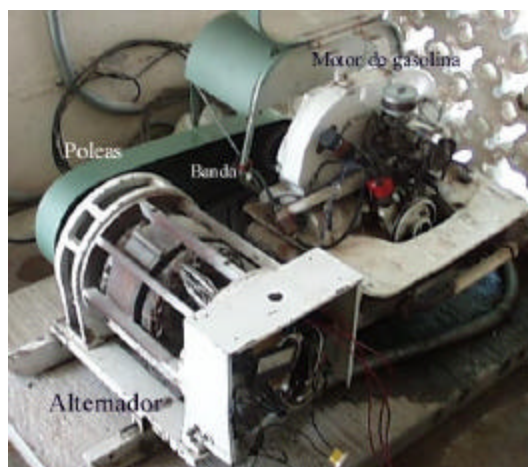


Figura 1.5 Planta de energía eléctrica

Las características del alternador fueron obtenidas mediante una inspección visual, y se observó que tiene una conexión en delta alta en serie, ya que seis cables de las seis bobinas están conectados al neutro, y por cada fase existen dos bobinas.

De los tipos de sistemas de excitación existentes en la industria, el alternador a controlar tiene el sistema de excitación denominado *rotatorio* (sin escobillas). La figura 1.6 presenta su esquema básico, en realidad se trata de dos alternadores; uno de ellos es el excitador principal (parte izquierda), encargado de proporcionar la corriente de excitación al segundo alternador trifásico (parte derecha de la figura), que en sí es el que genera el voltaje de CA.

El excitador principal es del tipo de *armadura giratoria*, la cuál rota a través del campo magnético estacionario creado por la corriente de excitación proporcionada por una fuente externa o un regulador de voltaje. El excitador principal se encarga de producir un voltaje alterno trifásico, que posteriormente es rectificado por medio de tres diodos montados en el eje del rotor. El segundo alternador es del tipo de *campo giratorio*, este campo es creado por el voltaje y la corriente del excitador principal (proveniente de los diodos montados en el rotor), el campo es cortado por el estator embobinado de tres fases y de esta forma el voltaje trifásico se obtiene del devanado de armadura estacionario.

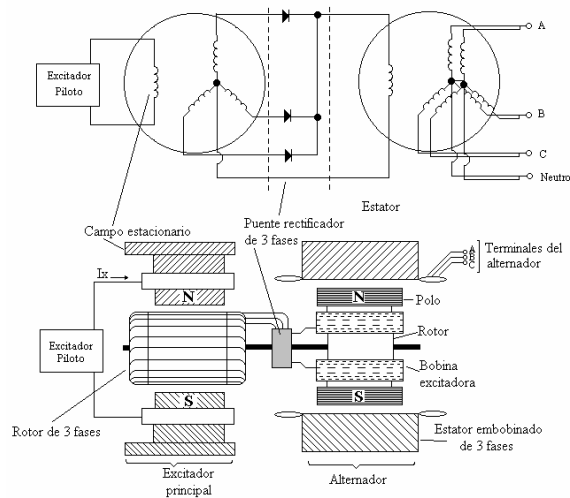


Figura 1.6 Esquema básico del alternador a controlar

En la figura 1.7 se muestra uno de los tres diodos del puente rectificador de media onda, montado en el eje del rotor.

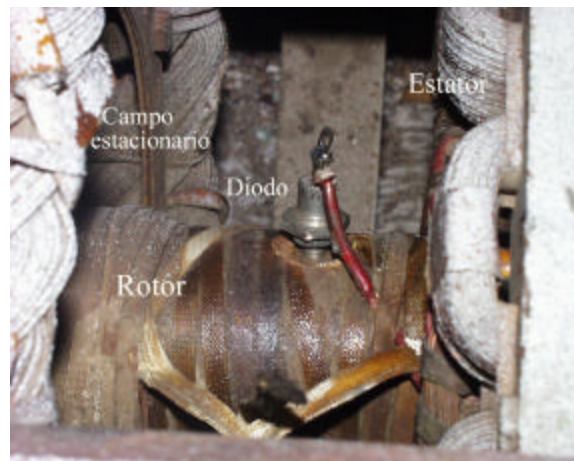


Figura 1.7 Puente rectificador de media onda montado en el eje del rotor

El control de la velocidad del motor de gasolina, es controlado por un pedal, el cual, junto con los diversos dispositivos del carburador regulan la cantidad de mezcla (combinación de aire, aceite y gasolina) que pasa a los cilindros, permitiendo de esta forma regular la velocidad del motor.

La figura 1.8 presenta el esquema general de control de velocidad del motor de gasolina, donde el pedal tiene que presionarse hacia abajo para provocar que el chicote mueva el acelerador, lo cual incrementa la cantidad de mezcla suministrada al motor, y por consiguiente la velocidad también aumenta. Para reducir la velocidad, solo se deja de ejercer fuerza sobre el pedal y el resorte obligará a que la palanca de aceleramiento regrese a su posición inicial, disminuyendo la cantidad de mezcla del motor y con ello se reduce la velocidad.

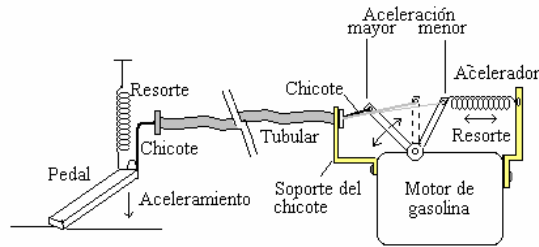


Figura 1.8 Esquema del acelerador y el pedal del motor de gasolina

La transferencia de energía mecánica entre el motor de gasolina y el alternador, se logra por medio de una banda y dos poleas. La figura 1.9 muestra un diagrama a bloques de las conexiones entre estos dos elementos que forman la planta de energía. La relación de transferencia² de las poleas es 1:1, con un diámetro de polea de 14 cms.

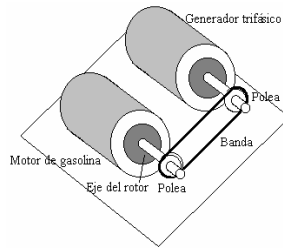
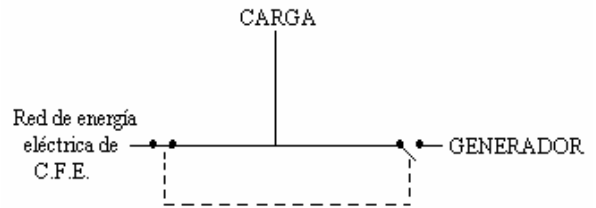


Figura 1.9 Esquema básico de la configuración del motor de gasolina y el alternador

Como la planta de energía es utilizada para dar servicio de emergencia, esta se encuentra conectada a un *interruptor de seguridad de dos vías sin fusible* trifásico para cambiar la carga conectada entre la red de energía eléctrica de la C.F.E. y el alternador, la cual se muestra en la figura 1.10.



a



b

Figura 1.10 Interruptor de seguridad; a) Aspecto físico, b) Diagrama de conexión

² Relación entre los diámetros de las poleas [URL 5].

2. DISEÑO DEL CONTROLADOR DE VELOCIDAD

El presente capítulo describe el diseño y construcción del controlador de velocidad, se presenta; el diagrama a bloques, las consideraciones tomadas en el diseño, la descripción de los bloques que lo componen, los diagramas de flujo empleados con base en un controlador de encendido-apagado, y por último el funcionamiento del controlador.

2.1. Antecedentes (Controlador de velocidad)

Para lograr un sistema automático de la planta se deben controlar la frecuencia y el voltaje de salida. En este caso la frecuencia está relacionada por la ecuación 1.1, el alternador a controlar consta de cuatro polos conectados en delta alta serie, y en base a la ecuación, la velocidad del rotor es la única variable a controlar. Ya que el alternador es accionado por un motor de gasolina, entonces para controlar la frecuencia, se debe regular la velocidad del motor. Por lo que la función del sistema será medir la frecuencia del voltaje generado y por medio de un actuador se aumente o disminuya la velocidad a la que gira el rotor del alternador, para provocar un incremento o decremento en la frecuencia.

La relación de transmisión de las poleas entre el alternador y el motor de gasolina es 1:1, esto significa que la velocidad del motor de gasolina es la misma que tendrá el alternador, así un cambio en la velocidad afectará de forma proporcional a la frecuencia.

Se considerará el empleo de un sistema digital de lazo cerrado, la variable a medir es la frecuencia del alternador y dada la naturaleza de ésta se desarrolla un controlador del tipo encendido-apagado (on-off).

2.2. Diseño del controlador de velocidad

Una de las necesidades que surgen en el diseño del controlador de velocidad es; encontrar la forma de accionar el mecanismo de aceleración del motor de gasolina, para esto se utiliza un acoplamiento mecánico utilizando un sistema de engranes de piñón y cremallera; en donde el movimiento de rotación es transformado en movimiento de traslación o desplazamiento lineal, figura 2.1, para sujetar al acelerador del motor se utiliza una tuerca, y ésta es montada en un tornillo sinfín al eje de un motor de CD, con esto se consigue que cuando gire el motor (CD) exista un desplazamiento lineal, figura 2.2.

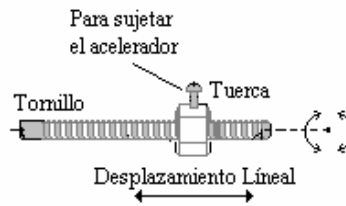


Figura 2.1 Acoplamiento mecánico de sinfín

Se requiere que el motor de CD contenga una caja reductora de engranes, para proporcionar más par (fuerza) de salida en el eje del motor y reducir la velocidad del mismo. Además se requiere una etapa de potencia con base en una configuración de puente H para el manejo del motor de CD.

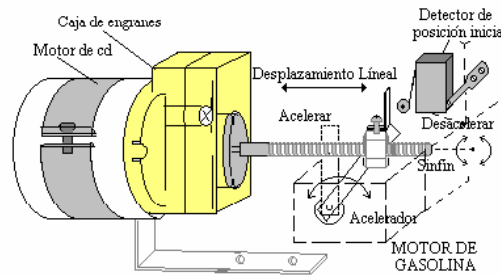


Figura 2.2 Acoplamiento mecánico del motor al sinfín, y el detector de posición inicial

Dada la naturaleza de la variable a controlar se prefiere implementar un controlador digital on-off (encendido-apagado) utilizando un microcontrolador, y un circuito externo que permite medir la frecuencia de la señal generada, con estos datos el microcontrolador compara este valor con el de referencia y determina si el motor de gasolina debe ser acelerado o desacelerado con ayuda de la etapa de potencia y el actuador mecánico. Con un control digital es posible tener una pantalla de cristal líquido (LCD) que permita visualizar el valor de la frecuencia en tiempo real. La figura 3.3 muestra el diagrama a bloques para el controlador de velocidad.

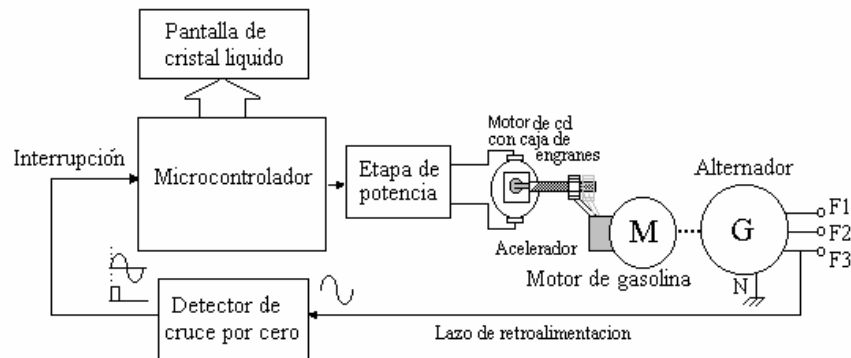


Figura 2.3 Diagrama a bloques del sistema digital con microcontrolador

Es importante mencionar las ventajas y desventajas que se tienen al desarrollar un controlador de velocidad digital frente a uno del tipo analógico, las cuales a continuación se presentan. Cabe mencionar que, anteriormente el diseño y construcción del controlador de velocidad estaba realizándose con amplificadores operacionales, sin embargo éste presentaba desventajas que más adelante se mencionarán.

Ventajas de un controlador digital

- Los componentes digitales tienen menor susceptibilidad al envejecimiento y a las variaciones de las condiciones ambientales, además son menos sensibles al ruido y las perturbaciones.
- Mayor confiabilidad y flexibilidad en el funcionamiento, ya que una modificación en el programa, no requiere añadir hardware.
- Mayor control en cuanto a eventos y funciones de tiempo.
- Un sistema digital requiere por lo regular una fuente de 5 voltios, y el consumo de corriente es considerablemente bajo, por lo que puede ser alimentada con la batería del motor de gasolina.
- Los procesadores digitales tienen un tamaño y peso menor. Pueden fabricarse microcontroladores (μ C), microprocesadores (MP) y procesadores de señal digital (PDS) de un solo circuito integrado, muy versátiles y de gran capacidad para aplicaciones de control.
- Los costos de los μ C, MP y PDS son cada vez menores.
- Proporcionan una mejor sensibilidad a variaciones en los parámetros.

Desventajas de un controlador digital

- Retardos en el control debido a los cálculos, pueden provocar inestabilidad.
- Limitaciones en la velocidad de cálculo y en la resolución de la señal debida a la longitud de la palabra finita del procesador digital. En contraste, los controladores analógicos trabajan en tiempo real y tienen una resolución teóricamente infinita.
- La longitud de palabra finita del procesador digital con frecuencia da origen a inestabilidades en el sistema, mismas que se manifiestan como ciclos límite en sistemas de lazo cerrado.
- La limitación en la velocidad de cálculo provoca retrasos en el lazo de control, los cuales pueden provocar inestabilidad en sistemas de lazo cerrado [4].

Por otro lado, las desventajas que presenta un controlador analógico son:

- Sus elementos están montados de manera fija, de modo que las características del controlador no pueden ser modificadas, dificultando realizar cambios en el diseño; cabe señalar que ésta es una de las desventajas encontrada en el desarrollo del controlador de velocidad analógico, el cual utilizaba amplificadores operacionales, su funcionamiento era correcto, sin embargo, se requería un sistema que permitiera programar funciones adicionales como controlar el actuador al inicio y final del funcionamiento del alternador, además del despliegue de datos como la frecuencia real.

- El envejecimiento de los componentes y la sensibilidad de éstos a cambios en el medio ambiente pueden llegar a ser muy importantes. Los componentes analógicos exhiben una susceptibilidad mayor a problemas de ruido.

Por lo anterior, es preferible diseñar y construir un controlador on-off digital empleando un microcontrolador, dada las siguientes ventajas:

Se podrá mantener un control más exacto, en cuanto a constantes de tiempo, el accionamiento del actuador y por consiguiente del acelerador será más preciso, el control de la frecuencia podrá tener límites de tolerancia, e incluso configurar el control para una frecuencia distinta a 60 Hz, la frecuencia actual podrá consultarse por medio de la pantalla (LCD) y mediante un algoritmo que permita sensar el estado del alternador (saber si está apagado o encendido) se podrá gobernar el aceleramiento inicial del motor de gasolina y una característica importante es que al realizar cambios en el diseño, es decir; la implementación de algoritmos de otros controladores (PD, PID, etc.), no requieren cambios en el hardware.

2.3. Construcción del controlador de velocidad

Con base en lo anterior, a continuación, se describen detalladamente la construcción de cada bloque que constituye al controlador de velocidad.

2.3.1. Bloques del controlador de velocidad

- Microcontrolador AT90S2313
- Detector de cruce por cero
- Etapa de potencia para el motor de CD
- Actuador y el detector de posición

2.3.1.1. Microcontrolador AT90S2313

La función principal y más importante la tiene el microcontrolador, por medio de éste podrán implementarse diferentes algoritmos de control para la manipulación óptima del controlador de velocidad.

En el diseño del controlador de velocidad, fue necesario encontrar un microcontrolador que responda lo más rápido posible a cualquier variación detectada en la frecuencia, ya que por el diseño de este controlador; solo se requiere medir la frecuencia generada por el alternador y controlar al motor de CD del actuador con ayuda del puente H. Aunque es preferible utilizar uno que contenga memoria de programa, reduciéndose así el número de componentes adicionales. Uno de los microcontroladores que ofrece estas características es el microcontrolador AT90S2313.

El AT90S2313 es un microcontrolador de 8 bits, de bajo consumo, basado en la arquitectura AVR RISC, con capacidad de ejecutar la mayoría de instrucciones en un ciclo de reloj, y consigue aproximadamente 1 MIPS (Millones de Instrucciones Por Segundo) por MHz, permitiendo la realización de sistemas óptimos de bajo consumo de energía frente a velocidad de procesamiento [1].

Este microcontrolador identificado en el esquemático de la figura A2 del apéndice A, como U5, contiene 15 líneas de E/S en dos puertos (B, D), de las cuales se han utilizado las siguientes:

Del puerto B, los pines PB0 y PB1 son utilizados como salida para el control del puente H, el pin PB7 es usado como entrada para la detección del estado del acelerador, el cual posteriormente se explicará.

Del puerto D, el pin PD2 es utilizado como entrada para la interrupción externa 0 (INT0), la cual es configurada por flanco de subida.

De las 10 fuentes de interrupción que contiene el microcontrolador AT90S2313, se han utilizado las siguientes (tabla 2.1).

Tabla 2.1 Fuentes de interrupción utilizadas en el controlador de velocidad

Dirección	Fuente	Propósito
\$000	RESET	Reset de encendido
\$001	INT0	Detección del pulso externo
\$004	TIMER2 COMP	Comparación T/C1
\$006	TIMER0 COMP	Sobreflujo T/C0

Cabe señalar que, las razones por las cuales se eligió este microcontrolador son que; la mayoría de instrucciones son realizadas en un ciclo de reloj, tiene el número de E/S suficientes para la operación del controlador de frecuencia, cuenta con el número necesario de temporizadores/contadores y la relación costo-beneficio es realmente redituable.

2.3.1.2. Detector de cruce por cero

Este bloque se encarga de entregar un pulso cada vez que la señal del alternador cruza por cero. Durante el semiciclo positivo de la señal alterna éste proporciona un “0” lógico y durante el semiciclo negativo entrega un “1” lógico. Aunque solo es de interés el flanco de subida del pulso, el cual permite que el microcontrolador detecte el inicio de un periodo de la señal con la interrupción externa, de tal forma que al recibir un flanco de subida se genera dentro del micro una interrupción y se ejecuta la rutina para medir el tiempo entre un pulso y otro (periodo) y posteriormente se calcula la frecuencia.

La figura 2.4 muestra el esquemático del detector de cruce por cero, se utiliza un transformador de voltaje (T2) para reducir la señal de entrada, que es rectificadas por medio del diodo D₁, de esta forma se obtiene una señal de media onda, (los semiciclos negativos han sido eliminados). Para la generación de los pulsos en función del cruce por cero de la señal alterna se emplea un comparador de precisión, el LM311 (U6), por su alto rendimiento en aplicaciones como detector de nivel de voltaje.

El comparador produce un voltaje de salida (V_o) que depende de la diferencia entre el voltaje de referencia aplicado a la terminal (+) y el voltaje de entrada de la terminal (-). Es decir, cuando la entrada (+) es más positiva que la entrada (-), la salida es igual a +5V, y para el caso contrario; cuando la terminal (+) es menos positiva que la entrada (-), el valor de V_o es igual a 0 V. Los valores de los resistores R₂ y R₃ agregan cerca de 50 mV de histéresis para minimizar los efectos de ruido, de modo que la terminal 2 en esencia está a 0 V. Así V_o está restringido entre 0 y +5V, los cuales son niveles típicos de las señales digitales [17].

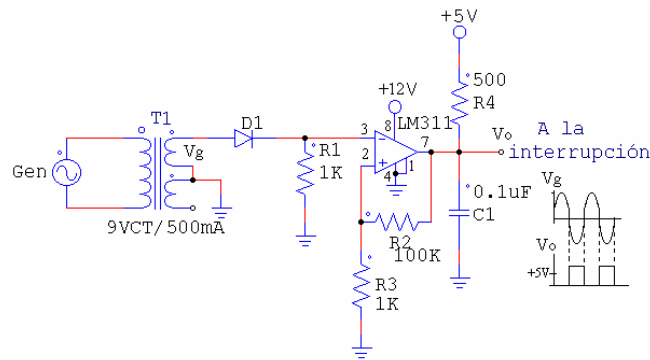


Figura 2.4 Circuito detector de cruce por cero

Este detector de cruce por cero, tiene la ventaja de trabajar con niveles de voltaje pequeños, así sí el alternador no tiene aún el voltaje nominal, pero se encuentra generando puede entregar al microcontrolador un pulso en cada cruce por cero. Así es posible determinar el valor de la frecuencia y ajustar la velocidad del motor hasta alcanzar su valor nominal.

2.3.1.3. Etapa de potencia para el motor de CD

La etapa de potencia se encarga de ejecutar las órdenes provenientes del microcontrolador y suministrar la corriente necesaria al motor de CD (actuador).

La etapa de potencia está formada por un puente H, el LMD18200 (U7), el cual está diseñado para aplicaciones de control de movimiento [9]. Éste tiene tres terminales de control y su descripción se presenta a continuación, la figura 2.5 muestra el esquemático.

- DIR – Entrada para controlar la dirección de rotación del motor. Utilizada en el controlador para hacer que el motor gire a la derecha para acelerar, o en caso contrario, a la izquierda para desacelerar al motor de gasolina.
- PWM – Entrada de modulación por anchura de pulso, que permite controlar la velocidad del motor, ver tabla 2.2. Utilizada en el controlador para accionar al motor por un intervalo de tiempo.
- BRAKE – Entrada usada para frenar el motor de CD. Esta terminal no es utilizada en el controlador.

