



cenidet

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Coordinación de Mecatrónica**

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

Prototipo de generador eléctrico doméstico con máquina diesel alimentada con aceite vegetal

Presentada por

Ing. Mecánico Orlando Montoya Márquez

como requisito para la obtención del grado de:
Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Directores de Tesis:

Dr. Victor Manuel Alvarado Martínez
M.C. Wilberth Melchor Alcocer Rosado

Jurado:

Dr. Enrique Quintero Mármol Márquez - Presidente
M.C. Wilberth Melchor Alcocer Rosado - Secretario
Dr. Luis Gerardo Vela Valdéz - Vocal
M.C. José Luis González Rubio - Vocal suplente

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Florentino y Elodia, a mis hermanos Romeo y Mariel, por su apoyo incondicional, por los esfuerzos y sacrificios realizados. También agradezco a mi tío Pepe por su ayuda para poder realizar esta tesis.

Un agradecimiento muy especial a Ana y doña Isabel por permitirme entrar en su hogar, así como también a la familia Martínez Ramírez por aguantarme tanto tiempo.

A mis compañeros y amigos de la maestría, por compartir sus conocimientos, por su ayuda y por los momentos agradables que pasamos juntos.

Gracias a mis asesores el Dr. Victor Manuel Alvarado Martínez y el M.C. Wilberth Melchor Alcocer Rosado, por su apoyo para la realización de este proyecto de investigación.

Al Dr. Marco Antonio Oliver Salazar, al cenidet y sus profesores por su confianza, sus enseñanzas y su apoyo.

Gracias, a las instituciones CONACYT y DGEST por el apoyo económico para la realización de la maestría.

RESUMEN

Este documento presenta el desarrollo de un proyecto de investigación para la generación de energía eléctrica a partir de un recurso renovable como lo es el aceite vegetal, con este propósito se realiza el diseño, construcción y pruebas de un sistema para la alimentación con aceite vegetal de una planta de energía de 6kw con motor diesel. El aceite de soya fue elegido para usarse como combustible en esta investigación.

Debido a la alta viscosidad del aceite vegetal no puede ser usado directamente como combustible, para poder hacerlo, debe ser calentado para hacerlo parecido al diesel, ya que hay una relación directa entre la temperatura del aceite y su viscosidad; por esta razón, el sistema de alimentación está construido de tal forma, que pueda calentar el aceite antes de enviarlo al motor. Este sistema, está diseñado para ser independiente del sistema de alimentación original de la planta, el diseño también permite modificar la temperatura de alimentación del aceite, todo esto se logró construir sin realizar modificaciones al motor.

Se llevaron a cabo pruebas para comparar el comportamiento de la planta cuando ésta es alimentada con diesel y aceite de soya, y en el caso de este último evaluar los efectos al variar la temperatura de alimentación en un rango de 80 a 110° C. En dichas pruebas se encontró que el motor tiende a mejorar su desempeño a medida que aumenta la temperatura del aceite de alimentación, sin embargo, las diferencias entre ambos combustibles no reportan cambios significativos, por lo que se confirma la factibilidad del uso de aceite vegetal como combustible en cuanto a funcionamiento se refiere.

Palabras clave: aceite vegetal, viscosidad, motor diesel, sistema de alimentación, generador eléctrico.

ABSTRACT

This paper presents the development of a research project to generate electricity from a renewable resource such as vegetable oil, for this purpose is the design, construction and testing of a system for feeding with vegetable oil a power plant 6Kw diesel. The soybean oil was selected for use as fuel in this investigation.

Due to the high viscosity of vegetable oil, this can not be used directly as fuel, to do so, it must be heated to make it similar to diesel, as there is a direct relationship between the oil temperature and viscosity; for this reason the power system is constructed in such a way that can heat the oil before sending it to the engine. This system is designed to be independent of the feeding system of the original plant; the design also allows for changing the temperature of the oil supply, this was achieved without making changes to the original engine.

Tests were conducted to compare the performance of the plant when it is fed with diesel and soybean oil, and in the latter to assess the effects when varying the temperature in a range from 80 to 110 ° C. In these tests it was found that the engine tends to improve its performance with increasing temperature of the oil supply, however, differences between the two fuels do not report significant changes, which confirms the feasibility of using vegetable oil as fuel.

Keywords: vegetable oil, viscosity, diesel engine, feeding system, electric generator.

CONTENIDO

Lista de figuras.....	iii
Lista de tablas.....	v
Nomenclatura.....	vi
Abreviaturas.....	vii
CAPITULO I INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PROBLEMA: DESVENTAJAS DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES.....	2
1.1.2 Efectos medioambientales de los combustibles fósiles.....	2
1.1.3 El fin de los combustibles fósiles.....	3
1.2 JUSTIFICACION: EL ACEITE VEGETAL COMO ENERGIA RENNOVABLE.....	5
1.2.1 Biocombustibles.....	5
1.2.2 Disminución de la contaminación.....	5
1.2.3 Beneficios a la economía.....	6
1.3 ANTECEDENTES.....	7
1.4 HIPOTESIS.....	8
1.5 OBJETIVOS.....	9
1.5.1 Objetivo general.....	9
1.5.2 Objetivos particulares.....	9
1.6 ALCANCES.....	9
1.7 APORTACION.....	9
CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 MOTOR DIESEL.....	11
2.1.1 Definiciones y dimensiones características.....	13
2.1.2 Operación de un motor diesel.....	14
2.1.3 Sistema de combustible diesel.....	16
2.2 ACEITE VEGETAL COMO COMBUSTIBLE.....	18
2.2.1 Propiedades del aceite y su combustión en motores diesel.....	19
2.2.2 Producción y consumo de aceites.....	21
CAPITULO 3 DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	25
3.1 CONSIDERACIONES GENERALES DEL DISEÑO.....	25
3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	28
3.2.1 Depósito de aceite.....	28
3.2.2 Precalentador de aceite.....	29
3.2.3 Base para depósito de aceite.....	30
3.2.4 Calentador eléctrico.....	32
3.2.5 Resistencia eléctrica.....	35
3.2.6 Válvula de conmutación.....	39
3.2.7 Caja de circuitos.....	40
3.3 MOTOR-GENERADOR.....	41

CAPITULO 4 ELECTRÓNICA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN.....	43
4.1 CIRCUITO DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	48
4.1.1 Medición de temperatura.....	48
4.1.2 Monitoreo de temperaturas.....	53
4.1.3 Temperatura deseada.....	55
4.1.4 Algoritmo de control.....	58
4.2 CIRCUITO DE POTENCIA.....	65
4.3 CIRCUITO DE CONMUTACIÓN.....	67
4.4 FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	70
 CAPITULO 5 MONTAJE Y PRUEBAS.....	 73
5.1 MONTAJE DEL SISTEMA.....	73
5.2 COMBUSTIBLES USADOS.....	76
5.3 PRUEBAS REALIZADAS AL MOTOR.....	79
5.3.1 Prueba de consumo.....	79
5.3.2 Eficiencia del motor.....	81
5.3.3 Temperatura de los gases de escape.....	82
5.4 PRUEBAS REALIZADAS AL GENERADOR.....	83
5.4.1 Calidad de la energía.....	83
5.4.2 Distorsión armónica usando diesel como combustible.....	85
5.4.3 Distorsión armónica usando aceite como combustible.....	89
5.4.4 Niveles de armónicas permitidos por las normas.....	93
5.5 CONCLUSIONES GENERALES.....	95
5.6 RECOMENDACIONES.....	96
5.7 REFERENCIAS.....	97
 ANEXO A Fotos de la caja de circuitos.....	 100
ANEXO B Diseño del sistema de alimentación.....	101
ANEXO C Diseño del calentador eléctrico.....	102
ANEXO D Diseño de la base del depósito de aceite.....	103

Lista de figuras

Fig. 1.1 Efecto invernadero.....	3
Fig. 1.2 Ciclo del CO ₂	6
Fig. 1.3 Motor diesel de 1906 en Augsburg.....	7
Fig. 1.4 Kit de conversión Greasecar.....	8
Fig. 2.1 Motor diesel.....	12
Fig. 2.2 Ciclo de un motor diesel.....	15
Fig. 2.3 Diagrama P-V de un motor diesel.....	15
Fig. 2.4 Alimentación por gravedad.....	16
Fig. 2.5 Inyección en motor diesel.....	17
Fig. 3.1 Sistema de alimentación propuesto.....	28
Fig. 3.2 Depósito de aceite.....	29
Fig. 3.3 Precalentador de aceite.....	29
Fig. 3.4 Intercambiador de flujo cruzado.....	30
Fig. 3.5 Base para tanque de combustible.....	30
Fig. 3.6 Sección transversal de las barras.....	30
Fig. 3.7 Cálculo de gasto en el depósito.....	31
Fig. 3.8 Calentador eléctrico comercial.....	33
Fig. 3.9 Efecto termosifón.....	33
Fig. 3.10 Calentador eléctrico.....	35
Fig. 3.11 Resistencia eléctrica.....	35
Fig. 3.12 Sistema a modelar.....	37
Fig. 3.13 Válvula de conmutación.....	40
Fig. 3.14 Caja de circuitos.....	41
Fig. 3.15 Motor generador.....	41
Fig. 4.1 Microcontrolador PIC16F877A.....	44
Fig. 4.2 Diagrama de flujo del sistema de alimentación.....	47
Fig. 4.3 Control automático.....	48
Fig. 4.4 Acondicionamiento de la señal del sensor.....	50
Fig. 4.5 Interfase RS-232.....	51
Fig. 4.6 Programa en LabVIEW.....	52
Fig. 4.7 Comparación de gráficas.....	52
Fig. 4.8 Pantalla LCD.....	54
Fig. 4.9 Teclado matricial.....	55
Fig. 4.10 Circuito de control.....	57
Fig. 4.11 Control On/Off.....	58
Fig. 4.12 Modulación por ancho de pulso.....	62
Fig. 4.13 Salida de la señal PWM.....	63
Fig. 4.14 Gráfica de control.....	64
Fig. 4.15 Circuito impulsor.....	65
Fig. 4.16 Circuito de potencia.....	66
Fig. 4.17 Circuito de conmutación.....	68
Fig. 4.18 Circuito de emergencia.....	69
Fig. 4.19 Circuito de la fuente de alimentación.....	70
Fig. 4.20 Diagrama de bloques de los circuitos.....	71
Fig. 5.1 Montaje sobre la planta de calentador y válvula.....	75
Fig. 5.2 Sistema de alimentación.....	75
Fig. 5.3 Viscosímetro Ostwald.....	76
Fig. 5.4 Gráfica de la viscosidad en función de la temperatura para aceite de soya con algunas referencias.....	78

Fig. 5.5 Gráfica de consumo específico a diferentes cargas para diesel y aceite.....	80
Fig. 5.6 Eficiencia del motor a distintas cargas.....	81
Fig. 5.7 Temperatura de los gases de escape a distintas cargas para diesel y aceite.....	83
Fig. 5.8 Componentes armónicas de una señal.....	84
Fig. 5.9 Componentes en el dominio del tiempo y de la frecuencia.....	85
Fig. 5.10 Señal de voltaje en el tiempo de la planta de energía.....	86
Fig. 5.11 Señal de voltaje de la planta en el dominio de la frecuencia.....	87
Fig. 5.12 Espectro de frecuencias usando una carga resistiva THD=2.38%.....	88
Fig. 5.13 Espectro de frecuencias usando una carga inductiva THD=2.65%.....	88
Fig.5.14 Espectro de frecuencias de voltaje de la planta usando como combustible aceite a 110°C THD=2.38%.....	89
Fig.5.15 Espectro de frecuencias de voltaje de la planta usando como combustible aceite a 100°C THD=2.38%.....	90
Fig.5.16 Espectro de frecuencias de voltaje de la planta usando como combustible aceite a 90°C THD=2.61%.....	90
Fig.5.17 Espectro de frecuencias de voltaje de la planta usando como combustible aceite a 80°C THD=2.61%.....	90
Fig. 5.18 Espectro de frecuencias de la planta usando como combustible aceite a 110°C, con una carga inductiva THD=2.65%.....	91
Fig. 5.19 Espectro de frecuencias de la planta usando como combustible aceite a 100°C, con una carga inductiva THD=2.65%.....	91
Fig. 5.20 Espectro de frecuencias de la planta usando como combustible aceite a 90°C, con una carga inductiva THD=2.87%.....	92
Fig. 5.21 Espectro de frecuencias de la planta usando como combustible aceite a 80°C, con una carga inductiva THD=2.87%.....	92
Fig. A.1 Caja de circuitos.....	98
Fig. A.2 Vista superior caja de circuitos.....	98
Fig. A.3 Interior de la caja de circuitos.....	98

Lista de tablas

Tabla 2.1 Especificaciones físicas de aceite de soya y diesel.....	19
Tabla 2.2 Consumo mundial de aceites.....	22
Tabla 2.3 Rendimiento de diez especies comunes de oleaginosas.....	22
Tabla 3.1 Características del motor generador usado en este proyecto.....	42
Tabla 4.1 Características del PIC16F877A.....	45
Tabla 4.2 Descripción de pines de LCD.....	54
Tabla 5.1 Pérdida de temperatura.....	74
Tabla 5.2 Cálculo de distorsión armónica permitido por las normas para diesel y aceite a diferentes temperaturas.....	94

Nomenclatura

Símbolo	Descripción
ρ	Densidad
σ	Desviación estándar
η	Eficiencia
π	Pi
v	Velocidad
μF	Microfaradios
ηt	Rendimiento energético
A	Ampere
A	Área
bar	Presión barométrica
C	Capacitancia térmica
cal	Caloría
cm	Centímetro
Cp	Calor específico
cSt	Centistokes
D	Diámetro
dB	Decibeles
ea	Error absoluto
erp	Error relativo promedio
g	Aceleración de la gravedad
h	Altura
H	Flujo de calor en estado estable
HA	Hectárea
HP	Caballos de potencia
hr	Hora
Hz	Hertz
I	Corriente
k	Constante de proporcionalidad
Kcal	Kilocaloría
Kg	Kilogramos
KJ	Kilojoules
Kw	Kilowatts
Lb	Libra
LHV	Poder calorífico inferior del combustible
Lts.	Litros
M	Masa
m	Metro
MHz	Megahertz
min	Minuto
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mV	Milivolts
N	Número de cilindros
nF	Nanofaradios
°C	Grados Centígrados
°K	Grados Kelvin
P	Potencia

P	Presión
pF	Picofaradios
psi	Libra por pulgada cuadrada
Q	Gasto
r	Radio
R	Resistencia térmica
rc	Relación de compresión
rpm	Revoluciones por minuto
S	Carrera del pistón
seg	Segundo
T	Temperatura
T	Tiempo
Tf	Temperatura final
Ti	Temperatura inicial
T _m	Temperatura del medio
V CA	Volts de corriente alterna
V CC	Volts de corriente continua
V	Volumen
V ₁	Voltaje RMS de la fundamental
V _{comb}	Flujo volumétrico estándar de combustible
Vd	Volumen desplazado
Vs	Voltaje de alimentación
VT	Cilindrada
W	Watts

Abreviaturas

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASTM	American Society for Testing and Material
B1G	Biocombustibles de primera generación
B2G	Biocombustibles de primera generación
BCD	Binary-coded decimal
BTU	The Brithish Thermal Unit
CA/D	Convertidor analógico digital
CD/A	Convertidor digital analógico
CFE	Comisión Federal de Electricidad
DC	Duty Cicle
EUA	Estados Unidos de América
FFT	Fast fourier transform
GND	Tierra
IGBT	Isolated Gate Bipolar Transistor
KB	Kilobytes
Kd	Constante derivativa
Ki	Constante integral
Kp	Constante proporcional
LCD	Liquid Crystal Display
MMT	Millones de toneladas
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PIC	Microcontrolador PIC
PID	Proporcional Integral Derivativo
PMI	Punto muerto inferior
PMS	Punto muerto superior
PWM	Modulación por ancho de pulso
SP	Set point
TD	Temperatura deseada

THD	Total Harmonic Distortion
TM	Temperatura del motor
TR	Temperatura real
TTL	Transistor – Transistor Logic
TTM	Temperatura de trabajo del motor

PREFACIO

La explotación inapropiada por parte del hombre de su entorno, de los recursos provenientes de la naturaleza, imposibilita la regeneración del ciclo de vida de ésta, poniendo en peligro el abastecimiento del planeta. El punto alcanzado y la vorágine del consumo, para mantener un nivel de vida artificial, sitúan el momento como ideal para rectificar los errores cometidos. Frente a la inminente imposibilidad de seguir abasteciendo al planeta de energía proveniente de fuentes tradicionales, comienzan a cobrar gran importancia todas aquellas alternativas que plantean una nueva forma de convivir con el entorno. Las llamadas fuentes de energía renovables traen consigo una serie de grandes ventajas: Su carácter inagotable, el cuidado del medio ambiente y la posibilidad de producción descentralizada e independiente.

El día de hoy, en todo el mundo, tal como en México, los motores diesel se encuentran en una amplia gama de usos, desde automóviles privados hasta barcos, camiones, trenes y generación de electricidad. Debido a que la industria del petróleo, una vez en el pasado fue capaz de producir un abundante y barato combustible a partir del petróleo, aún hoy la gran mayoría de los motores diesel usan este combustible. Pero debido a que cualquiera de esos motores puede funcionar con aceite vegetal, su uso ha ido incrementándose, particularmente en Europa. Con el diesel de petróleo incrementando sus precios y alcanzando sus límites de abastecimiento se hace indispensable empezar a cambiar hacia fuentes de energía renovables.

El escenario planteado junto con el uso en un futuro de aceite usado como combustible, constituyen la principal motivación para la realización de esta investigación, la cual se orienta al uso de aceite vegetal como combustible, para la producción de energía eléctrica. Esto introducirá al área de Mecatrónica del cenidet en el estudio de los biocombustibles al utilizar dispositivos mecatrónicos para su mejor aprovechamiento.

La organización del presente documento se desarrolló de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introducción. Aquí se menciona de manera generalizada la problemática del uso de combustibles fósiles, y se da una posible solución mediante el uso de aceite vegetal como combustible, mostrando también sus ventajas. Se muestran también los antecedentes, objetivos, aportación, alcance y limitaciones.

Capítulo 2. Marco teórico. Se dan a conocer los fundamentos teóricos para la comprensión del problema planteado y dar a éste una solución. Se muestra el funcionamiento del motor diesel, de su sistema de alimentación, y del uso de aceite vegetal como combustible, así como su situación actual en cuanto a consumo y producción.

Capítulo 3. Diseño del sistema del sistema de alimentación. En este capítulo se presentan las consideraciones para el diseño del sistema de alimentación, se detallan cada uno de los componentes que lo conforman, se exponen los motivos de su selección y se realizan los cálculos para saber si éstos cumplirán con los requerimientos establecidos.

Capítulo 4. Electrónica de control y automatización. En este capítulo se muestra el funcionamiento detallado de los distintos circuitos electrónicos que logran tanto la automatización del sistema como el control de la temperatura del aceite de alimentación.

Capítulo 5. Montaje y pruebas. Aquí se describe la realización de las pruebas de funcionamiento del sistema de alimentación, así como su montaje en la planta de energía. Se muestran además las pruebas realizadas para comparar el funcionamiento de la planta cuando es alimentada con diesel y aceite, por último se dan a conocer las conclusiones de este trabajo, y las recomendaciones en cuanto a mejoras del sistema y trabajos futuros.

Anexos. En el anexo A se muestran algunas fotos de la caja de circuitos, en los anexos B, C y D se muestran las hojas de diseño de algunos componentes del sistema de alimentación, así como el sistema completo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El uso de aceite vegetal como combustible se conoce desde hace ya mucho tiempo, desde la aparición del primer motor diesel. Por esta razón varios estudios se han hecho acerca del uso del aceite vegetal como alternativa de sustitución del diesel, ya sea como aceite puro o como mezclas de estos dos combustibles. El aceite vegetal es biodegradable, no tóxico, produce menos emisiones contaminantes, y está hecho a partir de recursos renovables, por lo que es benéfico para el medio ambiente. Los aceites vegetales han sido usados como una alternativa para la parcial o total sustitución del diesel sin requerir grandes ajustes o modificaciones en el motor. Sin embargo, debido a las diferentes características entre aceite vegetal y diesel, tales como: viscosidad, composición química, poder calorífico, etc., existen algunos problemas para obtener un rendimiento aceptable del motor diesel al alimentarlo con aceite vegetal.

Fundamentalmente, la alta viscosidad del aceite parece ser la raíz de muchos de los problemas asociados con el uso directo de aceite vegetal como combustible, la alta viscosidad impide que los inyectores puedan pulverizarlo bien. Si no está bien pulverizado la combustión no es adecuada y forma depósitos en los inyectores y en los cilindros, empeora el rendimiento, aumenta las emisiones contaminantes y acorta la vida del motor.

Una forma de evitar estos problemas es reducir la viscosidad mediante el precalentamiento del aceite vegetal antes de introducirlo al motor, para que los inyectores puedan pulverizarlo bien, y pueda así realizar una mejor combustión. Este trabajo de investigación, está dirigido a mejorar el uso de aceite vegetal como combustible con el mínimo de modificaciones posibles al motor.

1.1 PROBLEMA: DESVENTAJAS DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

Los Combustibles fósiles, son sustancias ricas en energía que se han formado a partir de plantas y microorganismos enterrados durante mucho tiempo. Los combustibles fósiles, que incluyen el petróleo, el carbón y el gas natural, proporcionan la mayor parte de la energía que mueve la moderna sociedad industrial. La gasolina o el diesel que utilizan los automóviles, el carbón que mueve muchas plantas eléctricas y el gas natural que calienta las casas son todos combustibles fósiles.

Químicamente, los combustibles fósiles consisten en hidrocarburos, que son compuestos formados por hidrógeno y carbono; algunos contienen también pequeñas cantidades de otros componentes. Los hidrocarburos se forman a partir de antiguos organismos vivos que fueron enterrados bajo capas de sedimentos hace millones de años. Debido al calor y la presión creciente que ejercen las capas de sedimentos acumulados, los restos de los organismos se transforman gradualmente en hidrocarburos. Los combustibles fósiles más utilizados son el petróleo, el carbón y el gas natural. Estas sustancias son extraídas de la corteza terrestre y, si es necesario, refinadas para convertirse en productos adecuados, como la gasolina, el diesel y el queroseno. Algunos de esos hidrocarburos pueden ser transformados en plásticos, sustancias químicas, lubricantes y otros productos no combustibles.

La mayoría de los combustibles fósiles se utilizan en el transporte, las fábricas, la calefacción y las industrias de generación de energía eléctrica. El petróleo crudo es refinado en gasolina, gasóleo y combustible para reactores, que mueven el sistema de transporte mundial. El carbón es el combustible más utilizado para generar energía eléctrica y el gas natural es empleado sobre todo en la calefacción, la generación de agua caliente y el aire acondicionado de edificios comerciales y residenciales.

Además de la combustión directa con fines comerciales, los combustibles fósiles son quemados para generar la mayor parte de la energía eléctrica del mundo. Las plantas alimentadas con carbón producen el 37% de la energía eléctrica mundial, mientras el petróleo y el gas natural generan entre los dos el 25%. [11]

1.1.2 Efectos medioambientales de los combustibles fósiles

La lluvia ácida y el calentamiento global son dos de los más serios problemas medioambientales relacionados con la utilización a gran escala de los combustibles fósiles. Otros problemas de este tipo, como la contaminación del suelo y el vertido de petróleo, están relacionados directamente con la extracción y el transporte de los combustibles fósiles.

El dióxido de carbono es el principal subproducto de la combustión de los combustibles fósiles. Es lo que los científicos llaman un gas invernadero. Los gases invernadero absorben el calor del Sol reflejado en la superficie de la Tierra y lo retienen, manteniendo a la tierra caliente y habitable para los organismos vivos. No obstante, el rápido desarrollo industrial de los siglos XIX y XX ha provocado un incremento de las emisiones procedentes de la combustión de combustibles fósiles, elevando el porcentaje de dióxido de carbono en la atmósfera en un 28%. Este dramático incremento ha llevado a algunos científicos a predecir un escenario de calentamiento global que puede causar numerosos problemas medioambientales, como la destrucción de los modelos climáticos y la fusión de los casquetes polares.

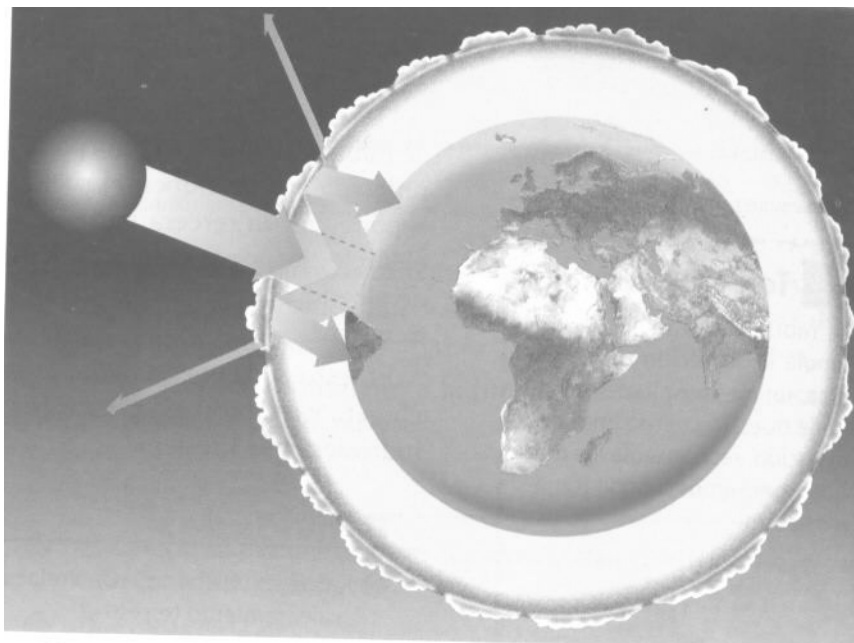


Fig. 1.1 Efecto invernadero

Los científicos emplean modelos informáticos sofisticados de temperatura, patrones de precipitación y circulación atmosférica para estudiar el calentamiento global. Basándose en estos modelos, los investigadores han realizado numerosas predicciones sobre cómo afectará el calentamiento global al clima, hielo glaciar, nivel del mar, agricultura, especies animales y vegetales y salud humana. Ya se están observando muchos de estos cambios relacionados con la subida de las temperaturas. [9]

1.1.3 El fin de los combustibles fósiles

Hasta hace unos dos siglos la humanidad vivió sin combustibles fósiles. A principios del siglo XIX la población sobre el planeta se situaba en unos 1000 millones de personas, tan sólo un 3% de ésta habitaba en ciudades, y su base energética era la energía humana y animal, complementada con el uso domesticado de energías renovables. Y no sería hasta comienzos del siglo XX, que el uso de energías fósiles (fundamentalmente el carbón entonces, aunque despuntaba ya el uso del petróleo) desplaza la importancia global de la matriz energética previa (renovable).

Hoy en día, la población mundial supera los 6,600 millones de personas, más de la mitad de ésta habita en ciudades (por primera vez en la historia), más de cien veces más que en 1800 (especialmente en grandes metrópolis), la base energética renovable es

claramente residual (6%), y el grueso de las necesidades en esta materia (un 80%) se garantiza por los combustibles fósiles (crudo, carbón y gas), aunque es el petróleo la fuente principal que mantiene un mundo crecientemente industrial, urbano-metropolitano y motorizado en funcionamiento. Un 40% de las necesidades energéticas globales está garantizada por el “oro negro” (en los últimos cincuenta años su demanda se ha multiplicado por siete). Sin él, y sin el carbón y el gas (en ascenso) también, el mundo cada día más globalizado, y enormemente devorador de recursos naturales que conocemos (no sólo energéticos), sencillamente no sería viable. [23]

Todos los combustibles fósiles son originados en procesos naturales que duraron cientos de millones de años en condiciones irrepetibles. Por lo tanto es un recurso que no se repone por la incapacidad de la naturaleza de volver a llevarlos a cabo en el término de la especie humana. Esto significa que se agotarán irremediabilmente a pesar del intento de disminuir su consumo, optimizar su uso y hallarle sustitutos.

México tiene crudo sólo para los próximos 11 años, de acuerdo con sus reservas probadas en 2004 y con el actual nivel de producción, según datos de *BP Statistical Review of World Energy* del 2005. Para México la disminución drástica de las reservas probadas (que son las únicas realmente existentes en tanto viables para ser explotadas) representaría una catástrofe económica, no sólo por los ingresos que el país dejaría de percibir, sino por la factura energética que tendría que pagar. Simplemente la economía no podría resistir ese *shock*, que puede presentarse si en unos pocos años dejamos de ser un exportador de hidrocarburos para convertirnos en un importador de petróleo y sus derivados.

Algunos informes internacionales advierten sobre la profundidad del abismo al que se acerca México si no incrementamos las reservas de hidrocarburos. De entre 23 países productores de petróleo, según *BP Statistical Review of World Energy 2005*, Noruega será el primero en agotar sus reservas, en ocho años. Le siguen en segundo lugar Estados Unidos y México, que sólo tienen reservas para 11 años. De ahí en adelante la dependencia de crudo importado será total, siendo Estados Unidos el país que consume 25% del crudo en el mundo. En tercer lugar está China, segundo consumidor de crudo en el mundo, con 13 años de reservas. [8]

Los techos del petróleo y del gas natural supondrán el colapso de la civilización actual. Nunca se ha dado un fenómeno semejante, por lo que es muy difícil prever el momento y la profundidad del colapso, así como el proceso de recuperación y las características de la nueva civilización. Sin embargo, podemos asegurar que el proceso será largo.

Asistimos a una lucha entre las potencias por el control del petróleo y del gas natural, en la que se está empleando todo tipo de violencia: militar, derrocamiento de gobiernos, amenazas, represión de minorías étnicas, etc. En este Gran Juego (como la denominan algunos analistas) EUA desempeña el papel de protagonista, pero también otras potencias suelen hacer uso de las armas en las disputas sobre yacimientos fronterizos y ante conflictos internos que amenazan el control del petróleo. [4]

1.2 JUSTIFICACION: EL ACEITE VEGETAL COMO ENERGÍA RENOVABLE

Las fuentes renovables de energía se basan en los flujos y ciclos naturales del planeta. Son aquellas que se regeneran y son tan abundantes que perdurarán por cientos o miles de años, las usemos o no; además, usadas con responsabilidad no destruyen el medio ambiente. La electricidad, calefacción o refrigeración generadas por las fuentes de energías renovables, consisten en el aprovechamiento de los recursos naturales como el sol, el viento, los residuos agrícolas u orgánicos. Incrementar la participación de las energías renovables, asegura una generación de electricidad sostenible a largo plazo, reduciendo la emisión de CO₂. Aplicadas de manera socialmente responsable, pueden ofrecer oportunidades de empleo en zonas rurales y urbanas y promover el desarrollo de tecnologías locales. [30]

1.2.1 Biocombustibles

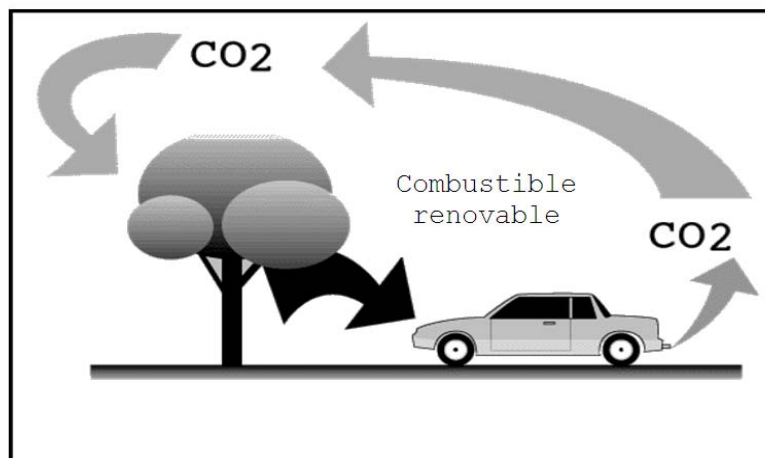
Se denomina así a aquellos combustibles de origen biológico. En tal sentido y siendo estrictos, incluso el petróleo sería un biocombustible en tanto procede de restos fósiles de seres vivos, sin embargo se tiende a llamar biocombustible a aquellos combustibles de origen biológico y que son renovables a partir de los restos orgánicos de donde proceden. Dentro de este marco, los biocombustibles líquidos (ó biocarburantes), obtenidos a partir de materias primas de origen agrícola, son productos que están siendo utilizados a nivel comercial como sustitutos de los combustibles derivados de petróleo [30].

Los biocombustibles son reemplazables, pueden ser producidos en cualquier clima usando las técnicas de agricultura ya conocidas. El aceite vegetal es un ejemplo de biocombustible, cuando se usa aceite vegetal como combustible, se producirá más de éste para reemplazarlo. Este ciclo puede ser usado indefinidamente mientras haya buenas tierras de cultivo, y mientras se haga uso adecuado de estas tierras los biocombustibles nunca se acabarán. [26]

1.2.2 Disminución de la contaminación

Las plantas pueden capturar todo el dióxido de carbono emitido por la quema de biocombustibles, las plantas lo separan en carbón y oxígeno, regresan algo de carbón a la tierra y el oxígeno a la atmósfera. Cuando se usan biocombustibles, las plantas balancean naturalmente las emisiones de dióxido de carbono.

La próxima generación de plantas crece, producen aceite y consumen dióxido de carbono. Las plantas liberarán oxígeno y combinan el carbón con hidrógeno para producir aceite vegetal (hidrocarburos). En lugar de un sistema donde los hidrocarburos son extraídos de la tierra y el dióxido de carbono es emitido a la atmósfera, el uso de aceite vegetal como combustible crea un ciclo donde los hidrocarburos crecen en plantas y el carbón es colocado en las plantas y no en la atmósfera.

Fig. 1.2 Ciclo del CO₂

Una cantidad de plantas que producen aceite vegetal absorben la misma cantidad de dióxido de carbono para producir un litro de aceite vegetal, tal como el emitido al quemarse este litro en un motor. Debido a que las plantas producen hidrocarburos y absorben dióxido de carbono, los biocombustibles no contribuyen significativamente al calentamiento global. [26]

1.2.3 Beneficios a la economía

El uso de biocombustibles está surgiendo como una de las más importantes alternativas a los combustibles fósiles, los beneficios que se pueden obtener por su uso en términos económicos son palpables pues mantienen todo un engranaje productivo que ocupa a: agricultores, productores de fertilizantes, de plaguicidas, transporte de biomasa, industria de transformación, disposición de desechos industriales, empresas químicas, transporte del producto terminado, proveedores finales, entre otros. Todo este ciclo implica una derrama económica amplia a diferentes sectores de la población así como a diversas industrias.

El análisis económico muestra que en todos los casos los precios de producción del aceite son mayores que el costo de oportunidad del diesel comercializado por PEMEX. En este sentido, la situación en México no es muy diferente de la de otros países, pero es más evidente dado el bajo costo del diesel de petróleo, el cual cuenta incluso con subsidios especiales dentro del sector agrícola. Los cultivos más competitivos son la palma, girasol y soya.

La demanda proyectada para los próximos años resultará en una expansión en la producción agrícola, ayudando a pequeños productores de áreas rurales. La demanda y el estilo de producción mantendrán la industria local, reduciendo la transportación de insumos para estos productores, lo que creará una industria sustentable con nuevos trabajos y mercados. [21]

1.3 ANTECEDENTES

En 1895, el Dr. Rudolf Diesel desarrolló el motor Diesel con la intención de que trabajara con amplia variedad de combustibles, incluso aceites vegetales. El Dr. Diesel lo mostró en París en 1900, trabajando con aceites vegetales como el de cacahuete. A partir de esa época el motor original ha sido modificado para trabajar con petrocarburos (petro diesel) por ser un combustible más barato.



