

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PRECALENTADOR DE
COMBUSTIBLE PARA MOTORES DIESEL**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TELMO ALEX PILLAJO TINITANA

alexptmc86@hotmail.com

DIEGO MIGUEL SALAZAR IZA

diegosalazar_mecanos_prs@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ÁNGEL PORTILLA

angel.portilla@epn.edu.ec

Quito, Septiembre 2009

DECLARACIÓN

Nosotros, Telmo Alex Pillajo Tinitana y Diego Miguel Salazar Iza, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Telmo Alex Pillajo Tinitana

Diego Miguel Salazar Iza

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Telmo Alex Pillajo Tinitana y Diego Miguel Salazar Iza, bajo mi supervisión.

ING. ÁNGEL PORTILLA

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Mecánica por habernos acogido en sus aulas, a todos los Profesores quienes supieron guiarnos y brindarnos sus conocimientos a través de estos años. A todas las señoras secretarias de la Facultad quienes con paciencia fueron nuestro sustento para solucionar cualquier percance.

Al Ing. Ángel Portilla quien nos ha dado su apoyo para el desarrollo de este proyecto y por ser más que un maestro, un amigo. Al Ing. Orwield Guerrero por sus consejos y su colaboración en la elaboración de este trabajo. A la Srta. Gabriela Campuzano, compañera de promoción quien nos brindo su ayuda desinteresada.

A todos nuestros amigos y compañeros de la Promoción BOA ISO 69, por estar con nosotros en los buenos y malos momentos a través de toda la carrera.

Alex y Diego

DEDICATORIA

A Silvia y Alison, quienes son la luz de mi vida y me dan el ánimo para seguir luchando día a día y superarme.

A mis padres, Samuel y María, quienes han estado a mi lado incondicionalmente para apoyarme y brindarme todo su cariño. Gracias por sus consejos, que me han servido para ser una mejor persona y para no darme vencido en los momentos difíciles.

Alex

A mis padres, Miguel y Olga, quienes lucharon contra cualquier contratiempo y con infinito amor supieron guiarme por la vida hasta alcanzar una profesión para ser un hombre de bien y útil a la sociedad. A ellos dedico este trabajo fruto de sus esfuerzos y sacrificios constantes.

A mis hermanas Andy y Jady quienes con su alegría y sinceridad supieron brindarme su apoyo y levantar mi ánimo. A Alejito quien desde que llego a mi vida la ha llenado de amor y ha sido una gran fuente de inspiración para dar lo mejor de mi cada día.

Diego

CONTENIDO

RESUMEN.....	XVIII
PRESENTACIÓN	XIX
1. CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	1
1.2.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS.....	1
1.3 ALCANCE	2
1.4 JUSTIFICACIÓN	2
1.5 ANTECEDENTES.....	3
1.6 COMBUSTIBLES.....	4
1.7 BIOCOMBUSTIBLES	5
1.7.1 TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES:.....	6
1.8 ACEITE VEGETAL	7
1.8.1 EXTRACCIÓN DEL ACEITE:.....	8
1.8.2 ACEITE VEGETAL DE COLZA	9
1.8.2.1 Propiedades del aceite de colza	10
1.8.2.2 Uso como combustible.....	11
1.8.3 ACEITE VEGETAL DE JATROPHA CURCAS.....	11
1.8.3.1 Uso como combustible.....	13
1.9 BIODIESEL.....	15
1.9.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL BIODIESEL.....	18
1.9.1.1 Transesterificación del aceite.....	18
1.10 USO DE ACEITES COMBUSTIBLES EN MOTORES DIESEL.....	21
1.10.1 MEZCLAS.....	21
1.10.2 USO DIRECTO DEL ACEITE VEGETAL	21
1.10.3 USO DEL ACEITE TRANSFORMADO EN BIODIESEL.....	22

2. CAPÍTULO 2	23
MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	23
2.1.1 CONDUCCIÓN.....	23
2.1.2 RADIACIÓN	24
2.1.3 CONVECCIÓN	25
2.1.4 SISTEMAS RADIALES	26
2.1.5 RESISTENCIA TÉRMICA EQUIVALENTE.....	27
2.1.6 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR	29
2.1.7 FLUJO INTERNO EN TUBERÍAS	30
2.1.7.1 Flujo de calor superficial constante.....	32
2.1.7.2 Temperatura superficial constante.	33
2.1.8 REGIÓN COMPLETAMENTE DESARROLLADA	35
2.1.8.1 Flujo laminar	35
2.1.8.2 Flujo turbulento	35
2.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR	36
2.2.1 INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CONTACTO DIRECTO	37
2.2.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CONTACTO INDIRECTO.....	38
2.2.2.1 Recuperadores	38
2.2.2.2 Regeneradores	41
2.3 METODOS DE DISEÑO, SELECCIÓN Y EVALUACION DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	41
2.3.1 DEFINICIONES.....	42
2.3.2 MÉTODO DE LA DIFERENCIA MEDIA LOGARÍTMICA DE TEMPERATURAS	42
2.3.2.1 Tubos concéntricos flujo paralelo	44
2.3.2.2 Tubos concéntricos en contraflujo.....	47
2.3.2.3 Tubos concéntricos en contraflujo con capacidades calóricas semejantes	48
2.3.2.4 Calentador – Enfriador	49
2.3.2.5 Calentador – Condensador.....	49

2.3.2.6	Enfriador – Evaporador	50
2.3.3	MÉTODO DE LA EFECTIVIDAD (ϵ), NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA DE CALOR (NUT)	50
2.3.3.1	Definiciones	51
3.	CAPÍTULO 3	54
	MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	54
3.1	PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MOTOR ALTERNATIVO DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	54
3.1.1	INTRODUCCIÓN.....	54
3.1.2	MOTORES TÉRMICOS	54
3.1.3	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	55
3.1.4	DEFINICIONES BÁSICAS DE UN MOTOR.....	55
3.2	MOTOR DIESEL	57
3.2.1	CICLO TERMODINÁMICO	57
3.2.2	CICLO OPERATIVO	59
3.2.3	CICLO REAL.....	61
3.2.4	SISTEMAS DE UN MOTOR A DIESEL.....	62
3.2.4.1	Sistema de Distribución	62
3.2.4.2	Sistema de Lubricación.....	63
3.2.4.3	Sistema de Inyección de Combustible	65
3.2.4.4	Sistema de Refrigeración	66
3.3	EMISIONES CONTAMINANTES	67
3.3.1	CONTAMINANTES PRIMARIOS	68
3.3.2	CONTAMINANTES SECUNDARIOS.....	69
3.3.3	EMISIONES CONTAMINANTES DE TIPO VEHICULAR.....	69
3.3.3.1	Emisiones Contaminantes en Motores Diesel.....	71
3.3.4	CONTROL DE EMISIONES.....	72
3.3.4.1	Norma INEN NTE 2204.....	73
3.3.4.2	Norma INEN NTE 2207.....	73

3.3.4.3	Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas de Combustión	74
3.3.4.4	Normas EURO	75
3.4	BALANCE DE ENERGÍA	76
3.4.1	CALOR AÑADIDO O POTENCIA TEÓRICA	77
3.4.2	POTENCIA DEL MOTOR	78
3.4.3	CALOR RECHAZADO – PÉRDIDAS	79
3.4.4	EFICIENCIA.....	79
3.5	CURVAS CARACTERÍSTICAS	79
3.5.1	CURVAS DE VELOCIDAD	80
3.5.2	CURVAS DE CARGA	81
4.	CAPÍTULO 4	82
	DISEÑO DEL EQUIPO	82
4.1	ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD	82
4.1.1	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	82
4.1.2	ESTUDIO DE MERCADO	82
4.1.2.1	Demanda de combustibles.....	82
4.1.2.2	Estudio de mercado de los motores Diesel	84
4.1.3	ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE MERCADO.....	88
4.1.4	RESTRICCIONES Y LIMITACIONES	88
4.1.4.1	Restricciones Económicas y Financieras	89
4.1.4.2	Restricciones Tecnológicas	89
4.1.5	ESPECIFICACIONES DEL BANCO DE PRUEBAS DE MOTOR DIESEL DEL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	90
4.1.6	PARÁMETROS DE DISEÑO.	91
4.1.7	PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACEITE DE JATROPHA	93
4.1.7.1	Conductividad Térmica	93
4.1.7.2	Calor Específico	94
4.1.7.3	Viscosidad	95
4.2	ESTUDIO DE FACTIBILIDAD.....	96
4.2.1	ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.....	98

4.2.1.1	Alternativa A	99
4.2.1.2	Alternativa B	100
4.2.2	SELECCIÓN DE ALTERNATIVA	101
4.2.3	TOMA DE VALORES DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	104
4.2.4	PARÁMETROS FUNCIONALES	106
4.3	DIMENSIONAMIENTO DE LA ALTERNATIVA.....	107
4.3.1	DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS.....	107
4.3.1.1	Balance de energías.....	107
4.3.1.2	Transferencia de calor máxima posible.....	108
4.3.1.3	Cálculo del coeficiente de convección para el agua.	111
4.3.1.4	Cálculo del coeficiente de convección para el aceite.....	113
4.3.2	CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA RESISTENCIA.....	117
4.3.2.1	Balance de energías.....	117
4.3.3	CÁLCULO DEL AISLAMIENTO TÉRMICO	118
4.3.3.1	Cálculo de la pérdida de calor sin aislante	118
4.3.3.2	Cálculo del radio crítico.....	121
4.3.3.3	Cálculo de la pérdida de calor con aislante.	121
4.3.4	DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE COMBUSTIBLE	124
4.3.5	SISTEMA DE CONTROL DEL SISTEMA.....	125
4.4	ANÁLISIS DE COSTOS DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE COMBUSTIBLE.....	126
4.4.1	COSTO DE LA MATERIA PRIMA.	126
4.4.2	COSTOS DE FABRICACIÓN.....	127
4.4.3	COSTOS DEL SISTEMA DE CONTROL.	128
4.4.4	COSTO FINAL DEL PRECALENTADOR DE COMBUSTIBLE.	129
4.4.5	COSTOS DE PRUEBAS	129
5.	CAPÍTULO 5	130
	CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS	130
5.1	INTRODUCCIÓN.....	130
5.2	CONSTRUCCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS..	130

5.3	CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE COMBUSTIBLE.....	134
5.4	PRUEBAS DE HERMETICIDAD DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO.	137
5.5	MONTAJE DEL PRECALENTADOR EN EL MOTOR DIESEL DE TERMODINÁMICA.....	137
5.6	PRUEBAS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE COMBUSTIBLE.....	144
5.6.1	MEDICIÓN DE TEMPERATURAS	145
5.6.2	CURVAS DE VELOCIDAD	145
5.6.3	MONITOREO DE GASES DE ESCAPE.....	146
5.6.4	OPACIDAD.....	148
5.7	RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS	148
5.7.1	CURVAS DE VELOCIDAD DEL MOTOR.....	148
5.7.2	CURVAS DE GASES.....	154
5.7.3	CURVAS DE OPACIDAD	157
5.7.4	RESULTADOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	158
5.8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	159
6.	CAPÍTULO 6	162
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	162
6.1	CONCLUSIONES.....	162
6.2	RECOMENDACIONES.....	166
	BIBLIOGRAFÍA.....	168
	REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	169
	ANEXOS	171