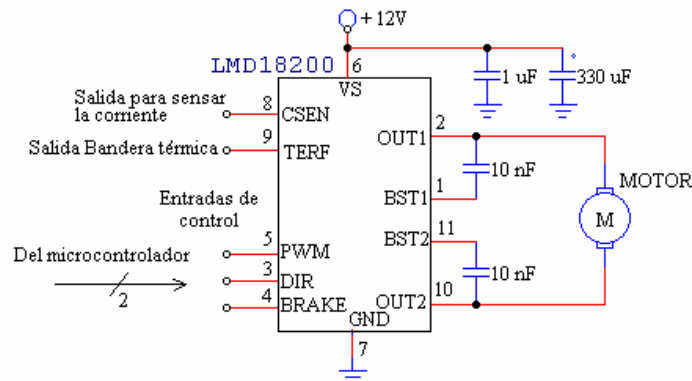


Figura 2.5 Configuración básica del Puente H, LMD18200

La tabla de verdad (tabla 2.2), muestra las condiciones para activar al motor de CD (actuador), del lado derecho se muestra el efecto obtenido por cada combinación posible de las terminales de control.

Tabla 2.2 Tabla de verdad para el control del puente H.

PWM	DIR (Dirección)	BRAKE (freno)	Efecto
1	1	0	Gira hacia el lado 1
1	0	0	Gira hacia el lado 2
0	X	0	No gira
1	1	1	Está frenado
1	0	1	Está frenado
0	X	1	Ninguno

El motor de CD no es utilizado para mantener una velocidad constante, éste es utilizado como actuador del tipo on-off. Es decir, en el momento que se requiera que acelere o gire hacia algún lado, se tendrá que activar por medio de un pequeño pulso en la terminal de PWM, haciendo que el motor tenga un pequeño desplazamiento. Al terminar el pulso el motor estará inactivo, hasta recibir nuevamente otro pulso, por esta razón no es necesario utilizar la terminal BRAKE para frenar al motor, ya que al quitar el pulso en la terminal PWM, el motor ya no girará. Por otro lado, la terminal de control DIR permite manipular el sentido de giro del motor de CD, ya sea hacia la derecha (acelerar, DIR=1) o hacia la izquierda (desacelerar, DIR=0). El esquemático del controlador de velocidad se presenta en la figura A2 del apéndice A.

2.3.1.4. Actuador y detector de posición

El acoplamiento utiliza la configuración mecánica de la figura 2.2, que a efectos de explicación se muestra nuevamente en la figura 2.6, éste acoplamiento mecánico del motor de CD fue construido con ayuda del personal técnico del Taller de Metal - Mecánica de la propia UTM.

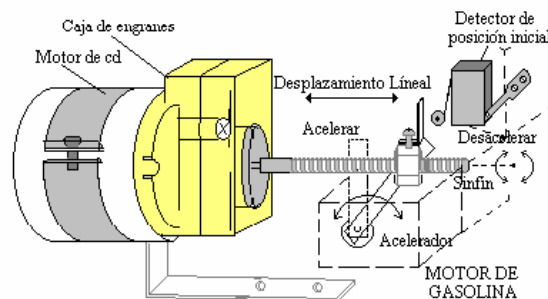


Figura 2.6 Acoplamiento mecánico del motor al sinfín, y el detector de posición inicial

La figura 2.7 muestra una imagen del mecanismo, y la posición de cada elemento instalado en el motor de gasolina.

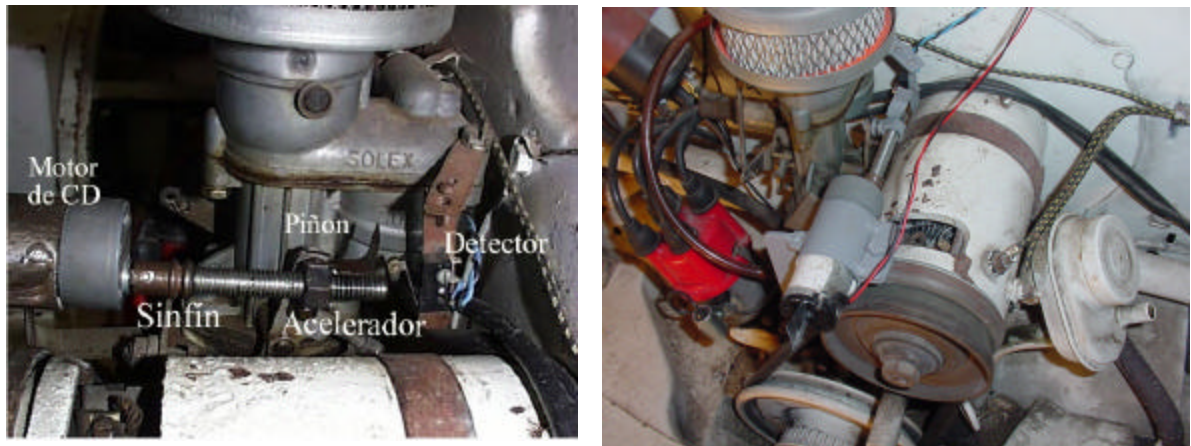


Figura 2.7 Acoplamiento mecánico instalado en el motor de gasolina

El motor funciona con 12 V, y tiene una caja reductora de engranes que proporciona más par (fuerza) de salida en el eje del motor y reduce la velocidad del mismo. En el eje se fijó un tornillo (cremallera), al cual se le ha montado una tuerca (piñón), que es la que tendrá el movimiento lineal con el acelerador debido al movimiento rotacional de la cremallera, el piñón sujetará a la pieza móvil de dicho acelerador.

Una de las acciones que debe realizar el actuador mecánico cuando el motor de gasolina es apagado, es que el acelerador regrese a la posición mínima de aceleramiento, para que la próxima vez que el motor arranque mantenga la aceleración adecuada para su correcto encendido, para esto se ha incluido un detector de posición inicial, el cual consta de un tope montado en la tuerca (piñón) y de un interruptor colocado en un extremo del motor como se muestra en la figura 2.6. El tope al llegar a cerrar el interruptor le indica al microcontrolador que el acelerador ha llegado a la posición mínima (posición inicial), cuando el motor de gasolina ha sido apagado.

La detección es realizada por medio de un interruptor normalmente abierto (N.A.), de tal forma que cuando el interruptor no está presionado por el tope, éste está abierto, en caso contrario (presionado) es cerrado.

Bajo la condición de que el controlador de velocidad detecte una frecuencia igual a cero, el acelerador regresa a la posición inicial de la siguiente forma: en la figura 2.8a se muestra que cuando el tope aún no llega a la posición inicial, el nivel de la terminal de PB7 (terminal 7 del puerto B) tiene un "0" lógico, como el motor sigue girando, provoca que el tope llegue hasta la posición inicial (figura 2.8b), y cierre el interruptor entregando un "1" lógico en el PB7, de esta forma el microcontrolador detecta este evento y detiene el movimiento del actuador.

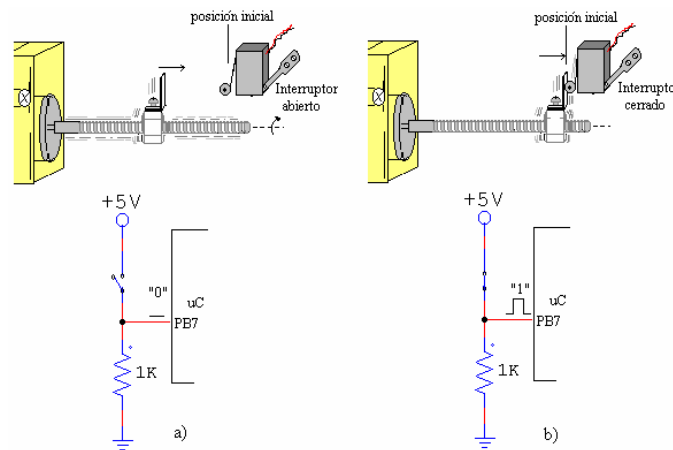


Figura 2.8 Detector de posición: a) interruptor se mantiene abierto mientras el tope aún no llega a la posición inicial; b) el interruptor es cerrado cuando el tope ha llegado hasta la posición inicial.

2.3.2. Algoritmo de control para el controlador de velocidad

Dada la naturaleza de la variable (frecuencia) a controlar, se ha utilizado un controlador de encendido-apagado, para poder acelerar o desacelerar el motor de gasolina y gobernar de esta manera su velocidad, y en consecuencia la frecuencia de la señal del alternador.

La operación de un controlador de encendido-apagado involucra una función no lineal (la señal de salida es de forma diferente a la de la entrada) lo que ocasiona; gastos de energía, trabajos mecánicos fuertes, y el hecho de que alrededor del punto de equilibrio ($e(t) \cong 0$) cualquier variación por pequeña que esta sea, origina una conmutación rápida de la acción de control cuando el error pasa de signo positivo a negativo y viceversa [URL 3], debido a esto se ha introducido una banda muerta de ± 1 Hz alrededor del punto de equilibrio que vuelva insensible al controlador para valores pequeños de la señal de error. Como es de esperarse la exactitud del control se ve afectada directamente por el ancho de la zona muerta, pero su inclusión evita cambios bruscos en el punto $e(t) = 0$.

El valor de referencia utilizado corresponde a la frecuencia nominal utilizada en nuestro país, que son 60 Hz o 60 ciclos por segundo, aunque si se desea puede configurarse para un valor diferente a este, por ejemplo a una frecuencia de 50 Hz.

La frecuencia es medida tomando el tiempo que transcurre entre dos pulsos recibidos del detector de cruce por cero, siendo éste el periodo T . Teniendo este dato se puede calcular la frecuencia ($f = 1 / T$), lo cual tomará un tiempo menor y logrando así una respuesta más rápida del sistema de control.

El algoritmo se explica con base en la figura 2.9, la señal sinusoidal es la que corresponde al voltaje generado por el alternador (V_{ac}) y los pulsos corresponden a los que entrega el detector de cruce por cero (V_d), el cual entrega un pulso durante el semiciclo negativo de la señal de CA.

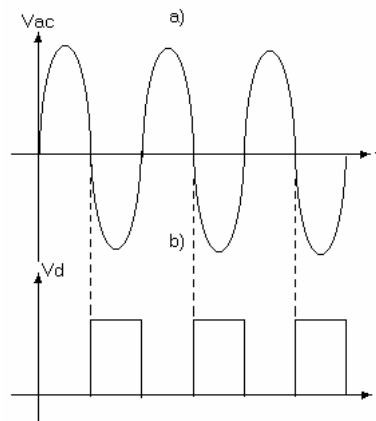


Figura 2.9 Señales de sincronismo, a) Señal generada por el alternador, b) Pulsos entregados por el detector de cruce por cero.

Entonces para determinar la frecuencia de estos pulsos de entrada, el microcontrolador mide el tiempo que transcurre entre un pulso y el siguiente, para esto utiliza la interrupción externa INT0 configurada por flanco de subida, para indicarle al micro que cuando reciba el primer pulso externo empiece a medir el tiempo, y al recibir el segundo pulso deje de tomar el tiempo, todo esto como si se estuviese utilizando un cronómetro para medir el tiempo que transcurre entre dos pulsos.

Para que el programa determine que pulso ha recibido, si el primero o el segundo, o incluso ninguno (cuando el alternador no está trabajando o el lazo de retroalimentación está abierto) se utiliza una bandera (B_pulso), el valor de ésta depende del pulso recibido, como se puede ver en la figura 2.10 y la tabla 2.3, al no recibir ningún pulso, el valor de la bandera corresponde a B_pulso=00, al recibir el primero, el valor de B_pulso es 01, y por último al recibir el segundo, el valor de B_pulso cambia a 02.

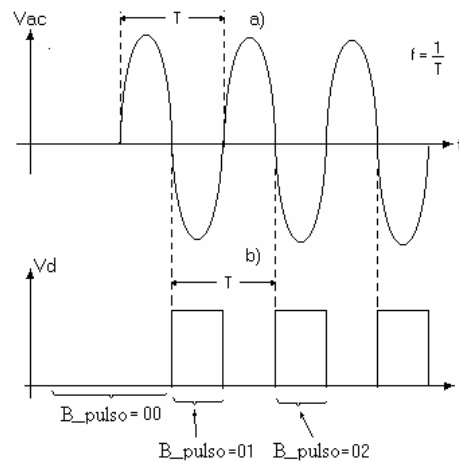


Figura 2.10 Señales de sincronismo, a) Señal generada por el alternador, b) Pulsos del detector de cruce por cero y valores de la bandera.

Tabla 2.3 Valores de la bandera, para cada caso del pulso externo recibido.

Bandera	Interpretación de la bandera	Acción en el programa
B_pulso =00	No se ha recibido ningún pulso del detector de cruce por cero	Esperar..., regresar el acelerador a la posición inicial
B_pulso =01	Se ha recibido el primer pulso de un ciclo de la señal de entrada	Empezar a tomar el tiempo
B_pulso =02	Se ha recibido el segundo pulso, (se ha completado un ciclo de la señal alterna)	Dejar de tomar el tiempo

Así, en el programa lo que se hace es ir verificando el valor de esta bandera, si el valor de B_pulso es 00 el microcontrolador le indica al puente H que gire el motor de CD, hacia la izquierda hasta que el detector le indique que ha llegado a la posición inicial.

Por otro lado, al recibir un pulso externo del detector de cruce por cero, ocurre una interrupción externa de INT0, el microcontrolador empieza a tomar el tiempo y el valor de B_pulso cambia a 01, desconociendo aún el periodo T, al recibir el segundo pulso se deja de medir el tiempo y el valor de B_pulso cambia a 02, aquí es cuando el programa entonces ya puede llamar a otra subrutina para determinar el inverso de T, posteriormente se compara con el valor de referencia (60 Hz, 3C_{HEX}) para decidir la acción del actuador, de esta forma el programa opera en un ciclo infinito.

Para la medición del tiempo que transcurre entre el primer y el segundo pulso, es empleada una base de tiempo (implementada en el código de la interrupción Zero_cross) que a continuación se describe, cabe mencionar que el microcontrolador contiene dos *timers/counters*, uno de 16 bits (T/C1) y el otro de 8 bits (T/C0).

El microcontrolador trabaja con un cristal de 8 MHz, además se utiliza el *timer/counter* T/C1 (16 bits), utilizando la interrupción por comparación, el *timer* es configurado para trabajar con una división de frecuencia del reloj (*Prescaler*) entre 8, por lo que la frecuencia del T/C1 es de 1 MHz ($CK_{T/C1} = CK / 8 = 8 \text{ MHz} / 8 = 1 \text{ MHz}$) con un periodo de 1 μs . El registro de comparación (T/C1 Output Compare Register – OCR1) es inicializado en 99_D, para que al contar de 00 a 99 tarde 100 μs (figura 2.11).

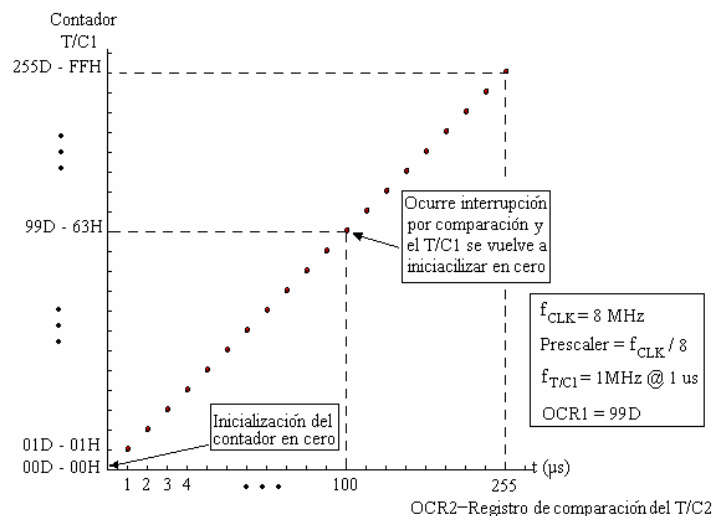


Figura 2.11 Gráfica del T/C1 con divisor de frecuencia igual a 8

Por otro lado se tiene un contador de 16 bits, formado por los registros T_{low} y T_{high} (parte alta y baja del contador), figura 2.12.

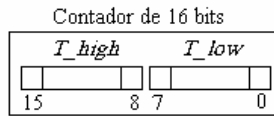


Figura 2.12 Contador de 16 bits, T_{high} y T_{low}

Así, al iniciar el T/C1 en cero y debido a la operación del reloj, existe un momento en el cual el valor del T/C1 es igual a la de los registros de comparación (OCR1AH y OCR1AL), generándose la interrupción por comparación, denominada $incrementa_T$.

En esta interrupción ambos registros llevan la cuenta (16 bits) de los incrementos de 100 μ s que han ocurrido. T_{low} es incrementado cada 100 μ s, al igual que T_{high} cada que T_{low} tiene un sobreflujo, es decir cada 25.5 ms ($255 * 100 \mu$ s), mientras no se reciba el segundo pulso externo del detector de cruce por cero.

Así, para una frecuencia de entrada de 62 Hz, el periodo T es de 16.12 ms, el valor de los registros será entonces de $T_{low} = A1_H$ (161_D) y $T_{high} = 00_H$ (00_D), para una frecuencia de 32 Hz, el periodo T es de 31.25 ms, y el valor de T_{low} es de 38_H (56_D) y T_{high} de 01_H (256_D).

En general, el programa del controlador de velocidad, implementado en el microcontrolador AT90S2313, desarrolla las siguientes funciones:

- Mide la frecuencia
- Compara el valor de la frecuencia medida con el valor de referencia (60 Hz), y, con los valores de la banda muerta (59 a 61 Hz)
- Si la frecuencia se encuentra dentro de la banda muerta entonces la acción del actuador es nula.
- Si la frecuencia es mayor al SETPOINT, entonces desacelera el motor de gasolina
- Si la frecuencia es menor al SETPOINT, entonces acelera el motor de gasolina
- Si la frecuencia es igual a cero, entonces regresa el acelerador a la posición inicial

Es decir, el algoritmo del controlador de encendido-apagado consiste en determinar la frecuencia si esta por arriba o abajo del punto establecido (Set Point = 60 Hz), para determinar si el motor de gasolina debe acelerarse o desacelerarse o incluso dejarlo en ese estado, así si el valor de la frecuencia es menor se activará al actuador para que acelere al motor de gasolina, si el valor es mayor entonces éste lo desacelerará, y cuando la frecuencia sea igual al valor deseado éste mantendrá al acelerador en esa misma posición.

A continuación se presentan los diagramas de flujo más relevantes. El programa está constituido por una función principal mostrada en la figura 213, al inicio del programa los recursos a emplear son habilitados y configurados, posteriormente se dedica a controlar la frecuencia. Se utiliza una bandera B_f_stable la cual servirá para indicarle al programa si se ha alcanzado al menos una vez la frecuencia nominal (60 Hz, $B_f_stable = 1$), en caso contrario el valor de B_f_stable es igual a 0 y como consecuencia se incluye un retardo de 450 ms con el

propósito de que el aceleramiento en el momento de arranque del motor de gasolina no sea demasiado brusco y esto no genere un sobretiro en el valor de la frecuencia de la señal del alternador. Es decir, en el momento de arranque del motor de gasolina, el controlador detecta una frecuencia menor a los 60 Hz, e inicia el aceleramiento, pero mientras no se alcance el valor nominal de 60 Hz, existe un retardo de 450 ms, permitiendo que el motor incremente su velocidad de forma gradual.

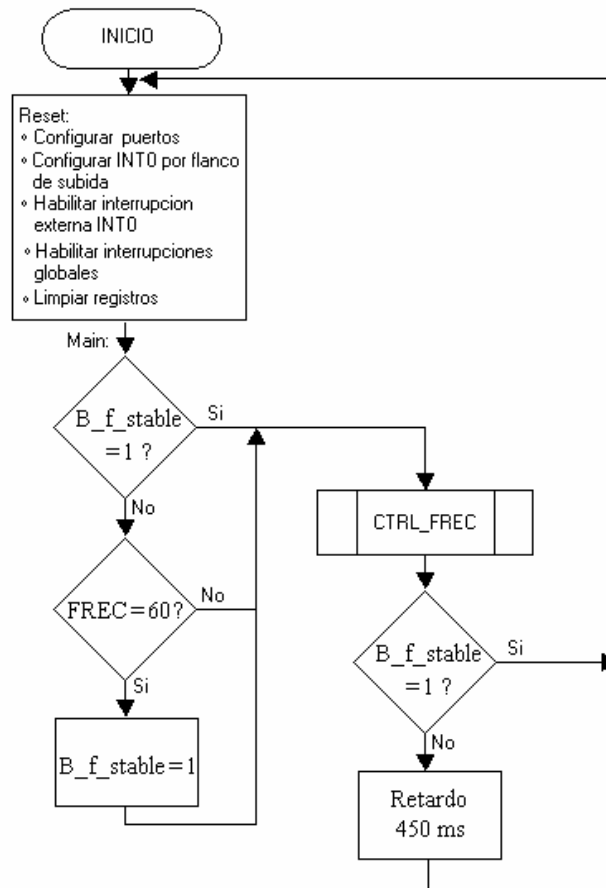


Figura 2.13 Diagrama de flujo de la función principal y el RESET del programa

Las figura 2.14a y 2.14b muestran los diagramas de flujo para las interrupciones Incrementa_T y Zero_cross, respectivamente. La interrupción de la figura 2.14a corresponde a la de comparación del T/C1 que es generada cada 100 μ s y puede decirse que trabaja paralelamente a las demás subrutinas del programa, ya que esto ocurre cada que la cuenta del T/C1 es igual a los registros de comparación. La función de esta interrupción es inicializar la cuenta del T/C1 en cero la primera vez, e incrementar en uno a T_{low} , después en la segunda y demás interrupciones va verificando si T_{low} no ha sufrido sobreflujo (llegado a la cuenta máxima), si es así, el registro T_{high} es incrementado en uno, y regresa el control a la subrutina que se estaba ejecutando.

La figura 2.14b muestra el diagrama de flujo que el programa del controlador de velocidad ejecuta para la interrupción externa INT0, denominada Zero_cross, donde se verifica el estado de B_pulso; con el primer pulso recibido el T/C1 es habilitado para que inicie la

cuenta desde cero y el valor de B_pulso cambia a 01, de ahí regresa el control a la subrutina que anteriormente se estaba ejecutando. Al ir transcurriendo el tiempo, van generándose las interrupciones correspondientes a $Incrementa_T$ y los valores de T_low y T_high van siendo incrementados mientras no se reciba el segundo pulso externo. En el momento que el microcontrolador recibe este pulso, la interrupción $Zero_cross$ es generada, y el valor de B_pulso es evaluada nuevamente; como su valor es igual a 01; se detiene la cuenta del T/C1 y B_pulso cambia a 02 para indicarle a la subrutina $CTRL_FREC$ que tiene el valor de T y realice el cálculo de la frecuencia con los valores de T_low y T_high registrados.