Fig. 1.3 Motor diesel de 1906 en Augsburg

Sin embargo, cuando se han presentado problemas de abastecimiento de productos petrolíferos, especialmente durante las dos guerras mundiales, se ha recurrido a los aceites vegetales para sustituir el diesel. Después de las dos guerras mundiales, el desarrollo tecnológico en el campo de los motores diesel se intensifica, y se basa en el diesel derivado del petróleo, barato y con propiedades específicas, necesarias para los nuevos sistemas de inyección.

Como consecuencia se abandona el empleo de los aceites vegetales como combustibles para los motores diesel, que resultaban más costosos y ofrecían características físico-químicas menos constantes.

La crisis de combustibles de finales de los 70's y principios de los 80's, acompañado de la preocupación acerca del agotamiento de los recursos no renovables mundiales, proporcionaron incentivos para buscar alternativas para los combustibles basados en el petróleo. En este contexto, el uso de aceites vegetales como combustibles fue retomado, ahora éstos ocupan una posición prominente en el desarrollo de combustibles alternativos. Cientos de artículos científicos y varios otros reportes, acerca de combustibles hechos a partir de aceites como alternativa para el diesel (biodiesel) han aparecido alrededor del mundo. Estos han avanzado de ser combustibles experimentales, a iniciar etapas de comercialización. Sin embargo, varios aspectos técnicos y económicos requieren mejoras en cuanto a estos combustibles.

Los 70's también vieron la formación de la primera empresa comercial que permite a los consumidores usar aceite vegetal en sus automóviles, esta empresa es Elsbett de Alemania.

Esta compañía, alguna vez ofreció motores especialmente diseñados para trabajar con aceite vegetal, desafortunadamente la poca demanda debida a los altos costos de esos motores que eran hechos a mano, comparados a los motores diesel producidos en masa, forzaron a la compañía a sacar de producción a su motor. Hoy en día ofrece un servicio para convertir a los motores diesel existentes a que funcionen con aceite.

En los años 90 dicho interés por nuevas formas de combustible se eleva como resultado de los alarmantes niveles de contaminación y debido a las ventajas de reducción de contaminación que vienen del uso de aceite vegetal.

En esa época empezaron a surgir un número creciente de compañías similares a Elsbett, tales como Biocar, Neoteric Biofuels y Greasecar, las cuales hoy en día, ofrecen kits de conversión y servicios de conversión, para permitir el uso de aceite vegetal como combustible en automóviles. Estos kits usan el sistema dual de combustible, el cual es una forma simple y efectiva de usar aceite vegetal en automóviles de forma segura. En este sistema el motor inicia su marcha con diesel de petróleo y el calor residual del motor es usado para calentar el aceite. Para evitar el uso del aceite en el motor cuando está frío, un indicador de temperatura permite ver cuando el aceite está lo suficientemente caliente para ser usado como combustible en el motor.



Fig.1.4 Kit de conversión Greasecar

La mayoría de estas investigaciones fueron hechas en medios de transporte, y se analizaba principalmente el funcionamiento del motor y las emisiones de éste.

Solo muy pocas investigaciones fueron hechas acerca del uso de aceite vegetal como combustible en plantas de energía eléctrica, éstas se hicieron en países donde la factibilidad de esta aplicación lo permite, como en el caso de Brasil y Tailandia.

En el cenidet no se han hecho trabajos de investigación de este tipo, una investigación afín es la denominada: Diseño, Construcción y Pruebas de un Prototipo para la Producción de Biodiesel a Partir de Aceites Provenientes de Recursos Renovables, en la que se realiza la construcción de un prototipo automatizado para la producción de biodiesel.

1.4 HIPOTESIS

El uso de aceite vegetal como combustible en motores diesel de forma segura es posible si se disminuye la viscosidad del aceite calentándolo; y si este sistema se usa en generadores con motor diesel es posible generar electricidad de manera sustentable.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general:

Diseñar y construir un sistema para poder alimentar a un motor diesel con aceite vegetal, el cual proporcionará el movimiento mecánico para un generador eléctrico doméstico.

1.5.2 Objetivos particulares:

1. Selección y montado del ensamble motor-generador (esta parte podrá ser omitida de acuerdo a lo que se encuentre en el mercado)
2. Diseño y construcción del sistema de alimentación de aceite al motor.
3. Diseño y construcción del calentador eléctrico de aceite.
4. Diseño y construcción del sistema de conmutación diesel-aceite.
5. Realizar pruebas comparativas de desempeño del aceite vegetal contra diesel de petróleo, obviamente por la duración de este trabajo no podrán realizarse pruebas de largo alcance.
6. Variar la temperatura del aceite de alimentación para poder observar sus consecuencias en el desempeño del sistema.

1.6 ALCANCES

1. No se realizarán mediciones de las emisiones contaminantes
2. Sólo se utilizará aceite limpio.
3. La instrumentación será la mínima necesaria para su correcta operación
4. El rendimiento del sistema motor-generador se medirá a partir de la salida obtenida en el generador (KW)
5. La salida obtenida de este generador **no** se tiene contemplada para usarse en la red eléctrica convencional, solo en aplicaciones aisladas.
6. De preferencia se usará un generador monofásico de corriente alterna.
7. El costo de construcción del sistema será el mínimo necesario

1.7 APORTACIÓN

Aparte de los beneficios al medio ambiente y a la economía antes mencionados, el presente trabajo busca servir como referencia para futuros proyectos donde por factibilidad se requiera la generación de energía eléctrica a partir de aceites vegetales. De esta forma, con los datos aquí obtenidos se podrá tomar una mejor decisión en cuanto a la temperatura de alimentación de aceite se refiere, de acuerdo a las necesidades de cada proyecto.

Página en blanco intencionalmente.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 MOTOR DIESEL

El **motor diesel** es un motor térmico de combustión interna cuyo encendido se logra por la temperatura elevada que produce la compresión del aire en el interior del cilindro. Fue inventado y patentado por Rudolf Diesel en 1895, del cual deriva su nombre. Fue diseñado inicialmente y presentado en la feria internacional de 1900 en París como el primer motor para "biocombustible", como aceite puro de palma o de soya. Diesel también reivindicó en su patente el uso de polvo de carbón como combustible, aunque no se utiliza por lo abrasivo que es.

Un motor diesel funciona mediante la ignición (quema) del combustible al ser inyectado en una cámara (o precámara, en el caso de inyección indirecta) de combustión que contiene aire a una temperatura superior a la temperatura de autocombustión, sin necesidad de chispa. La temperatura que inicia la combustión procede de la elevación de la presión que se produce en el segundo tiempo motor, la compresión. El combustible se inyecta en la parte superior de la cámara de compresión a gran presión, de forma que se atomiza y se mezcla con el aire a alta temperatura y presión. Como resultado, la mezcla

se quema muy rápidamente. Esta combustión ocasiona que el gas contenido en la cámara se expanda, impulsando el pistón hacia abajo. La biela transmite este movimiento al cigüeñal, al que hace girar, transformando el movimiento lineal del pistón en un movimiento de rotación.

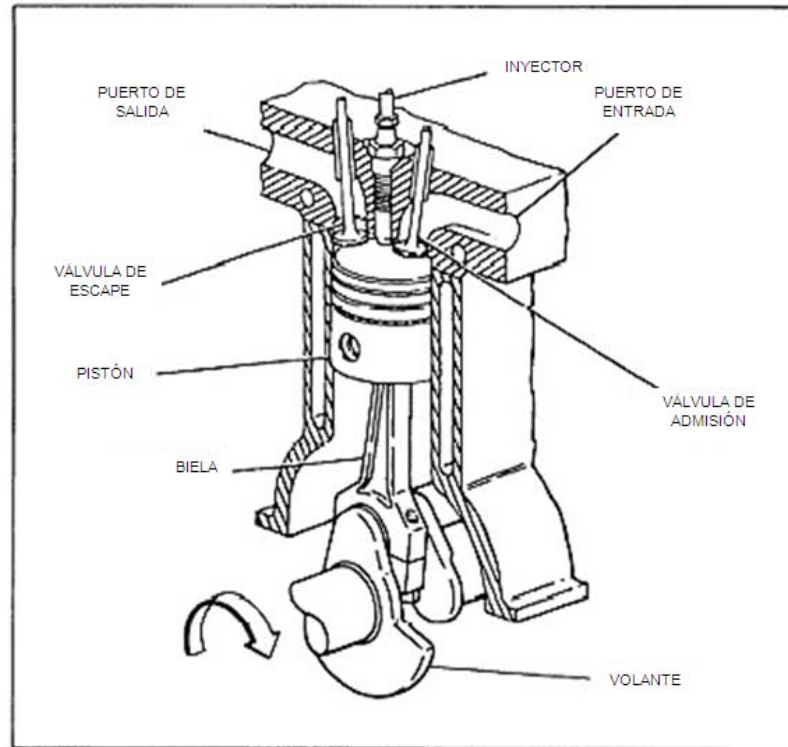


Fig. 2.1 Motor diesel

Para que se produzca la autoinflamación es necesario pre-calentar el aceite-combustible o emplear combustibles más pesados que los empleados en el motor de gasolina, empleándose la fracción de destilación del petróleo comprendida entre los 220° C y 350° C, que recibe la denominación de diesel.

La principal ventaja de los motores diesel frente a los motores de gasolina estriba en su menor consumo de combustible, el cual es, además, más barato. Por esta razón su uso se ha extendido en aplicaciones con elevada tasa de utilización. [32]

Las diferencias principales entre el motor a gasolina y el Diesel son:

Un motor a gasolina aspira una mezcla de gas y aire, los comprime y enciende la mezcla con una chispa. En un motor diesel, solo aire es introducido a la cámara de combustión. El aire es comprimido con un ratio de compresión típicamente entre 15 y 22, resultando en una presión de 40bar (alrededor de 600psi), comparados con los 14 bar (alrededor de 200psi) del motor de gasolina. Esta alta compresión calienta el aire a 550° C, lo que enciende el combustible. [31]

El motor diesel carece de sistema auxiliar de encendido, como asimismo de bujías para producir la chispa encendedora, sistema que es alimentado por electricidad a alta tensión, mediante un delco, y una batería de acumuladores, o bien el sistema de magneto. Nada de esto precisa en un motor diesel, porque el combustible se inflama

simplemente al ponerse en contacto con el aire muy caliente que ha sido intensamente comprimido en el cilindro.

Los motores diesel emplean combustibles líquidos menos volátiles que la gasolina, y estos combustibles, más pesados generalmente, son más baratos que la gasolina, como por ejemplo el aceite vegetal o el biodiesel.

Los motores diesel, debido a tener que trabajar a mayores presiones, son más pesados que los de explosión del mismo tamaño, por lo que sus elementos tienen que ser más robustos, de mayores dimensiones y por lo tanto más pesados. [18]

2.1.1 Definiciones y dimensiones características

El motor de combustión interna más simple es el *monocilíndrico* constituido por solo un mecanismo cilindro, pistón, biela, manivela y eje. A continuación se dan algunas definiciones ampliamente usadas en motores Diesel. [7]

Punto muerto

El pistón dentro del cilindro se mueve dentro de dos posiciones extremas el superior (PMS) e inferior (PMI). Una que corresponde al mínimo volumen interior y otra al máximo. La primera posición se denomina punto muerto superior PMS y la segunda punto muerto inferior, PMI.

Diámetro del motor

El diámetro interior del cilindro, D , es igual al diámetro del pistón para asegurar así su estanqueidad mutua entre las paredes y la cara del pistón. En la práctica esto se consigue mediante unos anillos de ajuste. La dimensión característica de un motor, el diámetro D , se refiere al diámetro del cilindro. También se le llama calibre.

Carrera

El pistón se mueve entre el PMS y PMI, la longitud de este recorrido se llama carrera S . tanto el diámetro como la carrera se miden en pulgadas o en milímetros. Una designación por ejemplo: $2\frac{1}{2} \times 4\frac{1}{4}$, significan $2\frac{1}{2}$ de diámetro y $4\frac{1}{4}$ de carrera en pulgadas. (Primero el diámetro y después la carrera).

Carreras cortas significa menor desgaste del motor al mismo tiempo reduce la velocidad lineal del pistón. La tendencia actual es reducir la carrera del pistón. Si la carrera es corta el diámetro es mayor lo que da más espacio en la culata para las válvulas.

Volumen desplazado

Cuando el pistón se mueve desde PMS hacia PMI barre un volumen que se llama volumen desplazado V_d .

$$V_d = \frac{\pi}{4} D^2 \times S \quad (2.1)$$

Cilindrada

Si el motor es de varios cilindros (motor multicilíndrico) el volumen desplazado total es el producto del número de cilindros N por el volumen desplazado por cada uno V_d . Este volumen total es llamado cilindrada V_T .

$$VT = N \times Vd = N \times \frac{\pi}{4} D^2 \times S \quad (2.2)$$

Volumen de la cámara de combustión

El volumen V_0 en el diagrama P - V corresponde a un volumen muerto. Es el espacio disponible para el inicio de la combustión y se llama cámara de combustión.

Relación de compresión

El valor que da al dividir el volumen máximo V_1 entre el volumen mínimo V_0 , es característico de los motores llamado relación de compresión rc .

$$rc = \frac{V_1}{V_0} \quad (2.3)$$

2.1.2 Operación de un motor diesel

Desde un punto de vista mecánico, el **ciclo del motor Diesel** de cuatro tiempos consta de las siguientes fases: [7]

1. Admisión:

Con el pistón posicionado en el PMS (punto muerto superior) comienza la carrera descendente y al mismo tiempo se abre la válvula de admisión para llenar de aire limpio aspirado o forzado por un turbocompresor al cilindro, terminando este ciclo cuando el pistón llega al (PMI) y la válvula de admisión se cierra nuevamente.

2. Compresión:

Durante la carrera de compresión, todas las válvulas están cerradas y el pistón se mueve hacia arriba en el cilindro comprimiendo el aire. A medida que se comprimen las moléculas de aire, aumenta la temperatura considerablemente. Cuando el pistón se acerca a la parte superior de su carrera, se inyecta combustible en la cámara de combustión, sobre la parte superior del pistón. Finalmente el combustible se mezcla con el aire caliente comprimido, produciendo la combustión.

3. Combustión:

Cuando el pistón está a punto de llegar al punto muerto superior (PMS) se inicia la inyección de combustible a alta presión. En este momento se mezclan las partículas de gasóleo pulverizado con el núcleo de aire caliente y se produce el encendido y la consiguiente expansión de gases por la combustión del gasóleo, moviendo el pistón desde el PMS hacia el PMI y generando trabajo.

4. Escape:

Concluida la fase de trabajo y habiendo llegado el pistón al (PMI), se abre la válvula de escape al mismo tiempo que el pistón empieza su carrera hacia el PMS y elimina hacia el conducto de escape los gases producidos por la combustión en el cilindro. Esto completa las cuatro carreras del pistón, éstas se repiten en forma cíclica mientras funcione el motor.

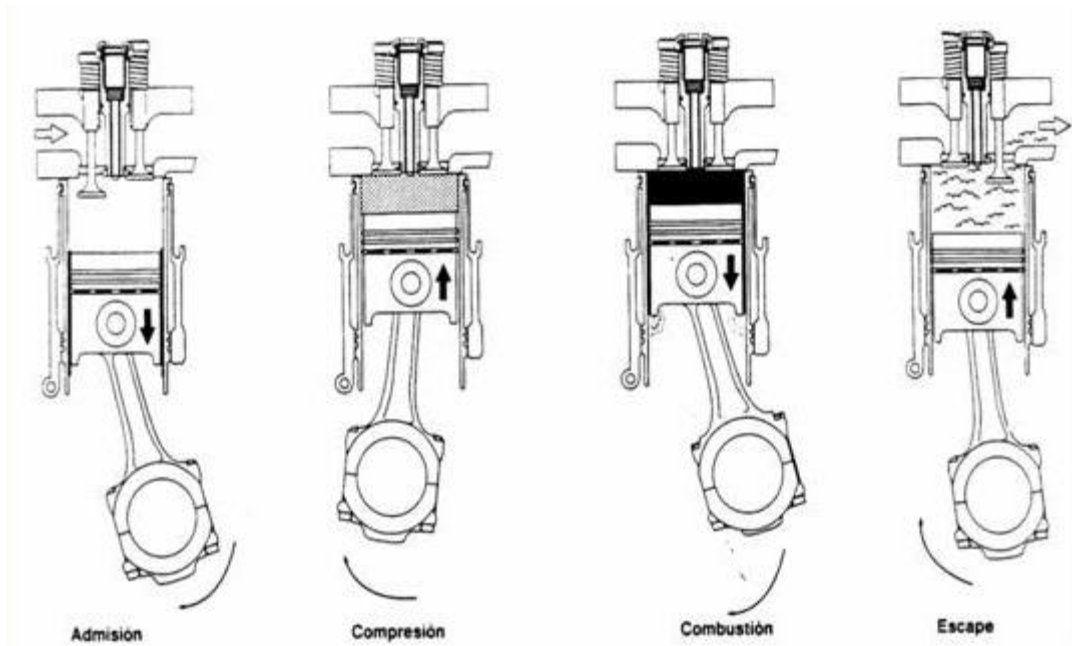


Fig. 2.2 Ciclo de un motor diesel

Este ciclo también puede ser representado mediante un diagrama P-V (presión volumen).

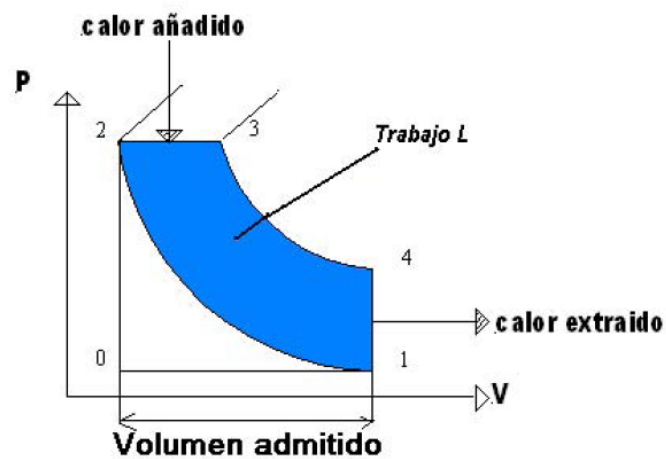


Fig. 2.3 Diagrama P-V de un motor diesel

La medida del rendimiento energético del ciclo es cuánto trabajo se obtiene por la cantidad de calor que se le suministre:

$$\eta_t = \frac{L_{\text{producido}}}{Q_{\text{suministrado}}} \quad (2.4)$$

En la gráfica 3.4 se puede ver las cantidades de la anterior ecuación. $L_{producido}$ es el trabajo producido en un ciclo y $Q_{suministrado}$ es el calor añadido. [7]

2.1.3 Sistema de combustible diesel

Es el encargado de suministrar el combustible necesario para el funcionamiento del motor, pudiéndose diferenciar dos apartados fundamentales: [1]

- Circuito de alta presión, encargado de impulsar el combustible a una presión determinada para ser introducido en las cámaras de combustión.
- Circuito de baja presión, encargado de enviar el combustible desde el depósito en que se encuentra almacenado a la bomba de inyección.

El circuito quedaría formado así:

- *Depósito de combustible.*
- *Bomba de alimentación.*
- *Filtro.*
- *Bomba de inyección.*
- *Inyectores.*

Algunos sistemas de combustible pueden no tener todos los elementos antes mencionados, como por ejemplo en una planta de energía, la cual carece de bomba de alimentación, debido a que esto se hace mediante la acción de la fuerza de gravedad.

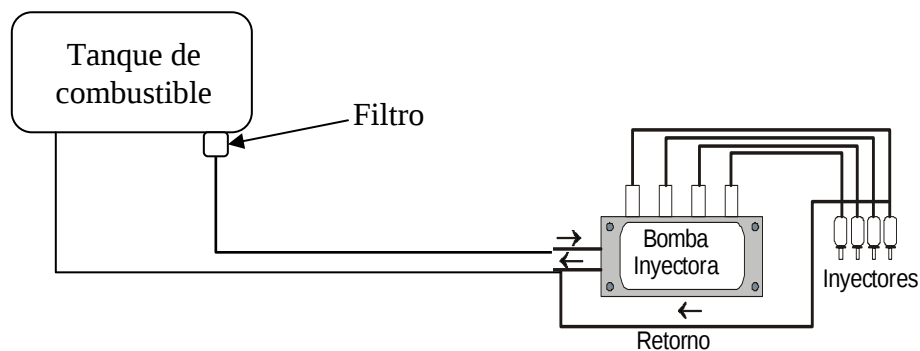


Fig. 2.4 Alimentación por gravedad

El circuito de alta presión, sirve para inyectar, de acuerdo a la secuencia de encendido de un motor, cierta cantidad de combustible a alta presión y finamente pulverizado en el ciclo de compresión del motor, el cual, al ponerse en contacto con el aire muy caliente, se mezcla y se enciende produciéndose la combustión.

La función es la de producir la inyección de combustible líquido finamente pulverizado en el momento indicado y en la cantidad justa de acuerdo al régimen de funcionamiento del motor.

Este sistema consta fundamentalmente de una bomba de desplazamiento positivo con capacidad para inyectar cantidades variables de combustible dada por un diseño especial

de los émbolos y con un émbolo por inyector o cilindro del motor. El otro componente importante es el inyector propiamente dicho encargado de la inyección directamente en la cámara de combustión (inyección directa) o en una cámara auxiliar (inyección indirecta). [24]

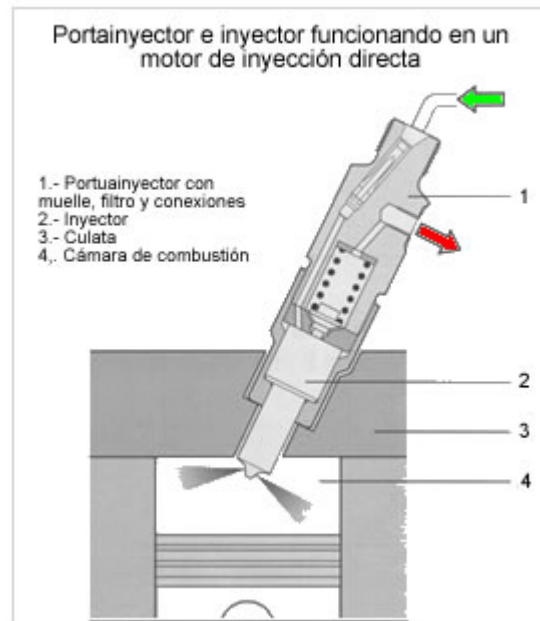


Fig. 2.5 Inyección en motor diesel

Además de la bomba de inyección y en conjunto con ella, existe en el motor otro dispositivo llamado regulador que se encarga de controlar y estabilizar la velocidad del motor. Cuando metemos carga a un motor diesel el regulador mantiene la velocidad graduando el suministro de combustible. [17]

Un gobernador es esencialmente un dispositivo que sensa la velocidad, está diseñado para mantener una velocidad constante, sin importar la variación de carga. Todos los gobernadores usados en motores diesel, controlan la velocidad de éstos a través de la regulación de la cantidad de combustible entregado a los cilindros. [12]

2.2 ACEITE VEGETAL COMO COMBUSTIBLE

Los aceites y grasas vegetales son lípidos derivados de plantas. Físicamente, los aceites son líquidos a temperatura ambiente, y las grasas son sólidas. Químicamente, ambos, aceites y grasas están compuestos de triglicéridos, en contraste con las ceras, las cuales no contienen glicerina en su estructura. Aunque de diferentes partes de la planta se puede obtener aceite, en la práctica comercial, el aceite es extraído principalmente de semillas. [13]

El aceite vegetal es energía solar bioquímicamente guardada de la mayor densidad. Las semillas tales como cacahuete, girasol y soya concentran la energía solar en sus aceites. Mientras que el petróleo tardó en formarse cientos de millones de años, las semillas de donde se extrae el aceite vegetal, tardan solo algunos meses en crecer. En comparación a los sólidos biológicos (madera, paja) y el biogás, el aceite vegetal representa la forma más densa de energía proveniente de la fotosíntesis. Se compone de carbono (C), hidrógeno (H) y un poco de oxígeno (O) en una relación de aproximadamente $C_{60}H_{120}O_6$.

Básicamente, el aceite vegetal puede considerarse como un combustible bueno y adecuado. No obstante, es más viscoso y dispone de un punto de ignición más alto que el diesel. Esto lo hace capaz de freír, pero como consecuencia dispone de una menor “combustionabilidad” durante el funcionamiento del motor. El uso de aceites vegetales como los de colza, palma, soya, girasol, cacahuete y oliva como combustibles alternativos para motores diesel data desde hace ya casi nueve décadas y el uso potencial de éstos ha atraído la atención de los investigadores durante mucho tiempo. [13]

Existen dos formas seguras de usar aceite vegetal como combustible en un motor diesel: alterar químicamente al aceite para convertirlo en biodiesel (transesterificación) o disminuir su viscosidad calentándolo. Esta última opción está cobrando cada vez más importancia, ya que el aceite no requiere de un proceso adicional, ni agregar sustancias que aumentan su precio, aunque hay que introducir modificaciones en el sistema de alimentación del motor.

Debido a que el aceite es muy viscoso a temperatura ambiente, éste debe ser calentado antes de que pueda ser usado como combustible en motores diesel. El aceite vegetal caliente puede fluir con mayor facilidad a través de las líneas de combustible y los inyectores, éstos pueden pulverizar el aceite caliente tan bien como lo hacen con el diesel. Usado con precaución, el aceite vegetal puede ser un combustible seguro para un motor diesel.

Para motores diseñados para usar diesel como combustible, la viscosidad del aceite vegetal debe ser reducida para permitir una atomización apropiada por los inyectores, de lo contrario la combustión incompleta puede ocasionar que se formen depósitos de carbón que a la larga puede causar daños al motor. Diversos factores determinarán la temperatura a partir de la cual, el aceite vegetal puede ser usado como combustible de forma segura, entre ellos se encuentran: El diseño del motor y su sistema de combustible, la calidad del aceite vegetal, la temperatura ambiente. De acuerdo a esto, esta temperatura deberá estar comprendida entre los 70-80° C.

Tabla 2.1 Especificaciones físicas de aceite de soya y diesel. [6], [22]

Propiedad	Unidades	Aceite de soya	Diesel
Viscosidad (38° C)	cSt	32.6	2.4
No. Cetano		37.9	47
Poder calorífico	KJ/Kg.	39,623	43,350
Contenido en agua (% en vol. máx.)		0.05	0.05
Sedimento (% en peso)		2.0	0.05
Contenido en azufre (% en peso)		0.02	0.5
Punto de chispa	° C	230	58
Punto de fluidez	° C	-3.9	-15
Punto de congelamiento	° C	-12.2	-28

Otra aproximación para reducir la viscosidad y sus problemas asociados es la micro emulsión, en ésta, el aceite vegetal es mezclado con alcoholes, diesel y solventes, en proporciones variables. El resultado es un combustible más apropiado para la operación en motores diesel. Su funcionamiento apropiado dependerá de las proporciones de los ingredientes, el diseño del motor y la temperatura ambiente encontrada.

Las ventajas más importantes del aceite vegetal natural son:

- Gran valor calorífico: gran densidad energética (39.623 kJ/kg)
- Forma líquida y, por ello, fácil de usar
- Cuando se quema emite menos hollín que el diesel
- No es tóxico ni dañino para humanos, animales, suelos o agua
- No es inflamable ni explosivo y no emite gases tóxicos
- Es fácil de almacenar, transportar y utilizar
- No causa daños si accidentalmente se vierte
- En su manejo no se requiere tomar precauciones especiales
- Es producido de forma directa por la naturaleza: no ha de ser transformado
- Es una forma reciclable de energía
- No tiene efectos ecológicos adversos cuando es utilizado
- No contiene azufre: no genera lluvia ácida cuando es usado
- Cuando se quema es neutral en CO₂: no contribuye al efecto invernadero.

2.2.1 Propiedades del aceite y su combustión en motores diesel

El combustible es inyectado a la cámara de combustión en los motores de encendido a compresión (Diesel) en un chorro líquido finísimo a alta presión, lo que hace que se le exija unas condiciones especiales en su calidad como combustible que, de no ser así, pueden producir afectaciones tanto durante el funcionamiento como en la vida útil del motor.

Las cualidades del combustible están completamente relacionadas con las siguientes características que aparecen durante la operación y arranque del motor. [7]

Número Cetano

El número de cetano es un índice del tiempo que demora el carburante en encenderse una vez inyectado a la cámara de combustión. Una buena calidad significa que se produce una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del combustible y se asocia con un número de cetano alto. Cuanto más elevado es el número de cetano, menor es el retraso de la ignición y mejor es la calidad de combustión. Un bajo número de cetano es indeseable en un carburante porque requieren mayor tiempo para que ocurra la ignición y después queman demasiado aprisa, produciendo altos índices de elevación de presión, la combustión es inadecuada y da lugar a ruido excesivo, aumento de las emisiones, bajo rendimiento, golpeteo y aumento de la fatiga del motor.

Viscosidad

Es una magnitud física que mide la resistencia interna al flujo de un fluido originado por la resistencia del frotamiento de las moléculas que se deslizan unas contra otras.

La inversa de la viscosidad es la fluidez.

La viscosidad es un parámetro determinante en las condiciones de la combustión y por lo tanto en la eficiencia del uso de combustibles y resulta importante para definir las posibilidades de bombeo de los fluidos y en particular de los combustibles. Alta viscosidad del combustible puede ocasionar obstrucción de los inyectores.

En los aceites combustibles es un parámetro básico en la clasificación de los productos pesados y la viscosidad de los distintos hidrocarburos tanto puros como mezclas (líquidos, vapor o gas) y de fracciones de petróleo, están en estrecha relación con el peso molecular y la estructura química de los componentes.

En los combustibles derivados del petróleo la magnitud de la viscosidad depende de la conformación química del crudo, de manera que a mayor proporción de fracciones ligeras, menor es la viscosidad. Este valor depende además de la temperatura, de forma que cuanto menor resulta ésta, más viscoso es un crudo. La relación entre la viscosidad y la temperatura es importante en relación a la temperatura ambiente sobre todo en almacenamiento y en el arranque del motor.

Poder calorífico

Poder calorífico es la cantidad de energía que libera un combustible durante su combustión completa, por unidad de masa. Se mide en Kj/Kg o en Btu/lb. En el caso de los combustibles líquidos se mide en pruebas de laboratorio normalizadas. También se calcula mediante fórmulas.

Punto de inflamación o Punto de chispa

La temperatura más baja a la cual los vapores de un líquido combustible pueden encenderse (o destellar) cuando se va calentando con ayuda de una llama, chispa u otra fuente de ignición. La combustión no es autosostenida en el sentido que si se retira la fuente de encendido se apaga. Es la temperatura mas baja a la cual el aceite arde transitoriamente en contacto con una llama. Es importante tenerla en cuenta en el almacenamiento de combustibles.

Punto de encendido

Es la temperatura a la cual el combustible se enciende en contacto con una llama y continúa ardiendo después.

Punto de fluidez

La temperatura más baja en la cual un lubricante o un combustible destilado no fluye, cuando se enfría bajo condiciones preestablecidas por el método ASTM D 97.

Punto de congelamiento

Es la temperatura a la que un líquido se solidifica. Se debe distinguir entre el punto de enturbamiento (cloud-point) o temperatura en que se forman micro-cristales, y el punto de

congelación inferior (pour point) cuando el líquido se hace pastoso y no fluye. El punto de congelación superior es la temperatura en la cual el hidrocarburo retorna a su estado fluido al recalentar el producto luego de una prolongada solidificación. El punto de congelamiento en los hidrocarburos aumenta con el peso molecular con algunas excepciones.

Volatilidad

La volatilidad se asocia con la posibilidad de ir evaporando los componentes de una mezcla combustible. Los combustibles, que son una mezcla, deben contener varios elementos y por lo tanto tienen diversos puntos de evaporación correspondientes a cada componente y para las diversas condiciones de trabajo.

En el arranque y en aceleradas bruscas del motor, la presencia de la mezcla combustible de fracciones muy volátiles es una condición necesaria.

Contenido de azufre

Es el Azufre que está presente en el combustible. Este elemento es nocivo porque se asocia con la corrosión de las partes metálicas y con su desgaste. Produce residuos sólidos duros y degrada el aceite lubricante.

Contenido de ceniza

Ceniza es material sólido incombustible, normalmente duro que queda como residuo después de la combustión. Sus consecuencias son funestas en el motor por el desgaste que influye grandemente en el acortamiento de su vida.

Residuos de carbón

Es mas bien explicada por la combustión del combustible con baja presencia de Oxígeno. Residuos de carbón son sólidos e indeseables.

Agua y sedimentos

El agua no es combustible y por lo tanto lejos de contribuir al suministro de calor para la generación de potencia en el eje, consume parte de éste para evaporarse y por lo tanto disminuir la potencia calórica suministrada. Además aumenta los humos y la corrosión. Si el agua presente en el combustible contiene sales es todavía más dañina.

2.2.2 Producción y consumo de aceites

La mayoría de los aceites vegetales pueden usarse, con pocas limitaciones, directamente en los motores diesel. Basta, después de extraerse, filtrarlo, secarlo y purificarlo. El aceite vegetal se puede obtener mecánica o químicamente, y generalmente se usa alguna combinación de ambas técnicas.

En el método mecánico las semillas y frutos oleaginosos se someten a un proceso de prensado. Los residuos de este prensado se aprovechan como alimento para el ganado, por ser un producto muy rico en proteínas. Finalmente se somete al aceite extraído a otro proceso de refinamiento.

El método químico utiliza disolventes químicos que resultan más rápidos y baratos, además de dar mejor rendimiento. El solvente generalmente usado es el Hexano. [29]

Según el Departamento de Agricultura de EUA el consumo mundial en el año 2007/08 de aceites vegetales fue:

Tabla 2.2 Consumo mundial de aceites

Soya	37.54 MMT (millones de toneladas)
Palma	41.31 MMT
Colza	18.24 MMT
Girasol	9.91 MMT
Cacahuete	4.82 MMT
Semilla de algodón	4.99 MMT
Palma	4.85 MMT
Coco	3.48 MMT
Oliva	2.84 MMT

Hay más de 350 especies de oleaginosas, o plantas que producen aceite y miles de sub-especies. La siguiente tabla muestra el promedio del rendimiento en kilogramos de aceite por hectárea anuales para diez especies de oleaginosas, muchas especies producen mas aceite en climas tropicales. [26]

Tabla 2.3 Rendimiento de diez especies comunes de oleaginosas

CULTIVO	Kg. Aceite/HA
Palma	5,000
Coco	2260
Jatropha	1590
Canola	1000
Cacahuete	890
Girasol	800
Cártamo	655
Soya	375
Cáñamo	305
Maíz	145

Al comenzar a utilizarse suelo agrario para el cultivo directo de biocombustibles, en lugar de aprovechar exclusivamente los restos de otros cultivos (en este caso, hablamos de "biocombustibles de segunda generación"), se ha comenzado a producir un efecto de competencia entre la producción de comida y la de biocombustibles, resultando en el aumento del precio de la comida.

Un caso de este efecto se ha dado en México, con la producción de maíz. La compra de maíz para producir biocombustibles para Estados Unidos ha hecho que en el primer semestre de 2007, la tortilla de maíz (que es la comida básica en México) duplique o incluso llegue a triplicar su precio. [30]

Criticados por desplazar cultivos alimentarios, provocar el encarecimiento de los alimentos, y de no contribuir mayormente a la reducción de la emisión de Gases de Efecto Invernadero, los agrocombustibles o biocombustibles de primera generación (B1G), están dando paso al desarrollo de nuevas tecnologías de producción de biocombustibles que no afectan la seguridad alimentaria, la biodiversidad y los recursos naturales a la vez que contribuyen mas eficientemente a la reducción de emisiones. [5]

Ya que el aceite vegetal es un tipo de biocombustible, una forma de evitar esto es utilizar aceites de fritura usados. El Aceite Vegetal Usado es un residuo generado en la elaboración de alimentos en restaurantes y empresas del sector alimenticio. Como en esos sitios siguen un protocolo estricto de uso sobre estas sustancias, el material resultante suele ser muy homogéneo y por tanto más susceptible de ser usado como combustible de una manera sencilla. Hace tiempo este tipo de aceites se podían obtener gratuitamente porque para estas empresas suponía un gasto deshacerse del producto legalmente, pero ahora lo venden.