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Consumo Mundial de Combustibles Fósiles por Fuente 1950-1998 (en millones de toneladas equivalente de petróleo MTEP, 1 MTEP=42 GJ).	4
Figura 1.2.	Producción ecuatoriana de petróleo en miles de barriles al año.	5
Figura 1.3.	Plantación de Colza.	10
Figura 1.4.	Área sembrada de Colza.....	10
Figura 1.5.	Planta de Jatropha Curcas.....	12
Figura 1.6.	El ciclo del Biodiesel.....	18
Figura 1.7.	Transesterificación del aceite.	19
Figura 1.8.	Diagrama de Flujo del proceso de producción de Biodiesel.....	19
Figura 2.1.	Transferencia de Calor por conducción.....	24
Figura 2.2.	Transferencia de Calor por radiación.	25
Figura 2.3.	Transferencia de Calor por convección.....	26
Figura 2.4.	Cilindro hueco con condiciones convectivas en la superficie.....	28
Figura 2.5.	Volumen de Control para el flujo interno en tuberías.	30
Figura 2.6.	Variación de la temperatura axial para Transferencia de Calor en un tubo, con un flujo de calor superficial constante.....	33
Figura 2.7.	Variación de la temperatura axial para Transferencia de Calor en un tubo, con temperatura superficial constante.....	34
Figura 2.8.	Intercambiadores de Calor de Contacto Directo.....	37
Figura 2.9.	Intercambiador de calor de tubos concéntricos de flujo paralelo.....	38
Figura 2.10.	Intercambiador de calor de tubos concéntricos contra flujo.	39
Figura 2.11.	Intercambiador de calor de coraza y tubos.	39
Figura 2.12.	Intercambiadores de calor compactos de flujo cruzado.	40
Figura 2.13.	Balance de energía en un intercambiador de calor.....	42
Figura 2.14.	Balance global de energía para los fluidos caliente y frío en un intercambiador de calor.....	43
Figura 2.15.	Distribuciones de temperatura para un intercambiador de calor de flujo paralelo.....	45
Figura 2.16.	Distribuciones de temperatura para un intercambiador de calor de contraflujo.....	47
Figura 2.17.	Definiciones usadas en un intercambiador de calor.....	51

Figura 3.1.	Definiciones básicas de un motor.....	56
Figura 3.2.	Ciclo Diesel Ideal. a) Diagrama P-v. b) Diagrama T-s.....	58
Figura 3.3.	Ciclo operativo del motor diesel.	60
Figura 3.4.	Comparación entre los ciclos Diesel teórico e indicado.	62
Figura 3.5.	Sistema de Distribución.....	62
Figura 3.6.	Sistema de lubricación y sus partes	64
Figura 3.7.	Sistema de Inyección Common Rail.....	65
Figura 3.8.	Sistema de Inyección Bomba-Inyector.	66
Figura 3.9.	Sistema de Refrigeración y sus partes.....	67
Figura 3.10.	Conductos por los que circula el líquido refrigerante en el motor.....	67
Figura 3.11.	Composición de los gases de escape en motores a gasolina.	70
Figura 3.12.	Composición de los gases de escape en motores diesel.....	70
Figura 3.13.	Evolución de las normas EURO.....	76
Figura 3.14.	Diagrama Sankey.....	77
Figura 3.15.	Curvas características de velocidad.....	80
Figura 3.16.	Curvas características de carga.....	81
Figura 4.1.	Venta de combustibles en barriles	83
Figura 4.2.	Producción de diesel en el Ecuador en barriles año.	84
Figura 4.3.	Ventas anuales de automotores en el Ecuador.....	85
Figura 4.4.	Ventas anuales de automotores en el Ecuador.....	86
Figura 4.5.	Gráfico de la viscosidad del piñón respecto a la temperatura.	95
Figura 4.6.	Esquema de la alternativa A.	99
Figura 4.7.	Esquema de la alternativa B.	100
Figura 4.8.	Corte transversal de un intercambiador de calor de tubos concéntricos.....	107
Figura 4.9.	Circuito térmico del intercambiador de calor de tubos concéntricos.....	111
Figura 4.10.	Esquema del balance energético del cálculo de la potencia de la resistencia.	117
Figura 4.11.	Esquema de temperaturas en la tubería exterior del intercambiador.	118

Figura 4.12. Esquema de temperaturas de la tubería exterior del intercambiador con aislante.	122
Figura 5.1. Tuberías y accesorios FUJINOX	131
Figura 5.2. Proceso de corte de las tuberías.....	132
Figura 5.3. Tapón de acero inoxidable	132
Figura 5.4. Proceso de Perforación del tapón.	133
Figura 5.5. Proceso de prensado de la tubería.	134
Figura 5.6. Proceso de soldadura del tapón con la tubería interior.	134
Figura 5.7. Proceso de soldadura del tanque.....	136
Figura 5.8. Proceso de pintura del tanque.	136
Figura 5.9. Prueba de hermeticidad del tanque de combustible.....	137
Figura 5.10. Unión de los accesorios del precalentador de combustible.....	139
Figura 5.11. Acople y montaje de termocupla.	139
Figura 5.12. Montaje de la resistencia eléctrica de calentamiento.	140
Figura 5.13. Montaje del sistema de precalentamiento de combustible.	141
Figura 5.14. Accesorios usados para acoplar el tanque de combustible con el intercambiador de calor.....	142
Figura 5.15. Montaje del tanque de combustible.....	142
Figura 5.16. Acople del precalentador de combustible al sistema de alimentación de combustible.	143
Figura 5.17. Montaje del sistema de control.....	144
Figura 5.18. Tacómetro digital.....	146
Figura 5.19. Analizador de gases de escape para fuentes fijas.	147
Figura 5.20. Medición de los gases de escape en el motor diesel.	147
Figura 5.21. Opacímetro.	148
Figura 5.22. Curva de Velocidad para el diesel puro.....	149
Figura 5.23. Curva de Velocidad para aceite vegetal puro.....	150
Figura 5.24. Comparación de las curvas de diesel y aceite.	151
Figura 5.25. Curva de velocidad para el biodiesel de Jatropha puro.....	152
Figura 5.26. Comparación de las curvas de diesel y biodiesel.....	153
Figura 5.27. Curva de dióxido de carbono.	154
Figura 5.28. Curva de oxígeno.	154
Figura 5.29. Curva de dióxido de azufre.	155

Figura 5.30. Curva de Monóxido de Carbono.....	155
Figura 5.31. Curva de óxidos de nitrógeno.	156
Figura 5.32. Curva de Material Particulado.	156
Figura 5.33. Curvas de opacidad para diesel y aceite.....	157
Figura 5.34. Valores de opacidad en aceleración libre.....	157
Figura 5.35. Curva de potencia del motor usando diesel como combustible.	160
Figura 5.36. Representación de la pérdida de potencia del motor utilizando aceite de Jatropha como combustible.	160

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.	Propiedades del aceite de Colza.	11
Tabla 1.2.	Propiedades del aceite de Jatropha Curcas.	14
Tabla 1.3.	Producción de biodiesel en el mundo en miles de toneladas métricas al año.	17
Tabla 3.1	Principales fuentes de contaminación.	68
Tabla 3.2.	Valores admisibles de contaminantes para motores a gasolina.	73
Tabla 3.3.	Valores admisibles de opacidad para motores Diesel.	74
Tabla 3.4.	Límites máximos permisibles de emisiones al aire para motores de combustión interna.	75
Tabla 4.1.	Venta de derivados de petróleo en barriles.	83
Tabla 4.2	Producción de diesel en el Ecuador en barriles.	84
Tabla 4.3.	Ventas anuales de automotores en el Ecuador.	85
Tabla 4.4.	Composición de las ventas de automotores en el Ecuador.	86
Tabla 4.5.	Ventas anuales por tipo de vehículos en el Ecuador.	86
Tabla 4.6.	Vehículos matriculados en el 2008.	87
Tabla 4.7.	Especificaciones del motor diesel del laboratorio de termodinámica.	90
Tabla 4.8.	Especificaciones del freno hidráulico.	91
Tabla 4.9.	Valores de algunas propiedades físicas.	94
Tabla 4.10.	Valores de calor específico de diversos líquidos.	94
Tabla 4.11.	Comportamiento de la viscosidad del aceite respecto a la temperatura.	95
Tabla 4.12.	Comparación entre el aceite de piñón y el diesel Nº 2.	96
Tabla 4.13.	Tabla de especificaciones.	97
Tabla 4.14.	Ventajas y desventajas de las alternativas.	101
Tabla 4.15.	Ponderación de parámetros para cada alternativa.	103
Tabla 4.16.	Datos de Aceleración Constante	104
Tabla 4.17.	Datos de Velocidad Constante	105
Tabla 4.18.	Datos calculados de Aceleración Constante	105
Tabla 4.19.	Datos calculados de Velocidad Constante	106
Tabla 4.20.	Parámetros funcionales para el diseño	106
Tabla 4.21.	Cálculo de la capacitancia térmica de los fluidos.	109

Tabla 4.22. Numero de Nusselt para flujo laminar completamente desarrollado en un anillo de tubos circulares.	113
Tabla 4.23. Dimensiones y pesos de tuberías de acero inoxidable del producto FUJINOX que se encuentran en el catálogo.	116
Tabla 4.24. Tabla de cálculos de la longitud del intercambiador.	116
Tabla 4.25. Cálculo del valor de la potencia de la resistencia de calentamiento.	118
Tabla 4.26. Cálculo del aislante térmico.	123
Tabla 4.27. Selección del espesor del aislante	124
Tabla 4.28. Descripción del costo de la materia prima utilizada.	126
Tabla 4.29. Costos de las herramientas utilizadas.	128
Tabla 4.30. Costos de la mano de obra.	128
Tabla 4.31. Costos del sistema de control.	128
Tabla 4.32. Costo final del precalentador de combustible.	129
Tabla 4.33. Costos de las pruebas.	129
Tabla 5.1. Lista de materiales utilizados para la construcción del intercambiador de tubos concéntricos.	131
Tabla 5.2. Lista de materiales utilizados para la construcción del tanque.	135
Tabla 5.3. Lista de materiales utilizados para el montaje del precalentador.	138
Tabla 5.4. Formato para la recolección de datos para realizar las curvas de velocidad.	146
Tabla 5.5. Datos experimentales del intercambiador de Calor.	158
Tabla 5.6. Datos experimentales del sistema de control.	159
Tabla 5.7. Ecuaciones obtenidas para cada curva.	159
Tabla 5.8. Área bajo la gráfica de cada curva de velocidad.	161
Tabla 5.9. Porcentajes de pérdida o aumento de los parámetros del motor.	161

RESUMEN

El presente trabajo responde a la necesidad creciente que tiene el país y en general el mundo de buscar nuevas fuentes de energía para reemplazar el petróleo y todos sus derivados, ya que al ser un recurso no renovable y con pocas reservas para los próximos años, no queda más que preguntar, que se va a usar como fuente de energía. Además el uso excesivo e inadecuado de los combustibles fósiles ha producido gran contaminación del aire a nivel mundial. Es esto lo que impulsa el desarrollo de este proyecto, que pretende el uso de aceite vegetal de *Jatropha* en motores Diesel.

El primer problema que se encontró del uso de aceites vegetales como combustibles en motores Diesel es la alta viscosidad que estos poseen, lo que dificulta el movimiento a través de conductos pequeños como cañerías, orificios de inyección, etc. Hay que tomar en cuenta que los aceites vegetales disminuyen su viscosidad al aumentar su temperatura y tienen propiedades muy similares a los combustibles tradicionales como el diesel.

Este proyecto tiene como fin solucionar este problema, mediante la construcción de un precalentador de combustible que permite elevar la temperatura del aceite vegetal de *Jatropha* de modo que pueda ser usado en el motor a Diesel que se encuentra en el laboratorio de Termodinámica.