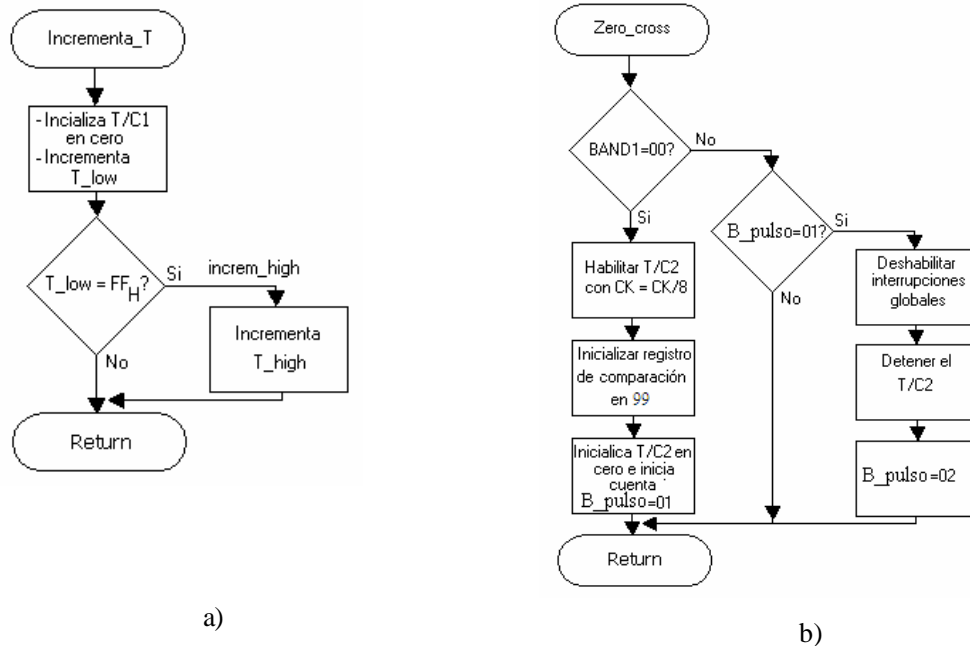


Figura 2.14 Diagramas de flujo para las interrupciones: a) interrupción por comparación del T/C1, b) Interrupción externa INTO.

La figura 2.15 muestra el diagrama de flujo para la subrutina denominada $CTRL_FREC$, al verificar que el estado de B_pulso es igual a 02, significa que ya se han recibido los dos pulsos externos y por tanto el número de incrementos de $100\ \mu s$ es conocido, registrados en T_low y T_high , es decir; se conoce el periodo de la señal de CA, por lo que ahora el microcontrolador puede calcular la frecuencia y compararla con los valores de la banda muerta y el valor de referencia para determinar la acción del actuador.

Como se utiliza un controlador de encendido-apagado y el comportamiento o la respuesta del motor de gasolina es lenta, es decir; por cada variación en la aceleración, éste tarda un tiempo en alcanzar la nueva velocidad, por otro lado cuando el valor de la frecuencia está muy alejada de 60 Hz, por ejemplo en 43 Hz o 70 Hz, es necesario que el aceleramiento sea en una proporción mayor que cuando está cerca del valor deseado (57 Hz). Para resolver esto, se han utilizado dos niveles de comparación, FH y FL. El comportamiento para el nivel de comparación FH es el siguiente: si la frecuencia está por arriba de este nivel, el accionamiento del actuador es por un tiempo mayor (girando hacia la izquierda, desacelerar), en cambio si la frecuencia es menor a FH, el tiempo de accionamiento es de un tiempo menor. El comportamiento para el nivel de comparación es similar, solo que el actuador debe girar hacia la derecha (acelerar). Para el ajuste de los niveles de comparación, son utilizados los registros

FH y FL, mostrados en la figura 2.15, inicialmente tienen el valor de referencia (60) y posteriormente se les suma y resta una constante (TOL1), respectivamente, de esta forma cambiando el valor de TOL1 se puede modificar ambos niveles de comparación.

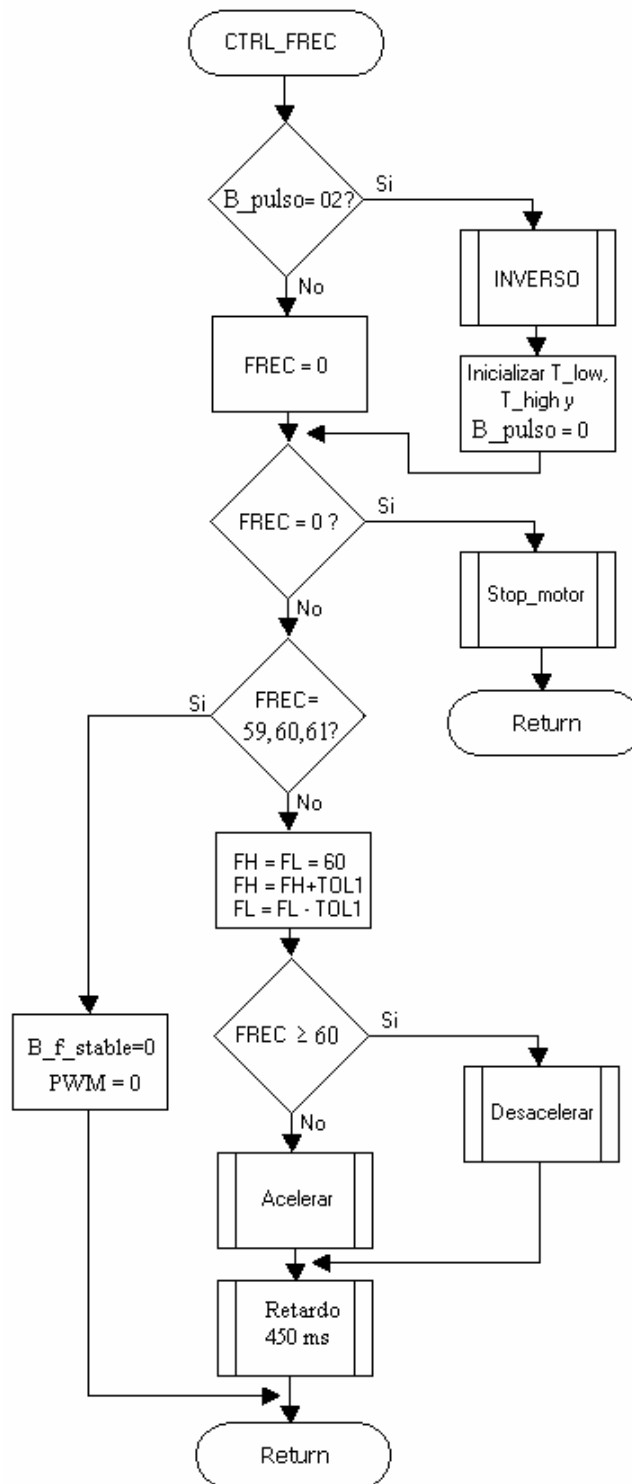


Figura 2.15 Diagrama de flujo para la subrutina CTRL_FREQ

Una vez calculado el valor de la frecuencia, ésta es comparada con tres constantes que son; 59, 60 y 61 Hz correspondientes a los valores de la banda muerta de ± 1 Hz, así dentro del rango de 59 a 61 Hz el controlador mantendrá la misma posición del actuador y por consiguiente la del acelerador. Posteriormente, si la frecuencia no está dentro de esta banda se compara con los dos niveles comparación FH y FL, para determinar en que parte de la banda se encuentra el valor de la frecuencia actual.

La figura 2.16 muestra el esquema de los dos niveles de comparación (FH y FL). El valor del referencia o SETPOINT (en ingles) es de 60 Hz, como anteriormente se menciona; los registros FH y FL se igualan a este valor y se le suma y resta respectivamente un $\Delta = 5$ (TOL1 = 5). Así, dentro del rango de 62 a 65 Hz, así como de 55 a 58 Hz el motor de CD es accionado por un pulso de 15 ms de duración (pulso de accionamiento corto), por medio de la terminal de PWM del puente H. De forma análoga; si la frecuencia es mayor a 66 Hz o menor a 55 Hz, el motor de CD se activa con un pulso de 40 ms (pulso de accionamiento largo). Todo esto con el propósito de que la respuesta del sistema de control sea lo suficientemente rápida, así al encender el motor de gasolina, y por la velocidad mínima que tiene al arrancar genera una señal con una frecuencia alrededor de los 40 Hz, y según el algoritmo, el actuador se acciona con un pulso largo (40 ms por cada comparación), cuando la frecuencia entre al rango de 55 a 58, muy cercano al valor deseado (SETPOINT = 60 Hz), el accionamiento se hace por medio de un pulso corto, y por último al entrar dentro de la banda muerta de 59 a 61 Hz el accionamiento es nulo, obteniéndose un control más preciso y logrando que no exista desgaste en el actuador, debido al cambio de signo del error.

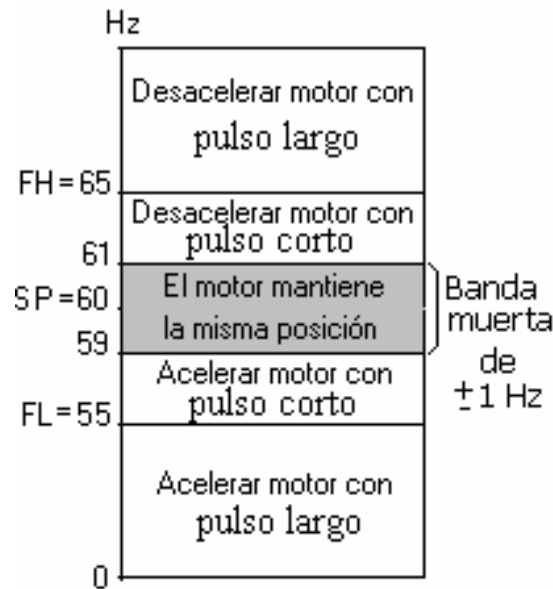


Figura 2.16 Niveles de comparación con la banda muerta de ± 1 Hz; y la característica de las dos pulsos de accionamiento

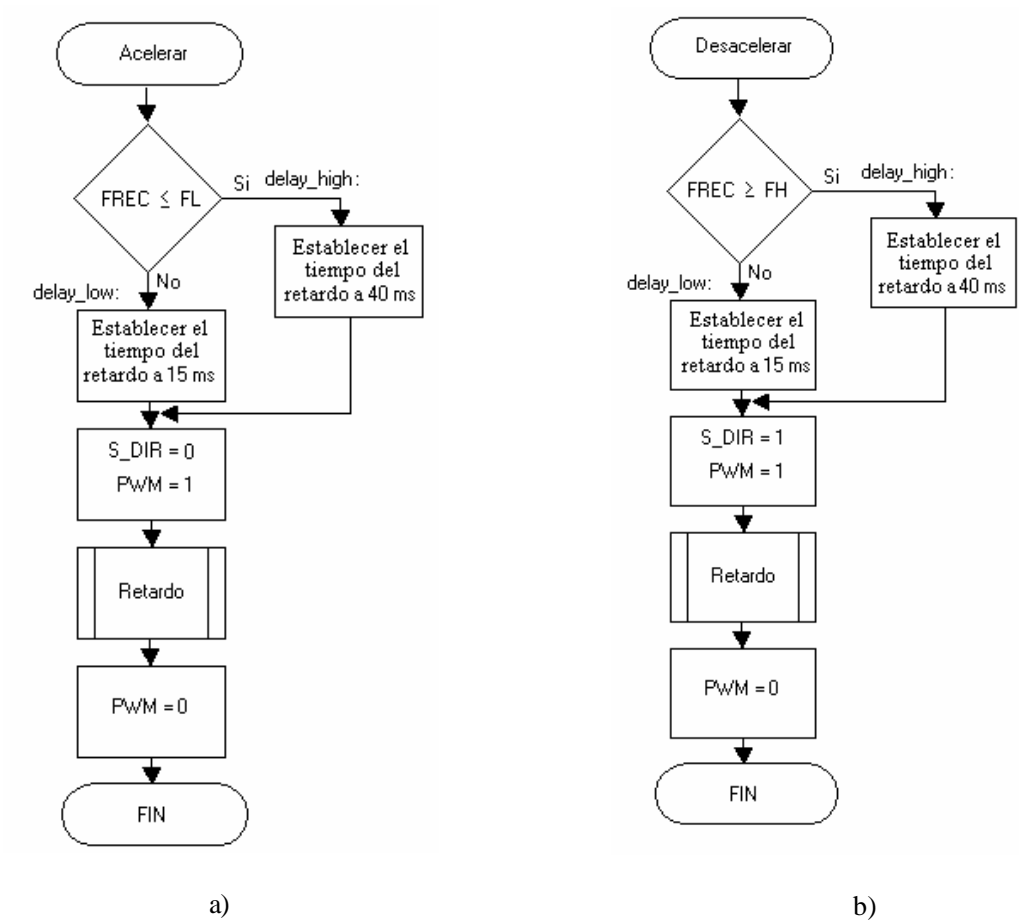


Figura 2.17 Diagramas de flujo para las subrutinas: a) Acelerar; b) Desacelerar.

La figura 2.17 muestra los diagramas de flujo para la parte de Acelerar y Desacelerar, que están dentro de la subrutina CTRL_FREC, en Acelerar se verifica si la frecuencia es menor al valor de comparación FL, si es así la señal de control S_DIR y PWM del puente H toman el valor de “0” y “1”, respectivamente, por un intervalo de tiempo de 40 ms, en otro caso (mayor a FL pero menor a 60) el intervalo de tiempo es de 15 ms, para la subrutina Desacelerar es similar a Acelerar, con la diferencia que la comparación es con el limite superior FH, y la señal de S_DIR es puesta a “1”.

La figura 2.18 muestra el diagrama de flujo correspondiente a la parte Stop_motor de la subrutina CTRL_FREC, en la cual se verifica el estado del pin de entrada PB7, para detectar el estado del tope del actuador.

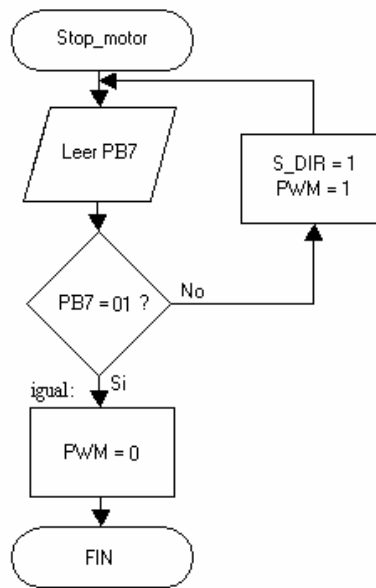


Figura 2.18 Diagrama de flujo para la subrutina Stop_motor

Se verifica el estado del bit 7 del puerto B (PB7), si su valor es aún “0” (interruptor abierto), entonces las señales de control S_DIR y PWM toman el valor de “1”, para hacer que el acelerador y el tope del actuador regresen a la posición inicial. Al llegar a dicha posición, el interruptor es cerrado provocando que PB7 cambie a “1”, y la señal de “PWM” cambie a “0”, deteniendo así al actuador, finalmente se regresa a la función principal.

2.3.3. Funcionamiento del controlador de velocidad

Después de haber descrito cada uno de los bloques que forman al controlador de velocidad y explicar el algoritmo de control, a continuación se presenta en forma general su funcionamiento:

El motor de gasolina es encendido manualmente, el sistema al detectar una señal generada, inicia el aceleramiento por medio del actuador con un pulso de accionamiento largo, al detectar que la frecuencia esta entre el rango de 54 a 59 Hz, el accionamiento se realiza por medio de un pulso corto, reduciendo la magnitud de aceleramiento del motor de gasolina. Sí el valor de la frecuencia se encuentra en el rango de 59 a 61 Hz, la acción es nula, aunque el sistema continua con el monitoreo, para detectar algún cambio con respecto al valor de referencia y actuar de forma inmediata.

Sí existe un cambio en el valor de la frecuencia, por ejemplo una reducción de 60 Hz a 48 Hz, el controlador detectará una frecuencia menor a 55 Hz (valor del límite inferior, FL) y decidirá que el actuador debe acelerar con un pulso de accionamiento largo, es decir, se acelerará por un lapso de tiempo mayor, al acercarse el valor de la frecuencia al de referencia (60 Hz), por ejemplo mayor a 54 Hz pero menor a 59 Hz, el actuador cambiará su accionamiento a un pulso corto para lograr que la frecuencia regrese a su valor nominal de 60 Hz, y permitir que no exista un sobretiro en la frecuencia.

Sí el motor de gasolina es apagado, el controlador detectará una frecuencia igual a cero, y hará que el actuador regrese el acelerador a la posición inicial, así la próxima vez que se desee encender, este permanezca acelerado al mínimo para su correcto encendido.

Sí la frecuencia es igual a cero, estando el motor de gasolina encendido, y el sistema no acciona al actuador, esto indicará al operador que existe una conexión abierta entre el lazo de retroalimentación.

Por último cabe mencionar, que el controlador de velocidad no despliega el valor de la frecuencia del alternador, debido a que el tiempo de respuesta ante un cambio en ésta es muy importante, por lo que el trabajo del despliegue de datos lo realiza el microcontrolador del regulador de voltaje automático que posteriormente se explicará.

Una vez descrito el diseño y la implementación, además del funcionamiento del controlador de velocidad, en el siguiente capítulo se presenta el diseño y construcción del regulador de voltaje automático.

3. DISEÑO DEL REGULADOR DE VOLTAJE AUTOMÁTICO

El presente capítulo describe el diseño y construcción del regulador de voltaje automático, de igual forma se presenta el diagrama a bloques, las consideraciones tomadas en el diseño, la descripción de los bloques que lo componen, los diagramas de flujo con base en un controlador proporcional, y por último el funcionamiento y la relación que tienen los dos controladores.

3.1. Antecedentes (Regulador de voltaje automático)

En la sección 1.5.3 se mencionó que: El voltaje de salida de un alternador depende en mayor parte de la velocidad del rotor, del número de bobinas de armadura y de la intensidad del campo magnético producido por los devanados de campo [13]. Sin embargo, la velocidad del rotor es regulada por el controlador de velocidad y el número de bobinas permanece constante. Por lo tanto, la variable a controlar es la intensidad de campo magnético, la cual está directamente relacionada con la corriente de excitación (I_{exc}) del devanado de campo, dicha corriente varía en función del voltaje aplicado al devanado de campo, por lo que; al suministrar un voltaje (V_{exc}) al devanado se manipula directamente I_{exc} .

Se puede pensar que si el voltaje de excitación se fija a un valor de tal forma que el alternador entregue exactamente 127 Vrms cuando tiene conectada una carga fija, no habrá mayor inconveniente; ya que el alternador está generando el nivel de voltaje adecuado, pero el problema surge cuando a éste se le conecta una carga adicional, esto causa una atenuación del voltaje de CA y que el equipo conectado al alternador funcione incorrectamente o simplemente no funcione. Para resolver esta situación, se requiere que la corriente de excitación sea ajustada, para que el alternador entregue nuevamente el voltaje nominal.

Para realizar esta función, el regulador de voltaje automático se encarga de monitorear el voltaje de salida de CA, y en caso de que la salida cambie su valor con respecto al voltaje de referencia (127 Vac), éste ajusta el voltaje modificando así la corriente I_{exc} en el devanado de campo, de tal forma que la aumente o disminuya, manteniendo así el voltaje en su valor nominal. Por esta razón se necesita que el regulador de voltaje utilice un controlador proporcional de lazo cerrado, para ajustar automáticamente el voltaje de excitación y por tanto I_{exc} .

La corriente de excitación es un factor esencial en el control de la salida del alternador. Una característica deseable de un regulador de voltaje automático es de mantener con suficiente rapidez, altos niveles de corriente de excitación después de un cambio en el voltaje terminal del alternador.

El control del regulador de voltaje automático consiste en variar la corriente de excitación del devanado de campo. Por la construcción del alternador sin escobillas, la forma de proporcionar esta corriente es variar el nivel de voltaje de CD del excitador piloto, ya que un incremento en el voltaje ocasiona una variación en la corriente de excitación.

Una vez planteado el problema que presenta el control del voltaje del alternador, y conociendo que la variable a medir es el voltaje de CA del alternador, el cual debe ser comparado con la señal de referencia para determinar el error que este se desvía, y en función a esto proporcionar el voltaje de excitación necesario al devanado de campo, para hacer que el voltaje del alternador vuelva a tener el nivel deseado.

3.2. Diseño del regulador de voltaje automático

El diseño y construcción del regulador de voltaje utiliza un sistema digital retroalimentado con base al diagrama a bloques de la figura 3.1, el cual emplea un microcontrolador, un convertidor analógico a digital (ADC), un circuito rectificador, un convertidor digital a analógico, una etapa de amplificación y una etapa de acoplamiento.

El funcionamiento básico es el siguiente: el voltaje generado por el alternador se rectifica a un voltaje de CD, el cual posteriormente se convierte a una señal digital, por medio del ADC, para que el microcontrolador lo compare con el nivel de referencia, encontrando el error que se desvía el voltaje de salida del valor deseado, en función de la magnitud del error, el microcontrolador determina que cantidad de voltaje debe ser aplicado al devanado de campo del alternador, dicho voltaje se obtiene de la palabra digital que el microcontrolador envía al DAC, posteriormente es amplificado con una ganancia igual a tres, para cubrir el rango del voltaje requerido, por último una etapa de acoplamiento con base en un seguidor de voltaje, provee el voltaje y la corriente necesaria al devanado de campo.