Una mejor forma de evitar esta competencia con los alimentos es utilizar los denominados biocombustibles de segunda generación. En ese marco los biocombustibles de segunda generación (B2G) se posicionan como una respuesta a las acusaciones contra los B1G. El objetivo de la segunda generación es ampliar la cantidad de biocombustible que puede producirse por el uso de cultivos no alimentarios, los residuos de cultivos, y los residuos agroindustriales y forestales. También se pretende que estos cultivos no alimentarios ocupen áreas marginales, para no desplazar los alimentos de las tierras agrícolas. [5]

Entre estos, el cultivo más prometedor es el de algas, el alga es el productor biológico de aceite más eficiente del planeta. El alga puede abastecer las necesidades de combustible del planeta con muy poco espacio y agua, porque se reproduce más rápidamente que cualquier otra planta. Esta se reproduce por división celular, se divide hasta que llena el espacio en el que está o hasta que agota sus nutrientes. El alga crecerá mas rápidamente si los niveles de dióxido de carbono y nutrientes se aumentan en el espacio en donde se encuentran, ya sea un estanque o una piscina. De acuerdo al NREL (National Renewable Energy Laboratory), el alga consume más dióxido de carbono que otras plantas por lo que estas pueden usar las emisiones de dióxido de carbono proveniente de plantas de energía como fuente de nutrientes. [26]

La estructura unicelular de las algas es extremadamente eficiente en el uso de la luz y en la absorción de nutrientes, tanto que el crecimiento y la productividad de las algas es entre 30 y 100 veces superior que cultivos como el de soya. La producción de algas no compite con la agricultura. Las instalaciones de producción de algas son cerradas y no requieren tierra para su crecimiento, usan un 99% menos cantidad de agua que la agricultura convencional y pueden ubicarse en terrenos no dedicados a la agricultura y situados lejos del agua. Ya que todo el organismo convierte la luz del sol en aceite, las algas pueden producir más aceite en un área del tamaño de un garaje que una plantación del tamaño de un campo de fútbol de soya. [19]

Página en blanco intencionalmente.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

3.1 CONSIDERACIONES GENERALES DEL DISEÑO

El diseño del sistema de alimentación se desarrolló considerando su aplicación y las condiciones de uso, este sistema sería usado para alimentar con aceite vegetal una planta de energía portátil, debido a esto, el sistema a usarse es aquel en el cual se reduce la viscosidad del aceite calentándolo. Se optó por usar un sistema, donde cada combustible tuviera su propio depósito individual, que es lo que se conoce como sistema de dos depósitos.

El diseño de este sistema debía incluir: Un tanque de combustible para el aceite vegetal, líneas por donde este pudiera fluir hasta el lugar deseado, un dispositivo de calentamiento y una válvula para hacer el cambio de diesel a aceite. El procedimiento de operación es: Iniciar la marcha del motor con diesel convencional, y que funcione con

éste hasta que el aceite esté lo suficientemente caliente para poder hacer el cambio de combustible. Antes de apagar el motor el combustible debe ser restaurado a diesel, para evitar que quede aceite vegetal en las líneas de combustible cuando éste se enfríe, ya que el motor diesel no puede ser alimentado con aceite frío, de ser así, existe el riesgo de causar daños al motor. El aceite no sería inyectado en los cilindros tan efectivamente como el diesel, el inyector no proporcionaría un fino spray con este aceite viscoso, las gotas más grandes de éste no se quemarían apropiadamente, lo que hará que se formen depósitos de carbón en el cilindro y los inyectores, causando que el motor funcione pobremente.

Para poder cumplir con uno de los objetivos de este trabajo de investigación, además de los componentes ya mencionados, el sistema debe contar con una forma de variar y mantener la temperatura del aceite. Para esto debía implementarse un control de temperatura, por lo que se optó por utilizar un calentador eléctrico con este propósito, porque con éste se puede variar la temperatura del aceite, variando el voltaje entre las terminales de la resistencia calentadora.

Ahora bien, para el sistema propuesto se tuvieron que hacer las siguientes consideraciones en su diseño:

- No deben hacerse modificaciones al motor ni a la planta de energía.
- El sistema constará de cuatro partes principales: tanque de combustible, calentador eléctrico, válvula de conmutación y circuitos de control.
- Estos componentes deben ser fáciles de conseguir, para poder sustituirlos rápidamente en caso de avería.
- Los componentes no deben contener elementos en los cuales, el aceite causa efectos adversos, por ejemplo el cobre, el cual es corroído por el aceite.
- La alimentación de aceite debe hacerse mediante la acción de la fuerza de gravedad, esto es, con el tanque de combustible en un nivel mas alto que los demás componentes, siguiendo este orden: tanque de combustible, calentador y válvula de conmutación.
- Debido a que sólo se usará aceite limpio, las precauciones en el filtrado de éste serán las mínimas necesarias.
- La válvula de conmutación debe ser eléctrica para poder hacer el cambio de combustibles automáticamente.
- El motor no puede ser alimentado con aceite vegetal cuando está frío, para asegurar que esto no suceda, la válvula debe hacer el cambio de diesel a aceite hasta que el motor haya alcanzado su temperatura normal de operación.
- La circuitería debe controlar tanto la temperatura del aceite, como el cambio de combustible, y ésta debe estar dentro de una caja para su protección.
- El sistema debe poder restaurar su alimentación a diesel en caso de fallo de energía cuando está siendo alimentado con aceite.

Una vez que se contó con la planta de energía a utilizar, las consideraciones a tomar en cuenta fueron incrementándose.

- Los componentes de este sistema deben ser lo suficientemente robustos para soportar las condiciones de trabajo (temperatura y vibración).
- Debido a las altas temperaturas de los gases de escape del motor, se decidió por usar intercambiador de calor, el cual usará la energía calorífica procedente de los gases de escape del motor para precalentar el aceite.
- Tanto el tanque de combustible como los circuitos de control deben estar separados de la planta, debido a que las vibraciones de ésta podrían causarles daños. Por esto mismo, estos componentes deben poderse conectar rápida y fácilmente a los que si están sobre la planta.
- El calentador eléctrico y la válvula de conmutación deben estar lo mas cerca posible del motor, esto para evitar la disminución de la temperatura del aceite de alimentación por convección, en el trayecto del calentador hacia el motor.
- Los componentes montados sobre la planta de energía, deberán fijarse a la estructura de ésta, donde las vibraciones son de menor intensidad.
- El sistema debe ser fácilmente desmontable en caso de que así se requiera.

De esta forma, un diseño preliminar del sistema de alimentación, se muestra en el siguiente diagrama esquemático.

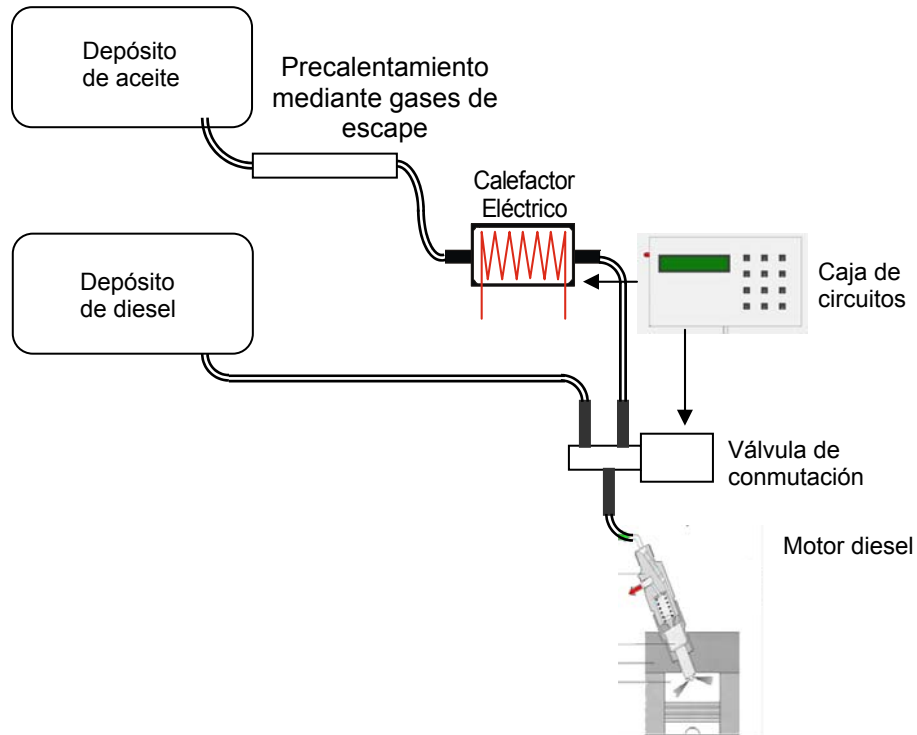


Fig. 3.1 Sistema de alimentación propuesto

3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

En esta sección se detallan los componentes del sistema de alimentación, atendiendo a las consideraciones generales antes planteadas. Se describe su función dentro del sistema, sus características técnicas y los criterios de selección tomados en cuenta.

3.2.1 Depósito de aceite

Este depósito es donde se almacena el aceite y se encarga de proveer al sistema el aceite necesario para realizar su función. Habiendo pasado ya por el precalentador, el aceite es dirigido hacia el calentador eléctrico que está en un nivel mas bajo, esto se logra mediante la acción de la fuerza de gravedad. Este depósito es de fácil adquisición, está hecho de plástico, ya que es un material que no se ve afectado por el aceite y tiene una capacidad de 20 litros.

Para adaptarlo al sistema de alimentación se le acopló una conexión roscada en la parte inferior para conectar la manguera que dirige el aceite hacia el calentador eléctrico, pasando antes por el precalentador. También se perforó la tapa de este depósito para permitir la entrada de aire, y sustituir así el aceite consumido, de lo contrario se crearía un vacío impidiendo el flujo de aceite.

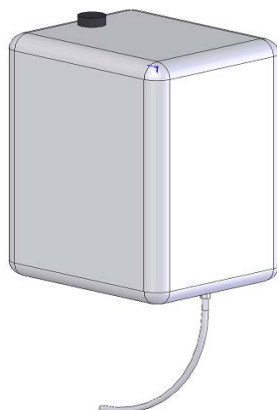


Fig. 3.2 Depósito de aceite

3.2.2 Precalentador de aceite

Se añadió también a este sistema un intercambiador de calor que aprovecha las altas temperaturas de los gases de escape para elevar la temperatura del aceite proveniente del depósito, antes de llegar al calentador eléctrico. Esto con el fin de ahorrar energía al llevar al aceite hasta la temperatura deseada, este precalentador es un tubo de aluminio al cual se le acoplaron dos conexiones roscadas en sus extremos con el fin de conectar las mangueras. Se eligió el aluminio por ser uno de los mejores conductores de calor (Conductividad térmica = $209.3 \text{ W/(m.}^{\circ}\text{K)}$), característica indispensable en un intercambiador de calor.

Gracias a esto el aceite llega al calentador eléctrico a una temperatura de 55°C , después de 15 minutos de haber iniciado a funcionar el motor, en lugar de llegar a temperatura ambiente, esto se determinó mediante pruebas.

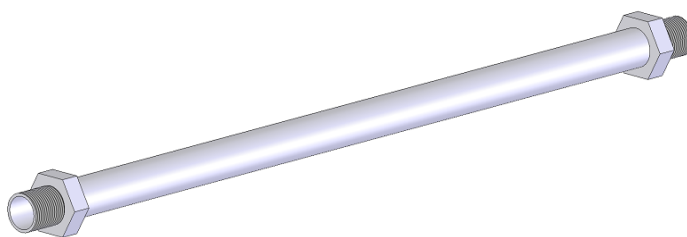


Fig. 3.3 Precalentador de aceite

Este intercambiador de calor es del tipo de flujo cruzado, en donde uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido, esto es, uno de los fluidos (aceite) pasa a través del tubo mientras que el otro (gases de escape) pasa alrededor de dicho tubo formando un ángulo de 90° .

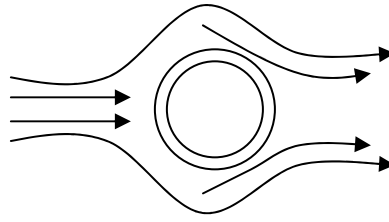


Fig.3.4 Intercambiador de flujo cruzado

3.2.3 Base para depósito de aceite

La base para el depósito de aceite viene de la necesidad de proveer a éste de la estabilidad y altura necesarias para su correcto funcionamiento. Además, al estar la base separada de la planta, proporciona al depósito una protección contra las vibraciones generadas por ésta, las cuales a la larga podrían causar daños en las conexiones, provocando derrames de aceite.

La altura de esta base es de 80cm, suficiente para proporcionar aceite a los demás componentes del sistema mediante la acción de la fuerza de gravedad.

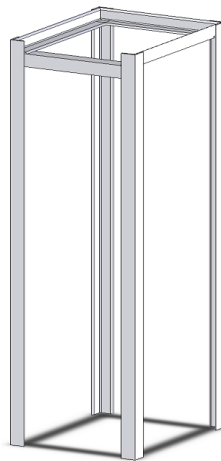


Fig.3.5 Base para tanque de combustible

Esta base se construyó con barras de acero de piernas iguales en ángulo de 90°.

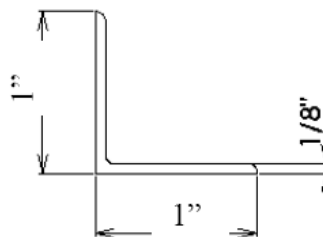


Fig. 3.6 Sección transversal de las barras

Para el correcto funcionamiento del sistema, el depósito debe asegurar el abasto constante de aceite a los demás componentes, especialmente al calentador eléctrico, de tal forma, que el flujo de aceite proveniente del depósito sea mayor que el que se consume en el motor cuando éste está a plena carga.

El consumo de la planta de energía a plena carga es de 1.9 lts/hr, por lo que el flujo de aceite que llega al calentador debe ser mayor a este valor para asegurar su correcto funcionamiento.

El teorema de Torricelli es una aplicación de Bernoulli y estudia el flujo de un líquido contenido en un recipiente, a través de un pequeño orificio, bajo la acción de la gravedad. A partir del teorema de Torricelli se puede calcular el caudal de salida de un líquido por un orificio.

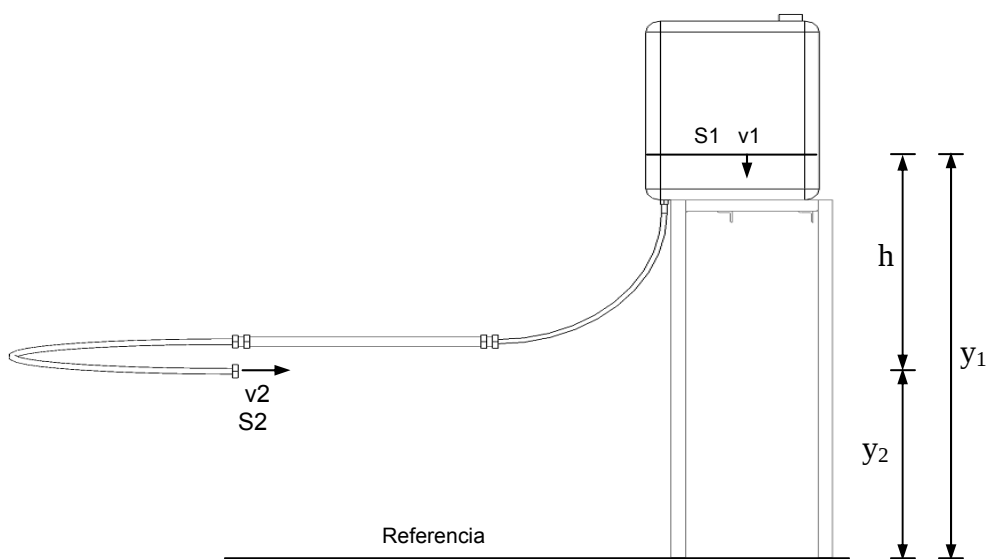


Fig. 3.7 Cálculo de gasto en el depósito

Un depósito, de sección S_1 tiene una salida de sección S_2 mucho más pequeña que S_1 . Aplicamos el teorema de Bernoulli a los puntos (1) y (2) situados en la superficie libre del fluido y en el centro del orificio inferior. [15]

$$p_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (3.1)$$

Suponiendo que la velocidad del fluido en la sección mayor S_1 es despreciable $v_1 \approx 0$ comparada con la velocidad del fluido v_2 en la sección menor S_2 . La presión en S_1 es la atmosférica ya que está entrando aire por la tapa del tanque, a medida que sale el líquido por el orificio. Por otra parte, el elemento de fluido delimitado por las secciones S_1 y S_2 está en contacto con el aire a la misma presión. Luego, $p_1 = p_2 = p_0$.

La diferencia de alturas es $y_1 - y_2 = h$. Siendo h la altura de la columna de fluido. Con estos datos la ecuación de Bernoulli se escribe:

$$gh = \frac{1}{2} v_2^2 \quad v_2 = \sqrt{2gh} \quad (3.2)$$

Y con la fórmula:

$$Q = A \times V \quad (3.3)$$

Donde: **A** es el área de sección transversal del orificio de salida

V es la velocidad del fluido a la salida

Se puede calcular el gasto de salida, pero la velocidad de salida de un flujo de un depósito depende de la diferencia de elevación entre la superficie libre del fluido y la salida de éste, si la altura del líquido va disminuyendo en el depósito la velocidad de salida también lo hace, por lo que el cálculo de caudal se debe hacer al nivel mas bajo en el depósito, para saber si cumplirá con el gasto requerido por el motor.

El nivel mas bajo es cuando el depósito está vacío y solo hay aceite en los conductos que van hacia el calentador, en cuyo caso:

$h=0.35 \text{ m}$.

Diámetro del orificio de salida = 5mm

$$v_2 = \sqrt{2(9.8 \text{ m/s}^2)(0.35 \text{ m})} = 2.61 \text{ m/s}$$

$$A = 0.785D^2 = 1.9625 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$Q = (2.61 \text{ m/s})(1.9625 \times 10^{-5} \text{ m}^2) = 5.122 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 3073.27 \text{ ml/min.}$$

Con lo que se comprueba que se cumple por mucho con el gasto requerido.

3.2.4 Calentador eléctrico

El calentador eléctrico sirve para elevar la temperatura del aceite hasta la deseada. Este componente del sistema en particular, pasó por varios diseños antes de establecerse el que ahora se tiene. Para este caso era necesario un calentador eléctrico que mantuviera la temperatura de un flujo de aceite en el nivel deseado, una vez que se alimentara con éste al motor.

Los primeros diseños constaban de tubos de metal, por donde debía pasar el aceite a calentarse y con el elemento calefactor alrededor del tubo, el elemento calefactor podían ser resistencias comunes o tipo banda; pero el inconveniente que estos presentaban era que la mayor parte del calor generado se desperdiciaba, además de que las resistencias tipo banda no son fáciles de conseguir, por lo que estos diseños fueron descartados.

El segundo diseño de calentador pudo encontrarse comercialmente, ya que éste contaba con las características requeridas y podía ser adaptado al sistema de alimentación fácilmente. Este dispositivo estaba diseñado para ser usado en el hogar, para calentar un flujo de agua. Constaba de un recipiente de plástico resistente a altas temperaturas cerrado, con una resistencia eléctrica en su interior y con las terminales de ésta sobresaliendo del recipiente, la entrada de agua se encontraba en un costado de éste, y su salida en la parte inferior.

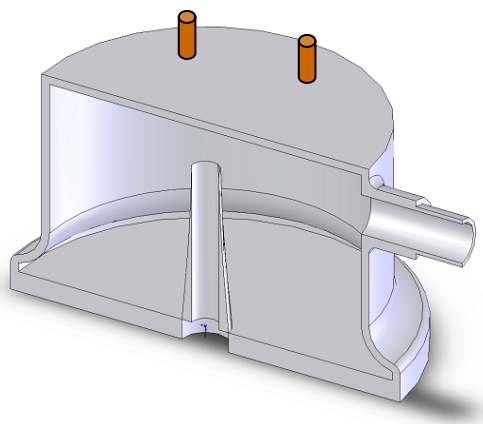


Fig. 3.8 Calentador eléctrico comercial

Este diseño fue usado satisfactoriamente en algunas pruebas de funcionamiento del sistema de alimentación, pero al hacer pruebas de larga duración a una temperatura de 110°C , el dispositivo falló; análisis posteriores dieron a conocer las razones de este fallo.

El fallo de este calentador se debió a la necesidad de colocar el sensor de temperatura del aceite lo mas cerca posible de la salida de éste, esto para evitar lo mas posible la pérdida de calor con el ambiente en el trayecto hasta el motor.

De esta forma, al poner en funcionamiento este calentador, el aceite contenido en él incrementa su temperatura, disminuyendo así su densidad, esto provoca un movimiento ascendente (denominado efecto termosifón) dentro del calentador, que hace que el aceite caliente suba a la parte superior, mientras que el aceite de menor temperatura descienda.

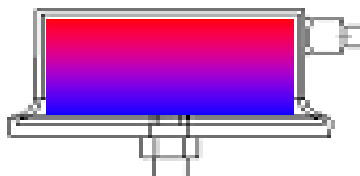


Fig. 3.9 Efecto termosifón

Debido a que la válvula de conmutación no se abre hasta que se alcanza la temperatura deseada no hay un flujo que lleve el aceite caliente a la parte inferior, por lo que el tiempo transcurrido para obtener la temperatura deseada en esta parte, para ser detectada por el sensor, se incrementaba drásticamente.

Además de esto, la temperatura en la parte superior se encontraba entre 10 y 15°C por encima de la temperatura en la parte inferior, provocando pérdida de energía calorífica y calentamiento excesivo que terminó por provocar el fallo en el calentador.

Hasta este punto, ya se conocían varios aspectos importantes a tomar en cuenta, en la concepción de un nuevo calentador eléctrico que sustituyera al anterior, dichos aspectos son:

- El calentador debe estar conformado por un recipiente cerrado con la resistencia eléctrica en su interior, para evitar la pérdida de calor.
- Debe estar hecho de un material resistente a las temperaturas requeridas (preferentemente metálico)
- La salida de este calentador debe estar posicionada en la parte superior del mismo, con el sensor de temperatura cerca de ésta.

Con la imposibilidad de encontrar comercialmente, un calentador eléctrico con las características solicitadas, se tuvo que construir uno, para satisfacer las necesidades requeridas, para su construcción se utilizaron componentes de fácil adquisición.

El calentador culminó con el diseño con que ahora se cuenta, el cual se trata de un recipiente cerrado hecho de metal, dentro del cual se encuentra una resistencia eléctrica del tipo de inmersión con sus terminales sobresaliendo en la parte superior.

Al recipiente se le acoplaron dos conexiones roscadas, una como entrada en la parte inferior, por donde entra aceite proveniente del depósito, y otra como salida en la parte superior, de donde sale el aceite hacia la válvula de conmutación.

Aunque este calentador presentaba mejores prestaciones que los anteriores, aún seguía teniendo problemas, tales como derramamiento de aceite por los sellos de la resistencia eléctrica interna y partículas suspendidas en el aceite de salida.

Las partículas en el aceite de salida se debían a que las altas temperaturas corroían el empaque de la manguera encargada de conducir el aceite hacia la válvula de conmutación, esto se logró solucionar sustituyendo esta manguera por un tubo de aluminio curvado a 90°.

Sin embargo, la razón del derramamiento de aceite por los sellos de la resistencia se debía a que al verter aceite en el depósito vacío, el aire en los conductos de aceite y el calentador quedaba atrapado en este último, por lo que al calentarlo con la resistencia eléctrica, este se expandía provocando una presión elevada en el interior del calentador, que terminaba por vencer los sellos, y la fuga de aceite de ellos como consecuencia.

La solución a este problema se dio a través de un pequeño purgador de aire colocado en la parte superior del calentador, con el que fácilmente podía extraerse todo el aire atrapado dentro de él, permitiendo que éste estuviera completamente lleno al calentar el aceite con la resistencia. Es necesario mencionar que esta purga de aire no es necesaria si el depósito de aceite se mantiene a un nivel mínimo de llenado.

Con los componentes añadidos se lograron solucionar los problemas que se tenían, además se recubrieron las paredes del calentador y el tubo de salida con poliestireno expandido como aislante térmico para impedir la pérdida de calor con el medio ambiente.

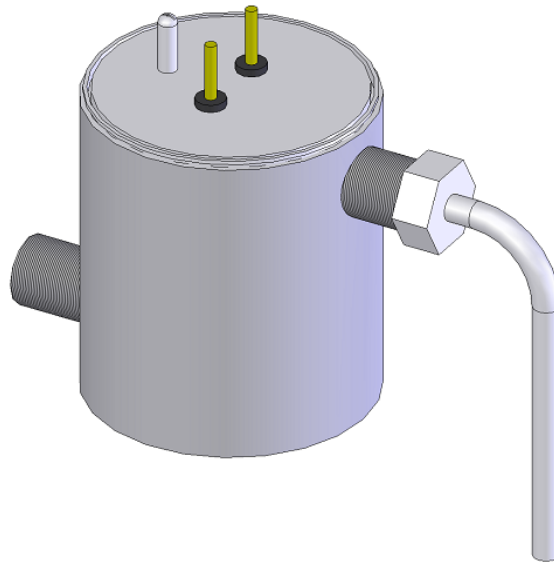


Fig.3.10 Calentador eléctrico

3.2.5 Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica que se eligió se hizo tomando en cuenta su tamaño, diseño y facilidad de adquisición, esto último, con el fin de poder sustituirla fácilmente en caso de avería. Esta resistencia es tubular de 250 w, diseñada para ser sumergida en el fluido a calentar, y cuenta con un cable especial para poder conectarse a sus terminales.

Dicha resistencia se acopló a la tapa del calentador, pero al ser esta metálica, tuvo que aislarse eléctricamente, para evitar el contacto de ambas terminales de la resistencia.

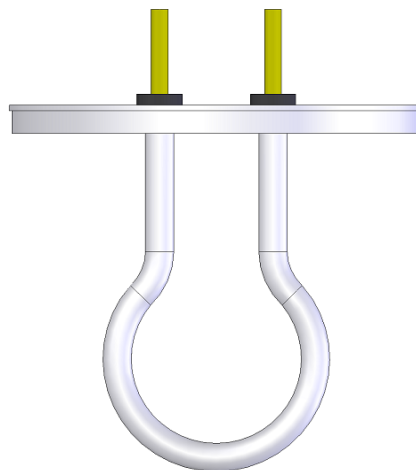


Fig. 3.11 Resistencia eléctrica

Aunque la resistencia seleccionada cumplía bien con las necesidades de diseño, se debía saber si cumpliría con los requerimientos de temperatura previamente establecidos.

Para saber esto se realizó el siguiente cálculo usando la ecuación general de transferencia de calor.

$$Q = MC_p(T_f - T_i) \quad (3.4)$$

Donde:

Q = Potencia (W)

M = masa del fluido a calentar (kg.)

C_p = calor específico del aceite (kcal/kg °C)

T_f = temperatura final (°C)

T_i = temperatura inicial (°C)

Para conocer la temperatura que alcanzará el aceite con esta resistencia se usa la formula anterior de la siguiente forma.

$$T_f = \frac{Qt}{mC_p} + T_i \quad (3.5)$$

Donde

t = tiempo en alcanzar la temperatura final (seg.)

Consideraciones de cálculo.

- La masa a calentar es la que cabe en el calentador completamente lleno.
- La potencia suministrada es la máxima que la resistencia eléctrica puede proporcionar.
- No se toma en cuenta el precalentador de aceite, es decir, la temperatura inicial será la del ambiente.
- El aceite está en reposo a la hora que es calentado.
- El tiempo de calentamiento del aceite es de cinco minutos.

$$T_f = \frac{(0.06 \text{ Kcal / seg})(300 \text{ seg})}{(0.27 \text{ kg})(0.4 \text{ kcal / kg}^\circ \text{C})} + 27^\circ \text{C} = 193^\circ \text{C}$$

Es decir, que al cabo de cinco minutos el aceite en el calentador alcanzará una temperatura de 193° C.

En el cálculo hecho anteriormente el aceite se encuentra en reposo dentro del calentador, sin embargo, al llegar a la temperatura deseada, la válvula de conmutación permite el paso de aceite vegetal hacia el motor para alimentarlo, creándose un flujo de aceite en el calentador, por lo que se hace necesario un nuevo cálculo para saber hasta que temperatura podrá elevar al aceite el calentador, cuando pasa por él un flujo igual al consumido por el motor cuando está a plena carga, que es lo máximo que podría circular por él.

Para saber esto se debió hacer un modelo matemático del calentador, tomando en cuenta los siguientes aspectos.

Resistencia térmica

La resistencia térmica R para la transferencia de calor es el inverso de la conductancia térmica, es decir, es la diferencia de temperaturas necesaria para que se produzca un traspaso de calor por unidad de tiempo a través de un material. Se define del modo siguiente: [20]

$$R = \frac{\text{cambio en la diferencia de temperatura, } ^\circ\text{C}}{\text{cambio en el flujo de calor, kcal/seg}} \quad (3.6)$$

Capacitancia térmica

La capacitancia térmica C se define mediante

$$C = \frac{\text{cambio en el calor almacenado, kcal}}{\text{cambio en la temperatura, } ^\circ\text{C}} \quad (3.7)$$

o bien

$$C = MCp$$

Donde M = masa de la sustancia considerada, kg

Cp = calor específico de la sustancia, kcal/kg $^\circ\text{C}$

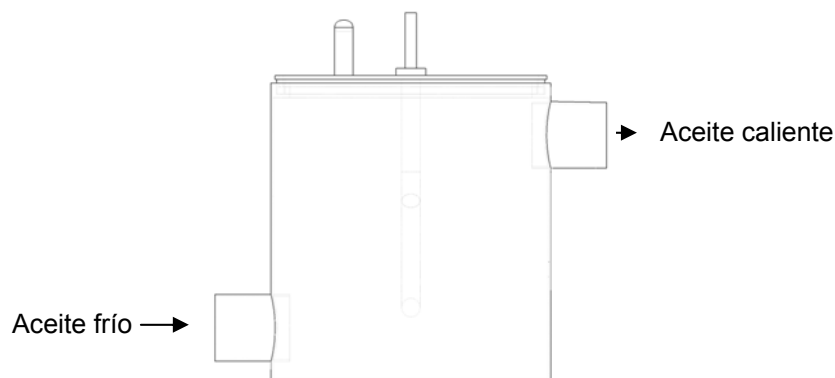


Fig. 3.12 Sistema a modelar

Definamos:

Θ_c = temperatura en estado estable del aceite en el calentador, $^\circ\text{C}$

Θ_s = temperatura en estado estable del aceite que sale, $^\circ\text{C}$

G = velocidad de flujo del líquido en estado estable, kg/seg.

M = masa del líquido en el tanque, kg.

Cp = calor específico del líquido, kcal/kg $^\circ\text{C}$

R = resistencia térmica, $^\circ\text{C seg/kcal}$.

C = capacitancia térmica, kcal/ $^\circ\text{C}$

H = flujo de calor en estado estable, kcal/seg.

Al abrirse la válvula de conmutación el aceite comienza a fluir, por lo que entra al calentador aceite frío para sustituir al que sale, de esta forma, la temperatura en el calentador cambia, de θ_c a $\theta_c + \theta$ en tanto que el flujo de calor de entrada H y el flujo de aceite G se conservan constantes, el flujo de calor de salida cambiará de H a $H + h_s$ y la temperatura del aceite que sale cambiará de θ_s a $\theta_s + \theta$. La ecuación diferencial para este caso es:

$$C \frac{d\theta}{dt} = h_s - h_c \quad (3.8)$$

Donde h_c = flujo de calor de entrada, kcal/seg.

h_s = flujo de calor de salida, kcal/seg.

Para este caso, h_s , C y R se obtienen, respectivamente, como

$$h_s = Gc\theta \quad (3.9)$$

$$C = MCp \quad (3.10)$$

$$R = \frac{\theta}{h_o} = \frac{1}{GCp} \quad (3.11)$$

Para saber la temperatura de salida de un flujo de aceite se usa la ecuación (3.3) de la siguiente forma:

$$\theta = RC \frac{d\theta}{dt} + \theta_c \quad (3.12)$$

Consideraciones de cálculo

- El flujo a través del calentador será el consumido por el motor a plena carga.
- El aceite en su salida, estará en contacto con aire a temperatura ambiente.

Para determinar $\frac{d\theta}{dt}$ se usa la ley de enfriamiento de Newton, la cual enuncia que en un cuerpo que se enfría, la rapidez con que la temperatura $T(t)$ cambia es proporcional a la diferencia entre la temperatura del cuerpo y la temperatura constante T_m del medio que lo rodea. Esto es,

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_m), \quad (3.13)$$

Donde k es una constante de proporcionalidad.

Para poder obtener la constante de proporcionalidad k se realizó una prueba de enfriamiento, con la que se obtuvieron las siguientes condiciones.

$$T(0) = 193^\circ \text{ C}$$

$$T(60) = 175^\circ \text{ C}$$

$$\frac{dT}{dt} = k(T - 27)$$

$$\frac{dT}{T - 27} = k dt$$

$$\ln(t - 27) = kt + C$$

$$T - 27 = Ce^{kt}$$

$$T = 27 + Ce^{kt}$$

Cuando $t=0$ se tiene que $T=193$, de modo que $193 = 27+C$, por lo que $C=166$, y por lo tanto, $T = 27 + 166e^{kt}$

De $T(60) = 175$ se obtiene

$$e^{60k} = \frac{148}{166} \quad \text{o bien} \quad k = \frac{1}{60} \ln \frac{148}{166} = -0.0019$$

Sustituyendo en (3.8) se tiene que $\frac{dT}{dt} = -0.3154$

Sustituyendo los datos obtenidos en (3.12) se tiene que $\theta = -45.2^\circ \text{C}$ los cuales hay que sumarlos a la temperatura inicial de salida del calentador ($\theta_s + \theta$). De esta manera, con un flujo igual al consumido por el motor a plena carga, y con la resistencia proporcionando toda su potencia, la temperatura del flujo de aceite a la salida del calentador se estabilizará en 147.8°C , suficiente para llevar a cabo las pruebas a realizar.

3.2.6 Válvula de conmutación

La válvula de conmutación sirve para hacer el cambio entre combustibles (diesel y aceite) de forma rápida y segura. Para esta aplicación era necesario usar una válvula tipo "or", con dos entradas y una salida. Su elección no fue tan difícil, ya que esta válvula es actualmente usada en medios de transporte con más de un depósito de combustible.

De esta forma, la válvula seleccionada fue una POLLAK® MOTOR-DRIVEN FUEL TANK SELECTOR VALVE, vendida por la empresa JC Whitney en EUA, y aunque no es tan fácil de conseguir, si es la mas adecuada para esta aplicación.

Esta válvula cuenta con dos entradas una de las cuales esta conectada al deposito de diesel de la planta, y la otra al calentador eléctrico, que a su vez esta conectado al deposito de aceite, la salida de esta válvula va hacia la entrada de combustible del motor. La válvula está provista de un pequeño motor eléctrico que sirve para hacer el cambio de posición, el cual es accionado con 12 V CC y que al invertir su polaridad regresa a la válvula a su posición inicial.