Se plantean varias alternativas de diseño del precalentador, de las cuales se seleccionará la mejor y luego se procederá a su construcción, además se verificará que el equipo funcione adecuadamente y se realizarán pruebas con el fin de conocer cuál es el comportamiento del motor al utilizar aceite vegetal de *Jatropha*.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto plantea el uso de aceite vegetal de *Jatropha* como combustible en motores Diesel, para buscar alternativas de energía que permitan reducir la dependencia que se tiene del petróleo y sus derivados.

Para la selección y diseño del precalentador se realiza un estudio de las propiedades físico-químicas que posee este aceite con el fin de buscar alternativas que permitan su uso directamente en un motor a Diesel.

Con el fin de establecer cómo se comporta el aceite vegetal de *Jatropha* como combustible se realizan una serie de pruebas en el motor Diesel del laboratorio de Termodinámica. De estas pruebas se obtuvieron curvas de velocidad del motor que muestran el desempeño de este cuando se usa aceite vegetal de *Jatropha*.

En forma adicional se realizó el análisis de las emisiones contaminantes presentes en los gases de escape del motor para conocer las ventajas o desventajas ambientales del uso de este tipo de combustible en comparación con el biodiesel y diesel común.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles derivados del petróleo produce contaminantes que son nocivos para la salud de los seres vivos, lo que genera preocupación a nivel mundial debido a que la calidad del aire en las grandes ciudades se ha degradado. Por esta razón se están realizando estudios para implementar el uso de nuevos combustibles amigables con el ambiente, lo que constituye una de las alternativas más viables para reducir y controlar la contaminación ambiental.

El presente proyecto tiene como finalidad impulsar el uso de combustibles renovables en motores diesel, para reducir las emisiones contaminantes y abrir una puerta al desarrollo de nuevas tecnologías que permitan reducir la dependencia que se tiene de la energía no renovable.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un precalentador de combustible para motores Diesel, mediante el estudio de las propiedades físico-químicas que presentan los nuevos combustibles, para que puedan ser utilizados sin que sus propiedades sean alteradas.

1.2.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Aplicar los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos en la Carrera de Ingeniería Mecánica.
- Determinar los parámetros de funcionamiento del motor Diesel, para conocer cuáles son las condiciones normales de trabajo.

- Identificar las principales características que deben tener los combustibles, para cumplir con las condiciones necesarias para ser utilizados en los motores Diesel.
- Establecer los parámetros de diseño y determinar cuáles son las mejores opciones para el diseño del precalentador.
- Determinar las propiedades físicas del aceite vegetal puro producido en base a la *Jatropha Curcas* y así establecer las condiciones de precalentamiento que necesita.

1.3 ALCANCE

- Obtención de información técnica para el diseño y construcción del equipo.
- Procesamiento de la información obtenida.
- Elaboración de planos.
- Construcción del equipo.
- Protocolo de pruebas.
- Conclusiones y Recomendaciones.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Históricamente se ha usado combustibles fósiles en motores de combustión interna debido a que sus características físicas se prestan para cumplir con el ciclo termodinámico, pero su uso indebido e ineficiente ha provocado el aumento de la contaminación ambiental la cual en la actualidad es preocupante, por este motivo el uso de fuentes de energía renovable, amigables con el ambiente es una de las soluciones que la sociedad se ha impuesto para mejorar su calidad de vida y controlar las emisiones contaminantes.

Las condiciones actuales y el panorama futuro, mejoran la posibilidad del uso de otras fuentes de energía, por ejemplo, los biocombustibles serían una alternativa

viable para reducir la contaminación. Además el alto precio del petróleo da la posibilidad de impulsar el estudio de este tipo de combustibles.

En Ecuador, se incorporó políticas nacionales en apoyo al uso de biocombustibles por medio del Decreto Ejecutivo 2332, Registro Oficial 482, 15 Diciembre 2004. En él se declara de interés nacional la producción, comercialización y uso de biocarburantes como componentes de los combustibles que se consumen en el país.

1.5 ANTECEDENTES

En gran parte del primer mundo el uso de biocombustibles no es ninguna novedad, existen equipos especializados que permiten adaptar vehículos de uso cotidiano para funcionar con estos¹. En Ecuador su uso es escaso y no se conoce nada sobre el tema. Solo el estudio permitirá conocer a ciencia cierta cuál es la realidad en el uso de este tipo de combustibles, además de identificar el comportamiento de los motores que los usan, bajo las condiciones ambientales que se presentan las ciudades de nuestro país.

Las tendencias actuales tienen como uno de los principales objetivos el uso de aceites vegetales como fuente de energía en motores Diesel para reducir los contaminantes, esto impulsa estudios sobre las propiedades que tienen estos, así como las diferentes aplicaciones y tecnologías que intervienen en su uso.

El primer motor Diesel funcionó con aceite vegetal puro, esto da la posibilidad de retomar el uso de este tipo de combustibles, lo que reduciría la emisión de gases contaminantes al ambiente, sin que se afecte considerablemente el funcionamiento normal de los motores actuales.

¹ <http://www.elsbett.com/es/tecnologia-de-modificacion-elsbett/automovil.html>

1.6 COMBUSTIBLES

Esta denominación hace referencia comúnmente a cualquier sustancia que, en contacto con el oxígeno del aire y a partir de una determinada temperatura, arde y produce energía térmica. En principio pueden establecerse dos tipos de combustibles según su naturaleza: los combustibles fósiles como son carbón, petróleo y sus derivados, gas natural y los biocombustibles que proceden de la biomasa.

En los últimos 50 años el consumo de combustibles fósiles ha crecido en forma significativa utilizándose primero el carbón, luego el petróleo y ahora el gas. Mientras en el año 1950 el carbón representaba el 62% del consumo total de combustibles fósiles, este se redujo al 28% en 1998. El petróleo tuvo su máximo consumo en 1980 con el 45% del total, mientras que el uso del gas natural ha venido incrementándose en los últimos años. Como se observa en la Figura 1.1.

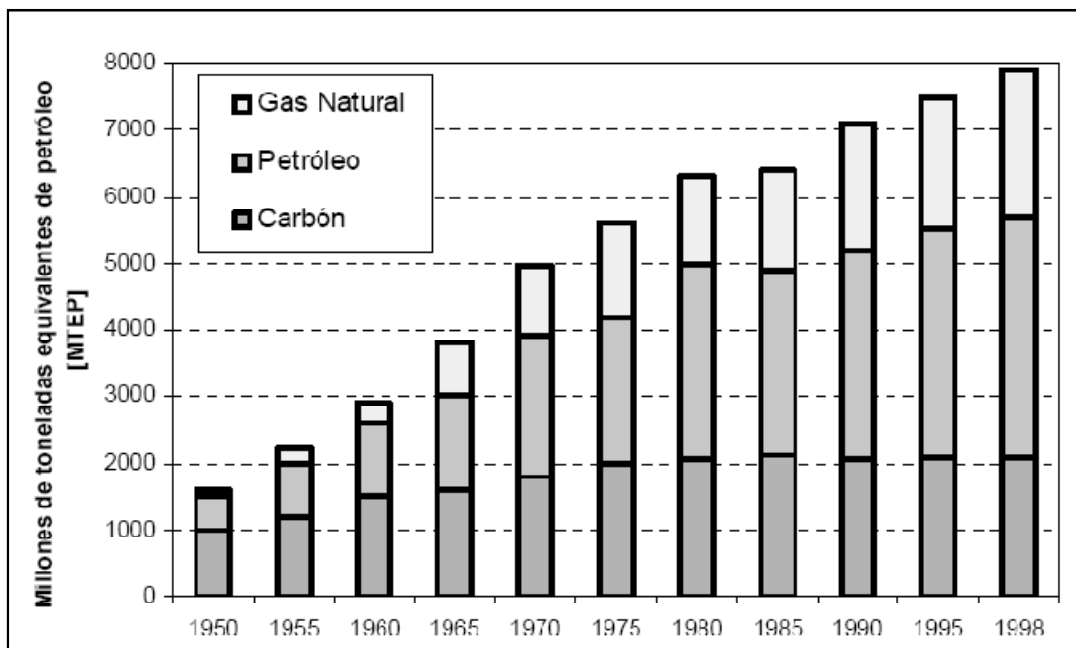


Figura 1.1. Consumo Mundial de Combustibles Fósiles por Fuente 1950-1998 (en millones de toneladas equivalente de petróleo MTEP, 1 MTEP=42 GJ).²

² Fuente: SÁNCHEZ Santiago; Energías Renovables Conceptos y aplicaciones; Fundación Natura; Quito; Junio 2003.

Nuestro país es rico en recursos naturales, entre ellos el más importante es el petróleo que ha sido el motor de la economía ecuatoriana en las últimas décadas. Desde la perforación del primer pozo en la península de Santa Elena en 1911 hasta la fecha se ha explorado y perforado miles de pozos que han generado recursos económicos al país. En la figura 1.2 se puede observar el crecimiento de la producción nacional de petróleo.

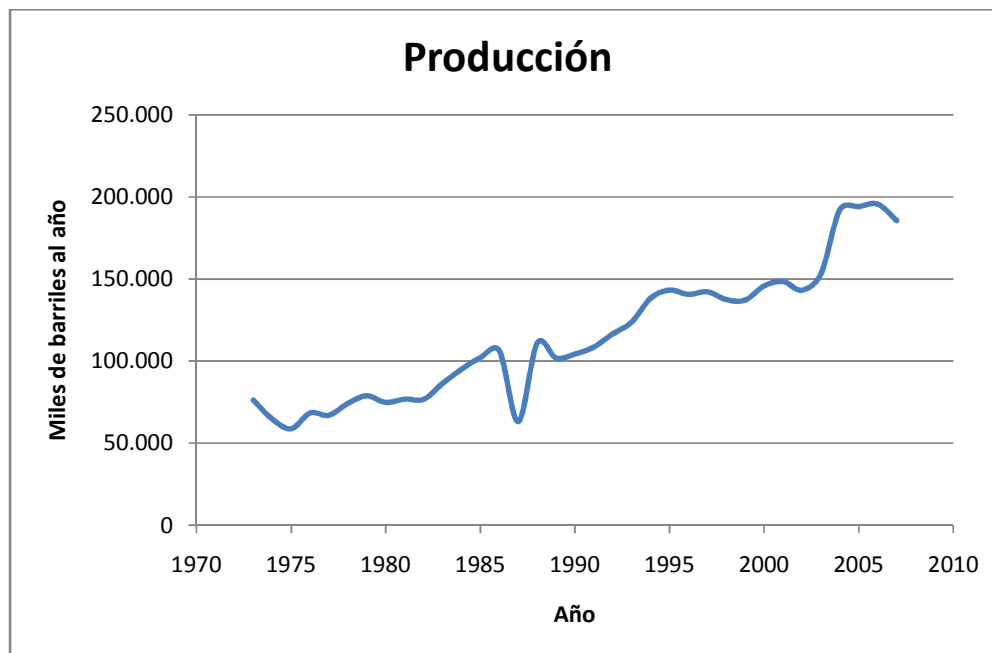


Figura 1.2. Producción ecuatoriana de petróleo en miles de barriles al año.³

1.7 BIOCMBUSTIBLES

Actualmente, con la intensa explotación de los pozos petrolíferos en todo el mundo, se estima que el petróleo se extinguirá en los próximos 100 años en nuestro planeta. Esto constituye un gran problema, ya que la gran mayoría de las máquinas, automóviles, etc. funcionan a partir de derivados del petróleo. Es por esto que hoy en día se están desarrollando nuevas tecnologías para la obtención de energías renovables que sean capaces de sustituir al petróleo, como por ejemplo la utilización de biocombustibles.