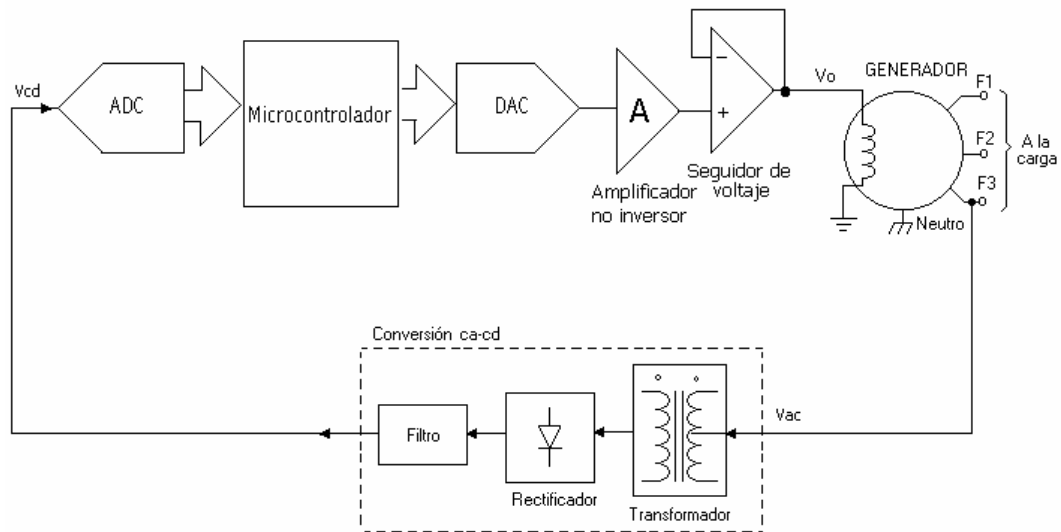


Figura 3.1 Diagrama a bloques del regulador de voltaje con convertidor digital a analógico, etapa de amplificación y aislamiento (seguidor de voltaje).

Debido a que la planta de energía eléctrica es utilizada en caso de que el suministro de energía eléctrica se interrumpa, y dado que los niveles de voltaje necesarios para alimentar al sistema son mayores al voltaje que proporciona la batería (12 V) del motor de gasolina e

incluso se requiere de una fuente bipolar para el amplificador de potencia (LM12), es necesario contar con una fuente de alimentación para el sistema, por esta razón se utiliza una fuente de energía ininterrumpible (UPS) o No-Break.

Como anteriormente se mencionó, existen varias desventajas que presenta un controlador analógico. Por esta razón se prefiere implementar un controlador digital que emplea un microcontrolador, un ADC, un DAC, una etapa de amplificación y aislamiento, por las siguientes ventajas:

- Se minimiza el número de componentes externos, al utilizar un microcontrolador que incluye un ADC de varios canales.
- La corriente de excitación se obtiene del voltaje proporcionado por los siguientes tres bloques: el DAC, la etapa de amplificación y el seguidor de voltaje.
- Despliegue de los datos en tiempo real cada segundo.
- Flexibilidad para la implementación de otros algoritmos de control (PD, PID, etc.).

De esta forma este diseño resulta ser simple y efectivo, el cual puede ser usado en otras aplicaciones de control automático.

3.3. Construcción del regulador de voltaje automático

A continuación, se describe la construcción de cada bloque que constituye al regulador de voltaje automático, con base en la figura 3.1.

3.3.1. Bloques del regulador de voltaje automático

- Microcontrolador AT90S8535
- Circuito de conversión de CA a CD
- Circuito de conversión digital a analógico
- Etapa de amplificación
- Seguidor de voltaje para cargas inductivas

3.3.1.1. Microcontrolador AT90S8535

De igual forma, este bloque es el que realiza la función principal y más importante, para la manipulación óptima del regulador de voltaje automático.

En el diseño del regulador de voltaje automático una de las necesidades fue encontrar un microcontrolador que cuente con un ADC de varios canales de entrada. Una de las ventajas de utilizar un microcontrolador con ADC interno es que el control de las conversiones es realizada por software, debido a que cuentan con una interrupción para fin de conversión y no requiere de ninguna conexión externa a un puerto del microcontrolador o al bus de datos del sistema. Uno de los microcontroladores que ofrece estas características es el microcontrolador AT90S8535.

El AT90S8535 (U1, figura A1 del apéndice A) es un microcontrolador de 8 bits, de bajo consumo, contiene un ADC de 10 bits con 8 canales, tiene 4 puertos de 8 líneas de E/S programables, de los cuales los pines utilizados son:

Del puerto A, los pines PA0-PA1 son utilizados como entradas analógicas del ADC y los pines PA6 y PA7 son usados como E/S de propósito general.

El puerto B es utilizado como bus de datos que contiene la palabra digital (8 bits) que va hacia la entrada del convertidor digital analógico.

Del puerto C, siete pines de E/S (PC0-PC6) son usados para manejar el bus de datos y control del LCD.

Del puerto D, el pin PD2 sirve como entrada hacia la interrupción externa 0 (INT0), configurada por flanco de subida.

Con respecto a las 16 fuentes de interrupción que tiene el microcontrolador, se han utilizado las siguientes (tabla 3.1).

Tabla 3.1 Fuentes de interrupción utilizadas en el regulador de voltaje automático

Dirección	Fuente	Propósito
\$000	RESET	Reset de encendido
\$001	INT0	Detección del pulso externo
\$003	TIMER2 COMP	Comparación T/C2
\$006	TIMER1 COMP	Comparación T/C1
\$009	TIMER0 COMP	Sobreflujo T/C0
\$00E	ADC	Fin de conversión ADC

3.3.1.2. Circuito de conversión de CA a CD

Este bloque se encarga de acondicionar el voltaje de CA a un voltaje de CD, el cual posteriormente es convertido a una señal digital por medio del ADC del microcontrolador y permite que exista el lazo de retroalimentación.

La figura 3.2 muestra el circuito de conversión de CA a CD, consta de un transformador (T1) para reducir el voltaje de 127 Vrms a 12 V, un puente rectificador de onda completa (D1-D4) que convierte la señal alterna a un voltaje pulsante de CD, y un capacitor (C2) como filtro que atenúa las variaciones; de manera que su valor sea lo más continuo posible con una componente de alterna mínima. Por último, un potenciómetro (R7) permite ajustar el voltaje de entrada al ADC.

Para poder determinar la relación que existe entre el voltaje de CA (V_{ac}) del alternador y el voltaje rectificado (V_{cd}), éste circuito fue caracterizado de la siguiente manera; se varió el voltaje de CA del alternador, excitando al devanado de campo por medio de una fuente de voltaje variable, y con ayuda de un voltímetro se midió el voltaje de CA y el voltaje de salida (V_{cd}), obteniéndose las lecturas registradas en la tabla 3.2. La figura 4.3 muestra la relación lineal que existe entre los voltajes V_{cd} y V_{ac} (V_{rms}).

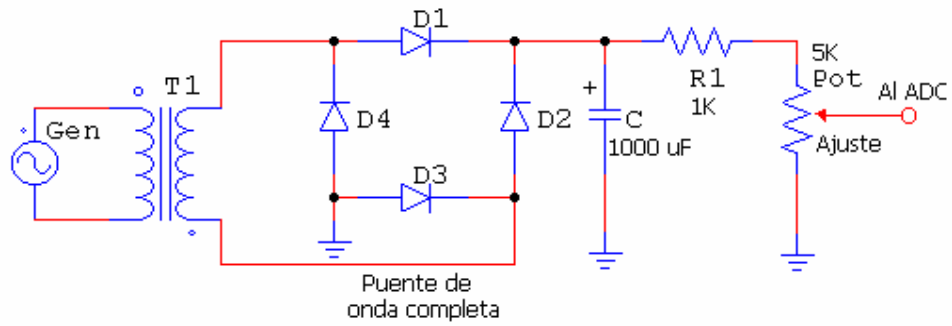


Figura 3.2 Circuito convertidor de CA a CD

Tabla 3.2 Relación entre Vcd y Vac

Vcd	Vac
1.72	90
1.84	93.7
1.91	97.5
1.99	100.7
2.07	106
2.12	107.3
2.18	110.9
2.26	113.9
2.31	117.8
2.41	122.7
2.5	126.8
2.6	129.5
2.66	133.7
2.73	136.4
2.79	141.5
2.85	143.8
2.9	144.3

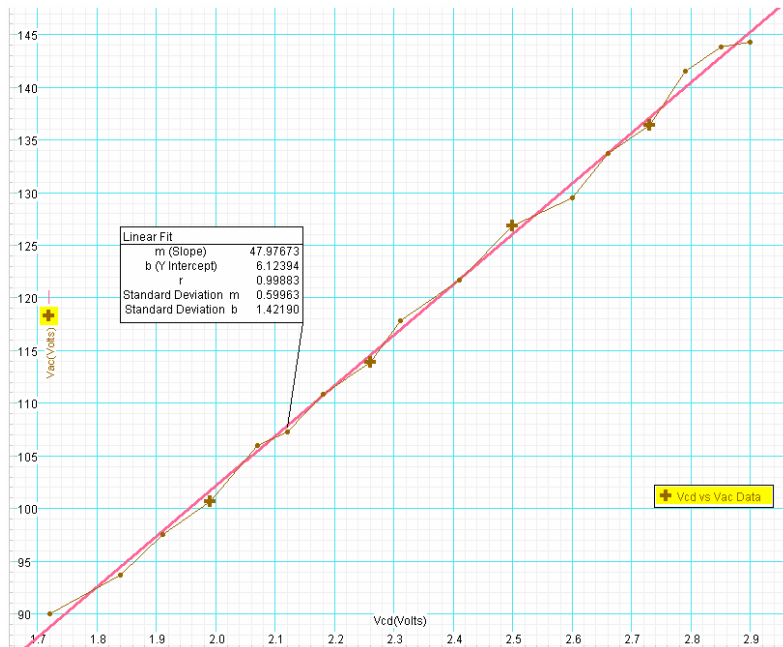


Figura 3.3 Gráfica de la relación Vcd vs. Vac

Para conocer la relación que existe entre estos dos voltajes; Vac y Vcd, los puntos de la gráfica 3.3 han sido ajustados a la ecuación de la recta, dada como:

$$Vac = m Vcd + b \tag{3.1}$$

entonces se tiene que, la pendiente m de la recta es igual a 48, y el valor de b es igual a 6, así la ecuación 3.1 queda como:

$$Vac = 48 Vcd + 6 \tag{3.2}$$

de esta forma se conoce la relación que existe entre los voltajes Vac y Vcd, la cual se utilizará posteriormente.

3.3.1.3. Circuito de conversión digital a analógico

La función de este circuito es convertir la señal digital del microcontrolador a una señal analógica. Posteriormente esta señal es amplificada y acoplada para alimentar al devanado de campo del alternador. Se utiliza el convertidor digital a analógico DAC0832 (U3).

Este convertidor es utilizado en el modo de conversiones continuas, para que la salida analógica continuamente refleje el estado de la entrada digital. Este modo se consigue simplemente conectando a tierra las terminales /CS, /WR₁, /WR₂, /XFER y manteniendo en alto (+5V) la terminal ILE, permitiendo así que los registros internos sigan a la entrada digital aplicada y afecten directamente la salida del DAC [5].

El rango del voltaje de salida del convertidor es configurado estableciendo $V_{max} = 5 \text{ V}$ y $V_{min} = 0 \text{ V}$. El voltaje de salida esta dado por la ecuación 3.3:

$$V_{out} = \frac{D}{256}(V_{max} - V_{min}) + \frac{255}{256}V_{min} \quad (3.3)$$

V_{max} se obtiene de un divisor de voltaje y un seguidor de voltaje conectado a la terminal I_{OUT1}, y $V_{min} = 0$ conectando I_{OUT2} a tierra.

La resolución del convertidor está dada por la ecuación 3.4, así por cada incremento en la palabra de entrada digital del DAC, existe un aumento de voltaje analógico de 19.53 mV. Para una entrada digital de 128_D, el voltaje de salida será de 2.5 V.

$$\Delta = \frac{1}{256}(V_{max} - V_{min}) \quad (3.4)$$

El esquemático de la figura 3.4, muestra que el voltaje de salida del DAC se obtiene de la terminal V_{REF}, el cual posteriormente es amplificado por el siguiente bloque.

Un dato importante que debe mencionarse es que la palabra de entrada digital del DAC corresponde al valor del registro VOLT, y este es enviado por el puerto B del microcontrolador.

3.3.1.4. Etapa de amplificación

La etapa de amplificación está formada por un amplificador no inversor, con una ganancia igual a tres, con lo cual se consigue que el voltaje de salida del DAC, que tiene un rango de 0 a 5 V sea amplificado a un valor de 0 a 15 V, con el propósito de obtener los niveles de voltaje necesarios para excitar al devanado de campo.

Se utiliza uno de los cuatro amplificadores operacionales independientes que contiene el circuito integrado LM324, el cual tiene la característica de operar con una fuente de alimentación unipolar sobre un amplio rango de voltaje.

La ecuación 3.5 expresa la relación de entrada y salida para el amplificador no inversor, así para obtener una ganancia igual a tres, se han conectado las resistencias R_f y R_i de 20 KΩ y 10 KΩ respectivamente, tomando a E_i como el voltaje de entrada (salida del DAC).

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right)E_i \quad (3.5)$$

3.3.1.5. Seguidor de voltaje para cargas inductivas

El seguidor de voltaje esta compuesto por un amplificador operacional de potencia, el LM12, con capacidad de manejar ± 25 V a 10 A, operando con una fuente de ± 30 V. Tiene una capacidad máxima de disipación de 800 W, permite manejar cargas reactivas con gran estabilidad como transductores, actuadores o motores pequeños, sin reducir su capacidad normal [10]. Se emplea la configuración para cargas inductivas, la cual utiliza tres diodos de protección, para evitar que la energía almacenada en la carga (bobina del devanado de campo) dañe al amplificador, dicha configuración se muestra en la figura 3.4.

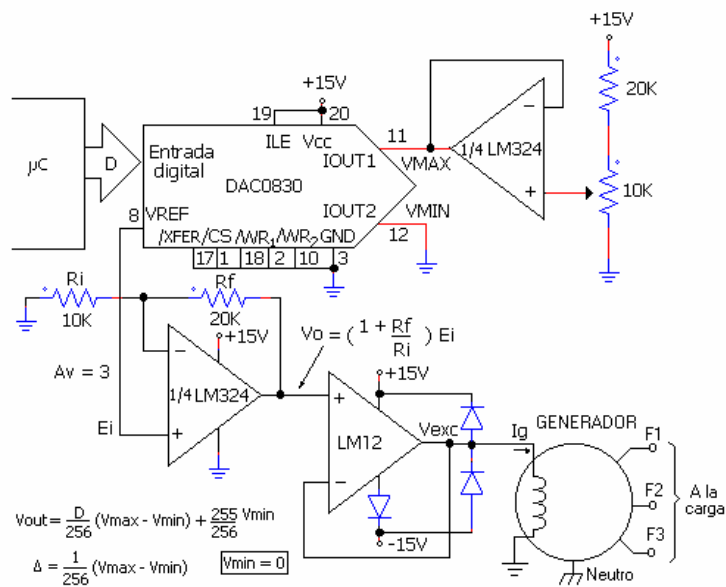


Figura 3.4 Esquemático para la conversión digital a analógica, la etapa de amplificación y el seguidor de voltaje para cargas inductivas

El esquemático completo del regulador de voltaje automático y la fuente de alimentación del sistema se presentan en la figura A1 y A3 del apéndice A, respectivamente.

3.3.2. Caracterización y tiempo de respuesta del alternador

En esta parte, es importante mencionar que dada la naturaleza de la variable a controlar en el regulador de voltaje se ha utilizado un controlador del tipo proporcional.

Sin importar el modo de control en uso, puede decirse que el controlador se encarga de pensar por el sistema completo. El controlador es el que envía las órdenes al dispositivo corrector final con base en su evaluación de la dirección y tamaño del error. Sin embargo, es importante tomar en cuenta una de las características de los procesos industriales, la cual es que estos requieren de una cierta cantidad de tiempo para responder completamente a un cambio en la entrada [18].

El tiempo que el alternador tarda en responder a un cambio en el voltaje de excitación se ha determinado de la siguiente forma: con base en las conexiones de la figura 3.5, se utiliza una fuente de voltaje variable (V_{exc}) para excitar el devanado de campo del alternador, y por medio de un osciloscopio de dos canales se mide el voltaje de CD (V_{cd}) proporcional al voltaje de CA del alternador. La figura 3.6 muestra la gráfica de voltaje con respecto al tiempo obtenida de estas dos señales, donde V_{exc} se incrementa repentinamente (escalón) de 1.2 V a 11.2 V, y V_{cd} lo hace de igual forma de 1.1 V a 2.3 V, solo que a V_{cd} le toma un tiempo aproximado de 800 ms en estabilizarse, lo que significa que un cambio en el voltaje de excitación en el devanado de campo del alternador toma alrededor de 800 ms en responder.

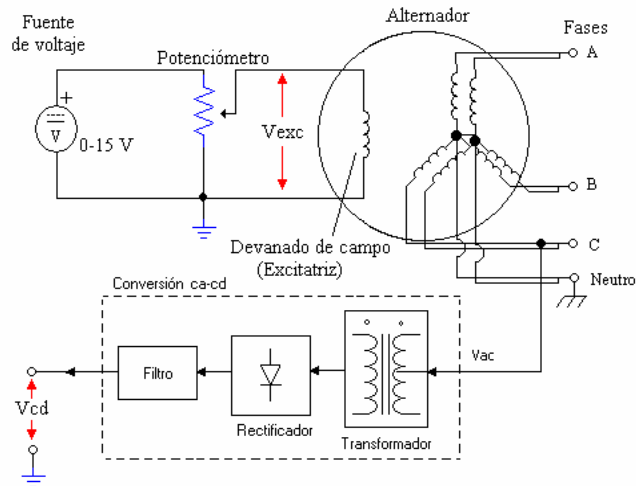


Figura 3.5 Conexiones de la fuente de excitación con el alternador

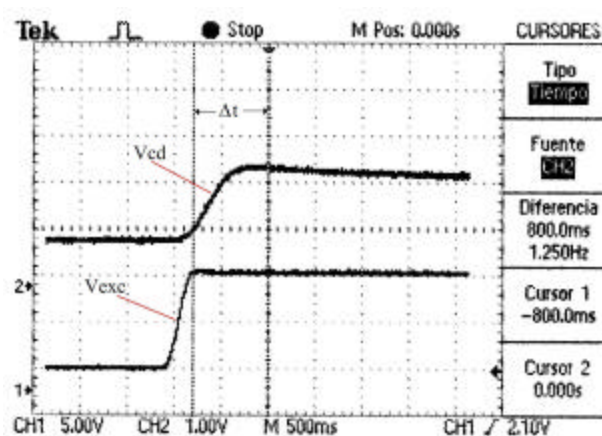


Figura 3.6 Gráfica del voltaje de excitación y el voltaje de CD con respecto al tiempo

Por lo que este tiempo de respuesta ha sido considerado en el programa de control del regulador de voltaje automático, después de hacer un cambio en el voltaje de excitación del devanado de campo del alternador.

Una característica que tiene el regulador de voltaje automático es que el nivel de voltaje de referencia (V_{ref}) puede cambiarse por medio de un potenciómetro, con el propósito de que el ajuste pueda ser más exacto y resulte más práctico, sin requerir que V_{ref} se modifique con la programación del microcontrolador.

Para calcular el error entre V_{cd} y la señal de referencia (V_{ref}), es necesario convertirlas a señales digitales por medio de dos canales del convertidor analógico a digital. El microcontrolador encuentra el error ($e = V_{ref} - V_{cd}$) que se desvía del valor deseado y determina que cantidad de voltaje debe ser aplicada al devanado de campo del alternador, para producir el voltaje de CA deseado. De esta manera se requiere conocer la respuesta del alternador ante cierta corriente aplicada al devanado de campo, es decir, es necesario caracterizar el alternador.

Caracterización del alternador

Para el control del voltaje del alternador, es necesario conocer que nivel de CD se requiere aplicar al devanado de campo, para mantener así el voltaje de salida de CA en su valor nominal de 127 Vac, para esto se ha caracterizado el alternador de la siguiente forma: con base también en la figura 3.5, se conecta una carga fija al alternador, y aplicando un voltaje de CD (V_{exc}) al devanado de campo, se mide por medio de dos voltímetros tanto la corriente de excitación (I_{exc}) como el voltaje de CA (V_{ac}) del alternador, de esta forma se obtiene la relación de V_{exc} vs. V_{ac} , que como era de esperarse, es completamente lineal. La tabla 3.3 muestra los valores obtenidos y la figura 3.7 ilustra la gráfica obtenida de los puntos de dicha tabla.