Fig. 3.13 Válvula de conmutación

Incorpora seis puertos, incluyendo retornos: conexión a presión de 3/8" para alimentación, y de 5/16" para el retorno, y cuenta con dos agujeros para poder montarse de 5/16". La válvula solo consume energía en una fracción de segundo durante el cambio de posición y permanece en esa posición después de que se corta la energía.

3.2.7 Caja de circuitos

En esta sección se verá la función de la caja de circuitos dentro del sistema de alimentación, los detalles de los circuitos internos y su funcionamiento se verán mas adelante.

La caja de circuitos se encarga de controlar la temperatura de alimentación y el cambio de combustible hecho por la válvula, esta caja cuenta con un dispositivo para introducir la temperatura a la cual se desea alimentar al motor (teclado matricial) y otro dispositivo para visualizar las temperaturas de alimentación de aceite, la deseada y la del motor (pantalla lcd). En el interior de esta caja se encuentran los siguientes circuitos, los cuales fueron colocados en dos niveles para ahorrar espacio.

- Circuito de control de temperatura
- Circuito de control de válvula de conmutación
- Impulsor
- Fuente de alimentación para 5 y 12 Volts
- Circuito de potencia

Este último es el encargado de proporcionar a la resistencia el voltaje necesario para calentar el aceite. La caja tiene sólo una toma de energía de 120 V CA en la parte posterior, la cual es conectada a la planta. Cuenta además con un led en uno de sus costados que indica cuándo el motor está siendo alimentado con aceite. La caja está hecha de acrílico a excepción de la pared posterior, la cual está hecha de aluminio, con el fin de que pueda servir como disipador de calor para los componentes del circuito de potencia que así lo requieren, de esta forma, el calor generado por estos componentes es extraído de la caja, con lo cual se ahorra en un sistema de ventilación forzada.

Al estar esta caja separada de la planta, se diseñó para ser fácilmente conectada a los demás componentes, por lo que las conexiones que de ésta salen al exterior son para:

- Sensor de temperatura de aceite

- Sensor de temperatura del motor
- Válvula de conmutación
- Resistencia del calentador
- Toma general de energía
- Batería para el circuito auxiliar de conmutación

Esta última es la misma usada por la planta para el arranque del motor, y es usada en la caja de circuitos para restaurar la alimentación a diesel en caso de fallo de energía cuando el motor está siendo alimentado con aceite.

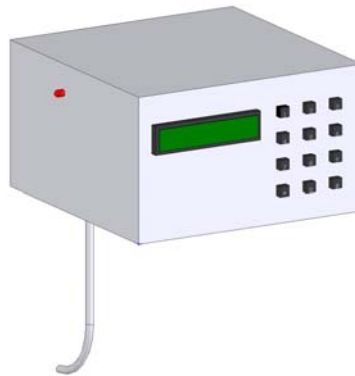


Fig. 3.14 Caja de circuitos

3.2.8 Motor-generator

El motor-generator usado en este proyecto de investigación es uno de 6 kw con motor diesel modelo AH6000LE de la empresa AMICO POWER con sede en Pico Rivera, CA, EUA.



Fig. 3.15 Motor generador

El motor es el modelo **AH186F de 10HP**, de un cilindro, con inyección directa, de cuatro tiempos y enfriado con aire. El generador es monofásico de 6 kw, de 60 Hertz y con dos opciones de voltaje de 120 y 240. Algunas de las características más importantes se encuentran en la siguiente tabla: [10]

Tabla 3.1 Características del motor generador usado en este proyecto

Modelo	AH6000LE
Frecuencia	60Hz
Voltaje (AC)	120V/240V
Potencia	6000W
Potencia máxima	6500W
Corriente alterna	120V/54Amps & 240V/27Amps
Salida corriente continua	12V/8.3A
Velocidad del motor	3600rpm
Factor de potencia	1.0(cosφ)
Arranque	Eléctrico y manual
Peso neto	253 lbs/ 115kg
Dimensiones (L×A×H)	700mm×500mm×620mm
Modelo de motor	AH186F(E)
Tipo	Monocilíndro, Inyección vertical directa, 4-tiempos, enfriado por aire
Salida continua	10.0HP
Bore × Stroke	86mm × 72mm
Desplazamiento	418cc
Sistema de protección	Sistema de advertencia de nivel bajo de aceite / Dispositivo de parada.
Nivel de ruido	72 db(A) a 7 metros
Capacidad del combustible	3.3 Galones / 12.5 Litros
Capacidad de aceite	1.6 Litros
Dirección del cigüeñal	Volante en sentido horario desde el final
Tipo de enfriamiento	Enfriamiento por aire forzado

CAPÍTULO 4

ELECTRÓNICA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

La necesidad de la automatización y el control, en el sistema de combustible a construir, trajo consigo la utilización de la electrónica. Con este fin, diversos circuitos electrónicos fueron contruidos para desempeñar dichas tareas.

La automatización es un sistema diseñado con el fin de usar la capacidad de las máquinas para llevar a cabo determinadas tareas anteriormente efectuadas por seres humanos, y para controlar la secuencia de las operaciones sin intervención humana. El término automatización también se ha utilizado para describir sistemas en los que los dispositivos programados o automáticos pueden funcionar de forma independiente o semi-independiente de la participación directa del humano.

Por otra parte, el control automático es el mantenimiento de un valor deseado dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla. En consecuencia, el control automático exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana.

Estos dos conceptos están presentes en el componente del sistema de combustible denominado “caja de circuitos”, en la cual se encuentran alojados los circuitos, cuya función es la de automatizar el sistema de alimentación, y que llevará a cabo tareas tales como:

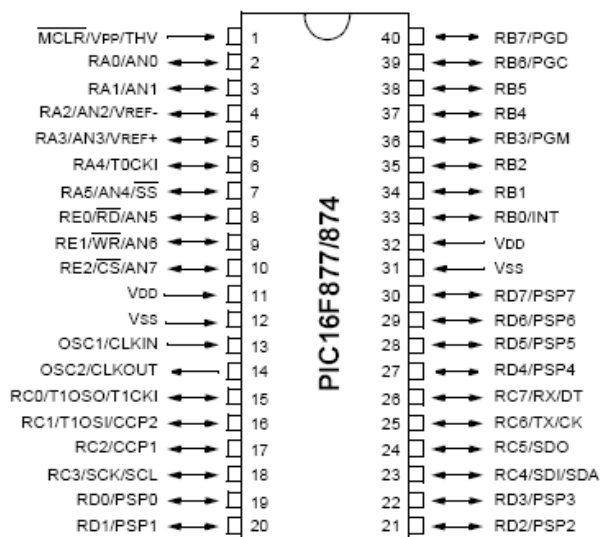
- Sensar y mostrar las temperaturas del aceite de alimentación y del motor.
- Controlar la temperatura del aceite, esto es, mantenerla en el valor indicado.
- Cambiar de posición la válvula, para alimentar ya sea con diesel o aceite al motor, de acuerdo a ciertos parámetros preestablecidos.

La acción de dichas tareas recae en un dispositivo llamado microcontrolador. El cual es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de un computador. Se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada.

El microcontrolador es un computador dedicado. En su memoria sólo reside un programa destinado a gobernar una aplicación determinada; sus líneas de entrada/salida soportan el conexionado de los sensores y actuadores del dispositivo a controlar, y todos los recursos complementarios disponibles tienen como única finalidad atender sus requerimientos. Una vez programado y configurado el microcontrolador solamente sirve para gobernar la tarea asignada.

La utilización de un microcontrolador en un circuito reduce notablemente el tamaño y número de componentes y, en consecuencia, disminuye el número de averías y el volumen y el peso de los equipos, entre otras ventajas.

En los últimos años han tenido un gran auge los microcontroladores PIC fabricados por *Microchip Technology Inc.* Los PIC (*Peripheral Interface Controller*) son una familia de microcontroladores que ha tenido gran aceptación y desarrollo en los últimos años gracias a que sus buenas características, bajo precio, reducido consumo, pequeño tamaño, *gran* calidad, fiabilidad y abundancia de información, lo convierten en muy fácil, cómodo y rápido de utilizar.



4.1 Microcontrolador PIC16F877A

Según las aplicaciones a las que orienta el fabricante cada modelo de microcontrolador, incorpora una diversidad de complementos que refuerzan la potencia y la flexibilidad del dispositivo. Entre los recursos más comunes se citan a los siguientes:

- a) *Circuito de reloj*, encargado de generar los impulsos que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.
- b) *Temporizadores*, orientados a controlar tiempos.
- c) *Perro Guardián («watchdog»)*, destinado a provocar una reinicialización cuando el programa queda bloqueado.
- d) *Conversores AD y DA*, para poder recibir y enviar señales analógicas.
- e) *Comparadores analógicos*, para verificar el valor de una señal analógica.
- f) *Sistema de protección ante fallos de la alimentación*
- g) *Juego de sólo 35 instrucciones* con 14 bits de longitud. Todas ellas se ejecutan en un ciclo de instrucción, menos las de salto que tardan dos.

Los microcontroladores poseen una memoria interna que almacena dos tipos de datos; las instrucciones, que corresponden al programa que se ejecuta, y los registros, es decir, los datos que el usuario maneja, así como registros especiales para el control de las diferentes funciones del microcontrolador. La utilización de los lenguajes más cercanos a la máquina (de bajo nivel) representan un considerable ahorro de código en la confección de los programas, lo que es muy importante dada la estricta limitación de la capacidad de la memoria de instrucciones. Los programas bien realizados en lenguaje Ensamblador optimizan el tamaño de la memoria que ocupan y su ejecución es muy rápida. [2]

Por todo lo anterior, el microcontrolador seleccionado es el PIC16F877A, debido a que cuenta con las características necesarias para el trabajo asignado.

Tabla 4.1 Características del PIC16F877A

CARACTERÍSTICAS	16F877
Frecuencia máxima	DX-20MHz
Memoria de programa flash palabra de 14 bits	8KB
Posiciones EEPROM de datos	256
Puertos E/S	A, B, C, D, E
Número de pines	40
Interrupciones	14
Timers	3
Módulos CCP	2
Comunicaciones Serie	MSSP, USART
Comunicaciones paralelo	PSP
Líneas de entrada de CAD de 10 bits	8
Juego de instrucciones	35 Instrucciones
Longitud de la instrucción	14 bits
Canales Pwm	2

Dichas características le permitirán a este microcontrolador manejar principalmente:

- Los sensores de temperatura del aceite y del motor
- La pantalla lcd que muestra todas las temperaturas
- El teclado matricial, para la introducción de la temperatura deseada
- El algoritmo de control de temperatura del aceite.
- Los módulos PWM para controlar el circuito de potencia, encargado de proporcionar el voltaje indicado por el control al calentador eléctrico.
- El cambio de posición de la válvula de conmutación.

Este dispositivo fue programado siguiendo un procedimiento por etapas, en el cual, las tareas citadas anteriormente fueron programadas una a la vez. Habiendo obtenido un buen funcionamiento en cada una de ellas, se prosiguió a unir las para obtener el programa encargado de llevarlas a cabo de la siguiente manera:

Al poner en marcha el motor-generator, éste proporciona energía para la caja de circuitos, la cual al encenderse muestra inmediatamente la temperatura actual del aceite en el calentador o temperatura real (TR) y la temperatura del motor (TM), y se mantiene en espera de que el usuario introduzca la temperatura a la que desea que sea alimentado el motor con el aceite (TD), una vez que se ha introducido esta temperatura, el control PID, junto con el circuito de potencia, se encargan de alcanzarla, para después comparar la temperatura del motor (TM) con la temperatura de trabajo del motor (TTM) que se encuentra cargada en el programa, una vez que se han alcanzado estas dos temperaturas (TD y TTM), el microcontrolador procede a cambiar de posición la válvula de conmutación para que el motor sea alimentado con aceite y enciende un led indicador para saber que ha ocurrido esto.

Mientras TR sea igual a TD y TM sea mayor o igual a TTM la válvula se mantendrá en la posición de alimentación de aceite, si alguno de estos valores cambia, la válvula regresará a su posición original de alimentación con diesel y se desactivará el led indicador. También se cuenta con un circuito de emergencia que en el caso de algún fallo de alimentación, una batería regresa a la válvula a su posición inicial.

Cuando se desea dejar de alimentar al motor con aceite, solamente se apaga el circuito de control, y la válvula regresará a su posición inicial.

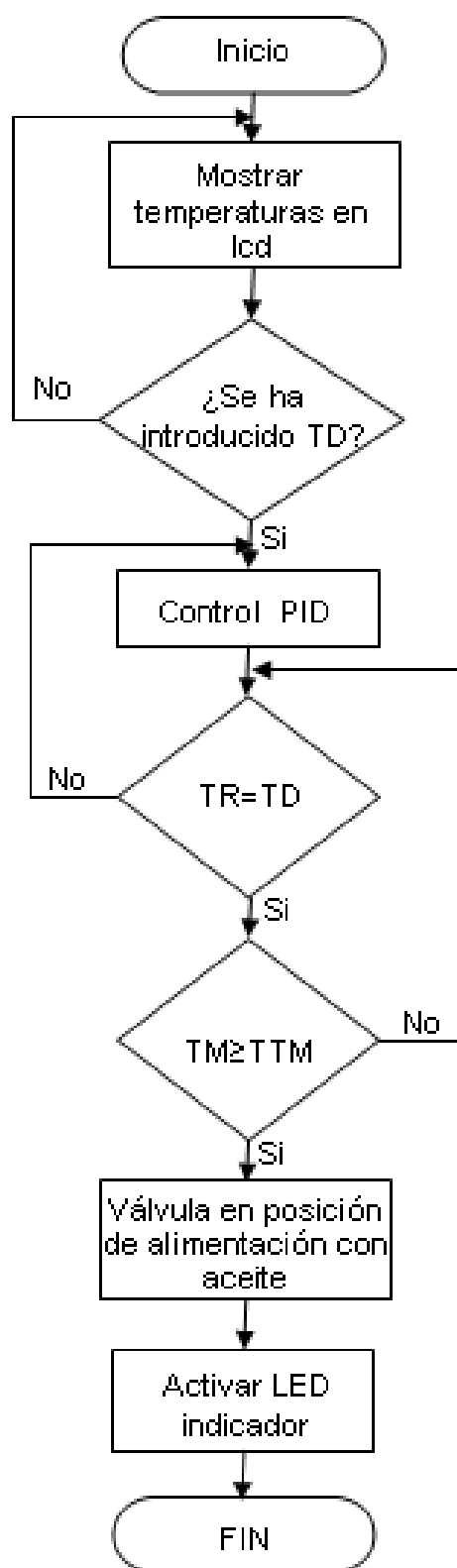


Fig. 4.2 Diagrama de flujo del sistema de alimentación

4.1 CIRCUITO DE CONTROL DE TEMPERATURA

En este trabajo de investigación, la temperatura se controlará mediante un bucle cerrado, implementando un algoritmo de control para que el error entre la temperatura deseada y la temperatura real sea nulo. En el sistema de lazo cerrado o retroalimentado, la señal de salida tiene efecto directo sobre la acción de control, ya que es retroalimentado y comparado con una entrada de referencia, con lo que permite rectificar las modificaciones que se producen en todas las entradas del proceso y así controlar el valor de salida

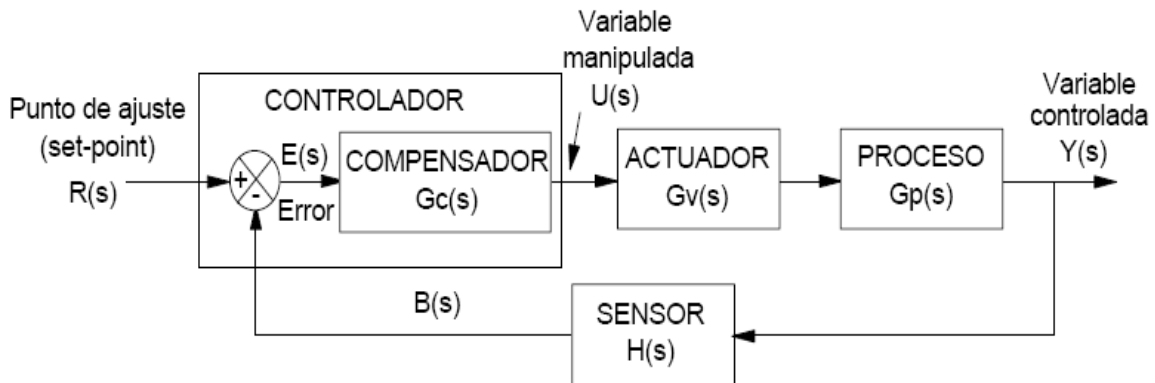


Fig. 4.3 Control automático

Para poder controlar la temperatura en un sistema se puede realizar mediante el algoritmo siguiente:

- Leer la temperatura del material (T_{real}) usando un sensor de temperatura.
- Se compara la temperatura real con la temperatura deseada (T_{deseada}).
- Basada en esta comparación, se decide que ancho de pulso se necesita enviar al circuito de potencia para que la temperatura real se acerque a la temperatura deseada.

Este proceso se ejecuta continuamente hasta obtener la temperatura deseada.

4.1.1 Medición de temperatura

Como ya se mencionó en la sección anterior, el primer paso para controlar la temperatura es medirla utilizando un sensor, entre la amplia gama de sensores de temperatura que existen, el seleccionado fue el sensor LM35, debido a su bajo coste y facilidad para encontrarlo en el mercado.

El LM35 es un circuito integrado que proporciona un valor de voltaje que es linealmente proporcional a la magnitud de temperatura que está midiendo en grados centígrados. Cuenta con un encapsulado TO-92 con tres pines: alimentación (V_s), tierra (GND) y voltaje de salida (V_{out}). De acuerdo con el fabricante su rango de operación va de 0V CC a 1.5 V CC, que equivale a 0° C y 150° C respectivamente, y a cada cambio de 1° C el valor de voltaje cambia en 10mV, es decir 10mV/° C, por lo tanto es muy fácil saber qué valor de temperatura está midiendo al saber el valor de voltaje que entrega el sensor.

Debido a que este sensor entrega un voltaje analógico proporcional a la temperatura que está midiendo, éste necesita ser digitalizado mediante el convertidor analógico-digital que se encuentra en el microcontrolador para poder ser tratado por el algoritmo de control que se encuentra en él.

Conversor A/D:

Se trata de un potente periférico que se halla integrado en todos los microcontroladores del tipo PIC16F87X. El modelo 16F877 dispone de 8 canales de entrada. Es un conversor analógico a digital de 10 bits con una tensión de referencia positiva que puede ser interna (VDD) o externa (entra por la patita AN3/Vref+) de igual manera que la tensión de referencia negativa (entrada por la patilla AN2/Vref-). En cada momento la conversión sólo se realiza con la entrada de uno de sus canales, depositando el resultado de la misma en los registros ADRESH y ADRESL, y activándose el señalizador ADIF, que provoca una interrupción si el bit de permiso correspondiente esta activado. Además, al terminar la conversión el bit GO/DONE se pone a 0.

Para gobernar el funcionamiento del CA/D se utilizan dos registros: ADCON0 y ADCON1. El primero, selecciona el canal a convertir con los bits CHS <2:0>, activa al conversor y contiene el señalizador que avisa del fin de la conversión (ADIF) y el bit GO/DONE.

El registro ADCON1 establece las entradas que son digitales y analógicas, así como el tipo de tensión de referencia (interna o externa). El tiempo que dura la conversión depende de la frecuencia de funcionamiento del PIC y del valor de los bits ADCS1 y ADCS0. Por ejemplo, en este caso el PIC trabaja a 4MHz y los bits ADCS1:ADCS0 =10, por lo tanto el tiempo de conversión es: [3]

$$T_{AD} = 32 \cdot T_{OSC} = 32(1/4) = 8 \text{ microsegundos} \quad (4.1)$$

Finalmente, se describen de forma resumida los pasos para realizar una conversión en el CA/D:

- 1º. Se configura correctamente el CA/D programando los bits de los registros de control.
- 2º. Se autoriza o prohíbe la generación de interrupción al finalizar la conversión, cargando los bits del PIE1.
- 3º. Para iniciar la conversión se pone el bit GO/DONE = 1. Hay que tener en cuenta el tiempo que durará la conversión.
- 4º. Se detecta el final de la conversión bien porque se genera la interrupción, o bien porque se explora cuando el bit GO/DONE = 0.
- 5º. Se lee el resultado de la conversión en el registro ADRESH y ADRESL.

En el caso de este proyecto, se utilizarán las entradas 0 y 1 del conversor, a las cuales se conectan los sensores de temperatura del aceite en el calentador y del motor respectivamente, y una vez activado el módulo A/D para iniciar la conversión de la tensión del sensor a un valor digital, exploraremos el bit GO/DONE hasta que esté activo indicando que ya tenemos nuestro resultado en el registro ADRESH.

Se utiliza el valor depositado en ADRESH porque se trabaja con conversiones de 8 bits aunque el conversor A/D es de 10 bits. El conversor A/D se programa para que deposite el resultado de la siguiente manera. Los 8 bits de más peso los introduce en ADRESH y los 2 bits de menos peso en ADRESL, despreciando estos últimos porque trabajamos con datos de 8 bits que ya nos proporcionan la precisión requerida.

La resolución que tiene cada bit procedente de la conversión tiene un valor que es función de la tensión de referencia V_{ref} , de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Resolución} = (V_{ref+} - V_{ref-}) / 1.024 = V_{ref} / 1.024 \quad (4.2)$$

Debido a que se utilizará el voltaje de referencia interna del microcontrolador (V_{DD}), para el conversor A/D, la $V_{ref+} = 5 \text{ V CC}$ y la V_{ref-} es tierra = 0 V , la resolución del conversor es entonces de 4.8 mV/bit , por ejemplo a la entrada analógica de 0 Volts le corresponde una digital de $0000 \ 0000$ y para la de 5 Volts una de $1111 \ 1111$. Por lo tanto, es necesario acondicionar la señal del sensor para entregar 4.8 mV/bit y no los 10 mV/bit que entrega normalmente, esto se hace con un divisor de voltaje, el cual usa la siguiente fórmula:

$$V_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_i \quad (4.3)$$

Donde: V_o = Voltaje de salida del divisor

V_i = Voltaje de entrada

R_1 = Resistencia 1

R_2 = Resistencia 2

Con esta fórmula se obtienen los valores de las resistencias R_1 y R_2 que se deben colocar para obtener el voltaje deseado en la entrada del PIC, dando como resultado que $R_1 = 10 \text{ K}$, y $R_2 = 9.56 \text{ K}$, y ya que este último valor de resistencia no es posible encontrarla, se usa en su lugar un potenciómetro multivuelta ajustado al valor de R_2 , además se conecta en la entrada del microcontrolador, el condensador de $0.1 \mu\text{F}$ tal y como aconseja el fabricante de dicho componente para trabajar en ambientes ruidosos.

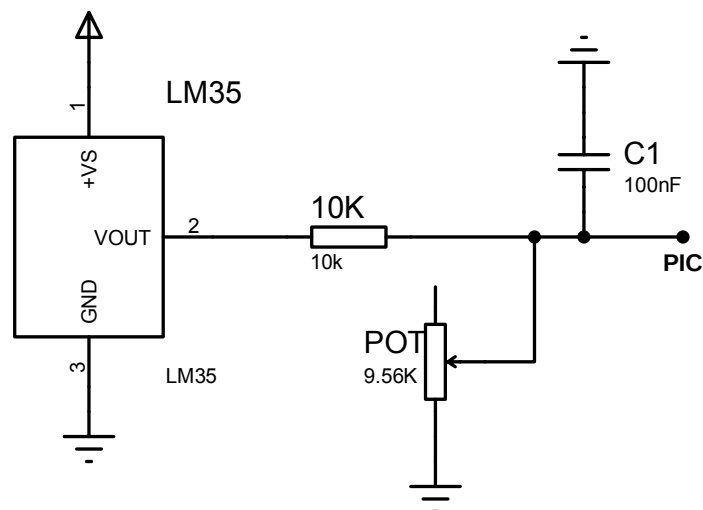


Fig.4.4 acondicionamiento de la señal del sensor

Con este acondicionamiento de la señal del sensor, es posible medir la temperatura del aceite y del motor en un rango que va desde 0 hasta los 150° C, rango suficiente para la realización de las pruebas que se pretenden hacer.

El siguiente paso en el proceso es validar este circuito, para hacer esto, el circuito debe ser comparado con un medidor de temperatura fiable, por esta razón el medidor de temperatura usado para éste propósito fue el MUL-600, el cual es un multímetro de la marca Steren que entre sus funciones está la de medir temperatura, esto lo hace con un termopar que debe ser conectado a éste para hacer la medición. Además, éste instrumento proporciona un software para poder conectarse a la computadora y visualizar una grafica de la temperatura en el tiempo.

Con estos datos proporcionados por el instrumento, era necesario hacer una gráfica igual, pero que proviniera del circuito realizado, para así poder comparar ambas. Esto se hizo con una interfase entre el PIC y la computadora, y el programa LabVIEW 8.2 para poder visualizar los datos en la PC.

La interfase usada es una RS-232, que consiste en un circuito integrado MAX232 de la empresa MAXIM, y un conector DB9 para poder conectarse al puerto serie de la PC. El MAX232 es un circuito integrado que convierte los niveles de las líneas de un puerto serie RS232 a niveles TTL y viceversa. Sólo necesita una alimentación de 5Volts, ya que genera internamente algunas tensiones que son necesarias para el estándar RS232. El MAX232 soluciona la conexión necesaria para lograr comunicación entre el puerto serie de una PC y cualquier otro circuito con funcionamiento en base a señales de nivel TTL/CMOS, como las del PIC.

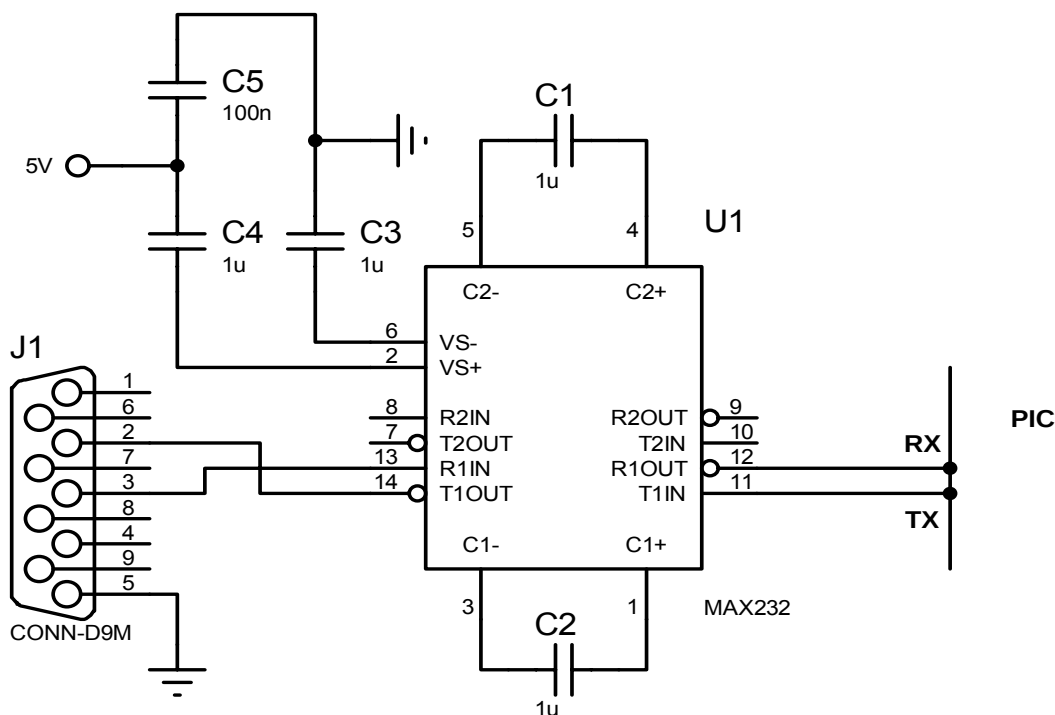


Fig. 4.5 Interfase RS-232

Con este circuito y una pequeña modificación en el programa del PIC se logró realizar la interfase. Con esto, aún era necesario realizar un programa en LabVIEW para poder hacer la gráfica de temperatura, de esta forma, se obtuvo el siguiente programa:

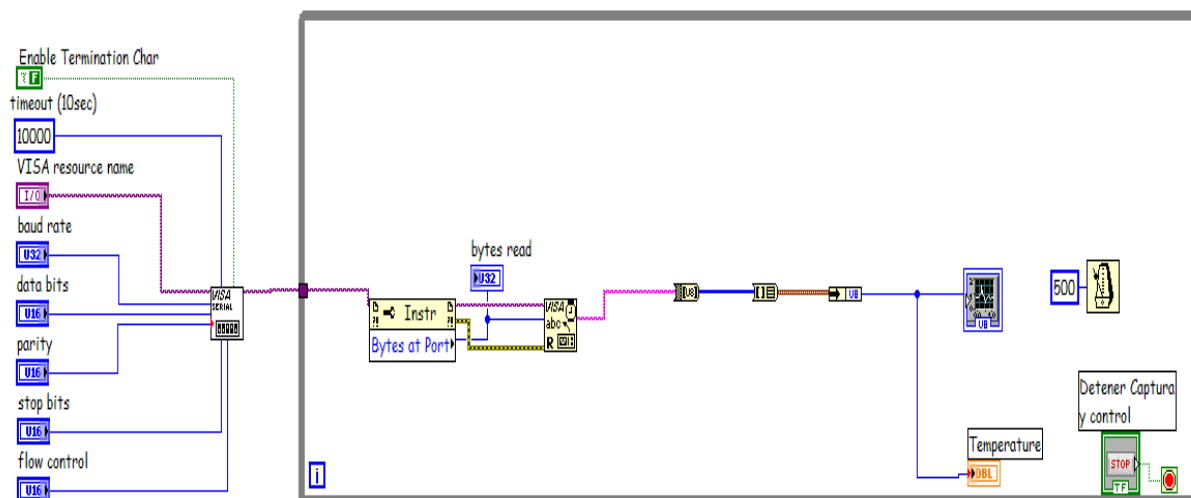


Fig.4.6 Programa en LabVIEW

De esta forma se obtiene una gráfica de la temperatura en el tiempo, la cual es comparada con la gráfica obtenida del MUL-600. Con estos dos métodos, se pueden hacer pruebas sobre una muestra de aceite, a la cual le es aplicado y retirado calor a intervalos, con el fin de obtener ambas gráficas; en la cual se varía la temperatura en el tiempo y así es posible comparar las gráficas con mayor claridad. La siguiente figura muestra una de estas pruebas, en la cual son unidos los dos sensores (termopar y LM35) para poder tomar la misma temperatura.

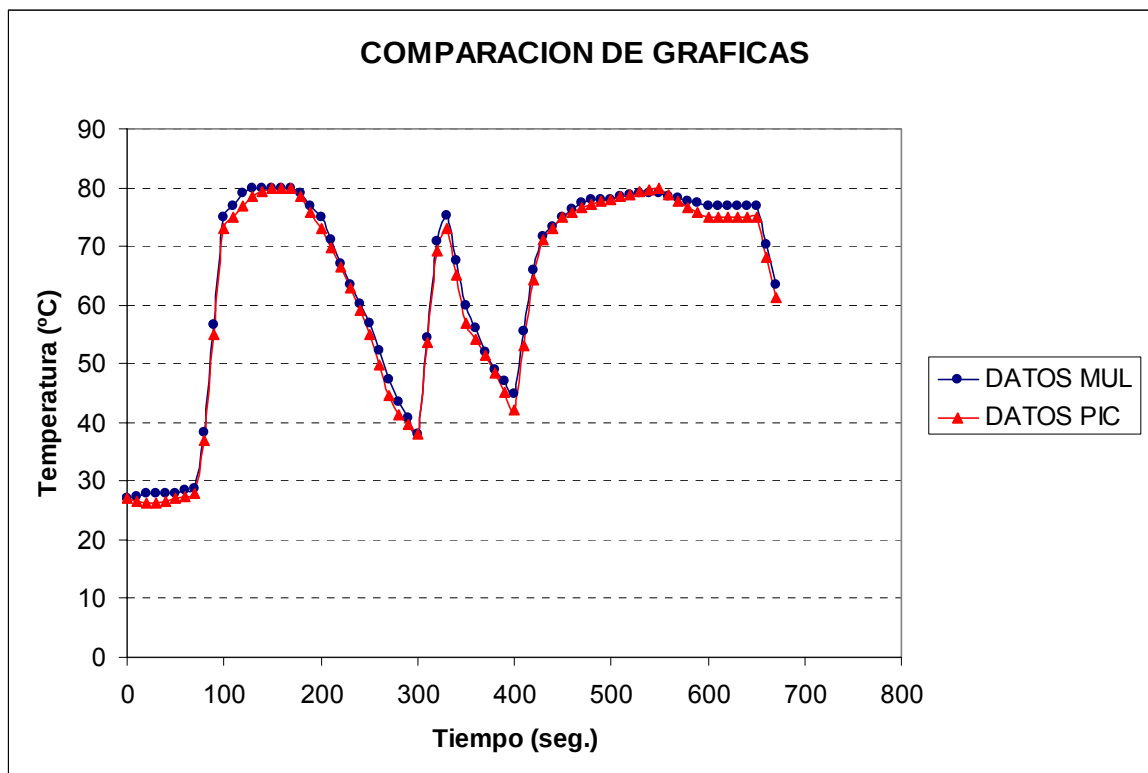


Fig. 4.7 Comparación de gráficas

De donde se obtuvieron los siguientes datos

$$erp = \frac{\sum \left(\frac{ea}{xr} \right)}{n} * 100 \quad (4.4)$$

Donde:

erp= error relativo promedio

ea= error absoluto

xr= medida del MUL-600

n= numero de muestras

erp = 2.15%

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - xr)^2} \quad (4.5)$$

Donde

σ = desviación estándar

n= numero de muestras

xi= medida del MUL-600

xr= medida sensor LM35

σ = 1.6° C

Con lo que podemos constatar que la temperatura medida por ambos sensores es casi igual, por lo que es posible afirmar que el sensor de temperatura usado para esta aplicación, trabaja de manera satisfactoria.

4.1.2 Monitoreo de temperaturas

El monitoreo de temperaturas es una parte fundamental del control, ya que éste permite visualizar en cualquier momento la temperatura del aceite de alimentación y la del motor, además permite ver la temperatura deseada cuando está siendo introducida en el control, y cómo el aceite en el calentador alcanza esa temperatura.

Todo esto es posible gracias a la utilización de una pantalla LCD (Liquid Crystal Display). Los módulos LCD están compuestos básicamente por una pantalla de cristal líquido y un circuito microcontrolador especializado el cual posee los circuitos y memorias de control necesarias para desplegar el conjunto de caracteres ASCII, un conjunto básico de caracteres japoneses, griegos y algunos símbolos matemáticos por medio de un circuito denominado generador de caracteres. La lógica de control se encarga de mantener la información en la pantalla hasta que ella sea sobrescrita o borrada en la memoria RAM de datos.

La pantalla de cristal líquido utilizada en este proyecto está conformada por dos líneas de 16 caracteres de 5x7 píxel c/u. El microcontrolador especializado es el modelo HITACHI 44780.

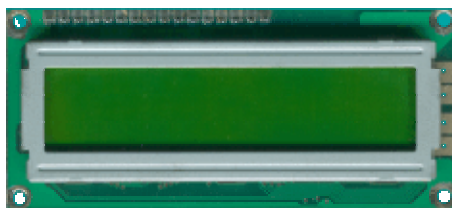


Fig.4.8 Pantalla LCD

Estos módulos poseen a través de estos CI's una interfase paralela para ser comandada desde un microcontrolador, microprocesador ó inclusive se puede realizar el control desde el puerto paralelo de una PC.