³ Fuente: Los datos para realizar la figura fueron tomados de la DNH.

El biocombustible es el término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa (es decir, que se obtiene a partir de las plantas y sus derivados).

1.7.1 TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES⁴:

- El **biodiesel** es el combustible renovable que tiene el mayor potencial de desarrollo en todo el mundo. Se puede usar puro o mezclado con diesel en cualquier proporción y funciona con todos los motores diesel. De hecho, en el año 1900, Rudolf Diesel utilizó aceite de maní en el primer motor diesel. El biodiesel se obtiene a partir de aceites vegetales y/o grasas animales por ejemplo colza, girasol, palma, soja, sebo, etc., permitiendo al campo y la industria aceitera otra posibilidad de comercialización y de diversificación de la producción. Alemania es el principal productor de Biodiesel (65% de la producción mundial), seguido por Francia (17%), y los Estados Unidos (10%).
- El **bioetanol**, también llamado etanol de biomasa, se obtiene a partir de maíz, sorgo, caña de azúcar o remolacha. Brasil es el principal productor de bioetanol con 45% de la producción mundial, Estados Unidos representa el 44%, China el 6%, la Unión Europea el 3%, India el 1% y otros países el restante 1%. El ejemplo más visible de que la producción de biocombustible puede llegar a ser rentable lo encontramos en Brasil donde, desde hace muchos años, se produce etanol a gran escala a partir de melazas de caña de azúcar o pulpa de mandioca. Este biocombustible se mezcla al 20% con la gasolina que utilizan los automóviles, lo que supone un considerable ahorro en el consumo de los derivados del petróleo, además el efecto global de la cadena productiva del bioetanol puede disminuir las emisiones contaminantes.

⁴ <http://exterior.pntic.mec.es/pvec0002/index.htm>

- El **biogás** es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos. Este gas se puede utilizar para producir energía eléctrica, mediante su combustión en plantas generadoras a gas, en hornos, estufas, secadores, calderas, u otros sistemas de combustión a gas, debidamente adaptados para tal efecto.
- La **madera** es la forma más simple de biomasa que se tiene, puede ser utilizada como combustible en calderas, hornos, secadores, etc.

1.8 ACEITE VEGETAL

Es un compuesto orgánico obtenido a partir de semillas u otras partes de las plantas en cuyos tejidos se acumula como fuente de energía.

La mayor parte de los aceites vegetales se usa para consumo alimenticio de personas y animales, además son utilizados en la industria química. El más usado para el consumo humano es el de girasol. Algunos no son aptos para ser ingeridos como el aceite de castor o algodón.

El aceite de palma que es sólido a temperatura ambiente, se usa especialmente para producir jabones y cosméticos, además una pequeña parte de este se utiliza para el consumo humano.

Los aceites vegetales producidos a partir de colza, palma, soja, girasol, cacahuete y oliva son utilizados como combustibles alternativos para motores diesel desde hace ya varios años. El más utilizado como biocombustible es el aceite de colza.

Se debe diferenciar entre el aceite vegetal sin refinar y el aceite vegetal refinado. El aceite sin refinar requiere de motores especiales para ser utilizado como combustible mientras que el aceite vegetal refinado tan sólo requiere unas ligeras modificaciones en los motores diesel.

1.8.1 EXTRACCIÓN DEL ACEITE:

El aceite contenido en la semilla se puede extraer mecánicamente (compresión o simple trituración) o químicamente (solventes). El primer método o extracción en frío se basa en someter a presión la semilla por medio de un tornillo prensa, obteniéndose así un aceite de buena calidad (el cual posteriormente debe ser filtrado y blanqueado) y un bagazo denominado torta. Para la extracción por solventes es necesario previamente triturar la semilla y luego adicionar una sustancia que disuelva el aceite, para así separar éste posteriormente por calentamiento.

Las ventajas más importantes del aceite vegetal natural:⁵

- Gran valor calorífico: gran densidad energética.
- Forma líquida y, por ello, fácil de usar.
- Cuando se quema emite menos hollín, con respecto al diesel.
- Cuando se quema tiene una eficiencia energética más grande.
- 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 por lo que no genera lluvia ácida cuando es usado.

⁵ <http://www.jatropha.es/aceitecombustible.htm>

1.8.2 ACEITE VEGETAL DE COLZA⁶

El aceite de colza se extrae de la semilla de la colza que es una planta crucífera (nombre común de una familia de hierbas de jugo picante entre las cuales hay muchas plantas que se cultivan como alimento. La familia contiene unos 390 géneros y 3.000 especies)⁷. Crece idealmente en climas templados a ligeramente fríos y húmedos (con temperaturas mínimas de 0 C° y máximas de 40 C°). Su textura es viscosa y de color pardo oscuro antes de ser refinado. Es el principal aceite de uso alimentario utilizado para la cocina y la fabricación de comida en países europeos como Alemania.

Además de ser un carburante excelente, es también muy bueno para preparar todo tipo de comidas, dado que este aceite presenta un menor contenido de grasas saturadas, un 6%. Además se cree que produce un descenso del nivel de colesterol sanguíneo y que posee efectos beneficiosos para el funcionamiento cerebral. Por su carácter insípido sirve tanto para la cocción y las vinagretas, como en repostería, sin embargo, desprende un olor desagradable si se calienta en exceso.

Los principales productores son la Unión Europea, Canadá, Estados Unidos, Australia, China y la India. En la India ocupa un 13% del suelo cultivable. Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, la colza era la tercera fuente de aceite vegetal en el 2000, tras la soya y la palma, además de la segunda fuente mundial de comida proteínica, aunque su importancia sea sólo una quinta parte de la soya. En Europa, se cultiva principalmente para alimentar el ganado (por su alto contenido en lípidos y contenido medio en proteínas).

Cuando se trituran las semillas de colza se obtiene el aceite y una especie de pasta o residuo muy apreciado para alimentar al ganado, ya que aporta un 34 % de proteínas y un 15 % de fibra cruda. Las propiedades biodegradables del aceite de colza lo hacen ideal para que sea utilizado en base de pinturas, envases alimentarios, herbicidas, lubricantes, etc.

⁶ <http://www.biocarburante.com/wp-content/uploads/cultivo-colza>

⁷ http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_761566093/Cruc%C3%ADferas.html



Figura 1.3. Plantación de Colza.

1.8.2.1 Propiedades del aceite de colza⁸

- Es muy eficaz para reducir las enfermedades y accidentes cardiovasculares (colesterol, riesgo de trombos o coágulos, etc.) gracias a su gran aporte de ácidos grasos esenciales, especialmente los del tipo Omega 3 (como el pescado azul)
- Puede ser por tanto, un buen complemento en las dietas vegetarianas.
- Su riqueza en vitamina E le confiere propiedades antioxidantes.
- Tradicionalmente se ha venido usando como combustible de lámparas para iluminación.

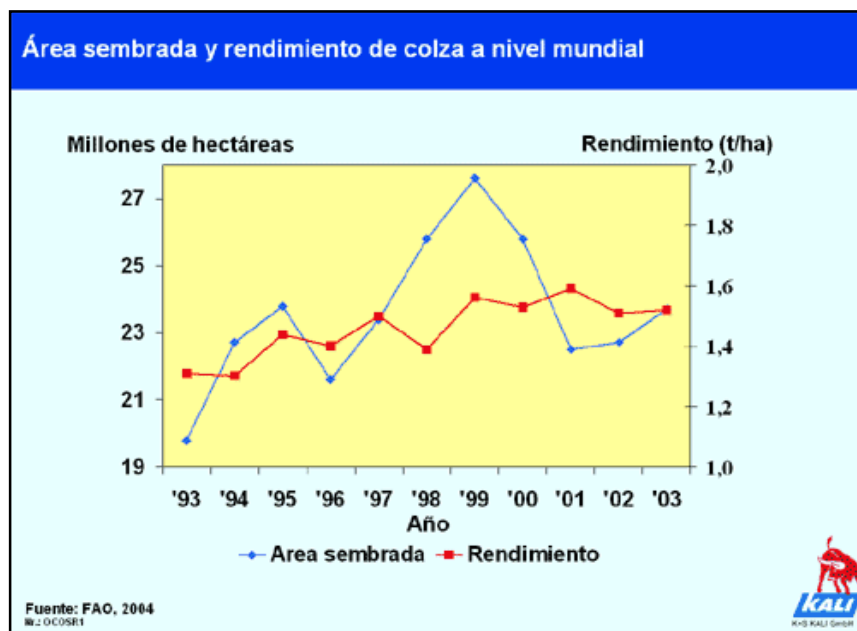


Figura 1.4. Área sembrada de Colza⁹

⁸ <http://www.enbuenasmanos.com/articulos/muestra.asp?art=1893>

⁹ http://www.kali-gmbh.com/duengemittel_sp/img/OCOSR1

1.8.2.2 Uso como combustible.

El aceite de colza ha sido utilizado para la producción de biodiesel y como combustible puro, debido a que tiene buenas propiedades y reduce considerablemente las emisiones contaminantes al ambiente.

Tabla 1.1. Propiedades del aceite de Colza.¹⁰

ENSAYO/PARAMETRO	VALORES
Punto de Inflamación	290 °C
Corrosión a la lámina de cobre	1 A*
Ensayo de destilación 90%	359 °C
Cenizas	0.01 (%p)
Viscosidad Cinemática 37.8°C	51.05 cts
Agua y Sedimentos	<50 (mg/Kg.)
Densidad	23,1 °API (15.5 °C) Lab. Petróleos 0.91 g/cm ³ (22 °C) Método de picnómetro 0.908 g/cm ³ (20 °C) Método de matraz aforado.

* Señala un valor de corrosividad de acuerdo con el código ASTM D 130.

No 1 Ligeramente Atacada.

No 2 Medianamente Atacada.

No 3 Muy Atacada. Corrosión Neta.

1.8.3 ACEITE VEGETAL DE JATROPHA CURCAS

La *Jatropha curcas*, es una planta originaria de Centroamérica y se desarrolla en Egipto, Etiopia, Ghana, India, Indonesia, Madagascar, Mali, Nepal y otros países, con fines energéticos, para la generación de energía por medio de la producción de aceite vegetal combustible.¹¹

¹⁰ Fuente: ALBUJA Marcelo, Propiedades Físico-Químicas del aceite de Colza, Seminario "Biocombustibles una opción para el futuro", Quito, EPN, Octubre 2008.

¹¹ http://www.sica.int/busqueda/busqueda_archivo.aspx?Archivo=odoc_9504_1_21062006.pdf

La *Jatropha Curcas* es una planta perenne no tóxica, resistente a la sequía, se desarrolla bien en suelos de escasa fertilidad. Cultivar esta planta es relativamente fácil, porque crece rápidamente y produce semillas con alto contenido de aceite durante muchos años en condiciones medio-ambientales difíciles. El aceite de las semillas de esta planta, puede utilizarse para elaborar biodiesel que funciona en motores Diesel, y el subproducto de la extracción del aceite puede usarse como fertilizante orgánico. Este aceite tiene propiedades insecticidas. Las semillas de las cuales se extrae el aceite se obtienen de dos a cinco años después de la plantación, dependiendo de la calidad del suelo y cantidad de lluvia o riego.



Figura 1.5. Planta de *Jatropha Curcas*.