Tabla 3.3 Caracterización del alternador, V_{exc} , I_{exc} y V_{ac}

V_{exc} (V)	I_{exc} (mA)	V_{ac} (V)
5.84	103	90
6.43	113	93.7
7.02	121	97.5
7.37	134	100.7
7.94	143	106
8.06	154	107.3
8.53	172	110.9
8.88	181	113.9
9.23	193	117.8
9.88	195	122.7
10.4	200	126.8
10.98	218	129.5
11.56	220	133.7
11.91	232	136.4
12.61	241	141.5
13.31	253	143.8
13.41	261	144.3

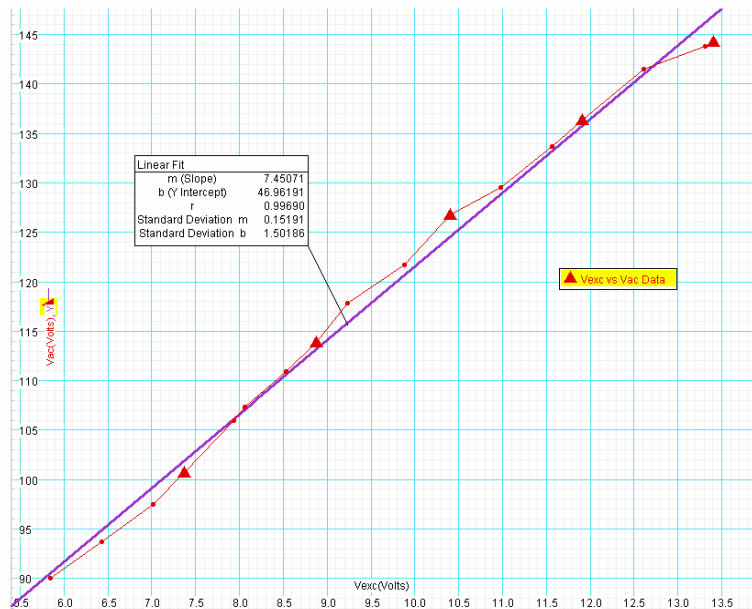


Figura 3.7 Gráfica de V_{exc} vs. V_{ac}

Ajustando los puntos de la gráfica a la ecuación de la recta:

$$V_{ac} = m V_{exc} + b \quad (3.6)$$

se tiene que la pendiente es igual a 7.45, y el valor de b (punto donde cruza al eje de las x's) es igual a 46.96, por lo que:

$$V_{ac} = 7.45 V_{exc} + 47 \quad (3.7)$$

ahora relacionando los términos V_{cd} y V_{ca} de la ecuación 3.2, y los términos de la ecuación 3.7, (para obtener una ecuación que relacione el valor de V_{exc} en función de V_{cd}):

$$V_{ac} = 48 V_{cd} + 6 \quad (3.2)$$

$$V_{ac} = 7.45 V_{exc} + 47 \quad (3.7)$$

y resolviendo para V_{exc} :

$$V_{exc} = 6.44 V_{cd} - 5.5 \quad (3.8)$$

de esta manera se conoce el nivel de voltaje (V_{exc}) que está siendo aplicado en el bobinado de excitación del alternador. Así, por ejemplo si V_{cd} es igual a 2 V, el V_{exc} aplicado es:

$$V_{exc} = 6.44 (2) - 5.5 = 7.384 \text{ V}$$

La operación de la ecuación 3.8, implica operaciones matemáticas tales como restas y multiplicaciones, las cuales pueden acarrear inexactitud debido al número de bits empleados, además de cierto tiempo de procesamiento, por tal razón es preferible una vez que se conoce la respuesta del alternador ante cierto voltaje de excitación, utilizar dos tablas de datos almacenadas en la memoria del programa, la relación entre estas dos tablas es la siguiente:

La primera tabla denominada Tabla VrD contiene los valores posibles de las lecturas del voltaje de CD o V_{cd} , provenientes del lazo cerrado. La segunda tabla llamada Tabla DAC_out contiene los valores posibles de salida del DAC conocido como VOLT (registro de 8 bits enviados por el puerto B hacia la entrada del DAC), los valores de ambas tablas fueron determinados de la siguiente forma.

En el diagrama a bloques de la figura 3.8, se muestran todos los bloques necesarios para el funcionamiento del regulador de voltaje, junto con los nombres de las señales utilizadas. La descripción de estas señales se presenta en la tabla 3.4.

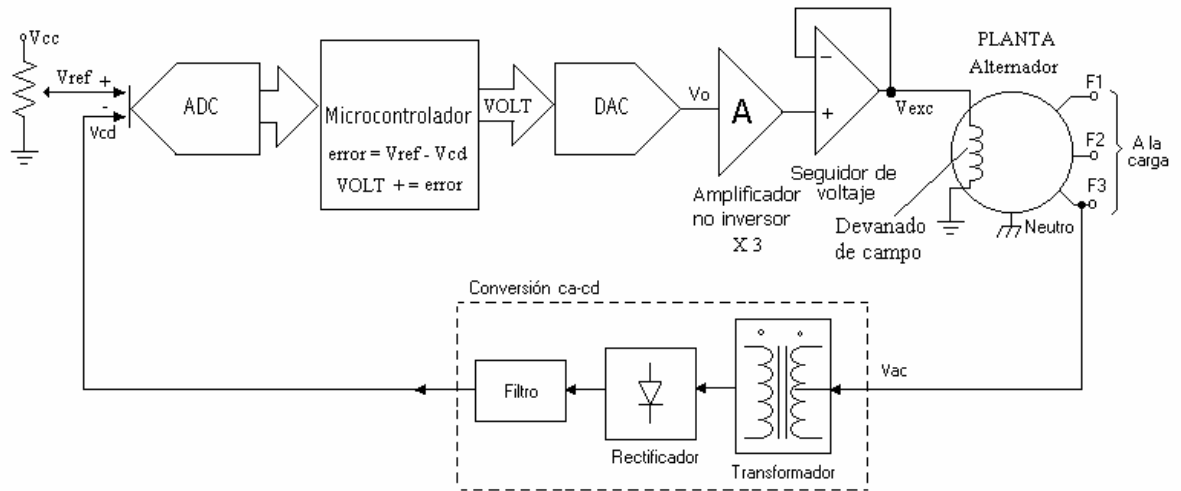


Figura 3.8 Diagrama a bloques del regulador de velocidad automático

Tabla 3.4 Descripción de las señales utilizadas en el regulador de voltaje.

Voltaje	Descripción
Vac	Voltaje generado por el alternador.
Vref	Voltaje de referencia, conectada al canal 1 del ADC.
Vcd	Voltaje proporcional al voltaje de CA del alternador, conectado al canal 2 del ADC.
VOLT	Palabra digital de 8 bits, aplicada a la entrada del DAC, su valor corresponde al error encontrado.
Vo	Voltaje de salida del DAC, correspondiente a la entrada VOLT, donde $V_o = \text{resolución_DAC} * \text{VOLT}$.
Vexc	Voltaje de excitación aplicado al devanado de campo del alternador. ($V_{exc} = 3 V_o$).

Para caracterizar la planta de energía en conjunto con los bloques del regulador de voltaje automático, mostrados en la figura 3.8; se implementó un programa temporal que corregía el error entre V_{ref} y V_{cd} , y después de que el voltaje de salida del alternador se estabiliza, se midieron los voltajes: V_{ac} , V_{ref} , V_{cd} , la palabra VOLT y V_{exc} . El V_{ref} se fue incrementando mediante un potenciómetro, permitiendo obtener los valores obtenidos mostrados en la tabla 3.5. Las mediciones y el procedimiento de dicha caracterización se explican con mayor detalle a continuación:

El programa temporal, es similar al del controlador de velocidad, con un controlador de encendido-apagado, se miden los voltajes V_{ref} y V_{cd} , y dependiendo del valor de V_{cd} con respecto a V_{ref} , el valor de la palabra VOLT es modificado (palabra digital de 8 bits del DAC), de tal forma que si $V_{ref} > V_{cd}$, la palabra VOLT se incrementa en dos unidades, logrando con esto incrementar el voltaje en el devanado de campo, de ahí se realiza nuevamente la lectura y comparación de estas señales, si V_{ref} aún es mayor a V_{cd} , VOLT se incrementa en dos, y así

sucesivamente; de manera opuesta si $V_{ref} < V_{cd}$, VOLT es decrementado en dos unidades, hasta que la relación de V_{ref} y V_{cd} sea igual a cero ($V_{ref} = V_{cd}$).

Tabla 3.5 Valores obtenidos de la caracterización de la planta de energía y el regulador de voltaje.

Voltaje De referencia analógico	Voltaje de Retro-alimentación	Lecturas del ADC de V_{ref} : $D = V_{ref} / \text{resolución}$	Voltaje aplicado al devanado de campo	Voltaje de CA del alternador	Salida hacia el DAC VOLT	Salida hacia el DAC VOLT
V_{ref}	V_{cd}	V_{ref} o V_{cd} (digital)	V_{exc}	V_{ca}	VOLT (HEX)	VOLT (DEC)
1.72	1.72	87	5.84	90	64	100
1.84	1.84	93	6.43	93.7	6E	110
1.91	1.91	97	7.02	97.5	78	120
1.99	1.99	101	7.37	100.7	7E	126
2.07	2.07	105	7.94	106	86	134
2.12	2.12	108	8.06	107.3	8A	138
2.18	2.18	111	8.53	110.9	92	146
2.26	2.26	115	8.88	113.9	98	152
2.31	2.31	117	9.23	117.8	9C	156
2.41	2.41	122	9.88	122.7	A4	164
2.50	2.50	127	10.4	126.8	B2	178
2.60	2.60	132	10.98	129.5	BA	186
2.66	2.66	135	11.56	133.7	C4	196
2.73	2.73	139	11.91	136.4	CC	204
2.79	2.79	142	12.61	141.5	D6	214
2.85	2.85	145	13.31	143.8	E4	228
2.90	2.90	147	13.41	144.3	FE	254

La columna seis “Salida hacia el DAC, VOLT” propiamente dicho, contiene la salida digital (en hexadecimal) del microcontrolador, que es enviada al convertidor digital analógico. Los valores de la columna tres denominada “Lecturas del ADC de V_{ref} ” han sido determinados mediante la ecuación 3.9:

$$D = \frac{V_i}{\text{resolución}} \quad (3.9)$$

donde V_i es el voltaje analógico de entrada del canal 1 correspondiente al voltaje de referencia, D es el valor decimal de la conversión y la *resolución* está dada por la ecuación 3.10:

$$\text{resolución} = \frac{V_{IFS}}{2^n - 1} \quad [\text{V} / \text{LSB}] \quad (3.10)$$

donde V_{IFS} es el voltaje de entrada a escala completa del convertidor y está definido como el voltaje resultante cuando todas las entradas digitales son unos, y n es el número de entradas (8 bits).

Se debe observar que en la tabla 3.5, los valores de V_{ref} y V_{cd} son iguales, debido a que los incrementos de VOLT hacen que V_{cd} siga a V_{ref} , es decir, el error se hace igual a cero.

La gráfica de la figura 3.9 muestra la relación entre VOLT y Vcd (valor de D, tercera columna), donde es posible observar que existe una región donde Vcd ya no se incrementa proporcionalmente, debido a la saturación del devanado del alternador, es decir como Vcd es el voltaje rectificado de Vca, significa que también Vca no aumenta linealmente. Así, ajustando la gráfica a una función lineal, e interpolando se pueden determinar todos los valores posibles de VOLT, en función de incrementos de uno en uno para almacenarlos en las dos tablas utilizadas, “Vr_D” (valores posibles de Vref o Vcd) y “Tabla_DAC_out” (valores posibles de VOLT en función de Vref).

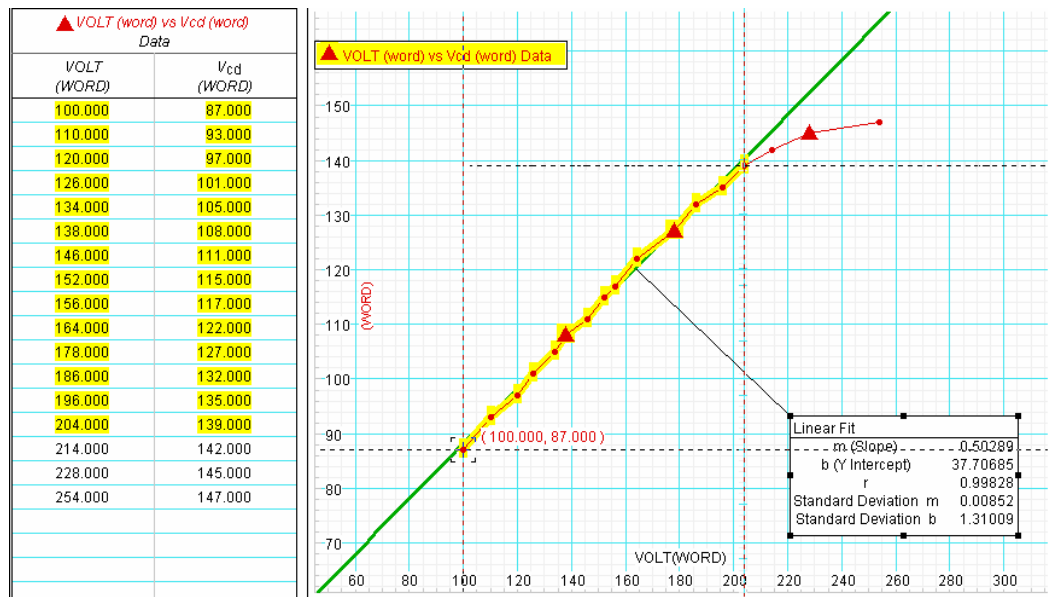


Figura 3.9 Gráfica de VOLT vs. Vcd (palabra)

En esta parte es importante mencionar que la columna siete denominada “Salida hacia el DAC, VOLT”, se midió utilizando leds en la salida del DAC, y esta columna representa los valores que han sido interpolados y almacenados en la tabla “TABLA_DAC_out” del programa del regulador de voltaje automático.

De esta forma cuando el microcontrolador recibe las señales digitales de los voltajes Vref y Vcd los almacena en dos registros, posteriormente estos valores son buscados en la tabla “Vr_D” para conocer el valor de la posición que ocupan, con este nuevo valor ahora es buscado en la tabla “Tabla_DAC_out” el dato que se encuentra en dicha posición, para después determinar el error que existe en ambas señales, y aplicar la diferencia (dado que esta cantidad de error, es un voltaje) al devanado de campo. Todo esto se realiza tomando en cuenta que por cada valor de medición existe un valor específico de salida del valor de VOLT.

Por otro lado, como la palabra de 8 bits es enviada al DAC, tal como se muestra en la figura 3.8, la salida del convertidor denominada Vo, está determinada por la ecuación 3.11:

$$V_o = \text{resolución_DAC} * D \quad (3.11)$$

donde *resolución_DAC* es la resolución del convertidor que se define como la razón del cambio en el voltaje de salida producido por un cambio del bit menos significativo en la entrada digital esta tiene un valor de 19.6 mV, y D es el valor decimal de la entrada digital del DAC, así la *resolución_DAC* se calcula según la ecuación 3.12:

$$resolución_DAC = \frac{V_{OFS}}{2^n - 1} \quad [V / LSB] \quad (3.12)$$

donde V_{OFS} es el voltaje de salida a escala completa del DAC y se define como el voltaje resultante cuando todas las entradas digitales son unos, y n es el número de entradas (8 bits).

Finalmente el voltaje de excitación aplicado al devanado de campo, esta dado por la ecuación 3.13 como:

$$V_{exc} = 3 * V_o \quad (3.13)$$

Cabe señalar que el programa que se describió anteriormente solo sirve para la caracterización de la planta con el regulador de voltaje. El programa final para el regulador de voltaje automático está basado en un controlador proporcional, y para comprender su funcionamiento a continuación se muestra un ejemplo.

Sí se conecta una carga mayor al alternador, el valor medido del voltaje de salida de CA cambia, y el voltaje de CD tomará un nuevo valor. Si el voltaje llega a caer por alguna razón a 100.7 V, el valor de Vcd leído por el ADC es 101_D (columna tres, tabla 3.5), al buscarlo en la tabla “Tabla_VrD” y encontrar la posición que ocupa, se busca nuevamente en “Tabla_DAC_out” el valor que ocupa dicha posición, el cual para este ejemplo tiene un valor de 126_D (columna siete, tabla 3.5), realizándose de la misma forma para Vref, encontrando que tiene un valor de 178_D según la tabla 3.5. De esta forma el error se determina como:

$$error_D = V_{ref} - V_{cd}$$

$$error_D = 178 - 126 = 52_D$$

utilizando la ecuación 3.11, tomando a error_D como D y dado que la resolución del DAC es de 19.6 mV, V_o da:

$$V_o = resolución_DAC * D$$

$$V_o = 19.6 \text{ mV} * 52_D = 1.01 \text{ V}$$

y por medio de la ecuación 3.13, el incremento de voltaje aplicado al devanado de campo es:

$$V_{exc} = 3 * V_o$$

$$V_{exc} = 3 * 1.01 = 3.03 \text{ V}$$

que sumado al V_{exc} que está siendo aplicado de 7.37 V (tabla 3.5), el V_{exc} final es de:

$$V_{exc} = 7.37 + 3.03 \text{ V} = 10.4 \text{ V}$$

De esta forma, se determina que cantidad de voltaje debe sumarse o restarse a la palabra VOLT y el voltaje aumente subsecuentemente de regreso a 127 V. Por tanto, el controlador responde no solo al hecho de que el voltaje medido es demasiado bajo. También responde a la cantidad del error. Entre más grande es el error, más drástica es la acción correctiva.

3.3.3. Algoritmo de control para el regulador de voltaje automático

En general, el programa para el regulador de voltaje automático realiza las siguientes funciones.

- Mide el voltaje proporcional al generado por el alternador (Vcd).
- Busca en la “Tabla_VrD” las posiciones que corresponden a los valores discretos de los voltajes, Vref y Vcd.
- Busca en la “Tabla_DAC_out” los valores de VOLT que corresponden a las dos posiciones encontradas en la búsqueda anterior.
- Realiza la comparación entre los dos valores de VOLT y encuentra el error.
- Ajusta la nueva salida del DAC, en base al error encontrado.
- Despliega el valor de la frecuencia, el valor de referencia (Vref) y el voltaje proporcional al generado por el alternador (Vcd), cada segundo.

A continuación se presentan los diagramas de flujo más relevantes del regulador de voltaje automático, que está implementado en el microcontrolador AT90S8535, el programa está constituido por una función principal mostrada en la figura 3.10. Nuevamente se ha utilizado la bandera B_f_stable, la cual de la misma forma que en el programa del controlador de velocidad; sirve para conocer si la frecuencia del alternador ya alcanzó el valor nominal. Después que el motor es encendido, la frecuencia será menor a 60 Hz (valor de B_f_stable = 00) por lo que el controlador de velocidad se encargará de acelerar al motor de gasolina, mientras que el regulador de voltaje entrega un voltaje fijo al devanado de campo. En el momento que se ha alcanzado una frecuencia igual o mayor a los 60 Hz, el valor de B_f_stable cambia a 01, indicándole al regulador de voltaje que ya debe ajustar el voltaje de excitación, en función del error que encuentre. A partir de este momento el valor de B_f_stable no cambiará, y ambos controladores estarán en operación.

La parte DETECT_FREQ es similar a la parte que corresponde exclusivamente a medir la frecuencia como en el controlador de velocidad, y poder desplegar su valor posteriormente. También se utiliza un registro llamado CNT_DSPLY que es en sí un contador, para hacer que dicho despliegue sea cada segundo y evitar que esta subrutina (DISPLAY) se ejecute cada ciclo y que ésta consuma demasiado tiempo.

La figura 3.11 muestra el diagrama de flujo de la subrutina READ_ADC, la cual se encarga de configurar al ADC, iniciar la conversión y esperar el fin de ésta (interrupción EOC), posteriormente guarda el valor de la lectura del ADC en el registro correspondiente y vuelve a realizar una segunda conversión. Esto se lleva a cabo de la siguiente forma; una vez completa la primera conversión correspondiente a la lectura del canal uno del convertidor, se verifica el valor de DIR (registro de selección de canal del ADC), si el valor de este es 00, entonces el valor de la conversión es guardado en el registro Vref, posteriormente el valor de DIR es incrementado en uno (direccionar el canal 2 del ADC), después se realiza una segunda conversión correspondiente al canal dos, para guardarlo en el registro Vcd, así al término de esta subrutina se conocen los valores tanto de Vref como de Vcd.

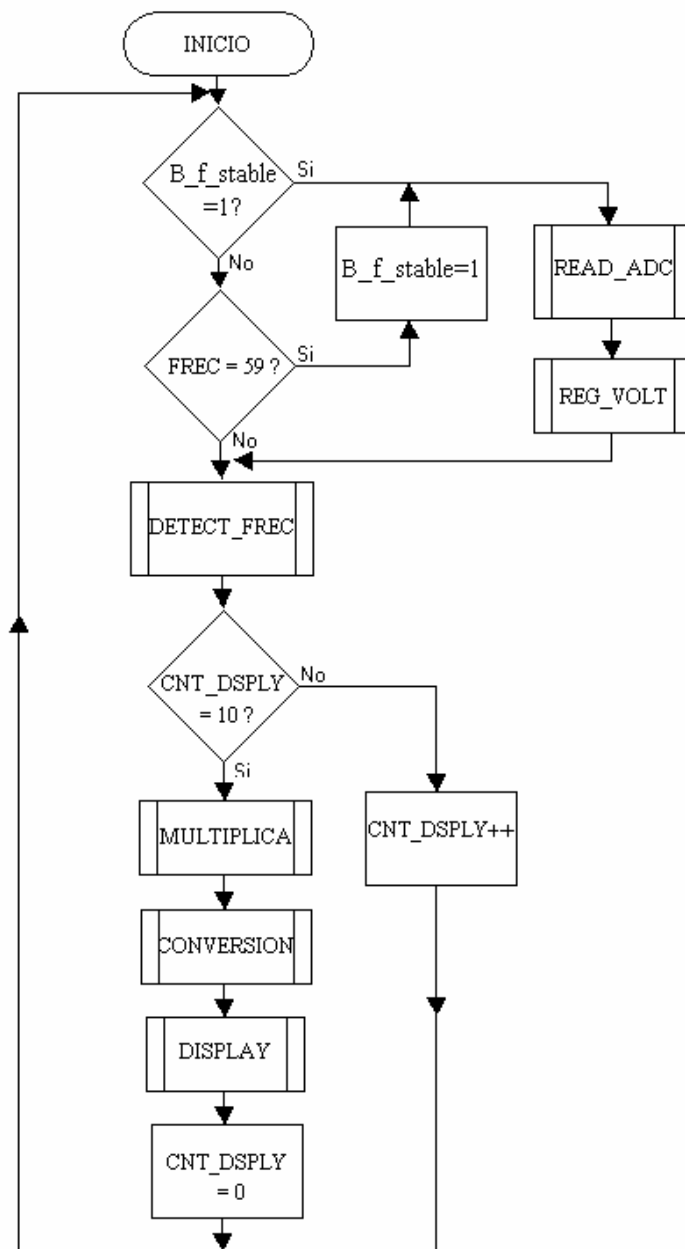


Figura 3.10 Diagrama de flujo de la función principal y el RESET del programa

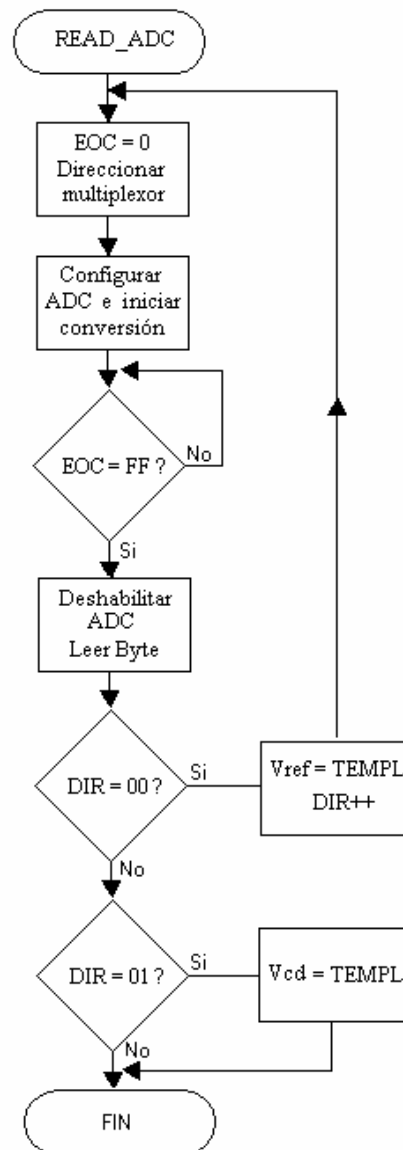


Figura 3.11 Diagrama de flujo de la subrutina READ_ADC

La figura 3.12 muestra el diagrama de flujo de la subrutina REG_VOLT, donde son utilizadas las tablas y está implementado el controlador proporcional. La subrutina inicia buscando en la tabla “VrD” la posición que corresponde al valor de Vcd leído con el convertidor. Para la primera búsqueda se van realizando comparaciones entre Vref y el valor del registro R0 apuntado por el registro Z (registro 30 y 31), cada vez que la parte baja de este apuntador cambia, un contador es incrementado para su uso posterior. Cuando la posición ha sido encontrado, se busca ahora en la tabla DAC_out, el valor que corresponde para esta posición (con el valor del contador) y este es guardado en el registro llamado D_ref, posteriormente se realizan los mismos pasos para encontrar el valor de Vcd que será guardado en D_cd.