El microcontrolador y la pantalla de cristal líquido están colocados sobre un circuito impreso (PCB) y se interconectan con el mundo exterior a través de un conector de 14 pines, el cual puede obtenerse en dos presentaciones: una línea y dos líneas teniendo la siguiente distribución:

Tabla 4.2 Descripción de pines de LCD

PIN N°	SIMBOLO	DESCRIPCION
1	Vss	Tierra de alimentación GND
2	Vdd	Alimentación de +5V CC
3	Vo	Contraste del cristal liquido. (0 a +5V)
4	RS	Selección del registro de control/registro de datos: RS=0 Selección registro de control RS=1 Selección registro de datos
5	R/W	Señal de lectura/escritura: R/W=0 Escritura (Write) R/W=1 Lectura (Read)
6	E	Habilitación del módulo: E=0 Módulo desconectado E=1 Módulo conectado
7-14	D0-D7	Bus de datos bidireccional.

Como ya se vio, el convertor A/D a 8 bits sólo usa un registro, lo que se hace es "separar" unidades, decenas y centenas mediante restas sucesivas de 100 en 100, después de 10 en 10 y lo que sobra son las unidades, ya separado el resultado de la conversión en BCD se le debe sumar 0X30 hexadecimal para convertirlo en su equivalente ASCII y así poder visualizar los datos enviados por el PIC.

Por ultimo, el LCD fue unido al circuito de control mediante cables, esto con el fin de poder colocarlo en la parte frontal de la caja de circuitos y así poder visual fácilmente la información que proporciona.

4.1.3 Temperatura deseada

La temperatura deseada o set point es la temperatura a la cual se desea calentar el aceite con el que se va a alimentar al motor, en este proyecto se utiliza un teclado matricial de 4x3 para poder hacer esto.

Un teclado matricial es un dispositivo de entrada de datos que consta de teclas o pulsadores, dispuestos e interconectados en filas y columnas. Cuando se presiona un pulsador se conecta una fila con una columna, teniendo en cuenta este hecho es posible averiguar qué tecla fue pulsada.

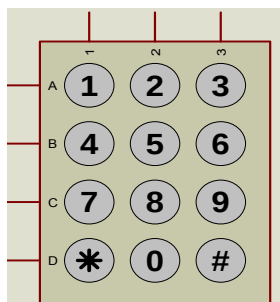


Fig. 4.9 Teclado matricial

Para ingresar la temperatura deseada, el usuario debe visualizar el teclado matricial y seguir los siguientes pasos:

1. Oprimir asterisco (*), lo cual genera una interrupción en el PIC16F877 y éste queda a la espera de la entrada de dígitos.
2. Oprimir dígito a dígito la temperatura deseada, ingresando primero las centenas, luego el número de decenas y por último las unidades.

El sistema está diseñado para recibir cualquier cantidad de datos, de los cuales sólo admitirá los tres últimos dígitos organizándolos en el orden anteriormente mencionado. Debido a que la temperatura máxima que puede medir el sensor son 150° C, éste puede ser el máximo valor digitado. Si se digita un valor mayor a éste, el dato no será admitido y el sistema retornará el último dato válido recibido.

3. Oprimir numeral (#), con lo cual se guarda el dato y el controlador comenzará el respectivo proceso para obtener la nueva temperatura deseada en el calentador. Después de pulsar esta tecla, el sistema no admitirá más datos hasta que no vuelva a pulsarse asterisco.

Debido a la utilización de este dispositivo, se hizo necesario el uso de un controlador de teclado, cuya función es la de enviar al PIC16F877 el número binario de la tecla correspondiente que fue pulsada. Este controlador es un circuito integrado especial para esta función, pero debido a que es costoso y difícil de conseguir, en su lugar se usó un PIC16F876, programado para desempeñar la misma tarea que el integrado, por ser éste más barato y fácil de obtener.

Para saber qué tecla está siendo pulsada es necesario escanear el teclado, y esto se consigue mediante una rutina en el PIC16F876 que consiste en ir poniendo una a una las líneas RB0 a RB3 (conectadas a las filas del teclado) a nivel bajo ya que estas salidas

tienen conectada la resistencia de polarización a Vd. y por lo tanto están siempre a nivel lógico alto. Cada vez que una fila se pone a nivel bajo se hacen 3 comprobaciones para ver si una de las tres columnas se ha puesto a nivel bajo y así saber la tecla pulsada. Además, fue anexada a éste programa una rutina antirebote, con lo que se evita que al pulsar una tecla, esta sea introducida dos o más veces al microcontrolador.

Así entonces, mediante una interrupción externa se obtiene la temperatura deseada a través del teclado matricial. Cuando los dígitos son introducidos, estos se envían al PIC16F876, para posteriormente ser enviados en código binario al PIC17F877, el cual lee el puerto B cada vez que es pulsado un dígito, gracias a un señalizador conectado a RB3 que es activado. Inmediatamente después, éste dígito se visualiza en pantalla LCD, para lo cual hay que convertir cada dígito a su equivalente ASCII, después, estos son ordenados en unidades decenas y centenas mediante sumas sucesivas, una vez que se ha introducido la temperatura deseada se pulsa # para ser almacenada en un registro, que es introducido al algoritmo de control para que éste realice las acciones correspondientes para llegar a esa temperatura.

Son agregadas a este circuito resistencias de 2k2 que son necesarias para poder compartir el puerto del PIC independientemente del teclado. Durante la fase de lectura del teclado la mitad de la puerta B es configurada como entrada y la otra mitad como lectura y durante la escritura, la puerta B es configurada como salidas. Entonces se podrían cortocircuitar accidentalmente las salidas de los puertos provocando su destrucción, si se pulsara alguna tecla en ese momento, por lo que al poner estas resistencias evitamos este hecho y así si se produjera el cortocircuito tan sólo circularía una pequeña corriente y el puerto del PIC no correría ningún riesgo.

Con el uso de este dispositivo se hace más fácil introducir la temperatura deseada, cualidad importante en éste sistema, ya que permite tener un mejor control sobre su funcionamiento, y sobre el uso que se le pueda dar.

La siguiente figura muestra el circuito de control, y la interconexión de los dispositivos antes mencionados, se pueden ver: el teclado y su controlador, el PIC16F876, la pantalla LCD conectada al microcontrolador principal el PIC16F877, los sensores de temperatura del aceite y del motor, con su respectivo acondicionamiento de señal, etc.

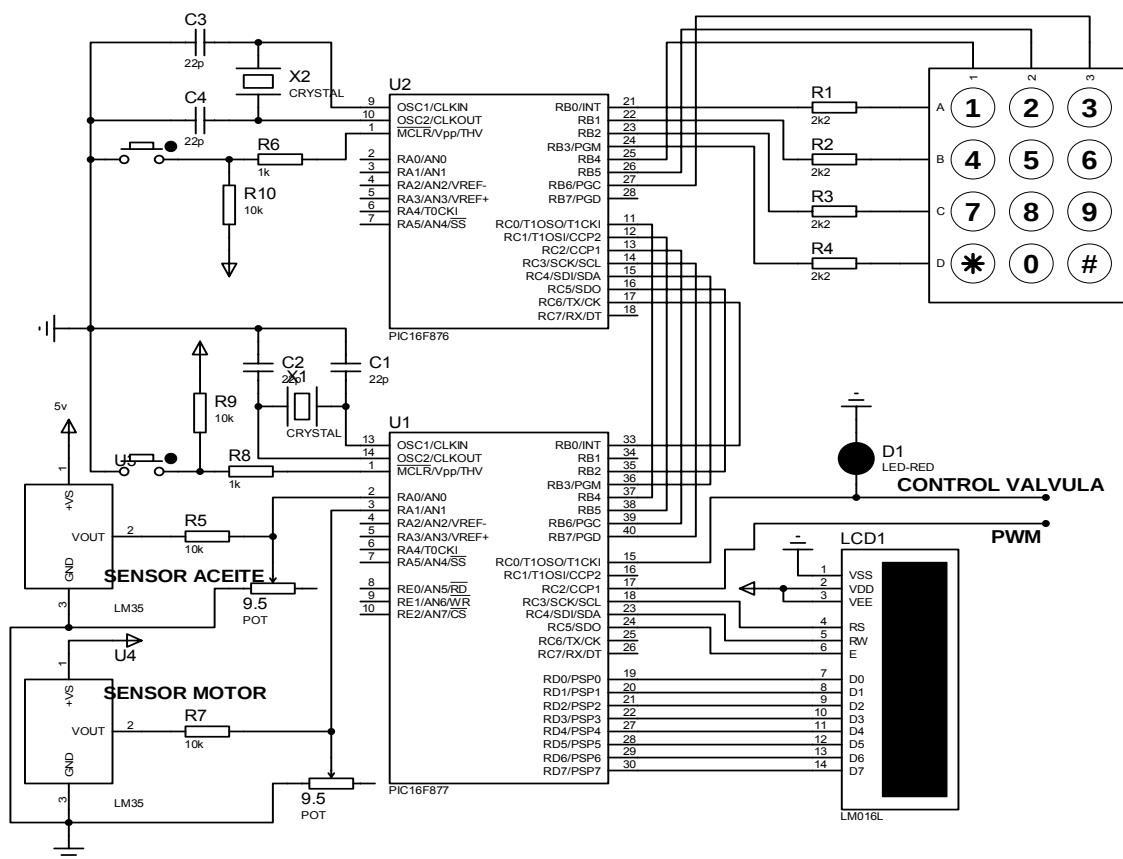


Fig. 4.10 Circuito de control

También dispone de una red de frecuencia, compuesta por dos capacitores cerámicos C1 y C2 de 22pF y un oscilador de 4 MHz. Esta red de frecuencia se utiliza para proporcionar el reloj del microcontrolador, que será el encargado de marcar los tiempos de ejecución de cada instrucción del programa residente.

4.1.4 Algoritmo de control

El controlador también pasó por etapas previas, antes de obtener el que ahora se tiene. El primer controlador usado fue el ON-OFF, este modo de control es lo más elemental y consiste en activar el mando de calentamiento cuando la temperatura está por debajo de la temperatura deseada o set point (SP) y luego desactivarlo cuando la temperatura esté por arriba, obteniéndose algo como lo que se muestra gráficamente.

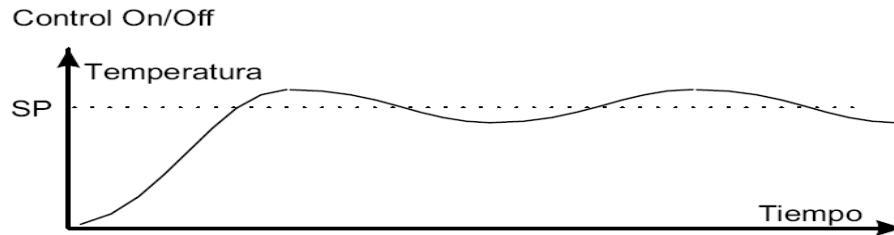


Fig. 4.11 Control On/Off

Inevitablemente, debido a la inercia térmica, la temperatura estará continuamente fluctuando alrededor del SP. La inercia térmica es consecuencia del retardo en la propagación del calor en el interior del tubo desde la resistencia calentadora hasta el sensor de temperatura. No es difícil imaginar que las fluctuaciones aumentarán cuanto mayor sea la inercia térmica (retardo).

Debido a que en esta investigación era necesario un controlador que siguiera fielmente al SP, se decidió por usar un control PID, el cual es más exacto que el control On/Off. El controlador **PID (Proporcional Integral Derivativo)** es una técnica de electrónica de control, cuya tecnología sirve para muchas aplicaciones, y que en este caso es la de intentar mantener su salida en un nivel predeterminado.

Para mantener una salida constante, el controlador mide la salida y controla la entrada y aplica modelos matemáticos a la diferencia de los dos (denominado error). El error es luego tratado en tres diferentes maneras simultáneamente.

Proporcional:

El método de *control proporcional* ofrece una manera sencilla para decidir el ancho de pulso (Duty Cycle) que será aplicado al circuito de potencia que alimenta a la resistencia eléctrica. En este método la diferencia entre la temperatura del punto deseado $T_{deseada}$ y la temperatura actual real T_{real} será el error $E = T_{deseada} - T_{real}$. Entonces, el control proporcional entrega una potencia que varía en forma gradual entre 0 y 100% según se requiera y en forma proporcional al error.

$$DC = AE, \text{ (Control Proporcional),} \quad (4.6)$$

Donde A es una constante llamada *ganancia*. El valor de la ganancia es escogida empíricamente, cuando se cambia la temperatura deseada, el valor óptimo de A causará que el sistema cambie a un nuevo punto de ajuste y después se estabilizará cerca de él.

Supongamos que el aceite esta inicialmente a la temperatura ambiente y se selecciona una temperatura deseada por arriba de la temperatura del ambiente. Al encender el algoritmo de control proporcional, el error inicial E será positivo y el dispositivo

(resistencia eléctrica) calentará el aceite. Conforme pasa el tiempo la temperatura real T_{real} se aproximará a la temperatura deseada $T_{deseada}$, por tanto el error E será pequeño; en el momento de que T_{real} es igual a $T_{deseada}$ el error se volverá cero y el control proporcional apagará el dispositivo; ésta es la imperfección. Cuando se eleva la temperatura, el aceite estará constantemente perdiendo calor con los alrededores (temperatura ambiente) a través de procesos de transferencia de calor como son la conducción, convección y radiación. Entonces para mantener el aceite a la temperatura deseada por arriba de la temperatura ambiente, el calor debe de fluir constantemente para contrarrestar las pérdidas de calor debidas al ambiente. El controlador proporcional deja de calentar cuando la temperatura real es igual a la temperatura deseada; el aceite nunca tendrá la capacidad de estabilizar a la temperatura deseada. Sin embargo, el aceite estabilizará a una temperatura $T_o < T_{deseada}$. Sin embargo un remedio simple para el problema del algoritmo de control proporcional, es simplemente incluir un término constante V_o del lado derecho de la Ecuación, entonces:

$$DC = AE + V_o \quad (4.7)$$

Cuando esta expresión es implementada, el término proporcional enviará la T_{real} a la $T_{deseada}$. Entonces en el punto de ajuste (cuando $E = 0$), V_o se le dará la instrucción al dispositivo que provea calor constantemente para contrarrestar las pérdidas de calor con el ambiente, estabilizando la temperatura real a la temperatura deseada. Por supuesto el valor de V_o debe ser escogido correctamente de tal manera que las influencias del medio ambiente en la muestra sean neutralizadas

Proporcional integral:

Hay una manera de introducir el valor correcto de V_o en el algoritmo de control tal que al escoger un punto deseado se escoja el valor de voltaje V_o automáticamente. En el *control proporcional-integral*, el término integral sirve para encontrar la constante correcta de acuerdo a la siguiente expresión:

$$DC = AE + B \int E dt, \quad (4.8)$$

En esta ecuación la integral almacena la suma de todos los errores E que han ocurrido durante la ejecución del algoritmo. Cuando T_{real} sea menor que $T_{deseada}$, una contribución positiva será almacenada en la suma. Cuando la T_{real} esté por arriba de $T_{deseada}$ una contribución negativa será almacenada. Debido a que se autocorriga conforme las contribuciones son hechas, el segundo término de la ecuación, eventualmente convergerá a una constante V_o que permitirá estabilizar la T_{real} a la $T_{deseada}$. Cuando el error sea igual a cero, el valor de la integral no tendrá cambios significativos.

Proporcional integral derivativo:

Se agrega un término derivativo a la ecuación anterior para amortiguar las oscilaciones producidas y para un refinamiento del algoritmo de control. Al control se le agrega la capacidad de considerar también la velocidad de la temperatura en el tiempo.

De esta forma se puede "adelantar" la acción de control del mando de salida para obtener así una temperatura más estable. Si la T_{real} esta por debajo de la $T_{deseada}$, pero subiendo muy rápidamente y se va a pasar de largo a la $T_{deseada}$, entonces el control se adelanta y disminuye la potencia del calentador.

La acción derivativa es llamada a veces "rate action" por algunos fabricantes de controles porque considera la "razón de cambio" de la temperatura. La expresión es llamada *Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID)*, y es la siguiente:

$$DC = AE + \int E dt + C \frac{dE}{dt} \quad (4.9)$$

donde A, B y C son constantes.

Para una situación experimental de muestras de datos discretos, donde el error E está determinado cada Δt segundos, el valor de voltaje después de la muestra n ésima puede ser aproximado a:

$$DC = AE + B\Delta t \sum_{m=0}^n E_m + \frac{C}{\Delta t} (E_n - E_{n-1}) \quad (4.10)$$

(Control PID discreto)

Implementación del algoritmo de control en el microcontrolador

Una vez que se indica la temperatura deseada y ésta es almacenada por el microcontrolador, la lee y carga esta consigna en un registro de propósito general llamado TDES. Para controlar la temperatura se implementa un algoritmo PID que se ejecuta periódicamente mediante un bucle de control.

Para implementar este algoritmo en el microcontrolador, se utiliza el lenguaje ensamblador, además de varios registros y banderas como a continuación se detalla. La ecuación general puede expresarse como un algoritmo de la forma:

$$DC = K_p e(n) + K_i s(n) + K_d [e(n) - e(n-1)] \quad (4.11)$$

Se estudia por separado cada instrucción:

En = Tdeseada – Treal

La temperatura real es un valor de 8 bits que proporciona el ADC, de la tensión que indica el sensor de temperatura, y la temperatura deseada es la que se introduce mediante el teclado. Como los dos registros son del mismo tamaño, se compara cual de los dos es el mayor y se restan depositando el resultado en el registro E0.

Si el valor mayor resultó ser Tdeseada, el bit de signo SIGE se pone a 1 indicando que es un error positivo. En caso contrario si el mayor fue Treal el bit de signo se pone a 0 indicando un resultado de error negativo, en este caso, automáticamente se envía un ancho de pulso igual a cero para apagar la resistencia eléctrica.

Sn = ΣE0(t)

Sn representa la suma acumulativa del error E0, y para implementarlo se emplean dos registros denominados S0 y S1. Se emplean dos registros, porque al ser un error acumulativo puede existir el riesgo de desbordar un registro de tan solo 8 bits. El resultado de error E0 se suma o resta en S0 hasta que éste se desborda, incrementado o decrementado así el registro S1.

En esta instrucción también se emplea una bandera de signo (SIGS) que indica si el error S0 es positivo o negativo.

- Si signo de $S_n = E0$: Se suman el error E0 en S0 y se deja el signo de ambos.
- Si signo de $S_n \neq E0$: Se comprueba cual de ellos es mayor, se restan y se deja el signo del error mayor.

La suma acumulativa entre el error S_n y E0, se deposita en los registros S0 y S1 en cada iteración, la cual se presenta aproximadamente cada tres segundos.

$$D0 = (E0 - EANT) / t$$

D0 es la diferencia entre el error actual y el error de la iteración anterior, en este caso solo se emplea el registro D0 ya que éste se renueva en cada iteración. Con el fin de obtener la velocidad de la temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{seg}$), se implementó un contador descendente el cual, se decrementa en uno en cada barrido de programa, y al llegar a cero, realiza la operación: $E0 - EANT$, de esta forma es posible saber cuanto cambió la temperatura en ese lapso, posteriormente se recarga el contador y el error E0 se guarda en el registro EANT, preparándose para la próxima iteración.

Una vez que se han obtenido los valores de E0, S_n y D0 se multiplican por las constantes K_p , K_i y K_d respectivamente, las cuales fueron aproximadas a su valor óptimo mediante el método de Ziegler-Nichols y ajustadas a éste mediante la práctica, estos valores son:

$$K_p = 2$$

$$K_i = 0.1$$

$$K_d = 1$$

Se usan rutinas especiales para multiplicar estas constantes por los registros E0, S_n y D0. Debido a que en código binario no es posible usar decimales, lo que se hace en el caso de K_i , es usar una rutina de división, en donde el valor de S_n se divide entre diez, para obtener lo mismo que si se multiplicara por 0.1, así el algoritmo de control, queda de la siguiente forma:

$$DC = [K_p \cdot E0 + K_i \cdot S_n + K_d \cdot D0] \quad (4.12)$$

Al sumar los resultados de las multiplicaciones se obtiene el valor DC (ancho de pulso) que se debe aplicar al circuito de potencia, para que éste proporcione a la resistencia calentadora el voltaje necesario para controlar la temperatura del aceite. El paréntesis [] se usa para indicar saturación, es decir que si al evaluar DC, resulta mayor de 100%, el ancho de pulso se deja en 100% y si resulta negativo, se deja en 0%.

Para poder controlar la temperatura con menos fluctuaciones, se debe poder entregar al calentador una potencia gradual, en la medida requerida para mantenerlo a la temperatura deseada. En el ejemplo anterior del control On/Off, el relé del mando de calentamiento estará activado 100%, entregando el máximo de potencia a la resistencia o bien desactivado sin entregar potencia.

Afortunadamente es posible modular de 0% a 100% la potencia que recibe un calentador eléctrico mediante el mismo contactor que se usaría para un control on/off.

La idea es modular el tiempo de activación del contactor durante un lapso de tiempo fijo (t_c), llamado tiempo de ciclo, menor al tiempo característico de respuesta del calentador de modo que el calentador reciba finalmente un promedio de la potencia.

Para ilustrar esta técnica conocida como modulación por ancho de pulso (PWM pulse width modulation) recurrimos al siguiente ejemplo:

Suponiendo que un calentador posee un tiempo de respuesta de 1 minuto, al aplicarle pulsos de calentamiento periódicos de 4 segundos, modulados en duración, el calentador experimentará un calentamiento proporcional al promedio de tiempo que ha estado activado, sin que su temperatura siga las fluctuaciones de 4 segundos con que se aplica la potencia.

Supongamos que nuestro calentador funciona con un calefactor de 1000W, si se requiere una potencia de 500W, equivalente a 50% de la total, entonces se activa 2 segundos el relé y se desactiva otros 2, para luego empezar otro ciclo.

El efecto neto será que el horno recibe 50% de la potencia pero la temperatura no fluctúa al ritmo del tiempo de ciclo pues éste es menor al tiempo de respuesta del calentador.

Siguiendo con el ejemplo, si hace falta 250W, es decir 25% de la potencia basta con tener 1 segundo activado el relé y 3 segundos desactivados.

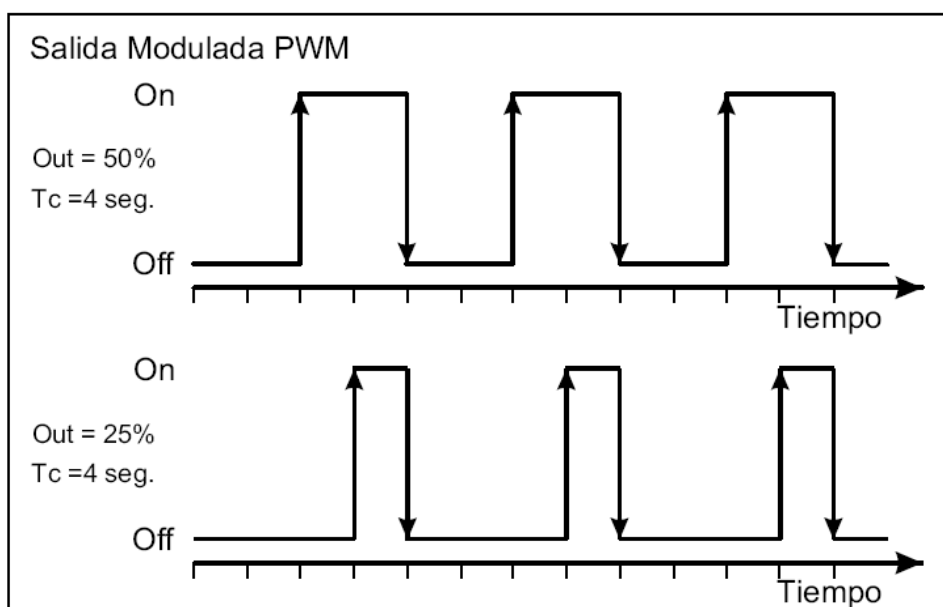


Fig. 4.12 Modulación por ancho de pulso

Para obtener las señales de PWM requeridas para el control de la tensión media aplicada en la resistencia eléctrica, se utilizan unos módulos de PWM que ya integra el microcontrolador.

Los microcontroladores de la gama media, tipo PIC16F8X disponen de dos de estos módulos, llamados CCP1 y CCP2, que se controlan con los registros CCP1CON y CCP2CON, respectivamente.

El módulo CCP en modo PWM utiliza como recurso al módulo TIMER2. En la figura se presenta la salida PWM, la señal tiene un periodo y un tiempo en el que la señal permanece activa (DUTY CYCLE).

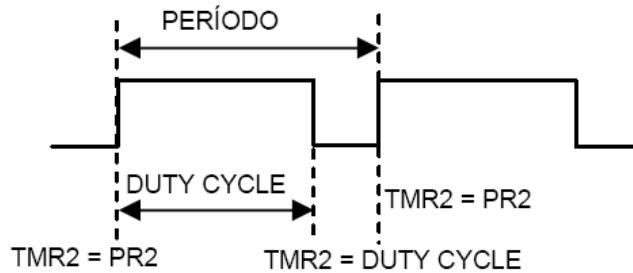


Fig. 4.13 Salida de la señal PWM

En este modo la patita del microcontrolador Rcy/CCPx, que se ha programado como salida, bascula entre 0 y 1 a intervalos variables de tiempo. Cuando el valor de registro PR2 coincide con los 8 bits de mas peso de TMR2 la patita mencionada pasa a 1 y TMR2 toma el valor 00 y reanuda la cuenta. Cuando ambos coinciden la patita Rcy/CCPx pasa a 0 y se repite la secuencia. Variando el valor de PR2 y CCPRxL se varia el intervalo de tiempo que la patita está a 1 y está a 0, respectivamente.

Las instrucciones que a continuación se detallan, sirven para activar el módulo PWM de microcontrolador. Estas instrucciones se han de ejecutar en la parte del programa de inicialización del PIC, por tal de obtener las señales de PWM requeridas para el control.

1. Establecer el periodo de la señal PWM, mediante la escritura del registro PR2.
2. Establecer el "duty cycle" de la señal PWM, mediante la escritura del registro CCPR1L.
3. Programar el pin CCPx como salida, limpiando el bit apropiado del registro TRISC.
4. Establecer el valor de prescaler del TMR2 y habilitarlo mediante la escritura del registro T2CON.
5. Configurar el módulo CCP con el modo de operación PWM.

El periodo es especificado escribiendo en el registro PR2, y puede ser calculado usando la fórmula:

$$\text{PWM periodo} = [(PR2)+1] * 4 * TOSC * (\text{TMR2 prescaler value})$$

El tiempo DUTY CYCLE (Fig. 4.13), se especifica escribiendo en el registro CCPR1L. La siguiente fórmula es utilizada para el cálculo del DUTY CYCLE.

$$\text{PWM duty cycle} = (\text{CCPRxL}) * TOSC * (\text{TMR2 prescaler value})$$

Los IGBT conmutan a una frecuencia entre 2 a 20kHz, llamada frecuencia portadora, debido a que los IGBT generan mayor calor a una frecuencia portadora más alta se optó por usar una frecuencia portadora baja de 8KHz, ya que se habían tenido problemas de calentamiento excesivo en éste dispositivo.

Inicialmente se programa el Timer2 con un valor de prescaler de 1, por lo tanto la incógnita es determinar el contenido del registro PR2 para proporcionar un periodo de 125 µs ya que:

$$\text{PWM periodo} = 1/\text{PWM frecuencia} = 1/ 8 \text{ KHz} = 125 \mu\text{s}$$

Despejando de la fórmula de PWM periodo obtenemos que:

$$PR2 = \frac{PWMperiodo}{4 \times T_{osc} \times TMR2 prescaler} - 1 = 125 - 1 = 124$$

Una vez que el algoritmo de control calcula el “duty_cycle” (DC) apropiado de la señal PWM que se utiliza para controlar la tensión media aplicada en bornes de la resistencia eléctrica, este resultado se carga en el registro CCPR1L y dependiendo de este valor es como variará el ancho de pulso aplicado al IGBT, para que éste proporcione un voltaje entre 0 y 100%.

El registro CCPR1L forma parte de uno de los dos módulos de control PWM que incorpora el PIC16F877, por medio del cual se controla el “duty_cyle” de la señal de salida que proporciona dicho módulo.

Al igual que con el circuito de temperatura, la validación del algoritmo de control también es importante, ya que sin ésta no se sabría si el control está trabajando correctamente, con lo cual se podría alimentar al motor a una temperatura no apta para éste, lo que causaría daños en el mismo. Además es importante estar seguro de que la temperatura de alimentación al motor sea la misma que se ha introducido, esto es por las pruebas que se pretenden hacer en el motor variando la temperatura del aceite de alimentación.

Ya que se contaba con la interfase RS-232, se usó esta misma para validar el algoritmo de control, lo cual consiste en introducirle al control, una determinada temperatura deseada o set point y ver en la gráfica si efectivamente el control mantiene ese valor de temperatura deseado.

De esta forma, con un set point de 80° C, la gráfica quedó de la siguiente manera:

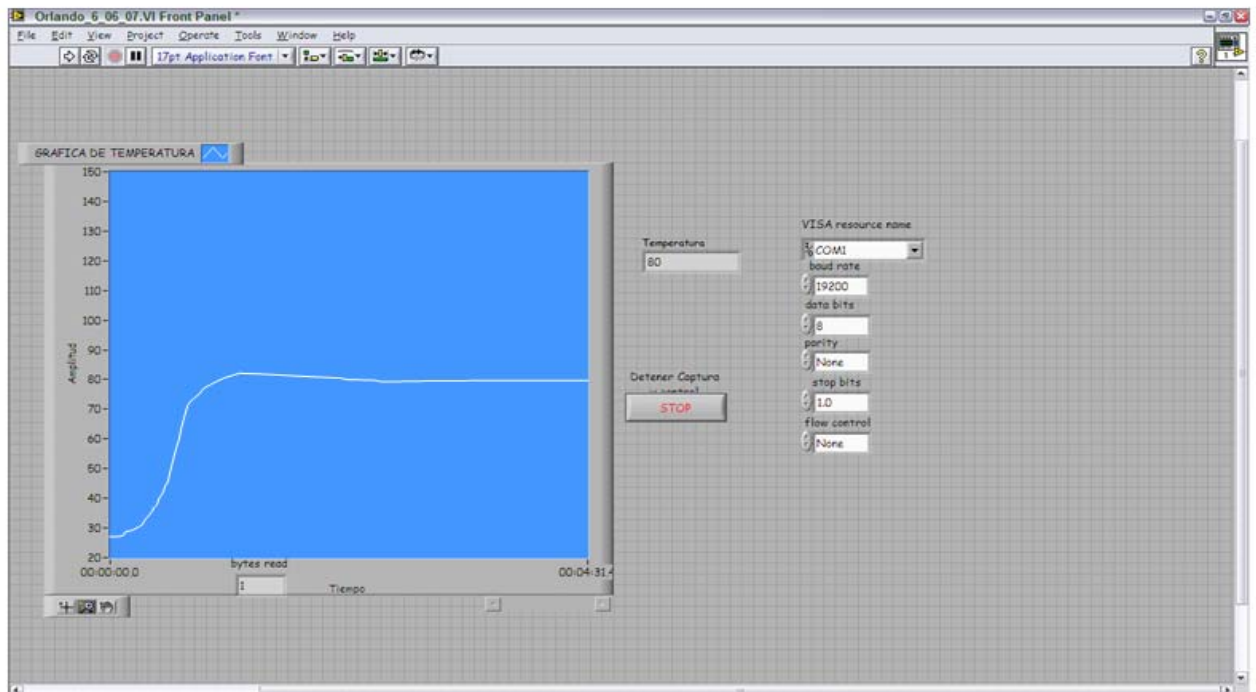


Fig. 4.14 Gráfica de control

Con lo que es posible comprobar que el algoritmo de control está trabajando correctamente.

4.2 CIRCUITO DE POTENCIA

Para llevar a cabo el control de la resistencia eléctrica, se requiere introducir las señales PWM por las puertas de un transistor de potencia, llamado IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor).

Debido a que las señales de PWM que el microcontrolador nos ofrece en sus salida son de baja tensión y por lo tanto incapaces de excitar las puertas del IGBT, se necesita un “driver” para poder acondicionar dichas señales.

Este acondicionamiento de señal es llevada a cabo mediante el circuito denominado “impulsor” cuya función principal es la de elevar la señal PWM de 5volts proveniente del microcontrolador hasta un valor de 12volts adecuado para excitar el IGBT, el cual tiene un voltaje de activación o “disparo” de entre 10 y 15Volts.

Una vez calculado el ancho de pulso (DC) por el algoritmo de control, pasa a través de un optoacoplador, el HCPL-4421, que es usado para proteger al microcontrolador, posteriormente, esta señal es enviada hacia el driver TC4451, el cual se encarga de elevar su tensión hasta los 12v.

El TC4451 es un driver de alta velocidad para mosfet e igbt, fabricado por la empresa Microchip, con una corriente de salida máxima de 2.6A capaz de excitar al IGBT, y una tensión de operación de 4.5 a 18Volts.

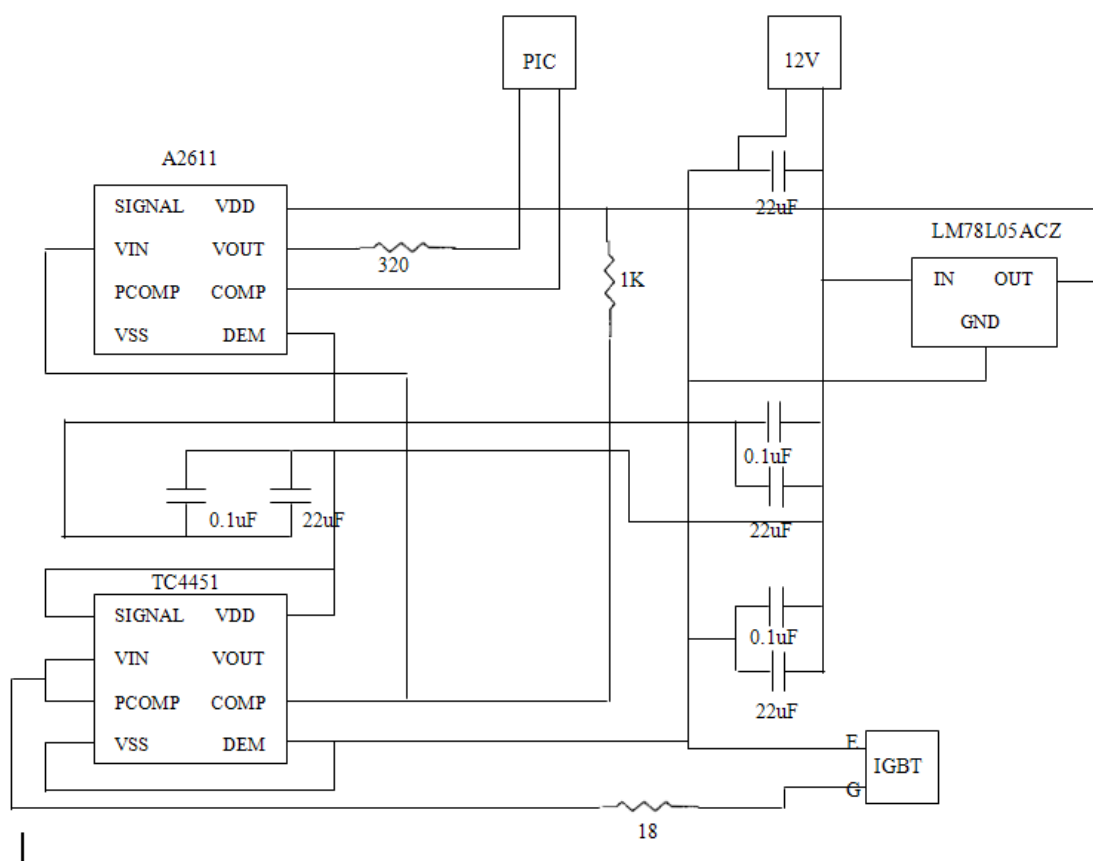


Fig. 4.15 Circuito impulsor

El circuito de potencia se usa para unir la etapa de control con la carga, en este caso la resistencia eléctrica, que debe ser alimentada con 120 V CA, obtenidos de la salida del motor generador, pero para poder controlar este voltaje suministrado a la resistencia en la medida enviada por el control, se debe hacer uso de un circuito de potencia, llamado también variador de frecuencia, cuyas partes principales son:

Circuito Rectificador. Recibe la tensión alterna y la convierte en continua por medio de un puente rectificador de diodos de potencia.