Las semillas se calientan para extraer su aceite, ya sea exponiéndolas directamente al calor de la luz solar sobre lienzos de plástico negro durante varias horas, o tostándolas durante diez minutos aproximadamente. Las semillas deben ser calentadas, no quemadas. El calentamiento rompe las células de las semillas que contienen el aceite, permitiendo que fluya fácilmente.

Hay muchas plantas que tienen semillas con contenido de aceite, sin embargo, la *Jatropha Curcas* es el espécimen más conveniente por las siguientes razones:

- Puede crecer como planta de rendimiento rápido incluso en situaciones adversas de la tierra, tierras degradadas y estériles, bajo áreas propensas de bosques, tierras marginales, etc.

- Puede ser plantada en tierras no cultivadas por varios años y a lo largo de los límites de los terrenos de los granjeros como cerca, porque no crecen demasiado, así como en tierras vacantes junto a líneas férreas, carreteras, canales de irrigación y tierras desocupadas en los municipios.
- Las semillas de Jatropha están disponibles durante la estación no-lluviosa, que facilita la recolección y procesamiento. La inversión de la plantación es mayor en el primer año de cultivo.
- Sembrar la planta de Jatropha y su cultivo crea trabajos para zonas rurales pobres, particularmente las tierras menos aprovechadas.
- Tiene aplicaciones múltiples y después de la extracción del aceite de las semillas, la torta de aceite es un abono orgánico excelente, la biomasa de la Jatropha Curca enriquece el suelo y puede también ser usada para otras aplicaciones.
- Conserva la humedad del suelo y mejora la capacidad y el ambiente de la tierra.
- El aceite puede ser usado como fuente de energía, por ejemplo como combustible. Además puede ser procesado para producir jabón.
- Las partes de madera de la planta se pueden utilizar para la repoblación forestal, hogar para las abejas y los pájaros, y como leña en áreas rurales.

1.8.3.1 Uso como combustible

La ventaja que existe del uso del aceite de Jatropha es que no se usa para el consumo alimenticio, sino exclusivamente como combustible. En la siguiente tabla se describen algunas propiedades del aceite de Jatropha obtenido en nuestro país.

Tabla 1.2. Propiedades del aceite de Jatropha Curcas.¹²

ENSAYO	NORMA	VALORES *		VALOR DETERMINADO	DESCRIPCIÓN
		min.	máx.		
Punto de inflamación (°C)	INEN 1047	220	--	335	Caracteriza el contenido de productos volátiles y permite así conocer hasta que temperatura podrá ser calentado un producto sin peligro
Corrosión a la lámina de cobre	INEN 927	No.1	No. 3	1 ^a	Señala un valor de corrosividad de acuerdo con el código ASTM No 1 Ligeramente Atacada No 2 Medianamente Atacada No 3 Muy Atacada Corrosión Neta
Índice de cetano Calculado	INEN 1495	39	--	51	Capacidad de arranque en frío. En ambientes fríos un alto número de cetano es deseable. Sin embargo la solidificación impide un arranque instantáneo
Ensayo de destilación: Temperatura del 90 % (°C)	INEN 926		370	320	La curva de destilación refleja en cierto sentido la composición del producto. Permite predecir el Índice de cetano a través de correlaciones.
Residuo de Carbón Conradson masa - (%)	INEN 1491	--	0.4	0.315	Indica la tendencia a formar coque o depósitos carbonosos en el curso de una combustión incompleta.

¹² Fuente: PROAÑO Oswaldo, Propiedades y procesamiento del Piñón para Biocombustibles, Seminario "Biocombustibles una opción para el futuro", Quito, EPN, Octubre 2008.

Cenizas(% p)	INEN 1492		0.01	0.027	Cantidad de sólidos abrasivos, jabones metálicos solubles y remanente de catalizador. Pueden provocar desgaste del inyector pistones y aros y formación de depósitos en el motor
Viscosidad cinemática a 37.8 °C (cSt)	INEN 1981	--	36.0	40.8	Una adecuada viscosidad proporciona un bombeado adecuado y características lubricantes a los componentes del sistema
Densidad kg/m ³	INEN 1298	900	930	925	La densidad de hidrocarburos es un indicador de la energía del combustible. Densidades altas indican mayor energía y buen rendimiento del combustible
Agua y sedimentos (mg/kg)	INEN 1494	--	24	0.0	El agua por sí misma no molestaría, pero contiene generalmente materias orgánicas disueltas o en suspensión.
Poder calorífico Kcal / Kg	8600 (Valor no sujetos a norma, promedio estadístico)			9471	La energía liberada por el combustible.

1.9 BIODIESEL

El biodiesel es un combustible líquido muy similar en propiedades al diesel, pero obtenido a partir de productos renovables, como son los aceites vegetales y las grasas animales. El término “bio” se refiere a su naturaleza renovable y “diesel” se refiere a su uso en motores de este tipo.

Puede usarse como combustible puro al 100 % (B100), como una base de mezcla para el diesel (B20), o en una proporción baja como aditivo del 1 al 5 %. De esta forma el biodiesel se complementa, no compite con el petróleo.

En Europa, el biodiesel es producido principalmente a partir del aceite de la semilla de colza y el metanol, denominado comercialmente como RME (Rapeseed Methyl Ester), el cual es utilizado en las máquinas diesel puro o mezclado con diesel, en proporciones que van desde un 5% hasta un 20%. En Alemania y Austria se usa puro para máximo beneficio ambiental.¹³

Además de la colza, en los últimos años se ha producido biodiesel a partir de soya, girasol y palma, siendo la última la principal fuente vegetal utilizada en Malasia para la producción de biodiesel PME y PEE (Palm Methyl Ester y Palm Ethyl Ester).

El biodiesel puro es biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y compuestos aromáticos, sin importar significativamente el alcohol y el aceite vegetal que se utilice en la transesterificación.

Durante la segunda guerra mundial, y ante la escasez de combustibles fósiles, se destacó la investigación realizada por Otto y Vivacqua en el Brasil, sobre diesel de origen vegetal, pero fue hasta el año de 1970, que el biodiesel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética que se sucedía en el momento, y al elevado costo del petróleo alcanzado como consecuencia de los factores políticos existentes.

En la siguiente tabla se puede observar los principales productores de biodiesel en el mundo.

¹³ <http://www.gratisweb.com/palmaceite/biodieseaceitevegetal.htm>

Tabla 1.3. Producción de biodiesel en el mundo en miles de toneladas métricas al año.¹⁴

	Capacidad / 96	Producción / 95	Proyectos	Total / 97
Austria	29	21	30	29
Bélgica	110	40	0	80
Francia	335	140	100	265
Alemania	291	83	0	77
Gran Bretaña	2	2	0	2
Italia	196	240	0	125
Suecia	11	10	0	8
DK, Irlanda	1	1	33	2
Total EU – 15	759	537	130	588
Checoslovaquia	58	40	0	32
Resto de Europa	19	10	5	18
U.S.A.	50	40	150	50
Canadá	2	2	100	2
Malasia	10	10	0	10
Total	898	639	385	700

El uso de biodiesel tiene la ventaja de que el carbono producido por su combustión cumple con un ciclo que no altera las condiciones ambientales, es decir no aumenta el efecto invernadero al contrario de los combustibles fósiles con los cuales se queda atrapado en la atmósfera en forma de CO₂.

Gracias al proceso de la fotosíntesis generado por las plantas (que sirven de fuente a su vez para la extracción de aceite y elaborar biodiesel), el ambiente no se ve afectado cada vez más por la contaminación. Es decir el CO₂ producido por la combustión del biodiesel es absorbido por las plantas de las cuales se obtiene el aceite que sirve para la producción del combustible y sigue el un ciclo como se muestra en la Figura 1.6.

¹⁴ Fuente: 2nd European Motor Biofuels Forum. Graz Austria. 22 - 24 Septiembre 1996.



Figura 1.6. El ciclo del Biodiesel.

1.9.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL BIODIESEL

El biodiesel básicamente se obtiene de aceites vegetales, la mayoría de ellos de semillas de poca aplicación y/o utilización a escala industrial, buscando con ello la rentabilidad del proyecto. Se requieren de dos pasos básicos para la producción del biodiesel, el primero es la extracción del aceite, por ejemplo el caso de la palma africana cuya obtención se realiza en la misma plantación. Para el segundo paso que es el proceso de transesterificación en la planta de biodiesel, se requiere el aceite extraído como materia prima.

1.9.1.1 Transesterificación del aceite.

El proceso más común para la producción de biodiesel es la transesterificación. Para llevar a cabo esta reacción química, se mezclan en un reactor (recipiente en donde se va a realizar la reacción química) el aceite vegetal y un alcohol (metanol ó etanol), en presencia de un catalizador alcalino (hidróxido de sodio NaOH ó hidróxido de potasio KOH). Químicamente la transesterificación rompe la molécula del aceite vegetal, convirtiéndose así en un metil alcohol éster o etil alcohol éster (según el alcohol utilizado), más glicerina, muy utilizada en la industria farmacéutica. La glicerina se separa del éster por decantación, y este último se somete a un proceso de limpieza, para luego ser mezclado con el diesel o ser usado puro. Esta reacción se puede observar en la figura 1.7.

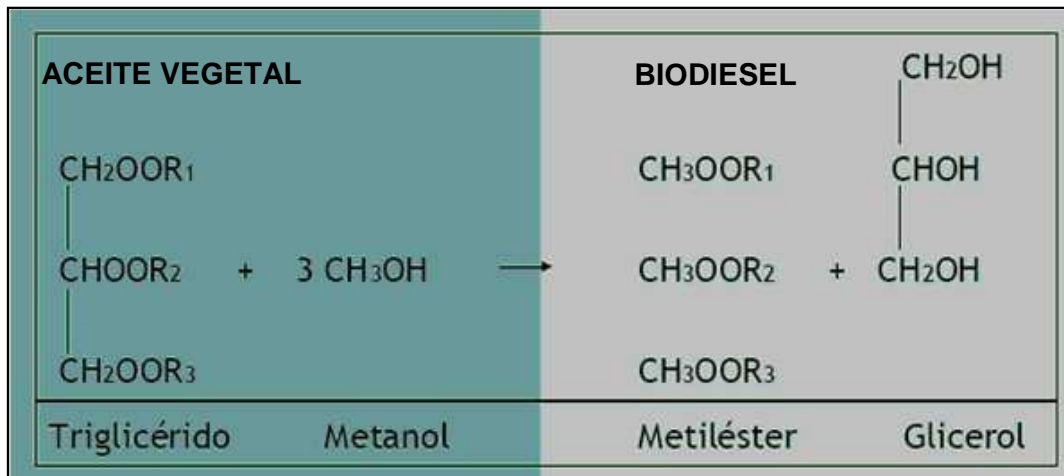


Figura 1.7. Transesterificación del aceite.¹⁵

En la figura 1.8 se puede observar cual es el diagrama de flujo que se utiliza para la producción de biodiesel.