Al tener los valores de D_{ref} y D_{cd} , la subrutina REG_VOLT encuentra el error que existe entre estos dos valores, primero determina si el error es positivo o negativo, comparando que registro es mayor, es decir compara si D_{ref} es mayor a D_{cd} entonces el error es positivo, en caso contrario el error es negativo, después encuentra el error de la siguiente forma:

Sí el error es positivo ($D_{ref} > D_{cd}$) entonces calcula lo siguiente:

$$\text{error} = D_{ref} - D_{cd}$$

$$\text{VOLT} = \text{VOLT} + \text{error}$$

pero si el error es negativo ($D_{ref} < D_{cd}$) entonces el cálculo cambia a:

$$\text{error} = D_{cd} - D_{ref}$$

$$\text{VOLT} = \text{VOLT} - \text{error}$$

donde VOLT es el byte enviado al puerto B del microcontrolador, el cual está conectado al convertidor digital a analógico, por último se incluye un retardo de 800 ms con el propósito de esperar la respuesta completa del alternador ante un cambio en su entrada (un cambio en el voltaje de excitación en el devanado de campo).

De esta forma se encuentra el signo y tamaño del error, ya sea para sumarlo al voltaje de salida del actuador sí el error es positivo, pero si el error es negativo entonces éste será restado a dicho voltaje de salida.

3.3.4. Funcionamiento del sistema completo

Después de haber presentado cada una de los bloques que forman al regulador de voltaje automático, se describe en forma general el proceso del sistema completo; constituido por el controlador de velocidad y el regulador de voltaje automático.

Un punto importante que se debe mencionar antes de describir el funcionamiento general; es que la función del regulador de voltaje automático entra en operación hasta que la frecuencia alcanza el valor nominal de 60 Hz, así mientras el motor de gasolina es acelerado para que el alternador genere esta frecuencia, el devanado de campo es excitado con un voltaje fijo proporcionado por el regulador de voltaje automático.

El motor de gasolina es encendido manualmente, el sistema al detectar una señal generada con una frecuencia inferior a los 60 Hz y un voltaje aproximadamente igual a los 127 V inicia el aceleramiento, por medio del actuador con un pulso de accionamiento largo (40 ms), al detectar que la frecuencia está entre el rango de 54 a 59 Hz, el accionamiento ahora se realiza con un pulso corto (15 ms), reduciendo la magnitud de aceleramiento del motor de gasolina. Cuando la frecuencia de la señal alterna esta dentro del rango de 59 a 61 Hz la acción es nula, aunque el sistema continua con el monitoreo de la frecuencia por parte del controlador de velocidad, en este mismo instante es cuando el regulador de voltaje automático entra en operación, realizando las lecturas del voltaje de referencia y el voltaje de la variable a controlar (voltaje de CA), posteriormente encuentra el error y ajusta el voltaje para producir la corriente necesaria en el devanado de campo y el alternador genere el voltaje nominal.

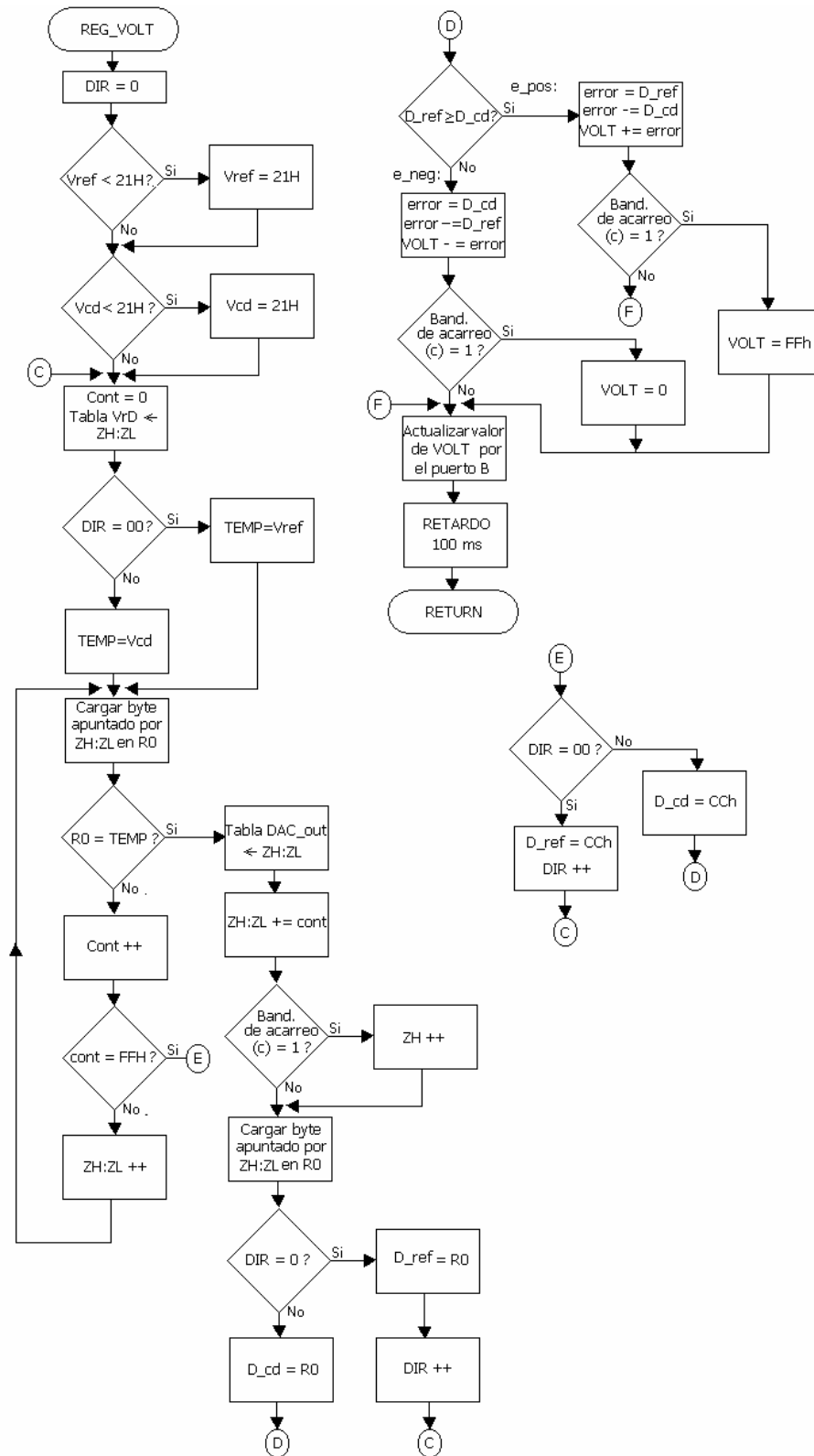


Figura 3.12 Diagrama de flujo de la subrutina REG_VOLT

Es así como el sistema completo monitorea continuamente la frecuencia y el voltaje, así en caso de que exista algún cambio debido a la conexión o desconexión de una carga, se detectará inmediatamente, realizando el ajuste necesario, para mantener ambas variables en su valor deseado.

Por otro lado, sí el motor de gasolina es apagado; el controlador detectará una frecuencia igual a cero y hará que el actuador del controlador de velocidad regrese el acelerador a la posición inicial, así la próxima vez que se desee encender éste permanezca acelerado al mínimo para su correcto encendido, además de que el voltaje de excitación se hace igual a cero para evitar que el devanado de campo permanezca alimentado. Aunque este procedimiento requiera que el sistema sea reiniciado la siguiente vez que se utilice.

Por último, los programas de control están almacenados en la memoria FLASH de cada microcontrolador, estos fueron desarrollados en lenguaje ensamblador mediante el programa AVR Studio v3.53 de ATMEL, el cual proporciona las herramientas necesarias para la elaboración y depuración del programa.

Con este capítulo se termina el diseño y construcción de los dos controladores, se presentó la descripción del sistema completo, el controlador de velocidad y el regulador de voltaje automático encargados de mantener la frecuencia y el voltaje de CA del alternador en su valor nominal, respectivamente, ante los cambios bruscos de carga en el alternador.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se describen las pruebas y los resultados obtenidos en la operación del sistema, se realiza una comparativa entre el funcionamiento del alternador sin regulador de voltaje automático (voltaje fijo) y únicamente la operación del controlador de velocidad; contra la operación de la planta con ambos controladores, se muestra también el voltaje obtenido durante el arranque en vacío del alternador, y los resultados de las pruebas más importantes; la conexión y desconexión de cargas. Por último, se presenta la tarjeta de circuito impreso que integran al sistema de control y su instalación.

4.1. Pruebas y resultados

A la planta se le realizaron pruebas mediante la conexión de cargas ficticias, utilizando reflectores de halógeno, los cuales fueron conectados como se muestra en el diagrama de conexión de la figura 4.1. Seis de estos reflectores son de 500 W y requieren una alimentación de 127 V, por lo que están conectados en estrella (fase y neutro), otros tres son de 1000W y requieren ser alimentados con 220 V, en una conexión delta.

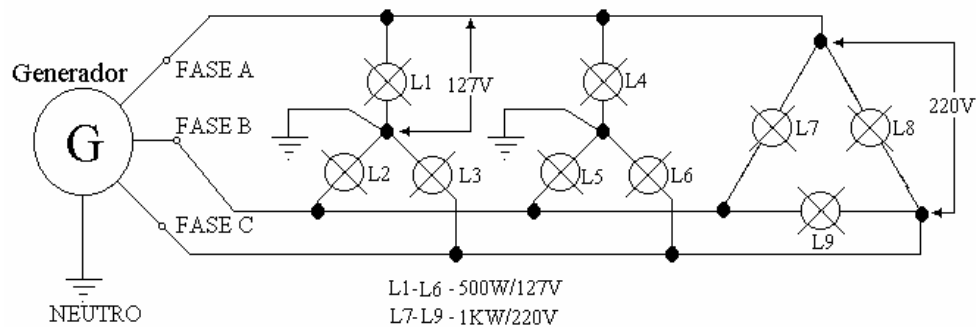


Figura 4.1 Diagrama de conexión de las cargas conectadas a la planta

La tabla 4.1 muestra la relación de alimentación y consumo de cada uno de estos reflectores.

Tabla 4.1 Valores de alimentación y consumo de las cargas utilizadas.

Lámpara	Potencia (W)	Voltaje de alimentación	Consumo c/u (A)
L1 – L6	500 W	127 V	3.93
L7 – L9	1000 W	220 V	4.54

Las mediciones fueron realizadas con el Analizador de Calidad de Energía FLUKE 43, el cual permite observar las fluctuaciones de voltaje con respecto al tiempo.

Para observar los resultados obtenidos se realizaron pruebas de conexión y desconexión de cargas de dos formas o modos de operación: El primer modo es con el alternador funcionando sin regulación de voltaje (voltaje de excitación fijo) y controlando solo la frecuencia mediante el controlador de velocidad. El segundo modo es con la operación de ambos controladores.

4.1.1. Funcionamiento con regulación de frecuencia y sin regulador de voltaje

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el alternador funcionando con el voltaje de excitación fijo y controlando la frecuencia con el controlador de velocidad. En la parte superior de la figura 4.2, se muestran las fluctuaciones con respecto al tiempo que sufre el voltaje del alternador, y en la parte inferior están los incrementos de corriente con respecto al tiempo. Es posible notar que las variaciones en voltaje son muy grandes y tiene una gran inestabilidad. Además una vez que el voltaje es estable; el nivel de voltaje no es el valor deseado (127 Vrms).

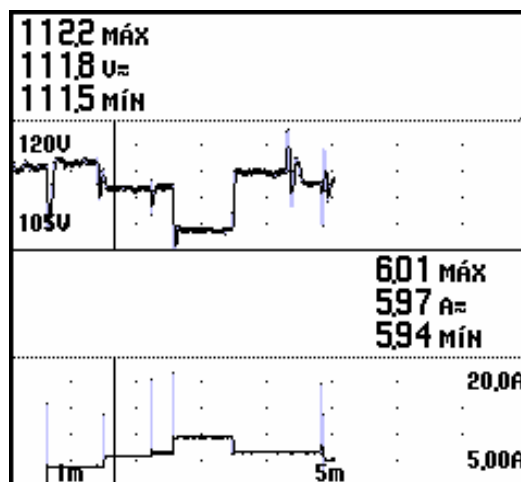


Figura 4.2 Funcionamiento del alternador con voltaje de excitación fijo y el controlador de velocidad

4.1.2. Funcionamiento con ambos controladores

La figura 4.3 muestra las variaciones del voltaje con ambos controladores. En los puntos 1 y 2 se observa la operación del alternador en vacío, cuando éste es inicialmente accionado. En el punto numero 3 se tienen las variaciones que sufre el voltaje al conectar las cargas en el orden mostrado en la tabla 4.2. Nuevamente, en la parte inferior de la figura se muestran los incrementos de la corriente durante la conexión de las cargas.

Tabla 4.2 Valores de alimentación, consumo de las cargas y secuencia de conexión.

Lámpara	Potencia (W)	Voltaje de alimentación	Consumo c/u (A)
1	1000 W	220 V	4.54
2	1000 W	220 V	4.54
3	1000 W	220 V	4.54
4	500 W	127 V	3.93
5	500 W	127 V	3.93

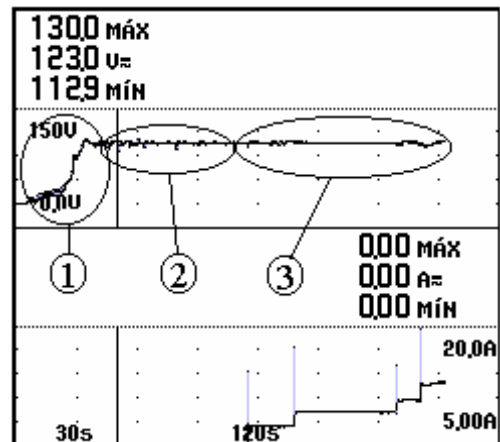


Figura 4.3 Funcionamiento del alternador 1) Arranque, 2) operación en vacío (sin carga), 3) conexión de cargas.

La figura 4.4 muestra otra prueba realizada de la conexión y desconexión de cargas, con base en la tabla 4.2, el orden de estas es de la siguiente manera: 4, 1, 2, 3 y 5.

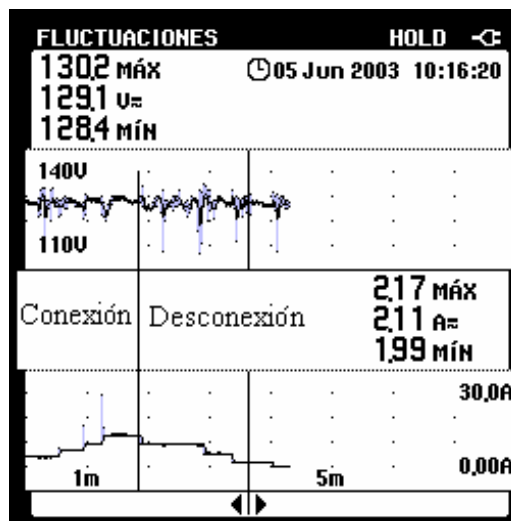


Figura 4.4 Fluctuaciones del voltaje generado con respecto al tiempo, al momento de conexión y desconexión de cargas.

En la gráfica anterior es posible notar la variación que sufre el voltaje en el momento de conectar cargas al sistema. Aún cuando el tiempo de establecimiento es de unos segundos, es posible notar que las variaciones de voltaje están dentro de las especificaciones de C.F.E. de $\pm 10\%$.

Una de las características importantes de la planta es el comportamiento ante la desconexión de cargas. Para observar el comportamiento de la planta de energía en conjunto con el sistema de control, dichas cargas fueron desconectadas en base a la tabla 4.2, de la siguiente manera: 2, 3, 4, 1 y 5, en la figura 4.5 se muestra la gráfica obtenida de las fluctuaciones ante la desconexión de las cargas.

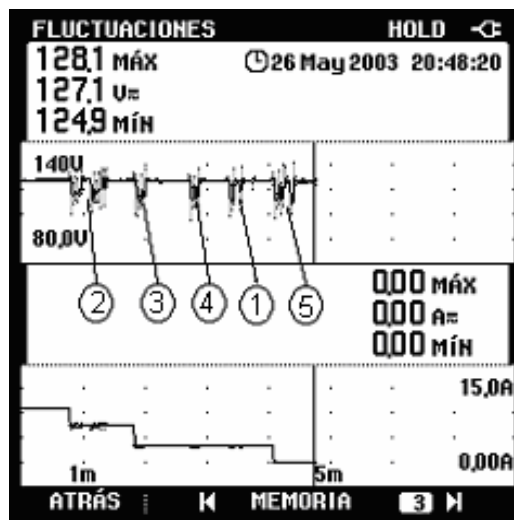


Figura 4.5 Fluctuaciones del voltaje generado al momento de desconectar las cargas

Es posible notar que la variación del voltaje en el momento de desconectar las cargas, muestra oscilaciones, debido principalmente a la desviación del valor deseado de la frecuencia. Es importante mencionar que la corriente que se aprecia en la gráfica es la de una fase.

Con base en la relación directa entre la frecuencia y el voltaje con la velocidad del rotor (variables acopladas), los resultados obtenidos en el control de la frecuencia por el momento no son satisfactorios, debido a que el desempeño del motor de gasolina no cubre con los requisitos necesarios, ya que al conectar una carga grande (3 KW), la velocidad del motor disminuye, entregando una frecuencia de 53 Hz, pero gracias a la implementación de los dos pulsos de accionamiento del controlador de velocidad, en un intervalo de 2.5 segundos se vuelve alcanzar la frecuencia nominal. De forma similar al desconectar una carga grande la frecuencia se incrementa a 68 Hz, pero también en un intervalo corto son alcanzados los 60 Hz. La figura 4.6 muestra la gráfica de las variaciones de la frecuencia al conectar y desconectar una carga. Dicha gráfica fue obtenida a partir de las observaciones de la frecuencia en el LCD y el tiempo en que se alcanzan los 60 Hz.

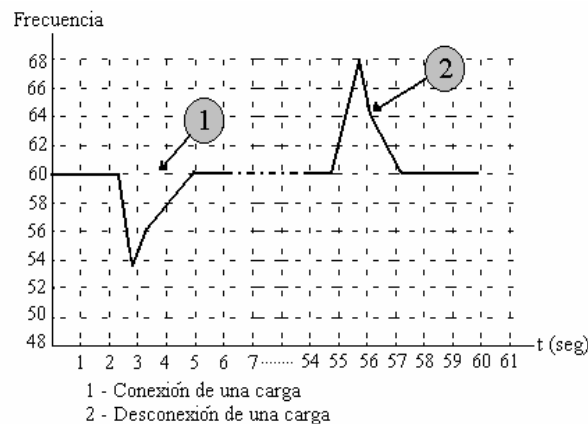


Figura 4.6 Gráfica de las variaciones de la frecuencia vs. tiempo

El alternador, se encuentra conectado a una parte del centro de carga (lugares estratégicos de la Universidad), los valores de consumo de corriente de la carga real a la que se provee de energía eléctrica, se muestran en la siguiente tabla. Se presentan, la suma de las corrientes con y sin alumbrado público, aunque a simple vista se puede observar que no existe un balance en la conexión de dichas cargas. Por lo que puede representar un problema en el desempeño del alternador. Por último, los reflectores utilizados en las pruebas representan el 42.77% de la carga real, incluyendo el alumbrado público.

Tabla 4.3 Consumo de corriente de la carga real.