Circuito intermedio. Consiste en un capacitor de gran tamaño (110 μ F), cuya función principal es suavizar el rizado de la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos hacia la red.

Modulador. Se encarga de controlar la carga con tensión y frecuencia variables mediante la generación de pulsos. Se emplea el sistema IGBT para generar los pulsos de voltaje de manera controlada, los cuales son enviados hacia la resistencia.

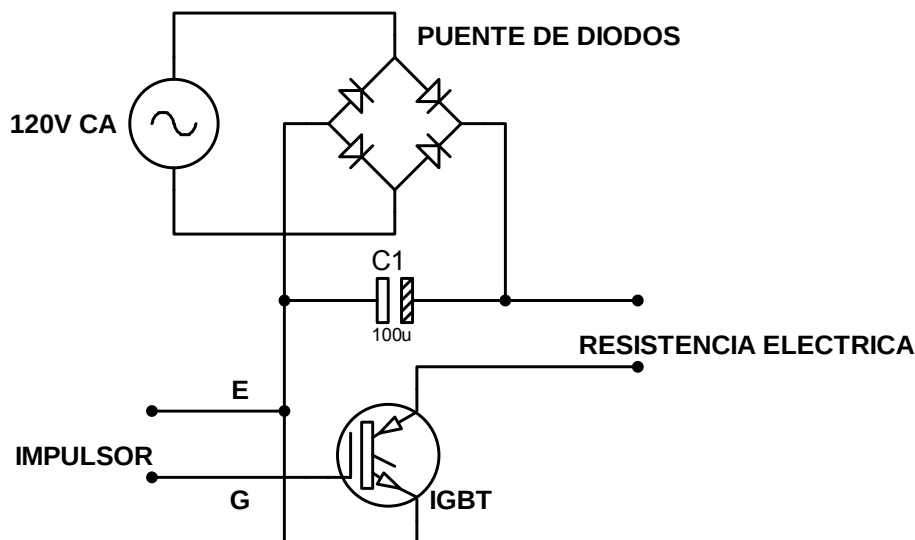


Fig. 4.16 Circuito de potencia

El IGBT usado es el STGW30NC60W fabricado por la empresa ST Microelectronics con encapsulado TO-247 con una corriente de salida máxima de 30A y una tensión de operación de hasta 600Volts.

Con este circuito es posible enviar a la resistencia eléctrica una potencia de entre 0 y 100% de la que puede suministrar de acuerdo al ancho de pulso (DC) calculado por el algoritmo de control.

4.3 CIRCUITO DE CONMUTACIÓN DE LA VÁLVULA

El circuito de conmutación de la válvula permite hacer el cambio de diesel a aceite y viceversa de forma automática, esto es posible, gracias a que la válvula posee un motor eléctrico controlado con 12volts con el que hace el cambio de posición.

Para que la válvula haga el cambio se deben cumplir dos condiciones:

1. Que la temperatura real haya alcanzado a la deseada.
2. Que el motor alcance su temperatura de trabajo normal. Esto también es controlado por el microcontrolador, al cual se le ha agregado un sensor más, que toma la temperatura del motor.

Esta última temperatura se determinó empíricamente, al poner en marcha al motor y medir su temperatura una vez que ésta se había estabilizado, lo cual sucedía alrededor de los 90° C, una vez determinada esta temperatura, se cargó en el PIC para ser comparada con la tomada por el sensor que está en el motor.

De esta forma, el microcontrolador está continuamente tomando estas dos temperaturas, y hace las comparaciones en su interior: Temperatura real contra deseada y temperatura del motor contra los 90° C cargados en el PIC, una vez alcanzadas estas temperaturas envía una señal hacia el exterior, para cambiar de posición la válvula. Por el contrario, una vez que la válvula se encuentra en la posición de alimentación con aceite, y la temperatura real cae por debajo de la temperatura deseada, la válvula regresa a su posición inicial de alimentación con diesel, y lo mismo sucede con la temperatura del motor, pero en este caso se colocó un margen de tolerancia, ya que ésta normalmente presenta fluctuaciones.

Como ya se había mencionado, la válvula utilizada en este proyecto de investigación es una POLLAK® MOTOR-DRIVEN FUEL TANK SELECTOR VALVE, la cual es utilizada en aplicaciones automotrices, por esto, cuenta con un interruptor con el cual, el usuario puede hacer el cambio entre tanques de combustible, dicho interruptor cierra un circuito para proveer 12Volts a la válvula provenientes de la batería para hacer al cambio de posición, e invierte la polaridad para regresar a la válvula a su posición inicial.

Conociendo esto, se diseñó un circuito para recrear esto y hacer los cambios de posición automáticamente de acuerdo a las condiciones antes mencionadas.

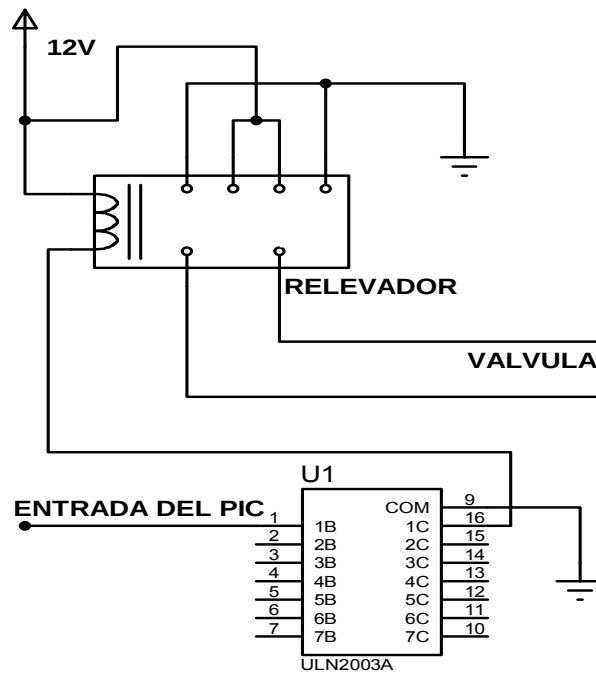


Fig. 4.17 Circuito de conmutación

Se hace uso de un “buffer” para poder activar el relevador con la señal del PIC, este “buffer” es el ULN2003A fabricado por la empresa ST Microelectronics, este dispositivo tiene entradas para 5Volts TTL, CMOS como las del PIC y es usado para manejar mediante este tipo de señales a una amplia gama de cargas, tales como: solenoides, relevadores, motores CC, etc.

El relevador usado en este circuito es el OMI-SH-212L fabricado por la empresa Omron, este relevador es activado con 12V CC, y es del tipo 2T2P (dos tiros, dos polos), esta característica es la que le confiere la capacidad de hacer el cambio de polaridad al motor de la válvula, lo cual es necesario para regresarla a su posición inicial, y así automatizar el sistema.

Cuando se cumplen las condiciones antes mencionadas, el PIC saca un 1 por RC0 y lo envía al buffer, al mismo tiempo que enciende el led de posición de alimentación con aceite, el buffer activa la bobina del relevador, y la válvula hace el cambio de posición. Cuando por alguna razón el PIC deja de enviar este 1, la bobina se desactiva y la válvula vuelve a su posición inicial.

Para que los cambios de posición puedan ser llevados a cabo, el relevador debe tener como entrada los 12V CC necesarios para manejar la válvula, por lo que en caso de un fallo de energía, ésta no podría realizar dichos cambios, y si este fallo se presenta cuando el motor está siendo alimentado con aceite, la válvula no podría regresar a la posición de alimentación con diesel, trayendo con esto consecuencias desastrosas para el motor.

Debido a esto, se hizo necesaria la introducción de un circuito de emergencia, para asegurar siempre la entrada de 12V CC al relevador. El circuito de emergencia se encuentra ubicado dentro del circuito de conmutación, y sirve para que en caso de fallo de energía la válvula tenga la energía suficiente para hacer el cambio a diesel nuevamente, y así no sufrir daños en el motor.

Las fallas de energía pueden ser causadas por distintas razones, por ejemplo:

1. Falla de la fuente de alimentación, que es la que se encarga de suministrar los 12Volts necesarios para hacer el cambio de posición de la válvula.
2. Sobrecarga en el generador, como sabemos, el generador es quien se encarga de alimentar a la fuente y al circuito de potencia, que a su vez se encarga de alimentar al calentador eléctrico, si llegara a ocurrir una sobrecarga, el calentador dejaría de calentar el aceite como es debido, lo que provocaría un rápido descenso en su temperatura y por consiguiente un aumento en su viscosidad. En este caso, el control enviaría un señal para cambiar a diesel, pero al no tener la fuente energía suficiente para hacer esto, permitiría la válvula el paso de aceite frío al motor, con las consecuencias perjudiciales ya explicadas.

Para evitar esto, era necesaria una fuente de energía externa que no se viera afectada por las fallas antes mencionadas. Entre las posibles opciones, se optó por usar una batería de 12Volts, debido a que la planta de energía cuenta con una batería con éste nivel de tensión. La planta usa esta batería para su arranque, por lo que es recargada con la misma energía generada por la planta, simplificando así el circuito, por que ya no fue necesario hacer uno para recargarla, de esta forma se eligió esta opción como la mas factible.

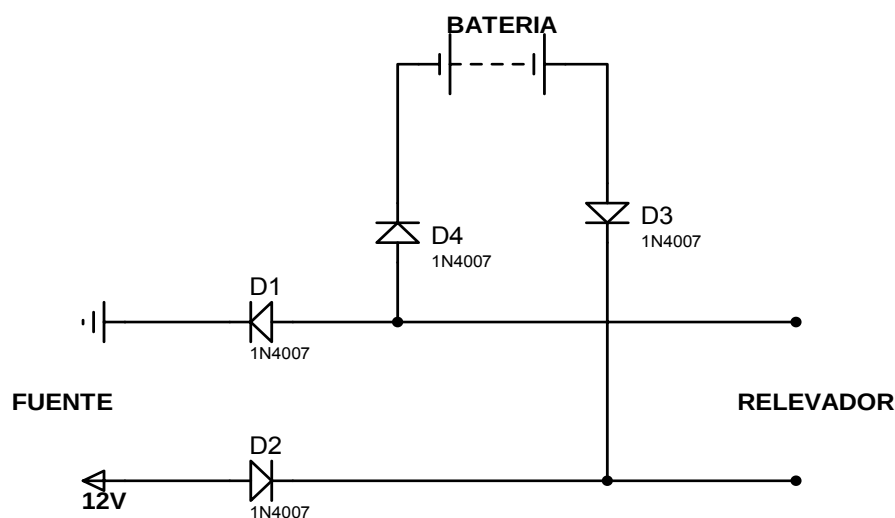


Fig. 4.18 Circuito de emergencia

Son usados un par de diodos 1N4007 para que no circule corriente desde la fuente hacia la batería y viceversa. Debido a esto se tuvo que rediseñar el circuito del sistema de conmutación, por lo que se optó por unirlo al sistema de control en un solo circuito impreso.

Este circuito actúa como un bypass, en donde la batería sustituye a la fuente de alimentación cuando ésta falla, permitiendo así que la válvula cambie de posición cuando sea necesario.

4.4 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La realización de este circuito se debió a que se planeó confinar a los circuitos impresos dentro de una caja que los resguardara. Por esta razón, hubo que armar una fuente de alimentación, para que estuviera dentro de esta caja, esta fuente de alimentación debía proporcionar niveles de tensión de 5 y 12 V CC, que servirían para alimentar a los circuitos de control de temperatura, de control de la válvula, y al impulsor del circuito de potencia. El circuito de dicha fuente se muestra a continuación:

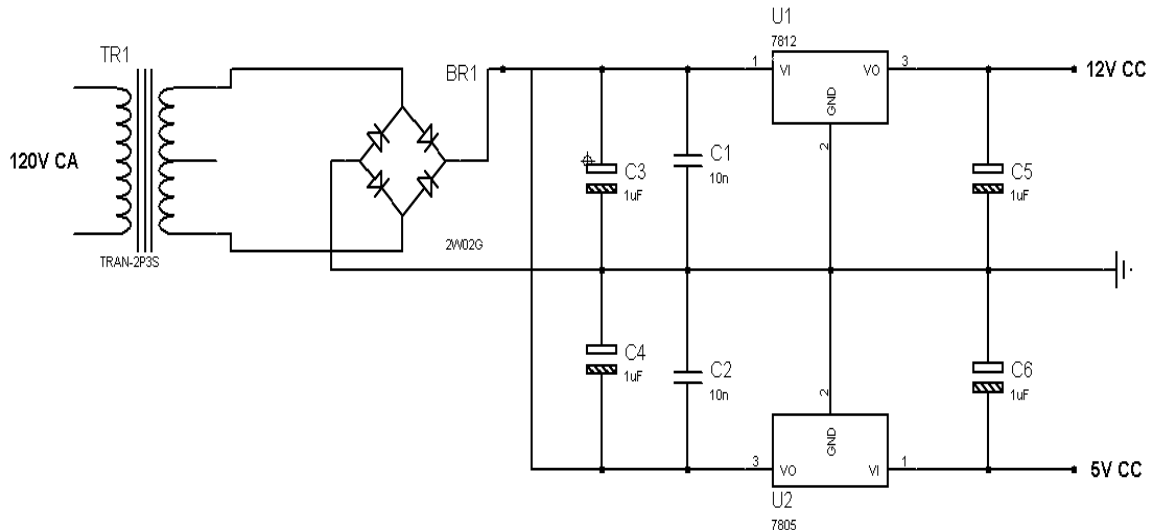


Fig. 4.19 Circuito de la fuente de alimentación

Este circuito consta de un transformador que se encarga de bajar el voltaje de 120V CA provenientes del generador, a 12V CA, los cuales pasan al puente de diodos que convierte esta tensión de corriente alterna en corriente continua, para luego pasar a los reguladores de voltaje, en donde el regulador LM7812 se asegura de mantener la tensión en 12V CC, y el regulador LM7805, baja la tensión a 5V CC, este circuito integrado es capaz de proporcionar una tensión de 5 V muy estable sólo con la condición de tener en su entrada una tensión superior a 7Volts e inferior a 25Volts. De esta forma se cubren todas las necesidades de tensión requeridas.

Para lograr el objetivo, el cual es, alimentar con aceite vegetal al motor diesel, los circuitos que se encuentran interconectados dentro de la caja, deben trabajar en conjunto satisfactoriamente.

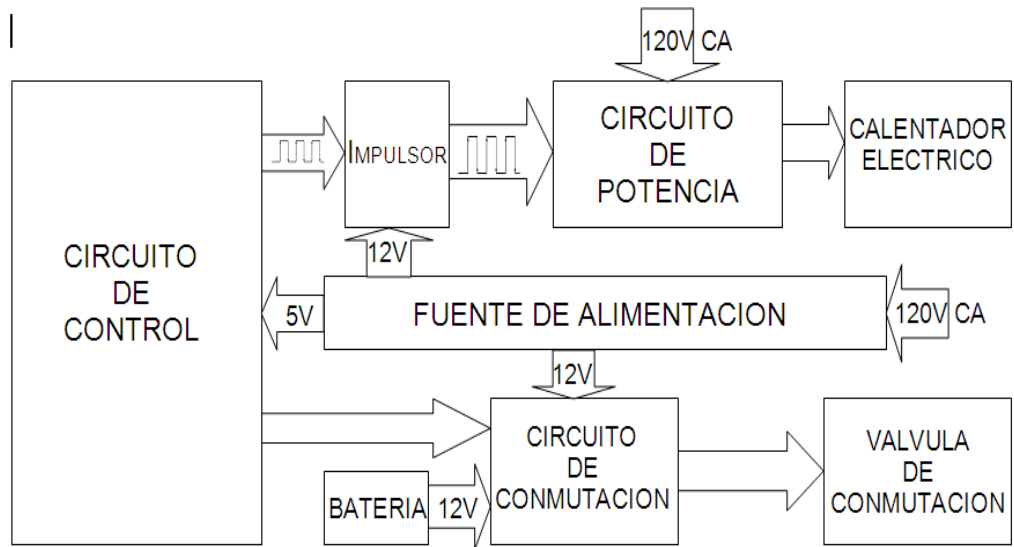


Fig. 4.20 Diagrama de bloques de los circuitos

Página en blanco intencionalmente.

CAPÍTULO 5

MONTAJE Y PRUEBAS

5.1 MONTAJE DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Una vez que se contó con todos los componentes del sistema de alimentación, se procedió a ensamblarlos, para realizar pruebas de funcionamiento, dichas pruebas pretendían dar a conocer el comportamiento del sistema bajo ciertas condiciones de trabajo, tales como

Control: Se colocaron distintos valores de temperatura deseada uno tras otro para ver cómo el control llegaba a ese valor y lo mantenía.

Temperaturas extremas: Se colocaron valores extremos de temperatura deseada entre 110 y 115° C para saber si el calentador soportaría dichas temperaturas, aquí fue donde se observó que la manguera que transportaba el aceite desde el calentador hasta la

válvula se estaba desintegrando con las altas temperaturas, por lo que se optó por usar un tubo de aluminio en su lugar.

Condiciones de la válvula: Se probó el funcionamiento de las condiciones para la apertura y cierre de la válvula de conmutación, introduciendo una temperatura deseada al control, y simulando la temperatura del motor con una fuente de calor, para hacer el cambio a aceite vegetal. De igual forma se apagó el calentador para que la temperatura del aceite cayera por debajo de la temperatura deseada, y ver que la válvula regresara a su posición inicial de alimentación con diesel, lo mismo se hizo con la temperatura del motor, retirando la fuente de calor que lo simulaba.

Fallos de energía: Se simularon fallos de energía, para probar el funcionamiento del circuito de emergencia. Al estar la válvula en la posición de alimentación con aceite, se cortó la energía de la caja de circuitos, para ver si la válvula regresaba a la posición de alimentación con diesel, gracias a la batería, dando como resultado un funcionamiento satisfactorio de este circuito.

Temperatura de salida: Se midió la temperatura del aceite proveniente del calentador a la salida del sistema de alimentación (después del tramo que conecta a la válvula con el motor) con un multímetro, para comprobar que esta temperatura fuera igual a la mostrada en la pantalla lcd, con el fin de asegurar que el motor es alimentado con aceite a la temperatura deseada.

Se observó que debido a las pérdidas de calor con el ambiente, esta temperatura estaba por debajo de la temperatura deseada a altas temperaturas, debido a que a mayor temperatura, hay mas perdidas de calor con el ambiente, de esto se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 5.1 pérdida de temperatura

T deseada (° C)	Pérdida (° C)
95	0
100	1
105	2
110	3

Por esta razón se realizó una compensación en el programa del microcontrolador, en el cual era sumado un uno al registro TDES si el valor de éste se encontraba entre 100 y 105° C, ($100 \leq TDES + 1 < 105$), se sumaba un dos si el valor estaba entre 105 y 110° C ($105 \leq TDES + 2 < 110$), y por último $TDES + 3 \geq 110$; con esto se logró compensar la pérdida de temperatura sin alterar el valor mostrado en la pantalla lcd.

Habiendo comprobado el correcto funcionamiento del sistema de alimentación se procedió a montarlo en la planta de energía, atendiendo las consideraciones de diseño planteadas en el capítulo 3. Por esta razón, el calentador y la válvula se colocaron lo más cerca posible del motor, pero fueron sujetos a la estructura de la planta, para evitar en lo posible las vibraciones del motor, debido a que en la estructura las vibraciones son de menor intensidad.

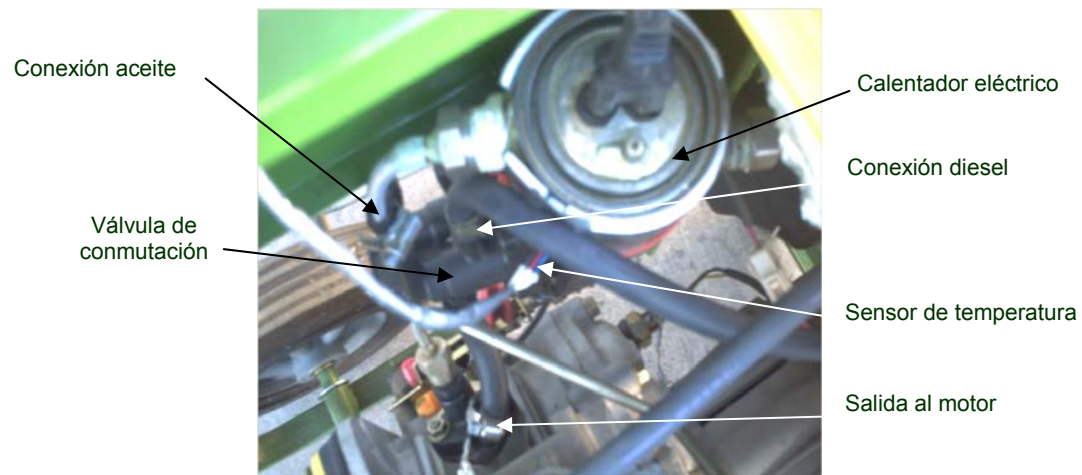


Fig. 5.1 Montaje sobre la planta de calentador y válvula

De igual forma, se protegió de la vibraciones de la planta al depósito de aceite y la caja de circuitos, colocándolos separados de ésta, por esto mismo, fueron diseñados para permitir una rápida conexión con los demás componentes del sistema de alimentación.



Fig. 5.2 Sistema de alimentación

5.2 COMBUSTIBLES USADOS

Los dos tipos de combustible usados en las diferentes pruebas realizadas son, obviamente, el diesel de petróleo, que es el combustible que debe usarse, puesto que el motor está diseñado para usar dicho combustible, y el aceite vegetal elegido, en este caso es el aceite de soya, por ser el más alto en producción a nivel mundial. [29]

Este aceite se compró en el mercado local, debido a que el ahorro en los costos de transportación lo hacía la opción más factible en contra de proveedores externos, que si bien eran un poco más baratos no superaban el ahorro obtenido con el que se eligió.

Para poder alimentar al motor diesel con aceite vegetal, este último tiene que ser calentado, para bajar su viscosidad, de tal forma que se asemeje al diesel de petróleo, por eso, para poder trabajar con este aceite se tuvo que determinar su viscosidad a diferentes temperaturas y así poder definir el rango con el que se debía trabajar, ya que la temperatura no debe ser demasiado baja como para no permitir una buena combustión o demasiado alta, como para que ya no sea factible calentarlo hasta ese nivel, debido a que ya no hay un cambio significativo en la viscosidad del aceite.

Para realizar la prueba se eligió como instrumento de medida al viscosímetro Ostwald. En este tipo de viscosímetros, se determina la viscosidad de un líquido midiendo el tiempo de flujo de un volumen dado V del líquido en un tubo capilar bajo la influencia de la gravedad.

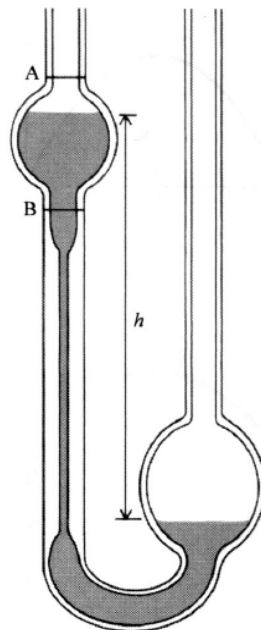


Fig. 5.3 Viscosímetro Ostwald

Para un fluido virtualmente incompresible, como un líquido, este flujo está gobernado por la ley de Poiseuille de la forma:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2)}{8\eta L} \quad (5.1)$$

Donde dV/dt es la velocidad de flujo del líquido a lo largo de un tubo cilíndrico, de radio r y de longitud L , y $(p_1 - p_2)$ es la diferencia de presiones entre los dos extremos del tubo. Dado que $(p_1 - p_2)$ es proporcional a la densidad del líquido en estudio, se puede demostrar que para un volumen total dado de un líquido:

$$\frac{\eta}{\rho} = Kt \quad (5.2)$$

Donde t es el tiempo en que el menisco superior cae de la marca superior del viscosímetro a la inferior (de A a B) y K es una constante del aparato que debe determinarse por calibración con un líquido de viscosidad conocida (por ejemplo, agua).

Procedimiento:

- 1) Llenar el viscosímetro limpio y seco con 10 ml del líquido problema.
- 2) Introducir el viscosímetro en el baño termostático y esperar unos cinco minutos para que el líquido problema alcance la temperatura de medida.
- 3) Succionar líquido por encima de la marca superior del viscosímetro y medir a continuación el tiempo de paso del mismo entre las marcas superior e inferior.
- 4) Cuando se termine la serie de medidas con un líquido limpiar el viscosímetro primero con agua abundante, después con acetona y por último secar con aire.

Con la imposibilidad de contar con un baño termostático, fue usada la caja de circuitos para este propósito, gracias a que cuenta con un control de temperatura, a ésta se le adaptó una resistencia de inmersión diferente a la del calentador, la cual era sumergida en un recipiente con aceite para proporcionar la temperatura de medida.

De esta forma, fueron obtenidas las siguientes gráficas para aceite de soya y de maíz:

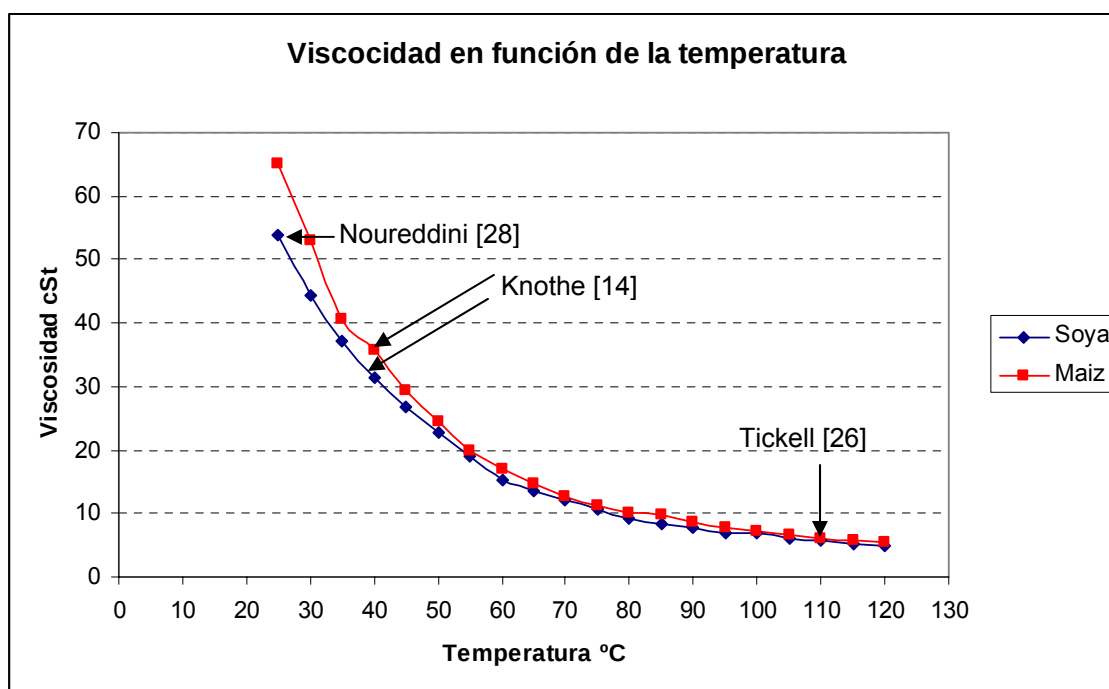


Fig. 5.4 Gráfica de la viscosidad en función de la temperatura para aceite de soya con algunas referencias

Con lo que se puede observar un comportamiento de viscosidad descendente en función del aumento de temperatura, también se puede observar una pequeña diferencia entre ambos aceites, esto puede deberse a diversas causas, una de ellas es por ejemplo la calidad del aceite.

Algunas de las mediciones obtenidas se compararon con la hechas por algunos autores de la literatura, resultando muy parecidas: Nouredдини (54.3 cSt* a 25° C), Knothe (32.6 cSt a 38° C.) y Tickell (6.5 cSt a 110° C), para el aceite de soya, y Knothe (34.9 cSt a 38° C), para el aceite de maíz. Los datos completos de estos autores se encuentran en la sección de referencias.

De esta forma se determinó que el rango de trabajo para realizar los experimentos sería de 80° C a 110° C, esto es porque después de 80° C la viscosidad esta por debajo de los 10 cSt, viscosidad a la cual es seguro alimentar al motor según lo recomendado en la literatura Tickell [18]. Se eligió una temperatura de 110° C como limite superior, porque después de esta temperatura la viscosidad cambia muy poco y ya no es factible calentar mas el aceite por el gasto de energía que implica elevar mas la temperatura, puesto que la pendiente entre 110 y 120° C es de apenas 0.06.

$$\text{Pendiente} = \frac{0.6}{10} = 0.06 \text{ cSt/}^{\circ}\text{C}$$

Además, con un cambio muy pequeño en la viscosidad, los cambios en el comportamiento del motor serian imperceptibles, lo cual no serviría en este caso, porque uno de los objetivos principales de este trabajo es analizar los cambios en el comportamiento del motor a diferentes temperaturas.

*1cSt = 1 mm²/seg.

5.3 PRUEBAS REALIZADAS AL MOTOR

5.3.1 Pruebas de consumo

Esta prueba nos permitirá comparar el consumo de combustible entre diesel y aceite, además de comparar el consumo de aceite a diferentes temperaturas, esto para conocer la temperatura óptima de alimentación de aceite y analizar el comportamiento del motor cuando se varía esta temperatura.

La prueba de consumo de combustible se realizó variando la carga del generador y midiendo la cantidad restante de combustible en el tanque después de un tiempo determinado para diferentes temperaturas en el caso del aceite.

Con la necesidad de proporcionar una carga variable al generador y así medir el consumo a diferentes cargas, se adaptó un banco de resistencias, el cual constaba de cuatro resistencias calentadoras de 820watts, las cuales proporcionaban el 25, 50, 75 y 100% de una carga total de 3280watts que equivalía al 100% de la carga a usarse en esta prueba. De esta forma una resistencia equivalía al 25% de la carga, dos resistencias al 50% y así sucesivamente.

Las primeras pruebas se realizaron con diesel de petróleo a temperatura ambiente, para posteriormente hacer la comparación con el aceite vegetal. Para realizar esta prueba, primero se coloca una cantidad conocida de combustible en litros en el tanque,

posteriormente se enciende el motor-generador y se conecta una o varias resistencias calentadoras dependiendo de la magnitud de carga a aplicar, después de una hora de estar funcionando el motor-generador alimentando dicha carga, este se apaga para poder drenar el tanque de combustible y medir la cantidad de combustible restante, así, con este dato y el tiempo que estuvo funcionando el motor generador con esta carga se determina el consumo en litros/hora, el cual puede usarse para obtener el consumo específico en litros/kw-hr. Este procedimiento se repite para los distintos niveles de carga y así poder comparar los resultados con los que se obtengan para aceite de soya.

Para el caso de las pruebas con aceite vegetal, el procedimiento es casi el mismo, solo que ahora se utilizó el sistema alternativo de combustible construido para poder alimentar con aceite vegetal al motor-generador. Para la realización de estas pruebas, el motor-generador debe iniciar su marcha como lo haría normalmente con diesel de petróleo, después se tectea la temperatura a la que se desea alimentar al motor; cuando el calentador lleva al aceite hasta esa temperatura la válvula hace el cambio automáticamente para empezar a alimentar al motor con aceite a la temperatura especificada, hecho esto, deben dejarse pasar aproximadamente diez minutos para que se consuma el diesel que queda en el tramo de manguera que está desde la válvula hasta el motor, esto para asegurar que se está alimentando al motor con aceite al 100%.

Con el tanque de aceite previamente lleno hasta una cantidad conocida en litros, se conecta la carga que vaya a usarse para este caso y al igual que en el caso del diesel se deja transcurrir una hora, para después medir el aceite restante en el tanque, y así obtener el consumo en litros/hr. Lo mismo se hace para las diferentes cargas, pero con la diferencia que ahora debe hacerse a diferentes temperaturas, como ya se había mencionado, estas temperaturas están comprendidas entre los 80 y los 110° C.

De esta forma, con los datos obtenidos se pudo hacer la siguiente grafica que muestra el consumo específico, en función de la carga aplicada para el diesel en comparación con aceite vegetal a diferentes temperaturas:

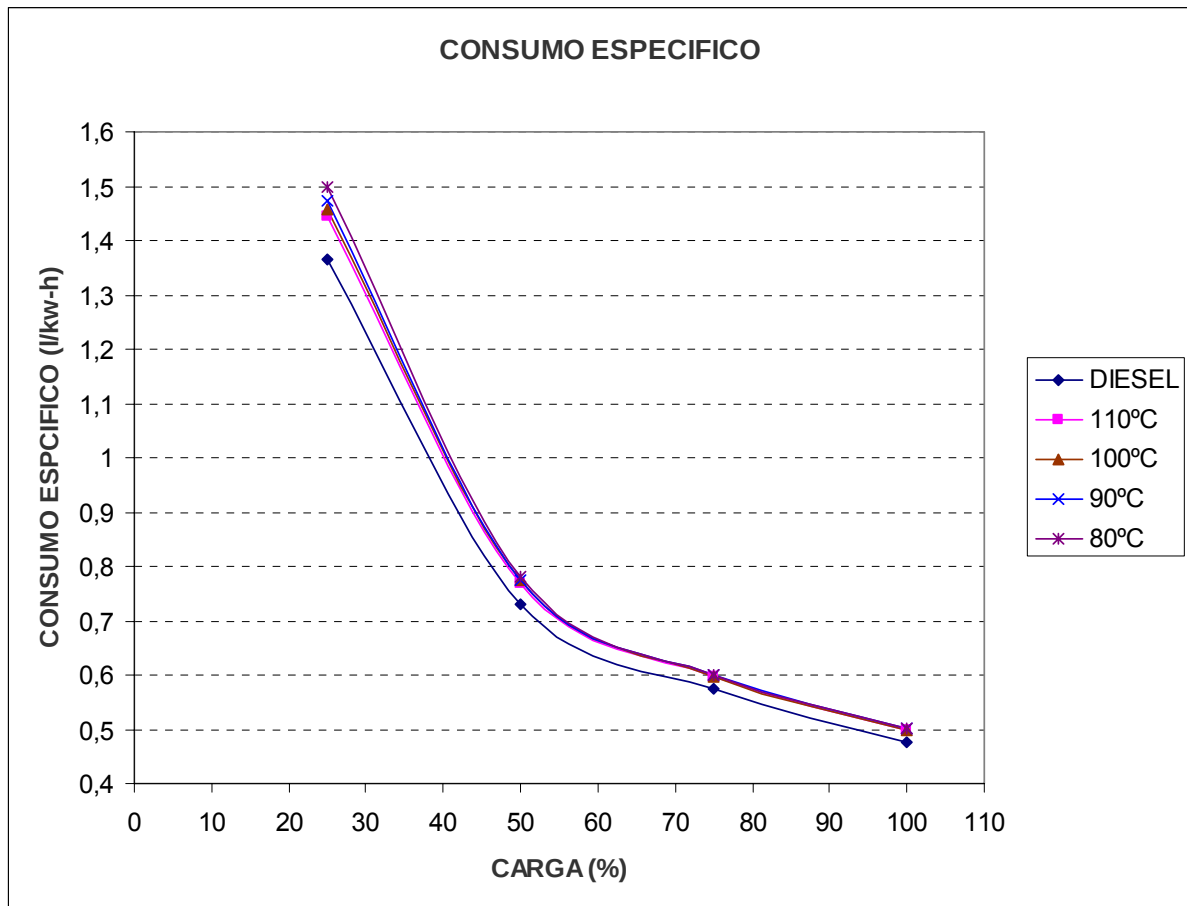


Fig. 5.5 Grafica de consumo especifico a diferentes cargas para diesel y aceite

Se puede observar que el diesel tiene un consumo específico más bajo que el aceite de soya (casi 9% menos, a cargas bajas). La explicación de este comportamiento se debe a que el poder calorífico contenido en el aceite vegetal es mas bajo que en el diesel. Debido a esto, se requiere un flujo de combustible más alto para mantener una entrada constante de energía al motor.