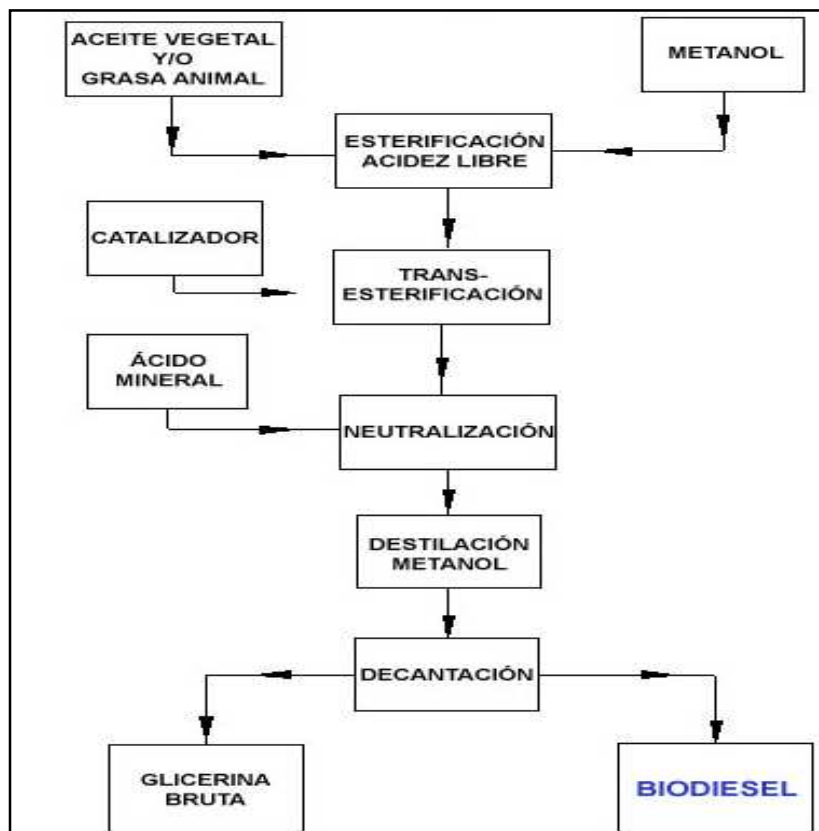


Figura 1.8. Diagrama de Flujo del proceso de producción de Biodiesel.

¹⁵ <http://grupoq2.blogspot.com/2007/11/transesterificacin.html>

VENTAJAS¹⁶:

- Complementa todas las nuevas tecnologías de diesel para reducción de gases contaminantes.
- Rendimiento similar al del combustible diesel.
- No es necesario cambiar o convertir motores.
- Se usan los mismos equipos de mantenimiento para los motores.
- No altera el tiempo de recarga de combustibles.
- Mantiene sus propiedades físicas en condiciones ambientales severas.
- Mejora las condiciones anti-exposición e incendio.
- La mezcla se puede hacer en el momento de carga o previamente.
- La mezcla es estable y no se separa en fases.
- Es un combustible biodegradable por lo que es compatible con la naturaleza y en caso de accidente no se produce ninguna contaminación.

IMPACTO AMBIENTAL¹⁷:

- Reduce la opacidad de los gases de escape.
- Reduce la cantidad de monóxido de carbono.
- Reduce la cantidad de hidrocarburos no quemados.
- Reduce la emisión de hidrocarburos aromáticos policíclicos.
- Reduce la cantidad de óxidos de azufre.
- Los cultivos de semillas de aceite vegetal absorben el CO₂ mientras crecen, por lo que en el balance no hay aumento en las emisiones.

IMPACTO ECONÓMICO:

- Aparición de un nuevo mercado.
- Valor agregado al material de base (semillas de aceite).
- Inversiones en plantas y equipos.
- Generación de nuevas plazas de trabajo.
- Mayor base tributaria por las operaciones de planta e impuestos por utilidades.

¹⁶ <http://www.yoteca.com/pg/Informacion-de-ventajas-y-desventajas-del-biodiesel.asp>

¹⁷ <http://www.yoteca.com/pg/Informacion-de-ventajas-y-desventajas-del-biodiesel.asp>

1.10 USO DE ACEITES COMBUSTIBLES EN MOTORES DIESEL.

Las tendencias actuales en el mundo han permitido el desarrollo y uso de combustibles alternativos, que sean amigables con el ambiente, y sobre todo reduzcan la dependencia que se tiene del petróleo y sus derivados.

Hay al menos tres formas de hacer funcionar un motor Diesel con aceite vegetal, o con grasa de animales. Pueden hacerse tanto con aceites nuevos como con aceites de cocina usados:

1. Mezclar el aceite con alguno de estos productos: queroseno, diesel mineral (procedente del petróleo), biodiesel, o gasolina.
2. Usarlo directamente sin mezclar con nada.
3. Convertirlo en biodiesel.

1.10.1 MEZCLAS

El aceite vegetal es más viscoso que el diesel y el biodiesel. La finalidad de mezclarlo con otros combustibles es reducir su viscosidad, para que pueda fluir mejor en el sistema de combustible hasta la cámara de combustión.

Si se mezcla aceite vegetal con kerosene o diesel, todavía se consume combustible fósil. De todas formas, por cada litro de aceite vegetal se ahorra un litro de combustible fósil y se libera a la atmósfera menos gases de efecto invernadero, entendiéndose esto por el ciclo de vida del producto.

Se hacen distintas mezclas, desde un 10% de aceite y 90% de diesel, hasta 90% aceite y 10% diesel.

1.10.2 USO DIRECTO DEL ACEITE VEGETAL

El aceite vegetal puede ser una opción eficaz, limpia y económica. Para poder usarlo hay que modificar el motor, lo mejor es instalar un nuevo sistema, con otro tanque de combustible, y con un precalentador de combustible.

Por ejemplo, el sistema **Elsbett** de un depósito funciona con diesel mineral, biodiesel, aceite vegetal, o cualquier mezcla entre ellos. Se puede conducir como un coche normal, sin preocuparse por el combustible. La furgoneta Toyota TownAce de Journey to Forever tiene instalado un sistema Elsbett.¹⁸

También existen sistemas para aceite vegetal con dos depósitos y precalentamiento del aceite. Hay que arrancar el motor con diesel o biodiesel, en uno de los depósitos, y luego cambiar al aceite cuando esté lo bastante fluido por el aumento de la temperatura (en el otro depósito). Un poco antes de parar el motor hay que cambiar otra vez al diesel, o biodiesel, para poder arrancar de nuevo el motor en frío sin problemas.

1.10.3 USO DEL ACEITE TRANSFORMADO EN BIODIESEL

Otra forma de usar el aceite vegetal es procesarlo y obtener biodiesel para ser utilizado como combustible, este tiene algunas ventajas como son:

- Funciona en cualquier motor diesel sin tener que modificarlo.
- Tiene un buen funcionamiento a temperaturas bajas.
- Está respaldado por muchos estudios realizados en distintos países, incluyendo millones de kilómetros en carretera.¹⁹
- Es un combustible limpio, seguro y listo para usar.

Como desventajas se tiene que es más costoso, dependiendo de la escala de producción y la materia prima.

¹⁸ <http://www.elsbett.com/>

¹⁹ http://journeytoforever.org/es/biodiesel_fabricar.html

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La Transferencia de Calor es el proceso por el cual se intercambia energía térmica, siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia un medio de temperatura más baja, ésta se detiene cuando los dos medios se estabilizan. Esta transferencia puede ocurrir de tres modos: Conducción, Radiación y Convección.

2.1.1 CONDUCCIÓN

Es la transmisión de calor en un sólido o un fluido en reposo cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, siendo el calor transmitido por conducción q_k , proporcional al gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$, a la conductividad térmica k , y a la superficie A , a través de la cual se transfiere. La conducción se representa mediante la siguiente ecuación:

$$q_k = -k A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Donde:

q_k = flujo de calor o transferencia de calor [W]

(-) = consecuencia del Segundo Principio de la Termodinámica, según el cual, el calor debe fluir hacia la zona de temperatura más baja.

k = conductividad térmica [W/m * K]

A = área perpendicular a la dirección de transferencia térmica [m²]

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura en la dirección x [K/m]

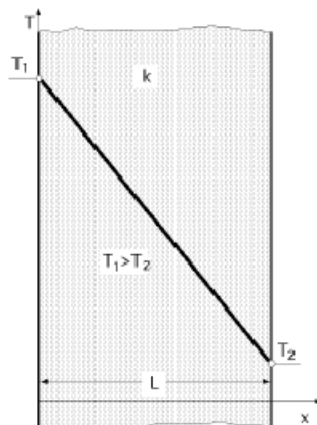


Figura 2.1. Transferencia de Calor por conducción.

2.1.2 RADIACIÓN

Es el transporte del calor a través de un fluido o del vacío, en forma de ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz. Existen muchos fenómenos diferentes de radiación pero sólo se considera la radiación térmica, es decir, aquella que transporta energía en forma de calor.

La energía que abandona una superficie en forma de calor radiante depende de la temperatura absoluta a que se encuentre y de la naturaleza de la superficie.

El intercambio neto de calor por radiación viene dado en la forma:

$$q_{rad} = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (2.2)$$

Donde:

q_{rad} = flujo de calor o transferencia de calor [W]

ε = emisividad de la superficie radiante

σ = constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

A = área del cuerpo radiante [m²]

T_s = temperatura absoluta de la superficie radiante [K]

T_{alr} = temperatura absoluta de una superficie isotérmica mucho más grande que rodea por completo a la pequeña [K]

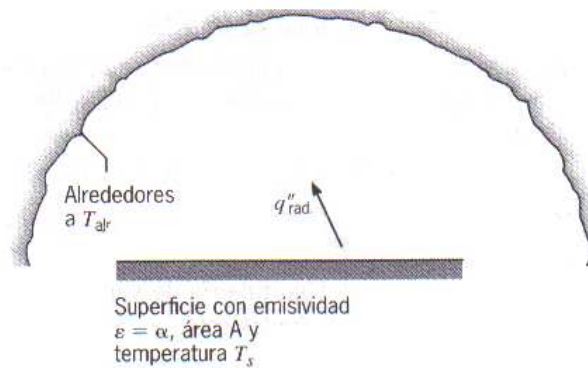


Figura 2.2. Transferencia de Calor por radiación.

2.1.3 CONVECCIÓN

La convección es la transmisión de calor que se produce entre un fluido a una determinada temperatura cuando entra en contacto con un sólido cuya superficie de contacto está a una temperatura distinta.

De acuerdo a la naturaleza del flujo la Transferencia de Calor se da de forma natural o forzada. Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación es de la forma

$$q_c = hA(T_\infty - T_s) \quad (2.3)$$

Donde:

q_c = flujo de calor o transmisión de calor [W]

A = área superficial en contacto con el fluido [m^2]

T_s = temperatura de la superficie [K]

T_∞ = temperatura del fluido no perturbado [K]

h = es el coeficiente de transmisión del calor por convección en la interfase líquido-sólido [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

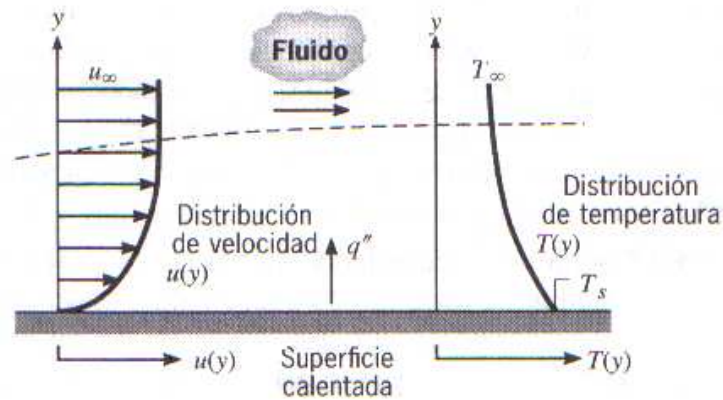


Figura 2.3. Transferencia de Calor por convección.