Carga	FASE A	FASE B	FASE C
Alumbrado público	11.6 A	11.1 A	
Red	6.1 A		6.4 A
Alumbrado salas computo		1.5 A	11 A
Rectoría	0.4 A	7 A	4.3 A
Total (con alumbrado público)	18.1 A	19.6 A	21.7 A
Total (sin alumbrado público)	6.5 A	8.5 A	21.7 A

4.2. Tarjeta de circuito impreso del sistema de control

Todo el sistema de control, tanto el controlador de velocidad como el regulador de voltaje automático se diseñó y construyó en una misma tarjeta, la cual contiene los siguientes bloques:

A. Microcontrolador AT90S8535, regulador de voltaje automático	H. Ajuste de V_{ref}
B. Microcontrolador AT90S2313, controlador de velocidad	I. Ajuste del nivel de V_{cd}
C. Detector de cruce por cero	J. Etapa de amplificación.
D. DAC0832	K. Seguidor de voltaje, LM12.
E. LMD18200, Puente H	L. Fuente de alimentación.
F. Conexiones para el devanado de campo, el motor de CD y el detector de posición.	M. LCD
G. Conexiones para el LCD.	

La figura 4.7 presenta la tarjeta de circuito impreso del sistema de control:

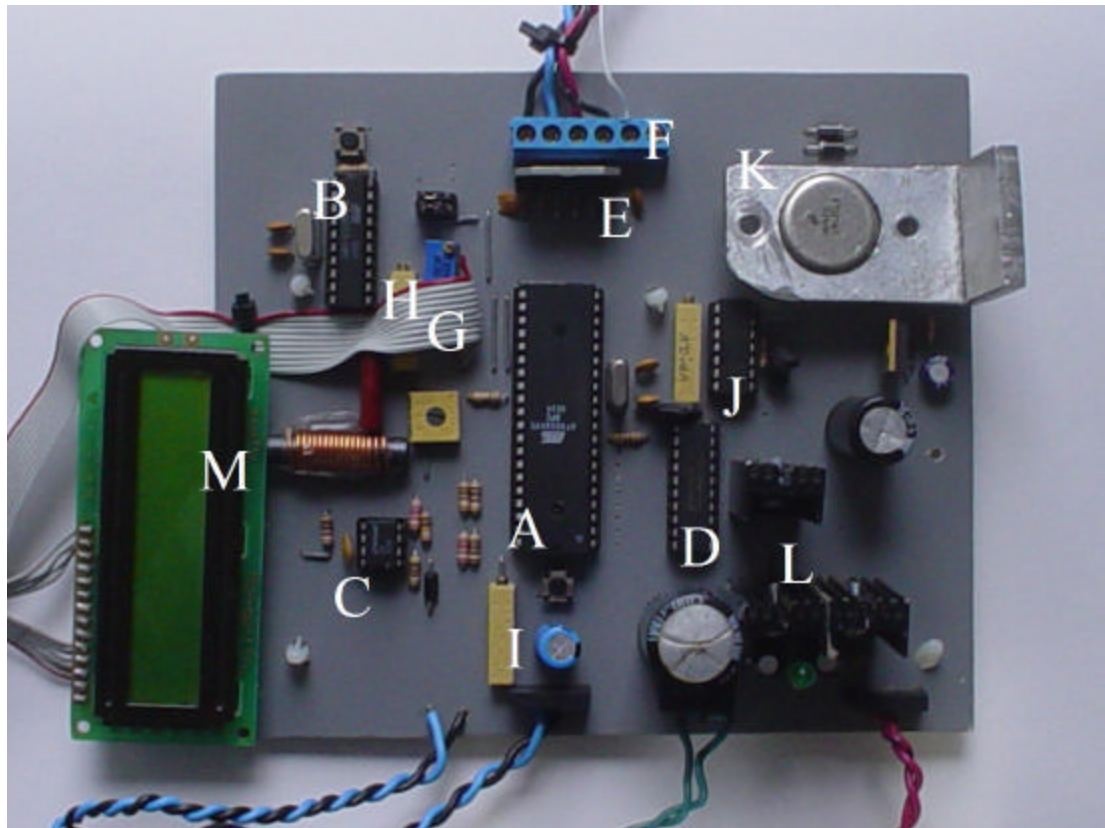


Figura 4.7 Tarjeta de control

El diagrama electrónico del sistema de control fue elaborado con el programa ORCAD 9.1, éste se presenta en el apéndice A. El diseño del circuito impreso fue elaborado con el programa PROTEL 99 SE, y éste se presenta en el apéndice C, al igual que la lista del material utilizado en el apéndice B.

El sistema de control requiere de los siguientes niveles de voltaje para su funcionamiento: ± 24 , $+15$ y $+5$ V, como se trata de un sistema que controla a una planta de energía eléctrica y ésta es operada cuando el suministro de energía se interrumpe, además que solo se cuenta con $+12$ V de la batería del motor de gasolina, se prefirió utilizar un sistema de respaldo de energía o UPS (Uninterrupt Power Source) en vez de un banco de baterías, para poder alimentar al sistema de control. En el apéndice C se incluye el manual de operación y el diagrama de las conexiones eléctricas del UPS y demás elementos del sistema de control.

4.3. Instalación del sistema de control

El sistema de control completo se instaló en un gabinete para su utilización. La figura 4.8 muestra la vista frontal de éste y la forma en como ha sido montado.



Figura 4.8 Vista frontal del gabinete

La figura 4.9 presenta las conexiones del LCD y del voltímetro analógico.



Figura 4.9 Vista inferior del gabinete

En la siguiente figura se presenta el interior del gabinete, donde aparece la tarjeta de control, y los transformadores para las fuentes de alimentación.



Figura 4.10 Interior del gabinete

La figura 4.11 muestra la instalación completa, junto con el UPS que sirve para alimentar al sistema de control. Por último, la figura 4.12 presenta una vista general de la planta de energía junto con el sistema de control instalado.



4.11 Instalación completa



4.12 Vista general de la planta de energía eléctrica y el sistema de control instalado

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

5.1. Conclusiones

Se diseñó y construyó un sistema de control automático, con el cual se logra automatizar y optimizar el funcionamiento de la planta generadora de energía eléctrica de la UTM. El sistema automático controla tanto la frecuencia como el voltaje de salida de un generador trifásico, con la implementación de dos reguladores.

El control, se encarga de mantener las dos variables en sus valores nominales establecidos, para cualquier régimen de carga dentro de los límites de operación.

El controlador de velocidad es un controlador del tipo encendido-apagado basado en el microcontrolador AT90S2313. Por otro lado el regulador de voltaje automático está formado por un controlador proporcional, implementado con el microcontrolador AT90S8535.

Para la etapa de pruebas del sistema con el alternador, se utilizaron reflectores como cargas con un consumo de 25.41 A, que abarca un 42.77% de la carga real de los circuitos de uno de los centros de carga de la UTM.

Aún cuando el tiempo de establecimiento es de unos segundos, es posible notar que las variaciones de voltaje están dentro de las especificaciones de C.F.E. de $\pm 10\%$.

Este trabajo permitirá, realizar modificaciones futuras para obtener una respuesta más rápida en el tiempo de establecimiento bajo condiciones cambiantes, mediante la implementación de nuevos algoritmos de control (PD, PID, etc.) en el sistema realizado.

El diseño del circuito impreso tanto del controlador de velocidad como el regulador de voltaje automático se han construido en la misma tarjeta. Ésta contiene los bloques de los dos controladores; los dos microcontroladores, un DAC, el puente H, la etapa de potencia del regulador de voltaje, el detector de cruce por cero, la fuente de alimentación bipolar y las conexiones para el LCD.

Este sistema de regulación constituye una base fundamental para continuar con un trabajo más complejo en sistemas de regulación como lo es sincronizar el alternador a la red eléctrica y diseñar para este caso, en forma digital, la compensación de reactivos hacia la red.

La forma de proveer el voltaje de CD al devanado de campo resulta ser simple y fácil de utilizar, ya que de esta forma se ha desistido de utilizar un regulador de voltaje con base a tiristores.

El sistema permite tener el control sobre el voltaje de referencia, el cual inicialmente es el nominal, obviamente dentro de valores adecuados; este cambio de nivel se hace modificando

el voltaje de referencia o set-point. Otra característica del sistema es que éste además despliega en el LCD, el valor de la frecuencia en tiempo real, de esta forma se puede conocer su valor actual, sin requerir de instrumentos de medición. Otros valores que también se despliegan son; los voltajes leídos por el ADC; el valor de referencia (V_{ref}) y el voltaje de CD proporcional al generado por el alternador (V_{cd}). En cuanto a la medición del voltaje de CA del alternador, esta se realiza de manera directa, por medio de un voltímetro analógico.

5.2. Perspectivas

Para lograr una variación menor de la frecuencia al momento de conectar cargas mayores a 3KW, se puede implementar un controlador proporcional para el controlador de velocidad, en base a la utilización de un codificador (encoder) como transductor, utilizando la relación de la velocidad de giro con la posición del codificador. De esta forma se determina la velocidad actual del motor y se encuentra el error que existe con el valor deseado (60 Hz, 1800 r.p.m.), para que el actuador acelere o desacelere al motor de gasolina.

Una forma de lograr que el desempeño del motor de gasolina no afecte las variaciones de la frecuencia e incluso evitar que éste se encuentre muy acelerado cerca del punto necesario (1800 r.p.m.), es cambiar la relación de transferencia de las poleas entre el motor de gasolina y el alternador, haciendo que la relación sea 2:1 (motor-alternador) por citar un ejemplo; la velocidad del motor solo deberá ser de 900 r.p.m. para que el alternador tenga el doble de esta velocidad (1800 r.p.m.). Es decir; para la polea del generador existe una relación de 15 r.p.m. por Hz, y para la polea del motor la relación es el doble, 30 r.p.m. por Hz. Así al conectar una carga y suponiendo que la frecuencia disminuye a 53 Hz, significa que el alternador está accionado a 1590 r.p.m. ($53 \text{ Hz} * 30 \text{ r.p.m.}$), mientras que el motor debido a la relación de transferencia está a 795 r.p.m. ($53 \text{ Hz} * 15 \text{ r.p.m.}$), entonces el error en relación a la velocidad de la polea del motor es igual a $900 - 795 = 105 \text{ r.p.m.}$, lo cual significa que con un incremento menor en la posición del acelerador; se ajustará a la frecuencia deseada también en un tiempo menor.

Otras características o funciones que pueden ser añadidas son: medidores de nivel de aceite, gasolina, presión y temperatura, para prever el correcto funcionamiento de la planta de energía eléctrica. Además de poder implementar la opción de que el arranque sea automático.

REFERENCIAS

- [1] AT90S2313 datasheet, 8 bit RISC Microcontrollers Data Book, Atmel Co, 1997.
- [2] AT90S8535 datasheet, 8 bit RISC Microcontrollers Data Book, Atmel Co, 2001.
- [3] Benjamín C. Kuo, Sistemas de control automático, Séptima edición, Editorial Prentice-Hall, 1996.
- [4] Benjamín C. Kuo, Sistemas de control digital, Editorial CECSA, 1996.
- [5] DAC0832 datasheet, National Data Acquisition Databook, página 3-38.
- [6] Electrónica de potencia, Sistemas de control de redes AC, Manual del estudiante, Lab-Volt
- [7] George Loveday, Manual de electrónica para Ingenieros, Trillas, 1982.
- [8] IEEE Std. 421.5-1992, Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.
- [9] LMD18200 datasheet, National power ICs Databook, página 4-44.
- [10] LM12 datasheet, National power ICs Databook, página 4-4.
- [11] Peter Buban, Marshall L. Schmitt, Electricidad y electrónica básicas, conceptos y aplicaciones - Understanding Electricity And Electronics, Mc Graw-Hill, 1982.
- [12] Reglamento de la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica, CAPÍTULO V - Del suministro y la venta de energía eléctrica, publicado en el DOF del 31 de mayo de 1993.
- [13] Robert Rosenberg, Reparación de motores eléctricos, Ediciones G. Gili, 1970.
- [14] SELMEC-ONAN, Manual de operación y mantenimiento de plantas eléctricas.
- [15] Theodore Wildi, Electrical machines drives, and power systems, Fifth Edition, Editorial Prentice-Hall, 2000.
- [16] Van Valkenburgh, Nooger & Neville, Inc., Electricidad básica Vol. 5, Editorial CECSA, 1990.
- [17] Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Cuarta edición, Editorial Prentice-Hall, 1993.
- [18] Timothy J. Maloney, Electrónica Industrial Moderna, Tercera Edición, Editorial Prentice-Hall, 1997.

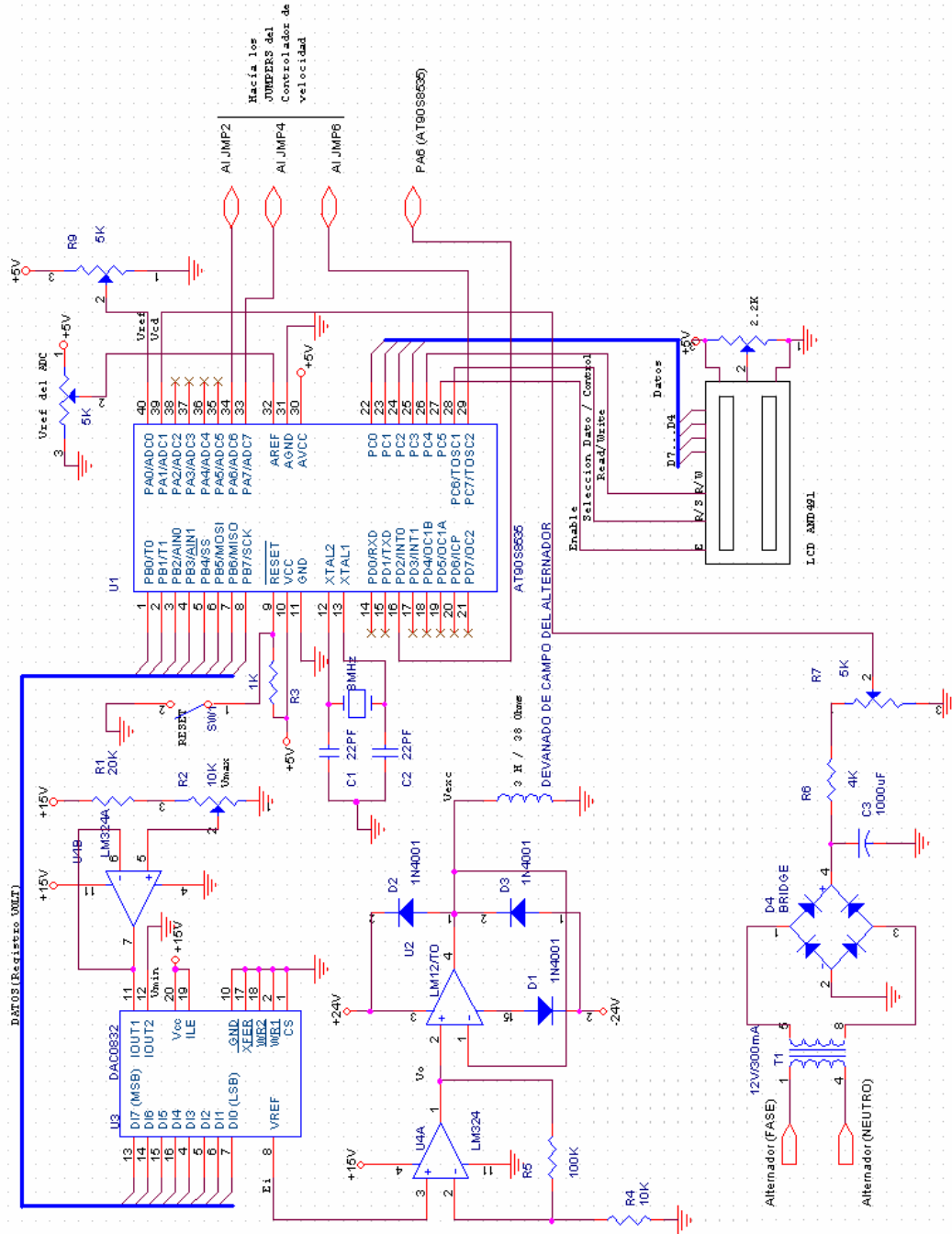
-
- [19] William H. Hayt, Jr. / Jack E. Kemmerly, Análisis de circuitos en ingeniería, Cuarta edición, Editorial Mc Graw-Hill, 1992.

Sitios de Internet

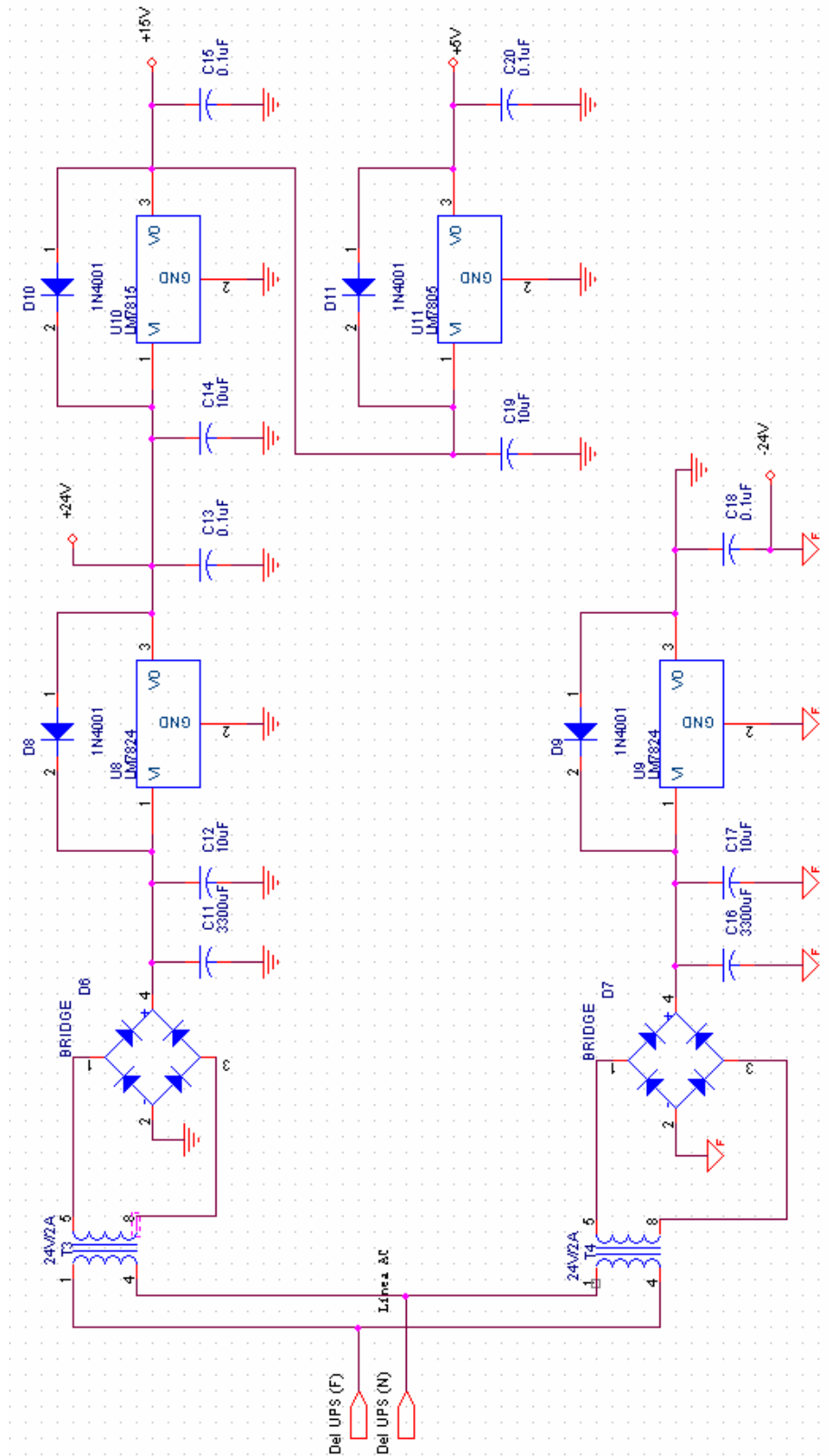
- [URL 1] <http://aniversario.unet.edu.ve/mipv/ce/ce02.htm>, “Página que proporciona información acerca de los generadores eléctricos”, fecha de última consulta: Julio de 2003
- [URL 2] <http://www.grupozug.com.br/ENGEL/gg5.doc>, “Documento con información acerca de motores y generadores obtenida de la página dedicada a la ingeniería eléctrica”, fecha de última consulta: Julio de 2003
- [URL 3] http://mailweb.udlap.mx/~lvazquez/cursos/ie-440/IE-440_Prac-2.pdf, “Practica del control de dos posiciones on/off, del Laboratorio de Teoría de Control de la Universidad de las Américas, Puebla”, fecha de última consulta: Julio de 2003.
- [URL 4] Control de frecuencia de una mini-hidroeléctrica operando en modo aislado / <http://www.uo.edu.cu/fac/fie/info/articulos/ControlFrec.pdf>, “Página del departamento de Informática de la Universidad de Oriente, Cuba”, fecha de última consulta: Julio de 2003.
- [URL 5] <http://medusa.unimet.edu.ve/mecanica/fpim16/>, “Página que proporciona información de diseño mecánico, Universidad Metropolitana, Venezuela”, fecha de última consulta: Octubre de 2003.