También se puede ver que al aumentar la temperatura del aceite vegetal hay un menor consumo de combustible. Esto es porque al aumentar su temperatura se asemeja cada vez más al diesel en cuanto a viscosidad se refiere, por lo que los inyectores pueden pulverizarlo mejor, con la consecuente disminución de combustible hacia el motor, puesto que hay menos pérdida de combustible debido a que el retraso de ignición es menor.

El retraso de ignición se define como el tiempo que transcurre desde que comienza la inyección de combustible, hasta el momento en que comienza su combustión. Se desea que esta etapa sea muy corta, ya que si es larga, puede causar una gran pérdida de energía calorífica y eficiencia del motor, por lo que se debe evitar. Este comportamiento se acentúa cuando el motor esta frío o con bajas cargas.

El más bajo número de cetano del aceite (37.9), con respecto al diesel (47), también tiene el efecto de incrementar el retraso de ignición. El número o índice de cetano guarda relación con el tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión. Una combustión de calidad ocurre cuando se produce una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del carburante.

Cuanto más elevado es el número de cetano, menor es el retraso de la ignición y mejor es la calidad de combustión. Por el contrario, aquellos carburantes con un bajo número de cetano requieren mayor tiempo para que ocurra la ignición.

Otra cosa que se puede notar es que al aumentar la carga, disminuye el consumo de aceite vegetal respecto al diesel y que a cargas bajas la diferencia es más grande. La razón de esto es que a elevadas cargas aumenta la eficiencia del motor, como se verá mas adelante.

5.3.2 Eficiencia del motor

La eficiencia de un motor se define como la relación entre la potencia que entrega éste y el calor que le suministra el combustible.

$$\eta = \frac{P}{V_{comb} * LHV} \quad (5.3)$$

Donde:

P = Potencia (Kw.)

V_{comb} = Flujo volumétrico estándar de combustible (l/hr)

LHV = Poder calorífico inferior del combustible (Kw-h/l)

Así, con los datos obtenidos en la prueba de consumo y con el poder calorífico inferior de ambos combustibles, obtenidos de la literatura se pudo obtener la eficiencia del motor a distintas cargas de trabajo.

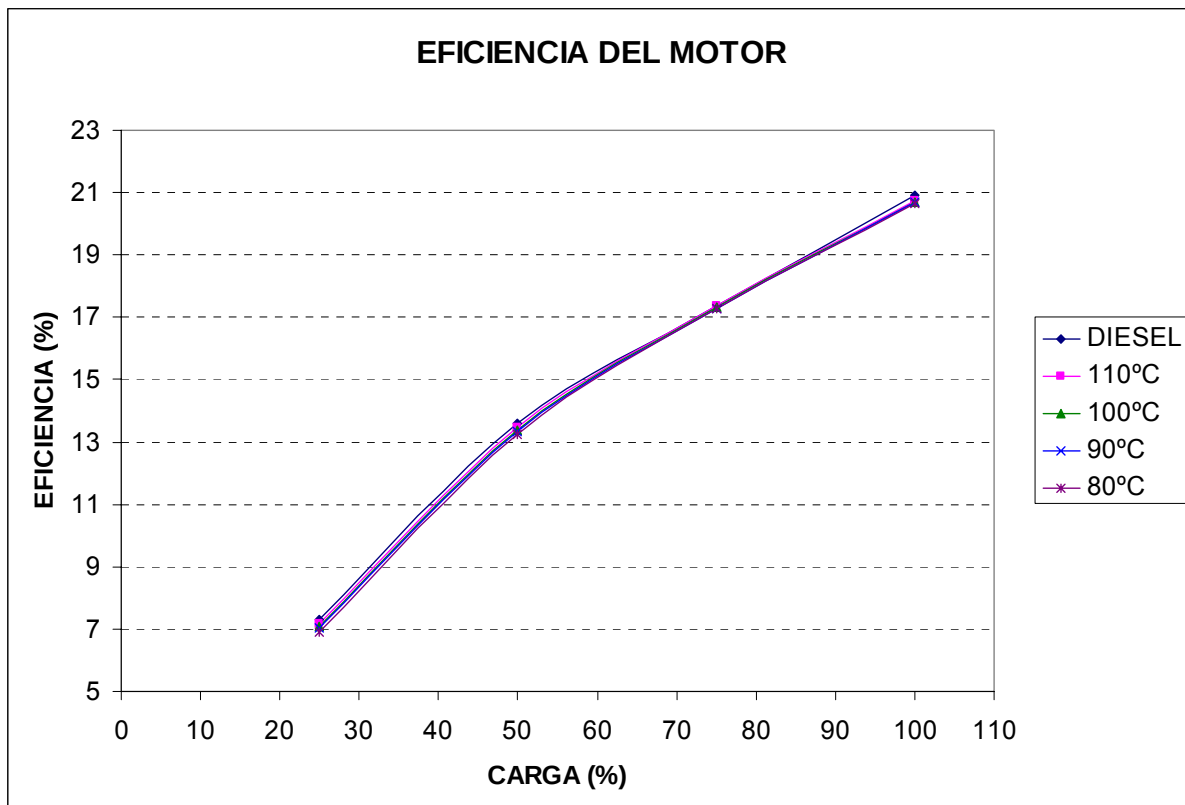


Fig. 5.6 Eficiencia del motor a distintas cargas

Con lo que se puede observar que la eficiencia del motor aumenta conforme aumenta la carga de trabajo.

La razón de este comportamiento es que al aumentar la carga, también lo hace la demanda de combustible, al haber mas combustible en la cámara de combustión, su volumen es mayor, mientras que la carrera del pistón es la misma, por lo que comprime mas la mezcla aire-combustible, debido a esto se aumenta la relación de compresión.

En los motores de combustión interna, la eficiencia aumenta al aumentar la relación de compresión. La relación de compresión en un motor de este tipo es el número que permite medir la proporción en que se ha comprimido la mezcla de aire-combustible dentro de la cámara de combustión de un cilindro.

Una alta relación de compresión es deseable porque permite a un motor extraer más energía mecánica de una determinada masa de aire-combustible debido a su mayor eficiencia térmica. Altas relaciones colocan al oxígeno disponible y las moléculas de combustible en un espacio reducido, junto con el calor de la compresión, causando una mejor mezcla, y la evaporación de las gotas de combustible. Por lo tanto, permite el aumento de poder en el momento de la ignición y la extracción de más trabajo útil de ese poder por la expansión de los gases calientes a un mayor grado.

La (figura 5.6) muestra que la diferencia entre la eficiencia de ambos combustibles es pequeña, lo cual hace del aceite vegetal una alternativa viable para reemplazar al diesel. Un inconveniente del aceite es su precio (17.50\$/litro), que es más elevado que el del diesel (7.52\$/litro), pero este costo podría reducirse al usar mezclas de aceites o aceite usado.

5.3.3 Temperatura de los gases de escape

Conocer el comportamiento de temperatura en los gases de escape es importante, ya que éstos pueden ser utilizados para precalentar al aceite antes de alimentar al motor, tal como se hizo en este trabajo, donde se utilizó un intercambiador de calor junto a la salida de los gases de escape para elevar la temperatura del aceite antes de entrar al calentador eléctrico.

El objetivo de esto, es que al calentador eléctrico le cueste menos trabajo llegar a la temperatura deseada, ya que gracias a este precalentamiento, la temperatura del aceite llega al calentador a un nivel mas alto que la temperatura ambiente, lo que hace que el precalentamiento cumpla su objetivo.

Esta prueba se realizó midiendo la temperatura de los gases de escape cuando el motor es alimentado con diesel y con aceite, variando la carga de trabajo. En este procedimiento, primero se alimenta al motor con diesel y luego se coloca la carga de trabajo a analizar, hecho esto se deja transcurrir un tiempo de veinte minutos para que la temperatura se estabilice y después se toma el dato. En el caso del aceite, se hace lo mismo una vez hecho el cambio de combustible y dejado transcurrir el tiempo de consumo del diesel remanente y el de estabilización.

Debido a que el cambio en la temperatura de los gases cuando el motor era alimentado con aceite a diferentes temperaturas era muy poco y en ocasiones nulo, estos valores se promediaron para dar lugar a una sola gráfica de temperatura-carga para el caso del aceite.

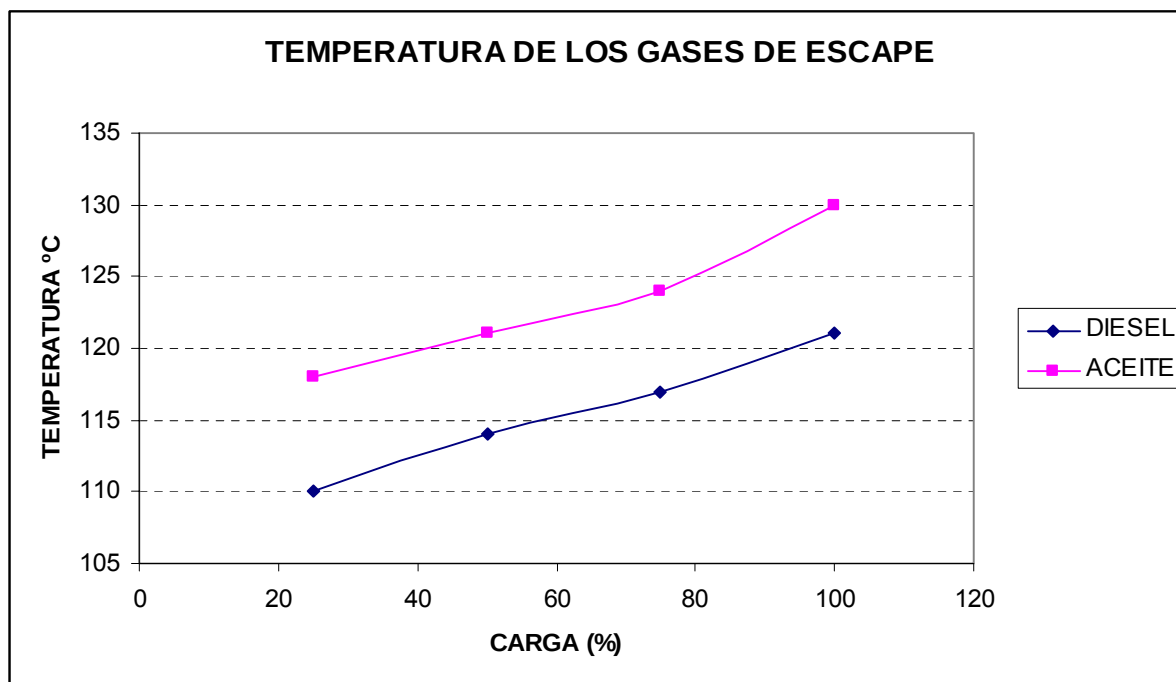


Fig. 5.7 Temperatura de los gases de escape a distintas cargas para diesel y aceite

Se puede observar que la temperatura de los gases de escape aumenta conforme lo hace la carga. Esto es, porque al aumentar la carga también lo hace la cantidad de combustible que entra al cilindro, por lo que al quemarse mas combustible, se producen temperaturas mas altas en la cámara, y por ende en el escape.

Se puede observar también que la temperatura de los gases, es más alta cuando el motor es alimentado con aceite vegetal. Esto se debe a que esta temperatura se ve afectada por los cambios en el retraso de ignición. Un más alto retraso de ignición causa una combustión retrasada y una mayor pérdida de energía calorífica en el escape.

5.4 PRUEBAS AL GENERADOR

5.4.1 Calidad de la energía

Esta prueba se hizo con la finalidad de determinar la calidad de la energía eléctrica entregada por la planta, cuando es alimentada con diesel y aceite. La Calidad de energía puede resumirse como las variaciones en la tensión, corriente y frecuencia del sistema eléctrico que afectan adversamente al equipo eléctrico y electrónico.

Para poder cuantificar esta calidad, se utilizó lo que se conoce como distorsión armónica total. La Distorsión Armónica Total (DAT) o Total Harmonic Distortion (THD), es una alteración de la onda senoidal pura (distorsión de la onda senoidal).

La distorsión armónica de la forma de onda de la tensión da lugar a la generación de armónicas (normalmente impares, por ejemplo: 3, 5, 7, etc.). Las armónicas pueden ocasionar una perturbación inaceptable sobre la red de distribución de energía eléctrica, y causar el recalentamiento de motores, cables y transformadores, el disparo de los

interruptores automáticos, el sobrecalentamiento (y posible explosión) de capacitores, y también el mal funcionamiento de distintos equipos como computadoras, sistemas de comunicaciones, máquinas de control numérico y equipos de control, protección y medición en general.

Los armónicos son distorsiones de las ondas senoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal. [25]

En un sistema de potencia eléctrica, los aparatos y equipos que se conectan a él, tanto por la propia empresa como por los clientes, están diseñados para operar a 50 ó 60 ciclos, con una tensión y corriente sinusoidal. Por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias de 50 ó 60 ciclos sobre algunas partes del sistema de potencia o dentro de la instalación de un usuario. La forma de onda existente esta compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, incluyendo una referida a la frecuencia fundamental. En la figura (5.8) se observa la descomposición de una onda distorsionada en una onda sinusoidal a la frecuencia fundamental (60 Hz), más una onda de frecuencia distinta. El término componente armónico o simplemente armónico, proviene del teorema de Fourier y define que, bajo ciertas condiciones analíticas, una función periódica cualquiera puede considerarse integrada por una suma de funciones senoidales, siendo la primera armónica, denominada también señal fundamental, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto serán funciones senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. Estas componentes son denominadas armónicas de la función periódica original. La amplitud de los armónicos es generalmente expresada en por ciento de la fundamental.

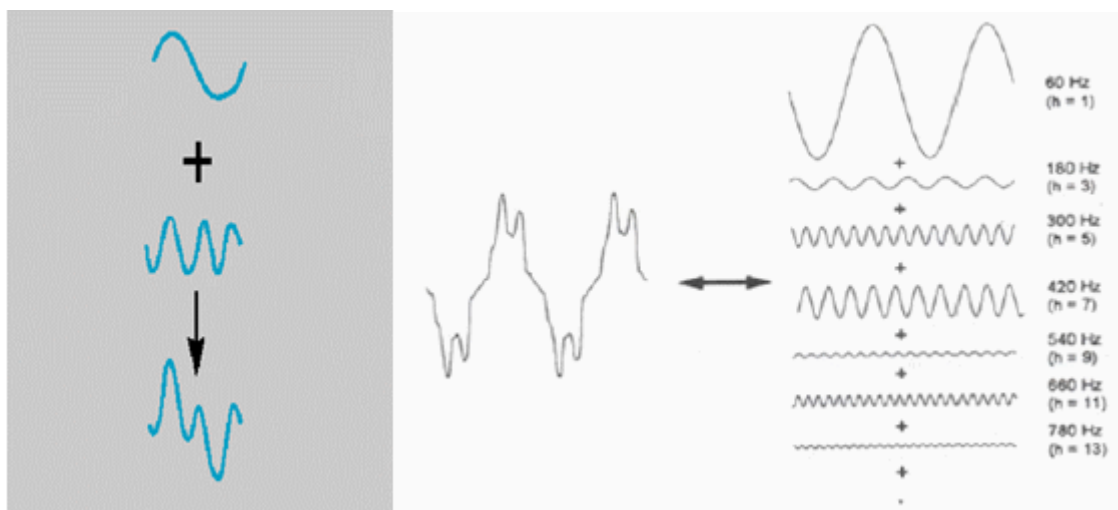


Fig. 5.8 Componentes armónicas de una señal

Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan, que son:

- su amplitud: hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico,
 - su orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz).
- Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir $3 \times 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$.

Estas señales pueden visualizarse en un sistema tridimensional en el que se representan su magnitud, ubicación en frecuencia y a lo largo del tiempo.

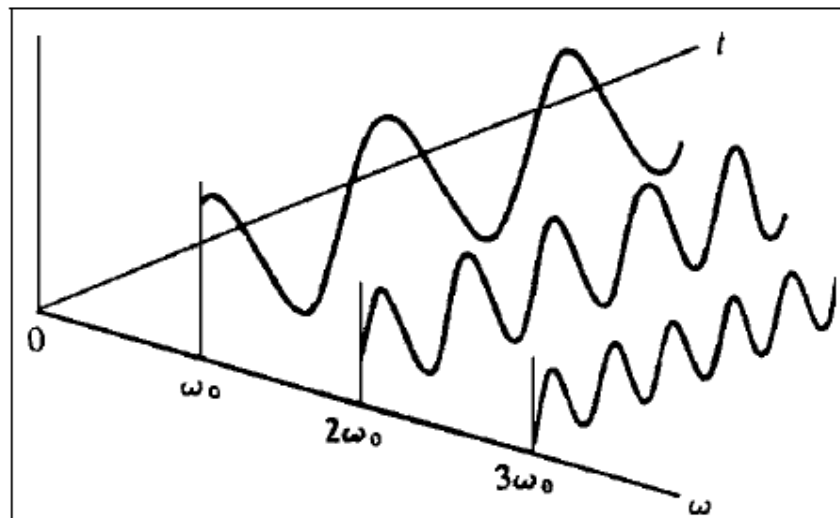


Fig. 5.9 Componentes en el dominio del tiempo y de la frecuencia

Como ya se había mencionado, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo respecto a la tensión. La curva característica corriente – voltaje de la carga define si es o no lineal su comportamiento y no se debe pensar que todos los equipos que tienen semiconductores por definición son no lineales.

Por el contrario, cuando se aplica un voltaje senoidal directamente a cargas tales como resistencias, capacitores o una combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es senoidal, por lo que se les denominan cargas lineales.

5.4.2 Distorsión armónica de voltaje y corriente usando diesel como combustible

La operación con plantas de emergencia es otra de las fuentes de distorsión. Los generadores eléctricos comunes, debido a la disposición de las bobinas en el inducido, y forma del campo, siempre producen armónicas, de 3ro, 5to y 7mo orden, por su paso en ciertas bobinas, esta es la razón por la que se realizó esta prueba, y así poder medir la distorsión y ver con qué tipo combustible hay mas de ésta y comparar los resultados obtenidos.

Para la realización de esta prueba se utilizó un osciloscopio de la marca Gwinstek modelo GDS-2104, el cual tiene conexión usb para poder guardar la señal que está en la pantalla, además de entregar la imagen de la señal, también entrega un archivo en formato Excel con los datos de la señal mostrada.

La primera prueba se hizo con diesel, conectando el osciloscopio a la salida de 120volts RMS del generador, con esto se obtuvo la siguiente gráfica.

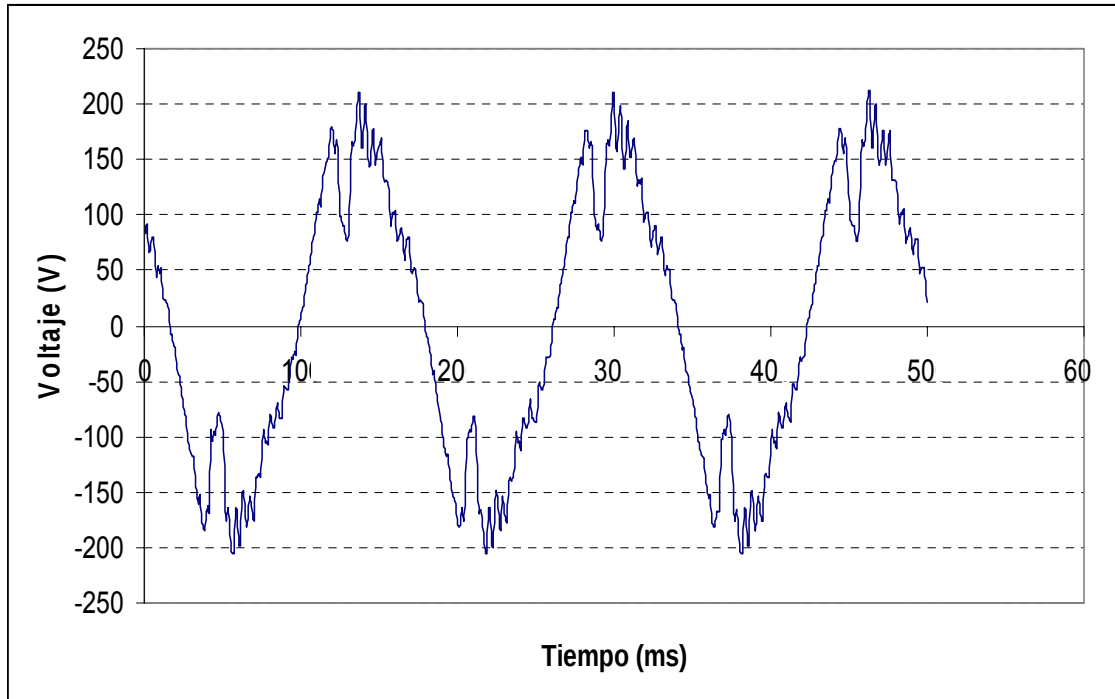


Fig. 5.10 Señal de voltaje en el tiempo de la planta de energía

La cual muestra la senoidal de voltaje en el tiempo, del generador. Como se puede ver, esta señal está distorsionada, es por esto que se debe calcular esta distorsión para poder compararla con la obtenida cuando la planta es alimentada con aceite y ver cuánto ha cambiado con respecto a la primera.

Como ya se había mencionado, para cuantificar esta distorsión se utilizó la Distorsión Armónica Total o THD, que es la relación de las armónicas con respecto a la fundamental. La distorsión nos indica el ruido o la variación que tiene la onda senoidal que se está midiendo con respecto de la onda fundamental que se quiere, es decir, nos dice qué tanto se ha "distorsionado" nuestra onda senoidal en el proceso.

El THD es calculado como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de todos los armónicos dividido por la señal fundamental (60 Hz.). Este cálculo da el valor de distorsión como porcentaje de la fundamental.

$$\%THD(\text{voltaje}) = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100 \quad (5.4)$$

Donde: $V_2 \dots V_n$ = Voltaje RMS de las armónicas múltiplos de la fundamental.
 V_1 = Voltaje RMS de la fundamental.

Para poder hacer este cálculo, se necesitan los voltajes rms tanto de las armónicas como de la fundamental, debido a esto se utiliza el análisis de Fourier en la señal obtenida por el osciloscopio. El análisis de Fourier, descompone una señal en sus constituyentes senoidales de frecuencias diferentes. Para datos muestreados en un vector, el análisis de Fourier se realiza usando la Transformada Discreta de Fourier (DFT, Discrete Fourier Transform). La transformada rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo eficiente para el cómputo de la DFT de una secuencia, no es una transformada diferente. [16,27]

Dicho de otra forma, la FFT toma una señal en el dominio del tiempo y la transforma en su representación del dominio de la frecuencia. Y ya que Matlab cuenta con esta función, se usa este programa para poder hacer el análisis, con los datos obtenidos del osciloscopio y así obtener la siguiente gráfica.

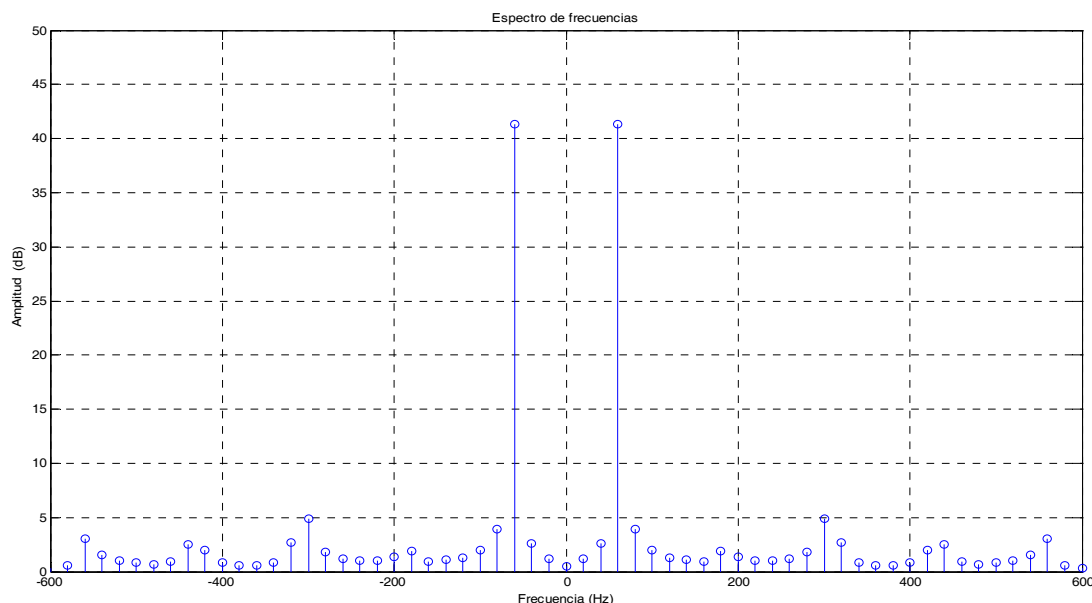


Fig. 5.11 Señal de voltaje de la planta en el dominio de la frecuencia

La grafica obtenida de Matlab seria una vista frontal de la figura 5.9, en donde se puede ver la amplitud de las distintas componentes en frecuencia de la señal de la figura 5.10. En esta gráfica se puede ver la fundamental a 60 Hz y las armónicas de mayor importancia, en este caso las que son múltiplos impares de la fundamental 3^a, 5^a, 7^a y 9^a, que están a 180, 300, 420 y 540 Hz respectivamente, y son estas las usadas para calcular el THD.

En la gráfica, las amplitudes de las armónicas están dadas en decibeles, hay que convertir a volts rms antes de introducirlas a la formula de THD, con esto, se obtiene un THD=2.38%, lo cual es bueno, ya que se recomienda que este valor esté por debajo del 10% para no tener problemas con los aparatos eléctricos.

La distorsión armónica también puede ser calculada para corriente, esto es por que al conectar una carga al generador, ésta puede aumentar o no la distorsión, dependiendo del tipo de carga. Un sistema eléctrico provee energía a las cargas entregando corriente a la frecuencia fundamental. Sólo la corriente a la frecuencia fundamental puede proveer energía real, la corriente entregada a frecuencias de las armónicas no entregan energía real a la carga.

Para obtener el THD de corriente se usa el mismo procedimiento anterior, solo que en este caso es conectada una carga al generador. Al igual que en el procedimiento anterior, se obtiene la señal de voltaje del generador mediante el osciloscopio, solo que en este caso, la carga hará que el generador entregue esta señal distorsionada o no según el tipo de carga.

Esta señal se introduce al programa Matlab para obtener su espectro de frecuencias, de donde se puede obtener el voltaje rms de la fundamental y de las armónicas, con este dato se puede usar la ley de Ohm ($I=V/R$) para obtener la corriente de cada armónica y de la fundamental e introducirlas a la formula para obtener el THD de corriente.

$$\%THD(\text{corriente}) = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100 \quad (5.5)$$

Donde: $I_2 \dots I_n$ = Corriente de las armónicas múltiplos de la fundamental.
 I_1 = Corriente de la fundamental.

En este caso se usaron dos tipos de cargas, una resistiva y una inductiva. La carga resistiva era un foco de 75w, y la inductiva era un taladro eléctrico. Dichas cargas se conectaron al generador, una a la vez y se obtuvo la señal de voltaje de cada una, posteriormente se obtuvo su espectro de frecuencias y consecuentemente su THD.

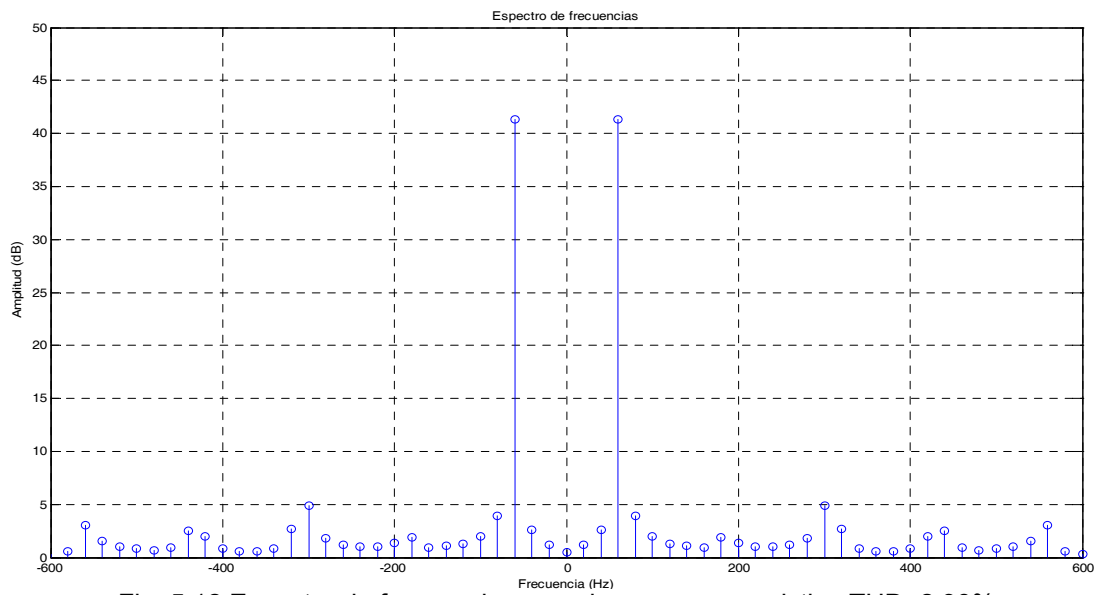


Fig. 5.12 Espectro de frecuencias usando una carga resistiva THD=2.38%

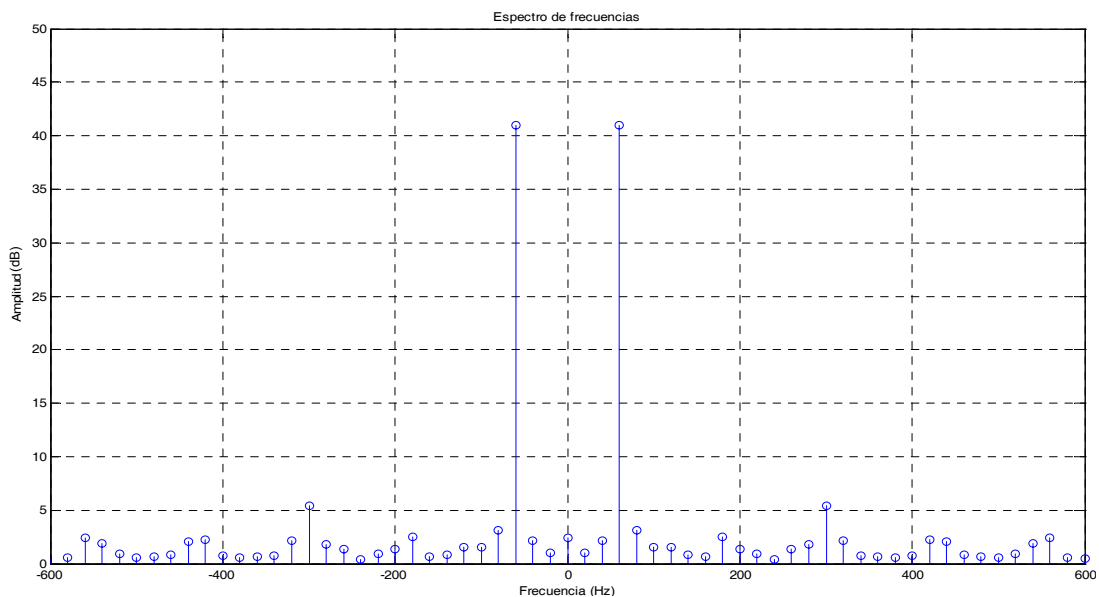


Fig. 5.13 Espectro de frecuencias usando una carga inductiva THD=2.65%

Como se puede ver no hay cambios en el THD con la carga resistiva, debido a que esta es una carga lineal y no altera la corriente. En cambio, cuando se usa la carga inductiva aumenta el THD por ser esta una carga no lineal, lo que hace que aumenten las armónicas.

5.4.3 Distorsión armónica de voltaje y corriente usando aceite como combustible

Las mediciones de THD son hechas usando aceite como combustible para poder determinar el efecto en la calidad de la energía cuando la planta esta operando con éste, y comparar las mediciones con las hechas para diesel.

Estas mediciones se realizan de la misma forma que las hechas usando diesel como combustible, solo que ahora, la caja de circuitos, indispensable para la operación de la planta con aceite, ya no toma la energía de la misma planta debido a que la presencia de cargas no lineales en ella alteraría los resultados de las mediciones, esta caja es ahora conectada a la red de energía eléctrica convencional.

Estas pruebas al igual que las anteriores, deben hacerse a diferentes temperaturas, para poder ver el efecto que tiene en los resultados el variar este parámetro.

De esta forma, el procedimiento para estas pruebas comienza con la operación de la planta con diesel, después se introduce la temperatura a la cual se desea alimentar el aceite, una vez que es seguro que la planta esta operando con aceite a la temperatura deseada, se toma la señal de voltaje del osciloscopio, que posteriormente servirá para hacer el cálculo del THD.