2.1.4 SISTEMAS RADIALES

Para los objetivos de este trabajo se analiza el caso de sistemas radiales específicamente los cilindros huecos, es decir tuberías, que constituyen la parte más importante de un intercambiador de calor.

Para condiciones de estado estable sin generación de calor, la forma apropiada de la ecuación de calor es:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2.4)$$

El significado físico de este resultado se vuelve evidente si se considera también la forma apropiada de la ley de Fourier, de ahí se tiene que la rapidez a la que se conduce la energía a través de cualquier superficie cilíndrica en el sólido se expresa como:

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2.5)$$

Donde $A=2\pi rL$ es el área normal a la dirección de Transferencia de Calor, se conoce también que la cantidad $kr(dT/dr)$ es independiente de r , entonces la Transferencia de Calor por conducción q_r es constante en la dirección radial.

Al determinar la distribución de temperaturas en el cilindro resolviendo la ecuación de calor, aplicando las condiciones de frontera apropiadas, y si además se asume que el valor de k es una constante, se obtiene la distribución de temperaturas:

$$T(r) = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_1/r_2)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (2.6)$$

Si se tiene presente que la distribución de temperaturas asociada con la conducción radial a través de una pared cilíndrica es logarítmica, no lineal, como lo es para la pared plana bajo las mismas condiciones, y si se usa ahora con la ley de Fourier, se obtiene la siguiente expresión para la Transferencia de Calor por conducción:

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (2.7)$$

En igual forma la expresión para la Transferencia de Calor por convección en un cilindro hueco, es de la forma:

$$q_r = 2\pi Lh(T_\infty - T_s) \quad (2.8)$$

2.1.5 RESISTENCIA TÉRMICA EQUIVALENTE

Es importante tomar en cuenta que existe una analogía entre la difusión de calor y la carga eléctrica, de la misma manera en que se asocia una resistencia eléctrica con la conducción de electricidad, se puede también asociar una resistencia térmica con la conducción de calor.

Al asociar la resistencia como la razón de un potencial de transmisión a la Transferencia de Calor correspondiente, se obtiene que la resistencia térmica en forma general es:

$$R_t = \frac{\Delta T}{q} \quad (2.9)$$

Entonces se tiene que la resistencia térmica para los diferentes mecanismos de Transferencia de Calor, en un cilindro hueco sería de las siguientes formas:

Conducción
$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (2.10)$$

Convección
$$R_{t,conv} = \frac{1}{h_c 2\pi r L} \quad (2.11)$$

Radiación
$$R_{t,conv} = \frac{1}{h_r 2\pi r L} \quad (2.12)$$

Si se hace esta analogía para un sistema compuesto por un cilindro hueco con condiciones convectivas en la superficie se tiene que:

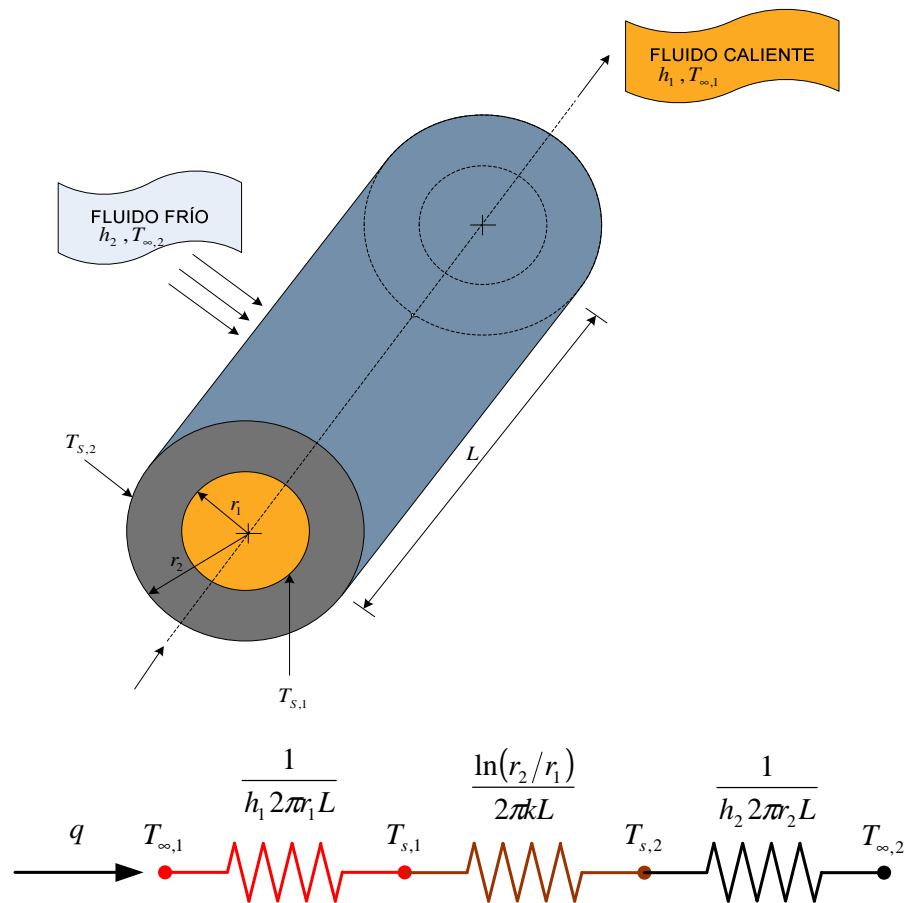


Figura 2.4. Cilindro hueco con condiciones convectivas en la superficie.

Entonces la Transferencia de Calor se expresa como

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_2}}$$

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (2.13)$$

Las representaciones de circuitos proporcionan una herramienta útil para conceptualizar y cuantificar problemas de Transferencia de Calor.

2.1.6 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En el análisis de equipos de Transferencia de Calor resulta conveniente trabajar con un coeficiente de Transferencia de Calor total U o una resistencia térmica total R expresada como:

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_o} + R_{pared} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.14)$$

Donde los subíndices i y o se refieren a las superficies interior y exterior de la pared que separa los dos fluidos, respectivamente. Cuando el espesor de la pared del tubo es pequeño y la conductividad del material de tubo es elevada, la última relación se simplifica y queda como:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (2.15)$$

Invirtiendo la relación:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} \quad (2.16)$$

Donde:

h_i = coeficiente de convección interno [W/m² K]

h_o = coeficiente de convección externo [W/m² K]

2.1.7 FLUJO INTERNO EN TUBERÍAS

En un flujo interno, tal como el flujo en tuberías, el fluido está confinado por una superficie. Por tanto, la capa límite no puede producirse sin quedar finalmente restringida. La configuración de flujo interno representa una geometría conveniente para calentar y enfriar fluidos que se usan en tecnologías de procesamiento químico, control ambiental y conversión de energía.

El análisis de flujo interno en tuberías es muy útil para:

- Determinar la variación de temperatura del fluido a lo largo de la tubería.
- Evaluar los coeficientes de Transferencia de Calor.
- Determinar la caída de presión a lo largo de la tubería.

Al aplicar un balance de energía para determinar cómo varía la temperatura media $T_m(x)$ con la posición a lo largo de un tubo y cómo está relacionada la Transferencia de Calor por convección q_{conv} con la diferencia de temperaturas en la entrada y salida del tubo. Se debe considerar lo siguiente:

- El fluido se mueve a un flujo constante \dot{m}
- La Transferencia de Calor por convección ocurre en la superficie interna.
- Los cambios en energía cinética y potencial del fluido, así como la transferencia de energía por conducción en la dirección axial son despreciables.
- El trabajo de flujo que se lleva a cabo mover el fluido a través de una superficie de control es el producto de la presión del fluido p y el volumen específico v .

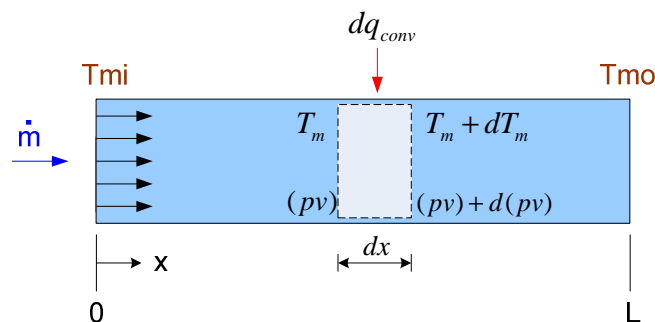


Figura 2.5. Volumen de Control para el flujo interno en tuberías.

Al aplicar el balance de energía:

$$\dot{E}_{entra} + \dot{E}_{generada} = \dot{E}_{sale} + \dot{E}_{almacenada}$$

Si se conoce que:

$$\dot{E}_g = 0 \text{ y } \dot{E}_a = 0$$

$$\dot{E}_{en} = dq_{conv} + \dot{m}[C_v T_m + (pv)]$$

$$\dot{E}_{sa} = \dot{m}\{C_v(T_m + dT_m)\} + [(pv) + d(pv)]$$

$$dT_m = \frac{d}{dx}(T_m)dx \quad d(pv) = \frac{d}{dx}(pv)dx$$

Reemplazando se obtiene que:

$$dq_{conv} + \dot{m}[C_v T_m + (pv)] = \dot{m}[C_v T_m + (pv)] + \dot{m} \frac{d[C_v T_m + (pv)]}{dx} dx$$

$$dq_{conv} = \dot{m} \frac{d[C_v T_m + (pv)]}{dx} dx$$

$$dq_{conv} = \dot{m} d[C_v T_m + (pv)] \quad (2.17)$$

Es decir, la rapidez de Transferencia de Calor por convección al fluido debe ser igual a la rapidez a la que aumenta la energía térmica del fluido $\dot{m}C_v dT_m$, más la rapidez neta a la que se realiza trabajo al mover el fluido a través del volumen de control $\dot{m}d(pv)$.

Para el caso de líquidos incompresibles se tiene que $C_v = C_p$, y como la variación del volumen específico es pequeña, $d(pv)$ es mucho menor que $d(C_v T_m)$ entonces se obtiene la siguiente ecuación:

$$dq_{conv} = \dot{m}C_p dT_m \quad (2.18)$$

Al integrar desde la entrada hasta la salida del tubo, se relaciona con las condiciones para todo el tubo, y se tiene que:

$$q_{conv} = \dot{m}C_p (T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (2.19)$$

Esta expresión general se aplica independientemente de la naturaleza de las condiciones térmicas de la superficie o de las condiciones del flujo.

2.1.7.1 Flujo de calor superficial constante.

Para este tipo de condición, es muy sencillo determinar la Transferencia de Calor, debido a que el flujo de calor superficial q_s'' es independiente de la dirección axial, por lo tanto se tiene que:

$$dq_{conv} = \dot{m}C_p dT_m$$

$$dq_{conv} = q_s'' P dx$$

$$q_s'' P dx = \dot{m}C_p dT_m$$

Al integrar con los límites respectivos

$$\int_{T_{m,i}}^{T_{m(x)}} dT_m = \frac{q_s'' P}{\dot{m}C_p} \int_0^x dx$$

$$T_{m(x)} - T_{m,i} = \frac{q_s'' P}{\dot{m}C_p} x$$

$$T_{m(x)} = T_{m,i} + \frac{q_s'' P}{\dot{m}C_p} x \quad (2.20)$$

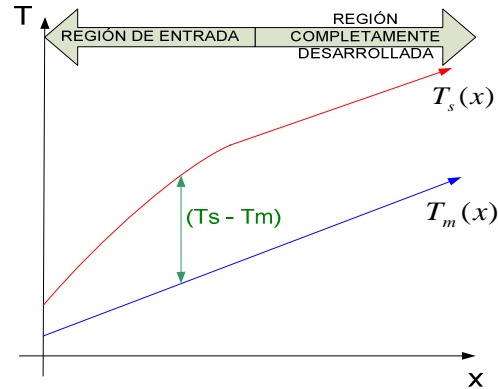


Figura 2.6. Variación de la temperatura axial para Transferencia de Calor en un tubo, con un flujo de calor superficial constante.