APÉNDICE A

Diagrama electrónico de la tarjeta de control



A1. Regulador de voltaje automático



A3. Fuente de alimentación

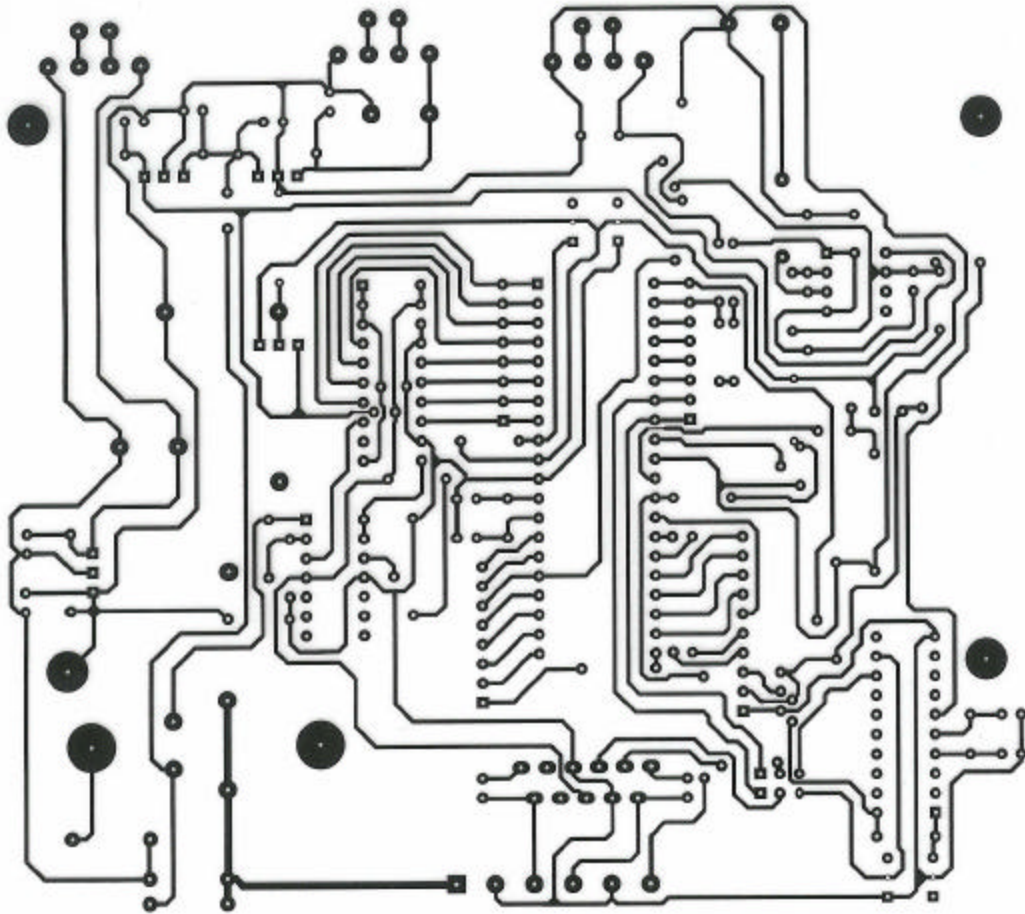
APÉNDICE B

Lista de material

Tipo	Cantidad	Referencia	Parte
1	4	C1,C2,C5,C6	22 pF
2	1	C3	1000 uF
3	1	C4	0.1 uf
4	1	C7	330 uF
5	1	C8	1 uF
6	2	C9,C10	10 nF
7	2	C11,C16	3300 uF
8	4	C12,C14,C17,C19	10 uF
9	4	C13,C15,C18,C20	0.1 uF
10	8	D1,D2,D3,D5,D8,D9,D10, D11	1N4001
11	3	D4,D6,D7	Puente de diodos
12	6	JP1,JP2,JP3,JP4,JP5,JP6	Jumper
13	1	MG1	Motor de CD
14	1	R1	20 K Ω
15	2	R4,R2	10 K Ω
16	4	R3,R11,R14,R15	1 K Ω
17	2	R5,R12	100 K Ω
18	1	R6	4 K Ω
19	3	R7,R9,R10	5 K Ω
20	1	R8	5 K Ω
21	1	R13	500 Ω
22	3	SW1,SW2,SW3	Interruptor N.A.
23	1	T1	12V/300mA
24	1	T2	9V/500mA
25	2	T3,T4	24V/2A
26	1	U1	AT90S8535
27	1	U2	LM12
28	1	U3	DAC0832
29	1	U4	LM324
30	1	U4	LM324A
31	1	U5	AT90S2313
32	1	U6	LM311
33	1	U7	LMD18200
34	2	U8, U9	LM7824
35	1	U10	LM7815
36	1	U11	LM7805
37	2	Y2,Y1	8MHz

APÉNDICE C

Diseño del circuito impreso de la tarjeta de control



C1. Circuito impreso de la tarjeta de control

APÉNDICE D

Manual de operación

Tabla de Contenido

SECCION	TITULO	PAGINA
1	INTRODUCCIÓN	1
2	ESPECIFICACIONES	II
	Especificaciones de la planta de energía eléctrica	
	Especificaciones del sistema de control	
3	INSTALACIÓN	III
	Tablero de control	
	Interior del tablero de control	
	Conexiones eléctricas	
4	FUNCIONAMIENTO	V
	Generalidades	
	Revisiones previas al arranque	
	Arranque	
	Parada	
	Funcionamiento sin carga	
	Periodo de operación	
5	AJUSTES	VI
	Ajuste del voltaje	
	Ajuste de la frecuencia	
6	LOCALIZACIÓN DE AVERIAS	VII

Importante

Se sugiere primero conectar las cargas de iluminación y después de que el voltaje y la frecuencia están dentro de sus valores nominales, se puede conectar las cargas que son sensibles a las variaciones. La conexión instantánea de una carga debe ser menor a los 3 KW.

Sección 1. Introducción

El sistema de control del generador, está diseñado para ser usado como controlador de velocidad y regulador de voltaje automático, los cuales permiten regular el voltaje y la frecuencia de la planta de energía eléctrica, manteniéndolos en su valor nominal de 127V/60Hz, respectivamente, independientemente de la carga que se le conecte.

ESTE MANUAL

Este manual contiene información general sobre el funcionamiento y el mantenimiento de la unidad alternador-motor. Leer este manual y tomar nota de todas las precauciones y advertencias. El uso apropiado y mantenimiento regular pueden resultar en una duración prolongada, rendimiento mayor y funcionamiento más seguro de dicha unidad.

Sección 2. Especificaciones

Tabla 1. Especificaciones de la planta de energía eléctrica (motor-alternador).

Característica	Valor
Motor	
Marca	Volkswagen
Potencia bruta a 1800 r.p.m	30 HP
r.p.m. máx.	3500
Sistema eléctrico	
Voltaje de arranque	12 Vcc
Batería	12 Vcc
Sistema de enfriamiento	Por aire
Sistema de lubricación	
Tipo de aceite	SAE 15W40
Generador	
Fases	3
Frecuencia	60 Hz
Potencia nominal	6.66 KW
Conexión	Delta alta en serie
Polos	4
Voltaje	127 /254
Corriente máxima	65.6 A / 32.8 A
KVA a FP de 0.8	8.33 KVA

Tabla 2. Especificaciones del sistema de control.

Característica	Valor
Voltaje de entrada	127 V/60 Hz
Voltaje de salida del regulador de voltaje automático	0-13.5 Vcd
Ajuste de voltaje externo	Si

Sección 3. Instalación

TABLERO DE CONTROL

A continuación se describe la función y operación del sistema para el control del alternador-motor.

La figura 1 muestra la apariencia física de la tarjeta de control contenida en el gabinete. Para ofrecer al operador datos de frecuencia y voltaje de la señal generada, así como ajustar el punto de referencia de voltaje, se utiliza una pantalla de cristal líquido (LCD) con regulación de contraste y un voltímetro analógico (figura 1).

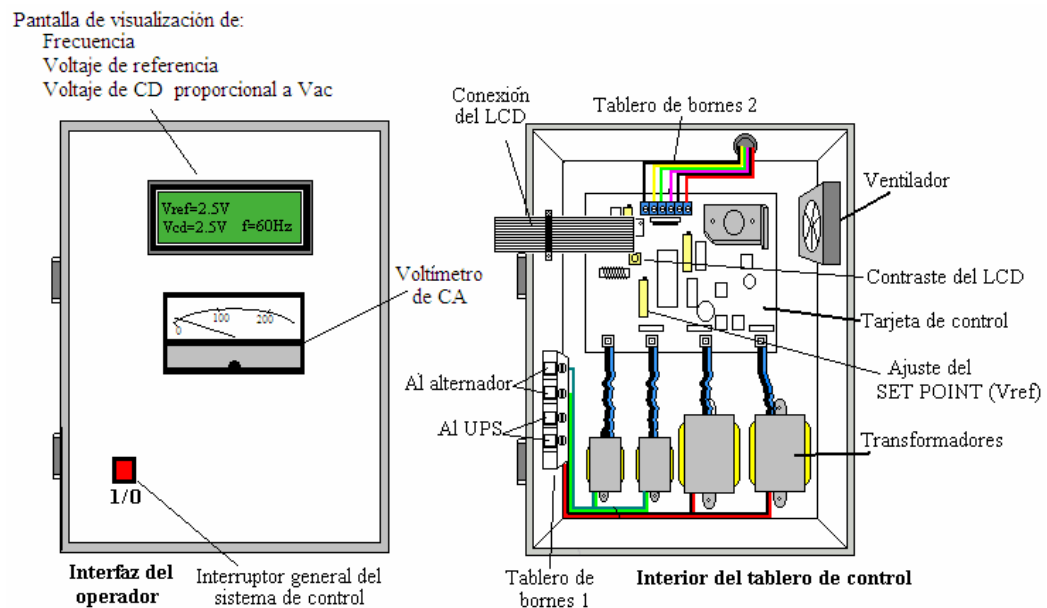


Figura D1. Interfaz del operador e interior del tablero de control

Voltímetro de CA

Indica en forma continua el voltaje de salida del alternador.

Frecuencímetro

Indica la frecuencia de salida del alternador en Hz. También sirve para indicar la velocidad del motor (1 Hz = 30 r.p.m.).

INTERIOR DEL TABLERO DE CONTROL

La tarjeta de control tiene incorporados dos módulos que permiten mantener el voltaje y la frecuencia en su valor nominal:

Regulador de voltaje del generador de CA

El regulador de voltaje automático se encarga de regular el voltaje de salida del generador ante los cambios de carga.

Módulo de control del motor (controlador de velocidad)

El controlador de velocidad se encarga de regular la velocidad del motor de gasolina ante los cambios de conexión y desconexión de cargas.

Los componentes electrónicos de los circuitos de control del motor de gasolina están ubicados en una tarjeta de circuito impreso. Todo el sistema es un conjunto de control integrado, éste se encuentra integrado en un gabinete metálico con las siguientes dimensiones:

Dimensiones del gabinete

300 mm (altura) x 250 mm (anchura) x 120 mm (profundidad)

Conexiones eléctricas

Para evitar señales parásitas, se recomienda que todos los cables que transportan corrientes débiles estén separados de los cables que transportan corrientes intensas. La figura 2 muestra el diagrama general de conexión de la tarjeta de control y la posición de los conectores de entrada y salida. Las conexiones de entrada corresponden a los conectores de tornillos de color azul, y el orden de conexión se indica en la tabla 3.

Tabla 3. Conexiones del tablero de bornes 2 de la tarjeta de control.

Conector	Conexión
1	Hacia el detector de posición inicial (interruptor)
2	Hacia el detector de posición inicial (interruptor)
3	Hacia el motor de CD (actuador) – Cable rojo
4	Hacia el motor de CD (actuador) – Cable negro
5	Tierra del voltaje de excitación
6	Voltaje de excitación

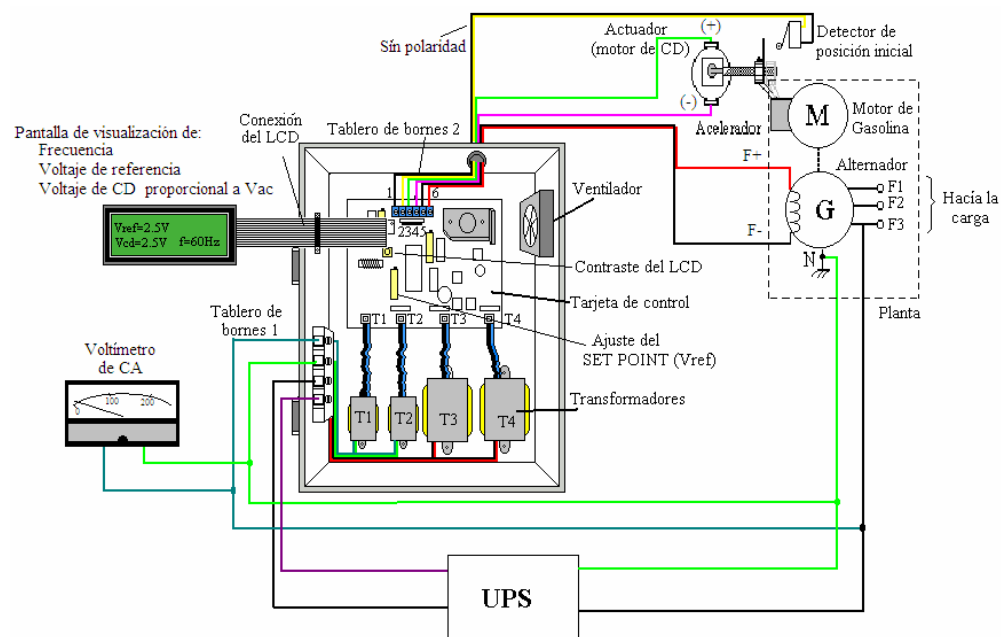


Figura D2. Diagrama general de conexión de la tarjeta de control

Debido a que el diseño del sistema de control que corresponde al módulo de regulador de voltaje automático, no es del tipo auto-excitado, es decir, la energía para excitar al devanado de campo y para la alimentación del resto del sistema de control no se obtiene del alternador, sino de una fuente de energía ininterrumpible (UPS) o No-Break.

Sección 4. Funcionamiento

GENERALIDADES

Ésta sección abarca las revisiones previas al arranque, y describe como arrancar, apagar y hacer funcionar el alternador-motor. Se recomienda que el operador lea toda la sección antes de intentar arrancar el motor. Para obtener un nivel adecuado de seguridad, es esencial que el operador este familiarizado con el alternador-motor.

REVISIONES PREVIAS AL ARRANQUE

Antes de arrancar el alternador-motor, asegúrese que las siguientes revisiones han sido efectuadas y que la unidad está lista para utilizarse.

Lubricación

Revisar el nivel de aceite del motor. Mantenerlo lo más cerca posible a la marca alta en la varilla de medición, pero no se debe sobre llenar el carter.

Combustible

Asegurarse que el tanque tenga combustible suficiente.

Batería

Revisar la condición de la batería de arranque. Asegúrese que las conexiones estén bien apretadas y limpias.

ARRANQUE

El sistema de control actual no incorpora arranque automático; por lo que para su encendido bastará hacer girar la llave como el encendido de un automóvil. El actuador del controlador de velocidad debe girar y el motor de gasolina empezará a incrementar su velocidad dentro de pocos segundos. Después de un tiempo de operación (tiempo de calentamiento del motor de gasolina, alrededor de 40 segundos) el voltaje y la frecuencia estarán en sus valores nominales, estando ya listo para las conexiones de las cargas. Aunque si la planta de energía ha sido utilizada anteriormente (precalentamiento) puede utilizarse casi inmediatamente (10 segundos), después del arranque.

PARADA

Antes de la parada

Dejar el alternador-motor funcionar sin carga durante tres a cinco minutos. Durante este periodo el aceite lubricante enfriará las cámaras de combustión.

Cómo parar la unidad

Para el apagado de la planta de energía solo basta con girar la llave de encendido del automóvil hacia la izquierda. El sistema de control detectará una frecuencia igual a cero, y activará al actuador para regresar a la posición inicial el acelerador del motor de gasolina para el siguiente servicio, después puede apagarse el sistema de control.

FUNCIONAMIENTO SIN CARGA

Siempre que sea posible deberá mantenerse al mínimo los periodos de funcionamiento sin carga. Si es necesario hacer funcionar el alternador durante mucho tiempo sin cargas, conectar una carga eléctrica ficticia para mejorar el rendimiento del alternador-motor. El elemento de un calefactor es un ejemplo de una carga ficticia.

PERIODO DE OPERACIÓN

El alternador-motor que está en servicio de reserva continuo debe poder pasar de un arranque en frío a carga plena en cuestión de segundos. Esto puede imponer condiciones severas a los componentes del motor.

Al ejercitar el alternador-motor a intervalos uniformes se conservará lubricados los componentes del motor, se evitará la oxidación de los contactos y asegurará la confiabilidad de arranque del motor. Ejercitar el alternador-motor por lo menos una vez a la semana por un minuto de 30 minutos con carga y dejarlo alcanzar las temperaturas de funcionamiento normal.

Sección 5. Ajustes

Ajuste del voltaje del generador

El ajuste del voltaje del generador se realiza directamente en el potenciómetro del regulador de voltaje el cual se encuentra ubicado en la tarjeta de control (Ajuste del SETPOINT) tal como se muestra en la figura 2, y para esto es necesario remover la tapa que cubre al sistema de control, introducir un destornillador plano para mover el potenciómetro. Si este se mueve en sentido inverso a las manecillas del reloj el voltaje decrece y viceversa. Una vez terminada la operación coloque nuevamente la tapa que cubre el sistema de control.

Ajuste de la frecuencia del generador

La frecuencia del generador es producto de la velocidad del motor, el cual se controla automáticamente y se encuentra programada para una frecuencia de 60 Hz. Debido a esto no es necesario ajuste alguno.

Sección 6. Localización de averías

ADVERTENCIA: Los procedimientos de servicio y localización de averías presentan riesgos que pueden ocasionar graves daños personales o incluso la muerte. Solamente personal capacitado debe ejecutar tareas mecánicas y eléctricas. Asegurar que los dispositivos de arranque de motor estén fuera de servicio antes de empezar con los trabajos de servicio o mantenimiento.

IMPORTANTE! Antes de empezar con cualquier procedimiento de localización de averías, examinar todos los cables por posibles conexiones cortadas o sueltas. Compruebe la continuidad de todos los cables.

6.1 Localización de averías

Problema	Posible solución
El motor de gasolina no enciende	Verificar que la batería esté cargada Verificar si existe combustible en el tanque Verificar el nivel de aceite del motor Verificar que el sistema de control esté encendido
La tarjeta de control no enciende	Verificar los fusibles de la tarjeta Verificar que el UPS este encendido
El motor de gasolina no incrementa inicialmente su velocidad	Verificar que el actuador del controlador de velocidad, pueda girar libremente, es decir; que esté sin obstrucciones y se encuentre lubricado
No se genera voltaje al arrancar la planta de energía	Comprobar velocidad del motor de gasolina, (1 Hz = 30 r.p.m.). Proceder con la prueba de excitación por fuente ajena para verificar el generador y el regulador de voltaje de la tarjeta de control. Consultar sub-inciso 6.2.
El voltaje de salida no se estabiliza a su valor nominal después de conectar una carga	Proceder con la prueba de excitación por fuente ajena para verificar el generador y la tarjeta de control. Consultar sub-inciso 6.2.
Voltaje inestable, tanto con como sin carga	Comprobar estabilidad de la velocidad.

6.2 Prueba de excitación por fuente ajena

Empleando esta prueba se pueden comprobar los devanados del generador, los diodos giratorios y el regulador de voltaje automático.

- Con la planta de energía eléctrica apagada, quitar la tapa del gabinete y desconectar los cables 5 y 6 (F1 y F2) del tablero de bornes 2 que van hacia el devanado de campo del alternador.
- Conectar una fuente de CD de 0-12 V, 1 A, a los cables F1 y F2 del alternador. El positivo de la fuente de alimentación se conecta con el cable F1 y el negativo a F2.

La prueba se simplifica dividiéndola en dos partes:

- Devanados del generador, diodos giratorios
- Prueba de control de excitación

Asegurar que todos los cables desconectados sean aislados y sin contacto a tierra.

6.2.1 Devanados del generador, diodos giratorios

Esta prueba se realiza con los cables F1 y F2 desconectados de la tarjeta de control, y empleando una fuente de 12 V conectada a los cables F1 y F2.

Con la tarjeta de control encendida, arrancar la planta de energía eléctrica sin carga. Automáticamente ésta se encargará de llevar a la velocidad nominal al alternador.

Medir el voltaje en los tres bornes principales de salida del alternador (cada fase). Este voltaje debe estar equilibrado y dentro del 10% del voltaje nominal del alternador.

6.2.1.1 Voltaje equilibrado en bornes principales

Si todos los voltajes están equilibrados dentro de un límite del 1% en los bornes principales, se puede suponer que todos los devanados de excitación, devanados principales y diodos giratorios se encuentran en buen estado. Por lo tanto el fallo debe estar en la parte del regulador de voltaje de la tarjeta de control. Para la prueba consultar el sub-inciso 6.2.2.

Si el voltaje esta equilibrado pero bajo, debe haber un fallo en los devanados principales de excitación o con el conjunto de los diodos giratorios. Proceder como sigue para su identificación.

Diodos giratorios

Los diodos en el conjunto rectificador principal se pueden comprobar con un multímetro. Los cables conectados a cada diodo deben ser desconectados en el extremo de la terminal y se debe medir la resistencia positiva y reversa. Un diodo en buen estado indicará una resistencia infinita en dirección inversa, y una resistencia baja en dirección positiva. Un diodo defectuoso indicará una desviación completa en ambos sentidos con la escala del multímetro en 10 K Ω , o una resistencia infinita en ambos sentidos.

Cambio de diodos defectuosos

El conjunto rectificador consta de tres diodos montados en el eje del rotor del alternador, es caso de que se detecte que existe un diodo defectuoso, deberá cambiarse por uno que presente las mismas características y éste debe montarse con la misma polaridad. Así como, es preciso apretarlos sin pasarse, pero lo suficiente para garantizar un buen contacto mecánico y eléctrico al eje del alternador.

6.2.2 Prueba de control de excitación

Prueba estática del regulador de voltaje automático

Consultar sub-inciso 6.2 para instrucciones de conexión.

Alimentar F1 y F2 con 12 V, girar el potenciómetro de ajuste del valor de referencia a la derecha y poner en marcha la planta de energía eléctrica a velocidad nominal. Comprobar que el voltaje de salida del alternador se encuentre dentro de un límite del 10% del voltaje nominal. El voltaje en las terminales del alternador debe estar entre 100 y 140 V. Además se debe conectar una lámpara de 12 V en las terminales 5 y 6 del tablero de bornes 2 de la tarjeta de control, y ésta deberá iluminar continuamente. Girar el potenciómetro V_{ref} hacia la izquierda debe resultar en que se apaga la lámpara o al menos debe disminuir su intensidad.

Si la lámpara no ilumina, el regulador de voltaje automático está dañado y deberá ser revisado.

Después de realizar esta prueba, girar el potenciómetro V_{ref} a la posición inicial.