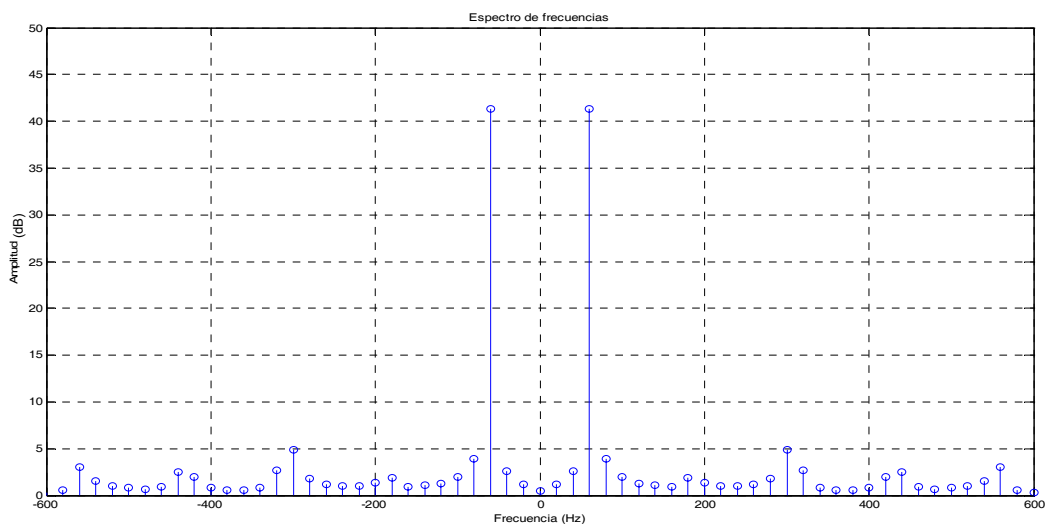


Fig.5.14 Espectro de frecuencias de voltaje de la planta usando como combustible aceite a 110°C
THD=2.38%

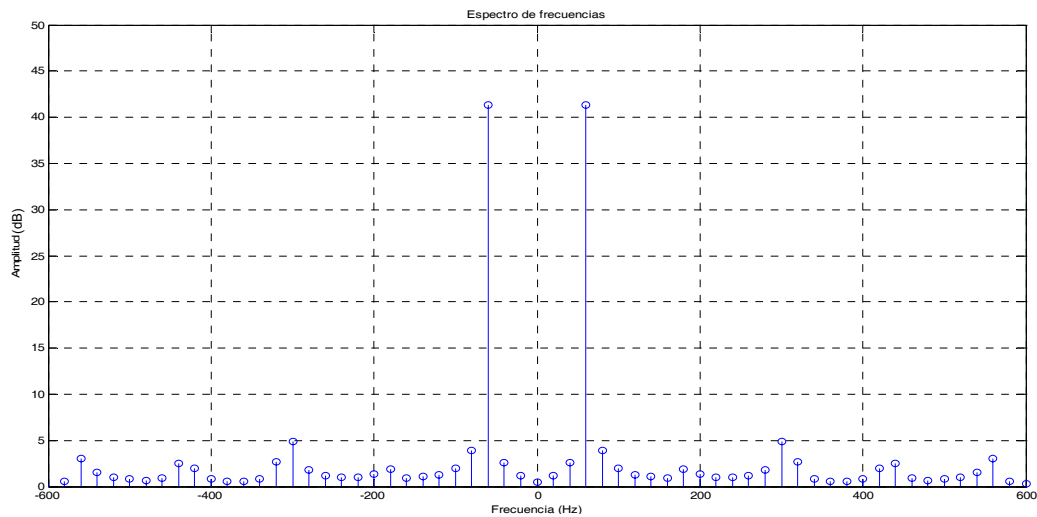


Fig.5.15 Espectro de frecuencias de voltaje de la planta usando como combustible aceite a 100°C
THD=2.38%

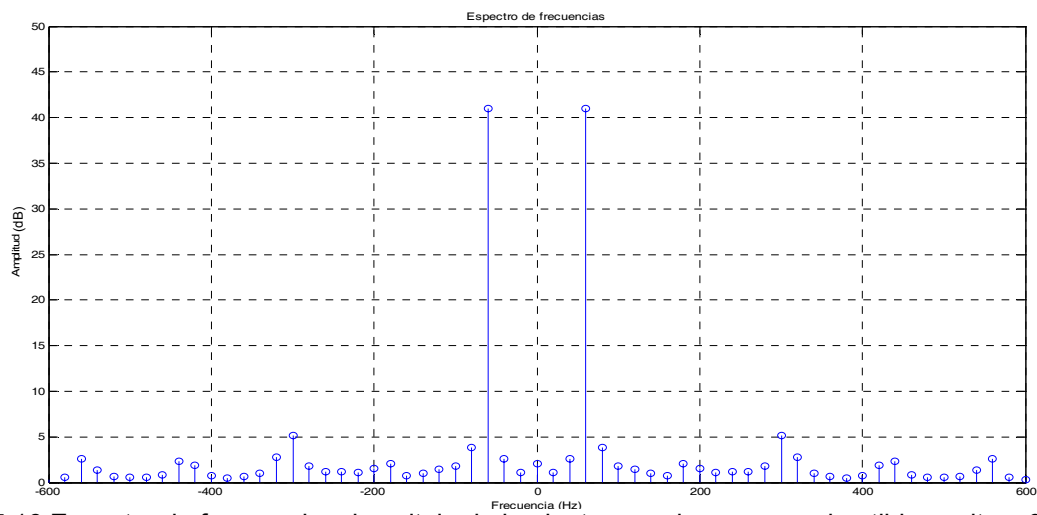


Fig.5.16 Espectro de frecuencias de voltaje de la planta usando como combustible aceite a 90°C
THD=2.61%

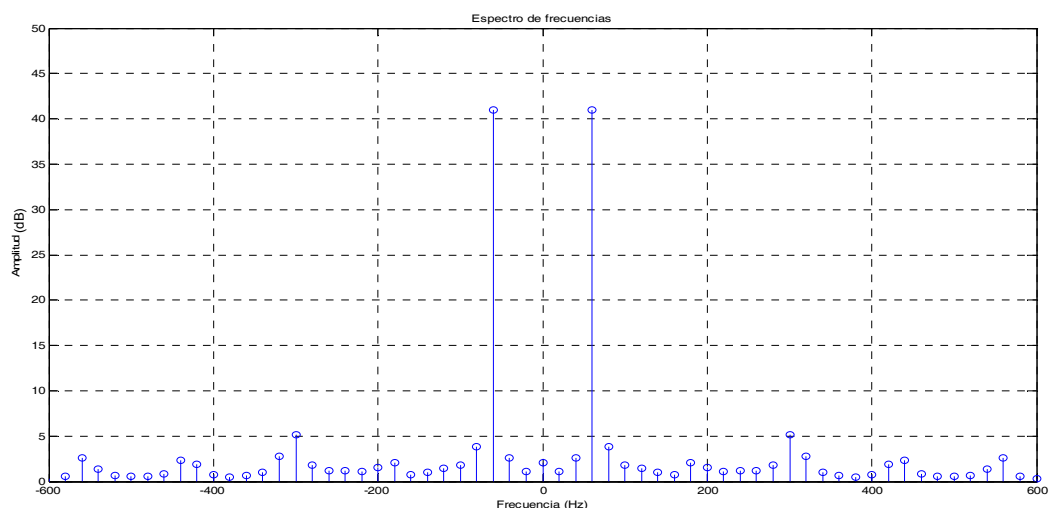


Fig.5.17 Espectro de frecuencias de voltaje de la planta usando como combustible aceite a 80°C
THD=2.61%

Como se puede ver, los resultados son casi iguales a los obtenidos usando diesel como combustible, solo que ahora hay un ligero incremento en el THD a temperaturas inferiores a los 100° C. Esto puede deberse a que el uso de aceite vegetal en el motor, causa un retraso de ignición, lo que ocasiona variaciones en la frecuencia del generador.

Este incremento de THD a bajas temperaturas no es significativo, lo que indica que las diferencias entre ambos combustibles usados son compensadas a nivel del motor y no afectan tanto al generador.

El THD es también calculado para corriente usando aceite como combustible a diferentes temperaturas, el procedimiento es el mismo que para diesel, pero en este caso solo se muestran los resultados obtenidos al usar la carga inductiva, ya que la resistiva no mostró cambios en el THD en comparación al obtenido en voltaje.

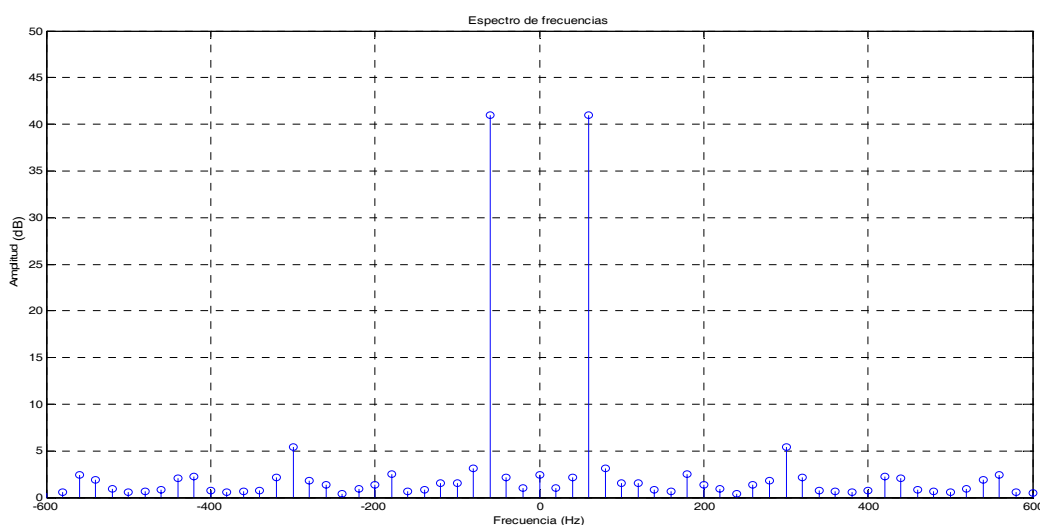


Fig. 5.18 Espectro de frecuencias de la planta usando como combustible aceite a 110°C, con una carga inductiva THD=2.65%

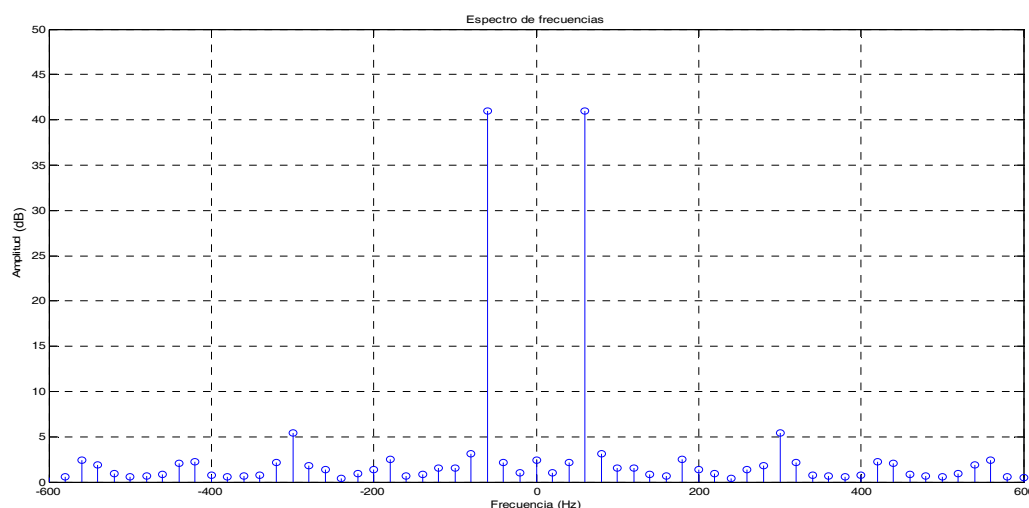


Fig. 5.19 Espectro de frecuencias de la planta usando como combustible aceite a 100°C, con una carga inductiva THD=2.65%

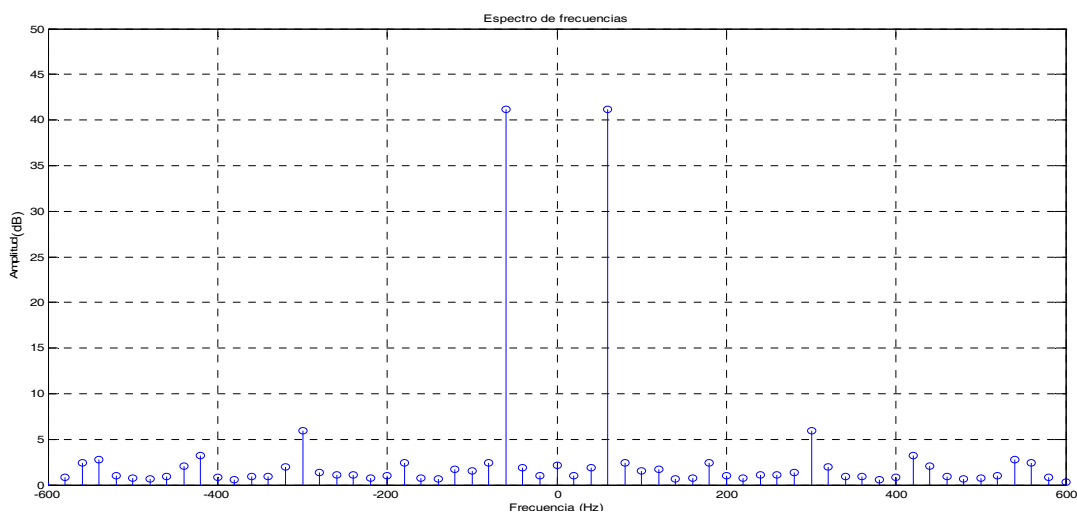


Fig. 5.20 Espectro de frecuencias de la planta usando como combustible aceite a 90°C, con una carga inductiva THD=2.87%

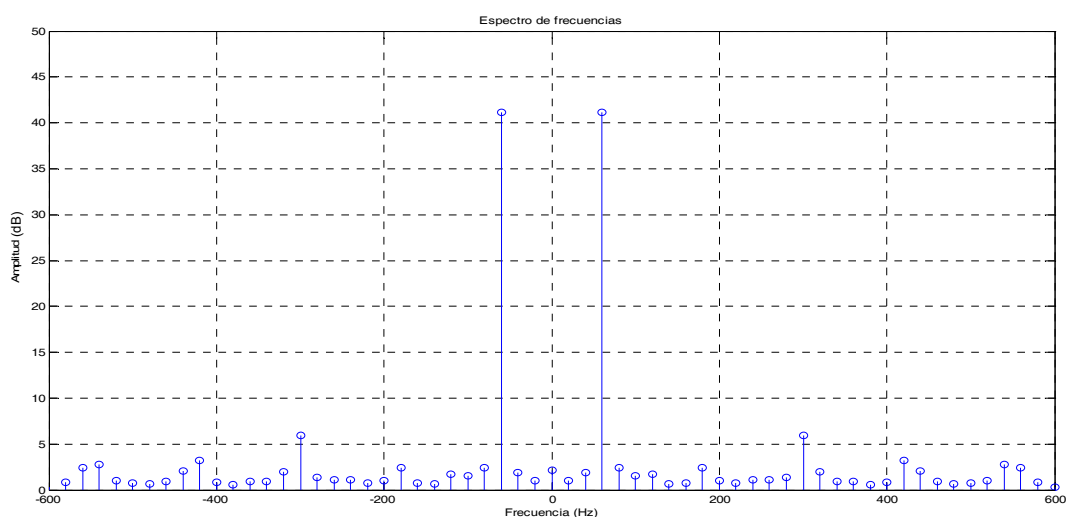


Fig. 5.21 Espectro de frecuencias de la planta usando como combustible aceite a 80°C, con una carga inductiva THD=2.87%

Como era de esperarse, hay un incremento del THD en corriente debido al uso de la carga inductiva y al igual que en las mediciones de voltaje, hay un ligero incremento del THD a temperaturas inferiores a los 100° C, lo que indica que existe un mayor aumento de armónicas por el uso de cargas no lineales que por el uso de aceite como combustible.

5.4.4 Niveles de armónicas permitidas por las normas

Para asegurar la integridad en el sistema de potencia global, es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles que apliquen tanto a los usuarios como a los suministradores de la energía.

Resulta especialmente delicada la relación usuario / compañía suministradora, ya que esta última tiene derecho a pedir al usuario que limite la contaminación al sistema de transmisión y distribución y el usuario tiene el derecho a pedir el suministro de una energía con la menor contaminación posible.

En México existe la especificación CFE L0000-45 denominada "Perturbaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica" concerniente a la distorsión armónica permisible.

En los Estados Unidos de América la norma IEEE 519 "Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia" define entre sus puntos los valores máximos de distorsión permisible.

Ambas normatividades están diseñadas para limitar las corrientes armónicas de cada usuario en lo individual de forma que los niveles armónicos en voltaje en la totalidad del sistema de potencia sean aceptables, siendo su cumplimiento una responsabilidad compartida entre suministrador y usuarios.

El suministrador es responsable de mantener la calidad del voltaje en el sistema global, especificándose los límites para diferentes niveles de tensión.

Es importante notar que la definición de la distorsión armónica total THD que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función al voltaje nominal, que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación a lo largo del tiempo.[25]

CFE L0000-45

Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal

Nivel de tensión en la Acometida (V_n)	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THD V_n
$V_n \leq 1$ kV	5.0%	8.0%
$1 < V_n < 69$ kV	3.0%	5.0%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 138$ kV	1.5%	2.5%
$V_n > 138$ kV	1.0%	1.5%

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100 \quad (5.6)$$

donde:

V_h : Magnitud de la componente armónica individual

h : orden armónico

V_n : Voltaje nominal fundamental del sistema

El cálculo en este caso, es similar al hecho anteriormente sólo que ahora la distorsión no es expresada con respecto a la fundamental, sino que es expresada en función del voltaje nominal, que en este caso es de 120Volts rms. Para este cálculo es usado el espectro de frecuencias obtenido anteriormente para diesel y aceite, también se usan las armónicas impares múltiplos de la fundamental.

Tabla 5.2 Cálculo de distorsión armónica permitido por las normas para diesel y aceite a diferentes temperaturas

Tipo de combustible	Distorsión armónica Total THD V_n
Diesel	2.36%
Aceite a 110° C	2.36%
Aceite a 100° C	2.36%
Aceite a 90° C	2.69%
Aceite a 80°C	2.69%

Con los cálculos realizados se puede ver que se está por debajo de los límites de distorsión permitidos por las normas aún usando aceite como combustible. Se calculó solo la distorsión armónica total porque es la que mas nos interesa.

Para la obtención de la distorsión en corriente se requiere el cálculo de la distorsión de demanda total TDD, que es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100 \quad (5.7)$$

donde:

I_h = Magnitud de la armónica individual

h = orden armónico

I_L = demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los 12 últimos meses.

Este cálculo no se pudo realizar, debido a que este último dato I_L no pudo ser obtenido, para ello se requiere tiempo con el que ya no se cuenta.

5.5 CONCLUSIONES GENERALES

Se diseñó y construyó un sistema alternativo de combustible, para poder alimentar con aceite vegetal a una planta de energía eléctrica de 6 Kw., cumpliendo así con el objetivo general de este trabajo de investigación, esto se logró sin hacer modificaciones al motor.

Los componentes del sistema de alimentación, fueron seleccionados en base a sus características, facilidad de adquisición, costo, etc. El control PID fue necesario debido a que las pruebas se debían realizar a temperaturas fijas, este control se implementó en el microcontrolador PIC16F877 para poder ser usado en el sistema de alimentación.

Se realizaron pruebas de funcionamiento del sistema de alimentación como condición para poder montarlo en la planta, una vez que éstas dieron resultados satisfactorios, se procedió a hacer el montaje atendiendo a las consideraciones planteadas en el diseño.

Se decidió por el uso de aceite de soya como combustible en este trabajo de investigación, por ser el mas alto en producción a nivel mundial. [29]

Fueron llevadas a cabo diversas pruebas que se utilizaron para comparar los resultados de funcionamiento de la planta cuando ésta es alimentada con diesel y aceite vegetal.

En las pruebas realizadas se pudo observar que el consumo de aceite es mayor que el del diesel, también se observó que el consumo de aceite disminuye a medida que aumenta la temperatura de éste, todo esto debido a las diferentes propiedades de estos combustibles.

También se observa una eficiencia del motor ligeramente mas baja en el aceite con respecto al diesel. En cuanto a la temperatura de los gases de escape, ésta es mas alta cuando se usa aceite como combustible, debido a la pérdida de energía calorífica en el escape y a un mayor retraso de ignición en el uso de aceite como combustible.

Las pruebas en el generador demuestran que la calidad de la energía entregada por éste conserva niveles aceptables aún cuando la planta es alimentada con aceite vegetal. La variación de temperatura del aceite de alimentación no causa mucho efecto en la distorsión armónica, comparada con la obtenida usando diesel como combustible.

Por las pruebas realizadas se concluye que es factible la utilización de aceite vegetal como combustible en una planta de energía eléctrica, en cuanto a funcionamiento se refiere.

5.6 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que a continuación se describen servirán para mejorar el funcionamiento del sistema de alimentación, también para la realización de posibles trabajos futuros.

Utilización de aceite usado previamente filtrado para alimentar al motor diesel, con el fin de reducir costos de operación.

Mejorar el diseño del intercambiador de calor, ya que el que es usado actualmente no aprovecha en su totalidad el flujo de los gases de escape por ser de flujo cruzado, en éste, solo una parte del intercambiador hace contacto con los gases. En un mejor diseño, el área que hace contacto con los gases de escape debería aumentarse, para obtener una mayor temperatura a la salida del intercambiador, esto podría lograrse mediante la utilización de tubos concéntricos, donde se haría circular aceite en el tubo de menor diámetro y los gases de escape en el tubo de mayor diámetro.

Utilización de un colector solar para el calentamiento del aceite vegetal, este podría ser plano o de concentración y se tendrían que realizar pruebas para determinar la temperatura alcanzada por el aceite en alguno de estos colectores. Colocado en la parte superior de la planta de energía, la alimentación continuaría siendo mediante la acción de la fuerza de gravedad.

Utilizar un sensor de efecto Hall para medir la corriente demandada por la carga, y con este dato, introducirlo al control, para que éste elija el valor de temperatura óptimo para alimentar al motor con aceite, ya que mediante las pruebas se comprobó que la temperatura óptima de alimentación con aceite dependerá de la carga.

Hacer uso de otros tipos de combustibles alternativos, como por ejemplo el etanol, para alimentar al motor de la planta de energía con las modificaciones al sistema de alimentación que esto implica.

REFERENCIAS

- [1] Alonso José Manuel. Sistemas auxiliares de motor. Revista Car and Driver, de Marzo del 2003. Pag 7 – 8.
- [2] Angulo Usategui José Ma.. Microcontroladores PIC diseño práctico de aplicaciones primera parte. El PIC16F84 Lenguajes PBASIC y ensamblador. Mc Graw Hill. Tercera edición, España 2003
- [3] Angulo Usategui José Ma. Microcontroladores PIC diseño práctico de aplicaciones segunda parte: PIC16F87x. Mc Graw Hill. Tercera edición, España 2000.
- [4] Bermejo Gómez de Segura Roberto. Reporte: El fin de la era de los combustibles fósiles. Sus consecuencias. Pag 5 – 10, 2006
- [5] Biocombustibles sin fronteras: De la primera a la segunda generación (en línea) Disponible:
<http://www.agrocombustibles.org/conceptos/LobatoBiocombustiblesSinFronteras.html>
Consulta: Febrero 2009
- [6] Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels. Gerhard Knothe. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Peoria, IL
- [7] Cabrera C Gerardo. Carburantes de algunos vegetales del Pacífico colombiano. Desarrollo y Difusión de Tecnologías Alternativas y Biología Integrativa Universidad del Valle. Pag. 13 – 32. Octubre, 2006.
- [8] Cabrera Enriqueta. México: hacia el fin de la era del petróleo. (en línea) Disponible:
http://www.proceso.com.mx/noticias_articulo.php?articulo=36118 consulta: marzo 2009
- [9] "Cambio climático," Enciclopedia Microsoft Encarta Online 2009. (en línea) Disponible:
<http://mx.encarta.msn.com/encyclopedia/Cambioclimatico.html>. Consulta febrero 2009.
- [10] Características planta de energía AH6000LE (en línea) Disponible:
<http://www.auroragenerators.com/> consulta: noviembre del 2007.
- [11] "Combustibles fósiles," Enciclopedia Microsoft Encarta Online 2009. (en línea) Disponible:
<http://mx.encarta.msn.com/encyclopedia/Combustiblesfosiles.html>. Consulta: Febrero 2009.
- [12] Diesel Engine: Governor (en línea) Disponible:
[http://en.wikipedia.org/wiki/Governor_\(device\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Governor_(device)) Consulta: Febrero 2009
- [13] Elsbett Aceite vegetal – General. (en línea) Disponible:
<http://www.elsbett.com/es/aceite-vegetal/general.html> Consulta: Febrero 2009
- [14] Knothe Gerhard. Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Peoria, IL. Pag 9 – 11.

- [15] Mataix Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Segunda edición. Ediciones del Castillo, S.A. Madrid 1986.
- [16] MATLAB - Introductory FFT Tutorial. (en línea) *Quan Quach* www.blinkdagger.com. Consulta: enero 2009
- [17] Motores diesel, Sistema de inyección. Fortunecity. (en línea) Disponible: <http://members.fortunecity.es/100pies/mecanica/inyeccion.htm> Consulta: Febrero 2009
- [18] Mundo tutoriales. Motores diesel y contaminación. (en línea) Disponible: <http://www.MundoTutoriales.com>. Consulta: Febrero 2009
- [19] Obtención de aceite vegetal de Algas por Fotoreactores. (en línea) Disponible: <http://tecnologiasalternas.blogspot.com/2009/01/obtencion-de-aceite-vegetal-de-algas-por.html>. Consulta: Febrero 2009
- [20] Ogata Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. Tercera edición. Pearson Prentice Hall. University of Minnesota, 1997
- [21] O. Maser, N. Rodríguez, I. Lazcano, L. Augusto. Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México. Reporte Solicitado por: Secretaría de Energía (SENER), Subsecretaría de Planeación Energético y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Investigación, Desarrollo Tecnológico y Medio Ambiente. Pag. 4 – 5. Noviembre 2006
- [22] Peidro Borrachina Jorge L.. Combustibles alternativos para su empleo en motores térmicos. Informe quincenal de la snmpe. Julio 2006.
- [23] Ramón Fernández Durán. El inicio del fin de la era de los combustibles fósiles. Texto publicado por la revista Viento Sur, en otoño de 2006, dentro de una carpeta monográfica sobre energía. Ecologistas en Acción, Madrid Diciembre de 2006
- [24] Sistema mecánico de inyección de combustible - Motores Diesel. (en línea) Disponible: <http://www.mailxmail.com/curso-motores-combustion-interna/sistema-mecanico-inyeccion-combustible-motores-diesel> Consulta: Febrero 2009
- [25] Téllez Ramírez Eugenio. Artículo técnico: Distorsión armónica. Automatización productividad y calidad S.A. de C.V. Pag. 4 – 8.
- [26] Tickell Joshua. From the Fryer to the Fuel Tank. The complete guide to using vegetable oil as an alternative fuel. Joshua Tickell publications New Orleans Louisiana. 2003
- [27] Vega Pineda Javier. Artículo: Análisis de Fourier. IEEE Taller de Matlab Instituto Tecnológico de Chihuahua. Pag. 1 - 5
- [28] Viscosities of vegetable oils and fatty acids. Hossein Nouredini. Chemical and Biomolecular Engineering Research and Publications. University of Nebraska – Lincoln 1992.
- [29] Wikipedia. Aceite vegetal. (en línea) Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Aceite_vegetal Consulta: Febrero 2009

[30] Wikipedia. Biocombustible. (en línea) Disponible:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Categor%C3%ADa:Biocombustibles> Consulta: Febrero 2009

[31] Wikipedia, la enciclopedia libre. Diesel engine. (en línea) Disponible:
http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine consulta: marzo 2009

[32] Wikipedia, la enciclopedia libre. Motor diésel. (en línea) Disponible:
http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_diesel consulta: marzo 2009

Página en blanco intencionalmente.

Anexo A

Fotos de la caja de circuitos



Fig. A.1 Caja de circuitos



Fig. A.2 Vista superior caja de circuitos

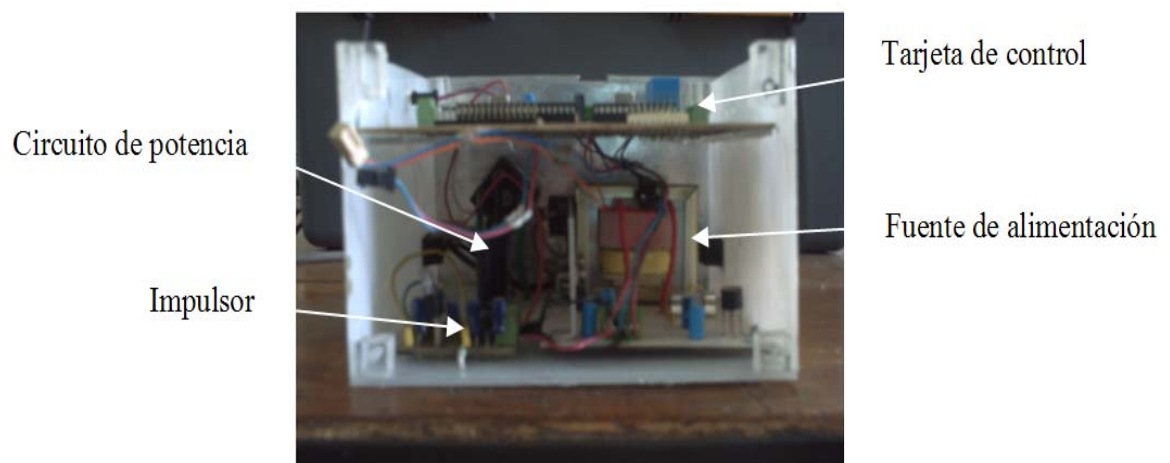
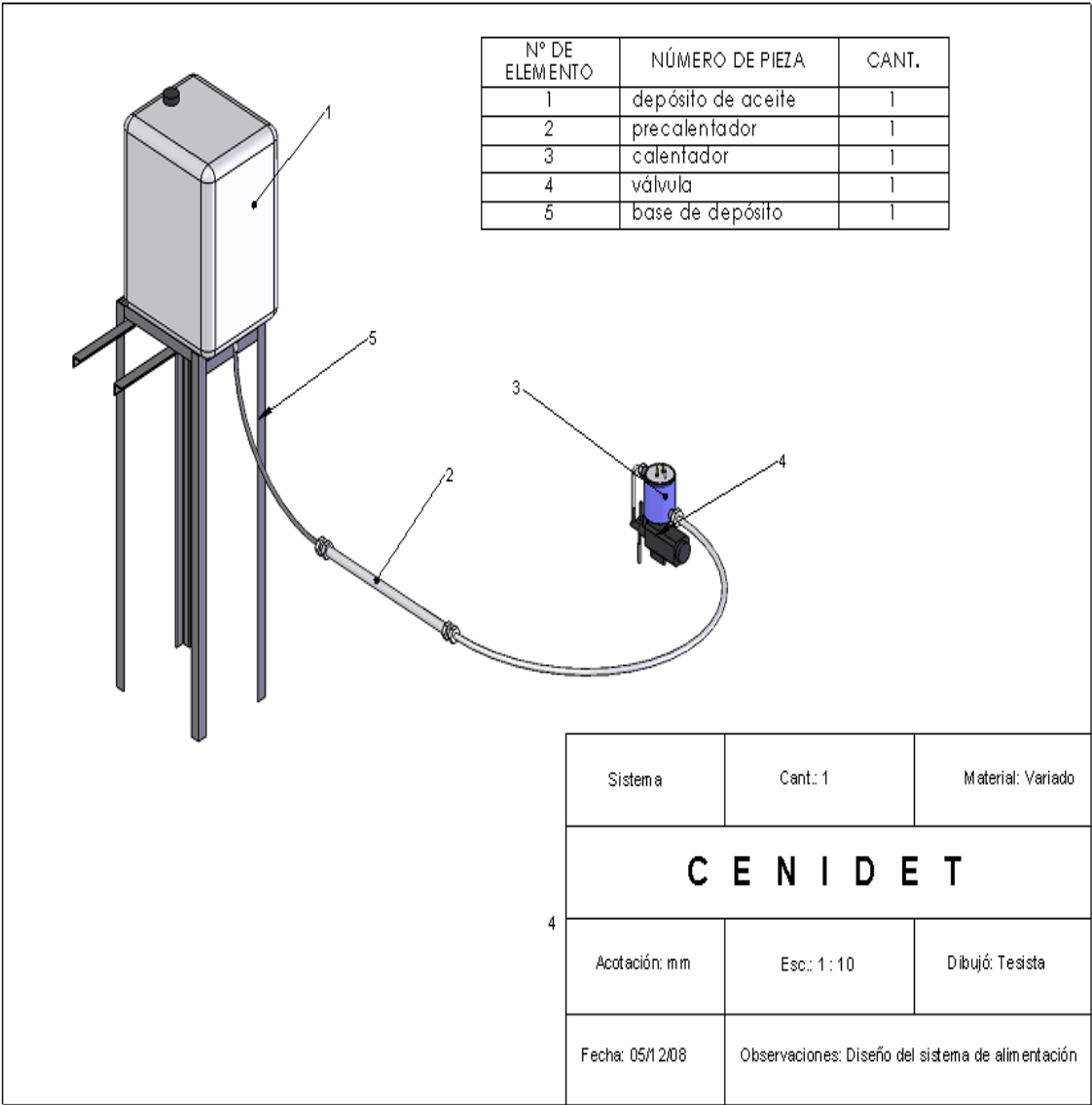


Fig. A.3 Interior de la caja de circuitos

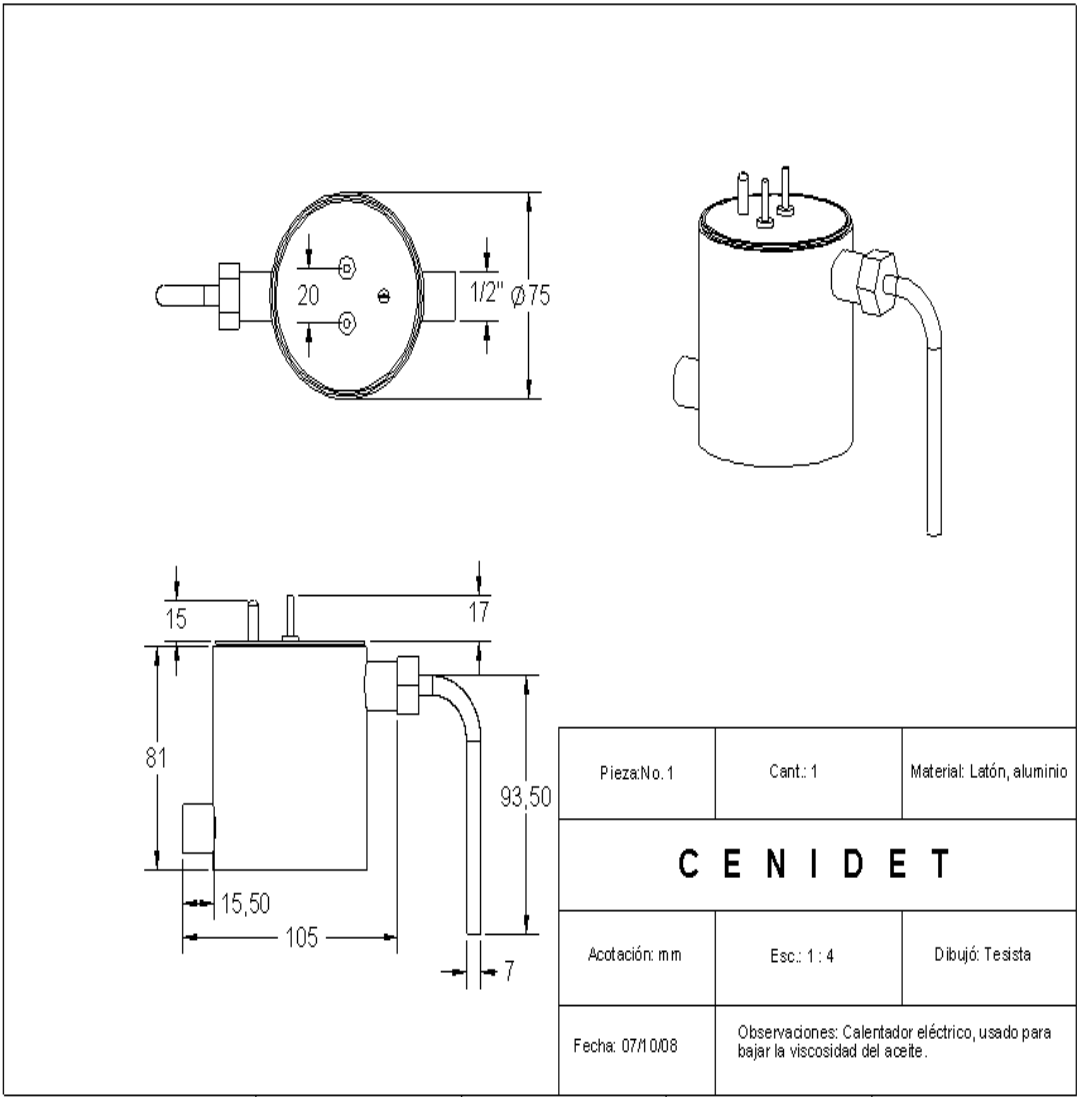
Anexo B

Diseño del sistema de alimentación



Anexo C

Diseño del calentador eléctrico



Anexo D

Diseño de la base del depósito de aceite