Por lo tanto se puede apreciar que la temperatura media varía de forma lineal con x a lo largo del tubo, como se muestra en la figura anterior. Se aprecia también que la diferencia de temperaturas inicialmente es pequeña pero se va incrementado conforme aumenta x , hasta la región completamente desarrollada donde el coeficiente de convección y la variación de temperaturas son independientes de x .

2.1.7.2 Temperatura superficial constante.

Se puede considerar que la Transferencia de Calor hacia un fluido cuyo flujo es interno en una tubería tiene la temperatura superficial constante cuando existe cambio de fase, es decir en la condensación o en la ebullición.

Los resultados para la Transferencia de Calor y la distribución axial de la temperatura media son completamente diferentes para la condición de temperatura superficial constante, al definir ΔT como $(T_s - T_m)$, se tiene que:

$$dq_{conv} = \dot{m}C_p dT_m$$

$$dq_{conv} = hPdx\Delta T$$

$$\dot{m}C_p dT_m = hPdx\Delta T$$

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{hP\Delta T}{\dot{m}C_p}$$

$$\frac{d\Delta T}{dx} = -\frac{hP}{\dot{m}C_p}\Delta T$$

$$\frac{d\Delta T}{\Delta T} = -\frac{hP}{\dot{m}C_p}dx$$

Al separar variables e integrar desde la entrada hasta la salida del tubo,

$$\int_{\Delta T_i}^{\Delta T_o} \frac{d\Delta T}{\Delta T} = -\frac{P}{\dot{m}C_p} \int_0^x h dx$$

$$\ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = -\frac{\bar{h}Px}{\dot{m}C_p}$$

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = \exp\left(-\frac{\bar{h}Px}{\dot{m}C_p}\right)$$

$$\frac{(T_s - T_m(x))}{(T_s - T_{m_i})} = \exp\left(-\frac{\bar{h}Px}{\dot{m}C_p}\right) \quad (2.21)$$

Esta ecuación muestra que la diferencia de temperaturas disminuye exponencialmente con la distancia x a lo largo del eje del tubo, tal como se aprecia en la figura inferior.

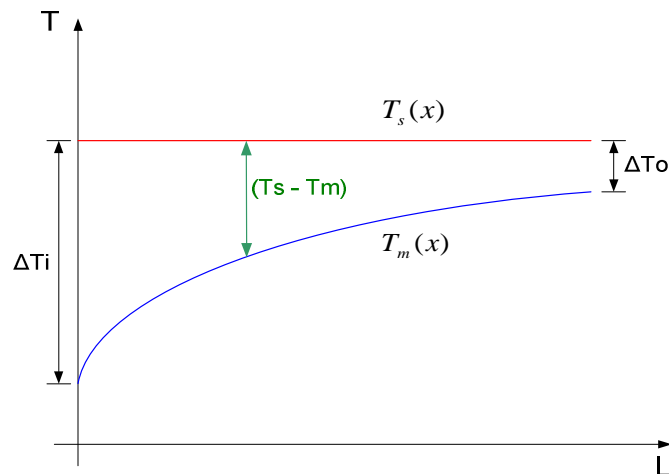


Figura 2.7. Variación de la temperatura axial para Transferencia de Calor en un tubo, con temperatura superficial constante.

2.1.8 REGIÓN COMPLETAMENTE DESARROLLADA

2.1.8.1 Flujo laminar

En un tubo circular caracterizado por un flujo de calor superficial uniforme y condiciones laminares completamente desarrolladas, el número de Nusselt es una constante, independiente del número de Reynolds, del número de Prandtl y la posición axial.

$$Nu_D \equiv \frac{hD}{k} = 4.36 \quad (2.22)$$

Para condiciones laminares completamente desarrolladas, con una temperatura superficial constante, el número de Nusselt es:

$$Nu_D \equiv \frac{hD}{k} = 3.66 \quad (2.23)$$

Se debe tener en cuenta que para determinar el coeficiente de convección h , la conductividad térmica se debe evaluar en la temperatura media T_m .

2.1.8.2 Flujo turbulento

La correlación obtenida para flujo turbulento completamente desarrollado en un tubo circular de baja rugosidad se debe a la ecuación de Dittus-Boelter, para la determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección forzada.

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^n \quad (2.24)$$

$n = 0.4$ (calentamiento)

$n = 0.3$ (enfriamiento)

$$h_{1-2} = \frac{Nu_D K_{fluido}}{D} \quad (2.25)$$

Donde:

Nu_D = número de Nusselt

Re_D = número de Reynolds

Pr = número de Prandtl

h_{1-2} = coeficiente de convección [W/m^2K]

K_{fluido} = coeficiente de conducción del fluido [$W/m K$]

D = diámetro de la tubería [m]

Estas ecuaciones se han confirmado de forma experimental para las siguientes condiciones.

$$\left[\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re_D \geq 10.000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{array} \right]$$

Esta ecuación se debe usar solo para diferencia de temperaturas de pequeñas a moderadas, con todas las propiedades evaluadas a la temperatura media T_m .

2.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor de un fluido a otro, sea que estos estén separados por una barrera sólida o que se encuentren en contacto.

El papel de los intercambiadores de calor ha adquirido una gran importancia ante la necesidad de ahorrar energía y disponer de equipos óptimos no sólo en función de su análisis térmico y del rendimiento económico de la instalación, sino también en función de otros factores como el aprovechamiento energético del sistema, la disponibilidad y cantidad de energía y de materias primas necesarias para cumplir una determinada función.

Según los procesos de Transferencia de Calor los intercambiadores de calor se clasifican en:

- Intercambiadores de calor de contacto directo.
- Intercambiadores de calor de contacto indirecto.

2.2.1 INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CONTACTO DIRECTO

En este tipo de intercambiadores los fluidos se hallan en contacto directo, por lo se tiene Transferencia de Calor y masa, se debe recalcar que no existe la mezcla de los fluidos y que en general se los usa para enfriar grandes cantidades de agua, pero con pequeñas variaciones de la temperatura, es decir con saltos de temperatura pequeños.

Un ejemplo de aplicación de este tipo de intercambiador se lo tiene en las torres de enfriamiento, donde el agua es el fluido caliente y el aire el fluido frío. Los tipos más comunes son las torres de enfriamiento por convección natural y por convección forzada.

En la torre de enfriamiento por convección natural el agua se pulveriza directamente en la corriente de aire que se mueve a través de la torre de enfriamiento por convección térmica. Al caer, las gotas de agua se enfrían tanto por convección ordinaria como por evaporación.

En una torre de enfriamiento por convección forzada se pulveriza el agua en una corriente de aire producida por un ventilador, gracias a lo cual el aire puede circular a través de la torre.



Figura 2.8. Intercambiadores de Calor de Contacto Directo.

2.2.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CONTACTO INDIRECTO

En esta clase de intercambiadores los fluidos caliente y frío están separados por una pared con sus respectivas superficies de Transferencia de Calor. Se clasifican en:

- Intercambiadores de transferencia de calor directa o Recuperadores
- Intercambiadores de transferencia de calor indirecta o Regeneradores

2.2.2.1 Recuperadores

En estos intercambiadores el calor se transfiere mediante convección desde el fluido caliente hacia la superficie de la pared, por conducción a través de ella y por convección desde la superficie de la pared hacia el fluido frío.

2.2.2.1.1 Intercambiadores de Calor de Tubos Concéntricos

Uno de los fluidos pasa por el tubo más pequeño, en tanto que el otro pasa por el espacio anular entre los dos tubos.

A) Flujo paralelo

Los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y se mueven en la misma dirección.

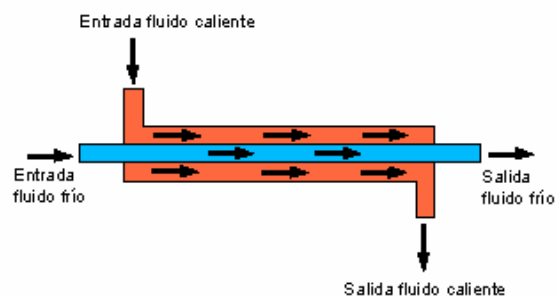


Figura 2.9. Intercambiador de calor de tubos concéntricos de flujo paralelo.

B) Contra flujo

Los dos fluidos entran al intercambiador por los extremos opuestos y fluyen en direcciones opuestas.

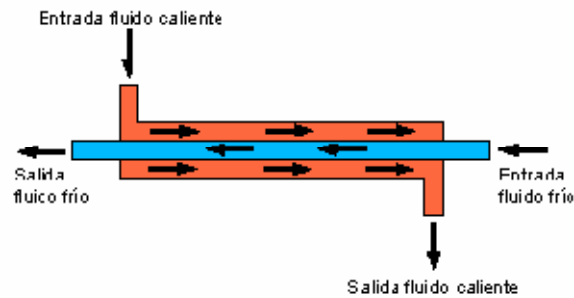


Figura 2.10. Intercambiador de calor de tubos concéntricos contra flujo.

2.2.2.1.2 Intercambiadores de Calor de Coraza y Tubos

Estos intercambiadores de calor están compuestos por tubos de sección circular dentro de una coraza cilíndrica, los que a su vez se diferencian dependiendo del número de pasos que puedan existir entre la coraza y los tubos. En general a este grupo pertenecen los intercambiadores de calor líquido - líquido y también en algunos casos los intercambiadores gas - gas.

Existen algunas variedades de este tipo de intercambiador, las diferencias principales radican en la forma en que se distribuye el un fluido a través de los tubos, es decir cuantos pasos se va a dar a través de los mismos y de los aspectos específicos de construcción, aquí se debe tomar en cuenta también el uso de deflectores que son láminas de metal ubicadas en la coraza y a través de los tubos, que garantizan una mejor Transferencia de Calor. Un factor muy importante para determinar el número de pasos del flujo a través de los tubos es la caída de presión permisible.

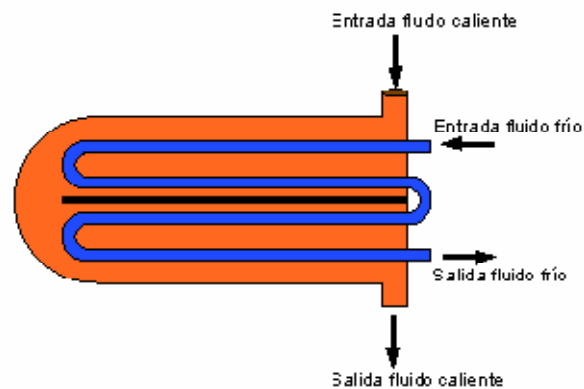


Figura 2.11. Intercambiador de calor de coraza y tubos.

2.2.2.1.3 Intercambiadores de Calor Compactos

Se los utiliza cuando al menos uno de los fluidos es un gas, los dos fluidos ingresan al intercambiador de manera perpendicular entre sí, por lo que también se lo conoce como intercambiador de flujo cruzado. Se los puede diferenciar por la forma del ingreso de los fluidos de la siguiente manera:

- Los dos fluidos de flujo no mezclados.
- Un fluido de flujo mezclado y un fluido no mezclado.
- Los dos fluidos de flujo mezclados.

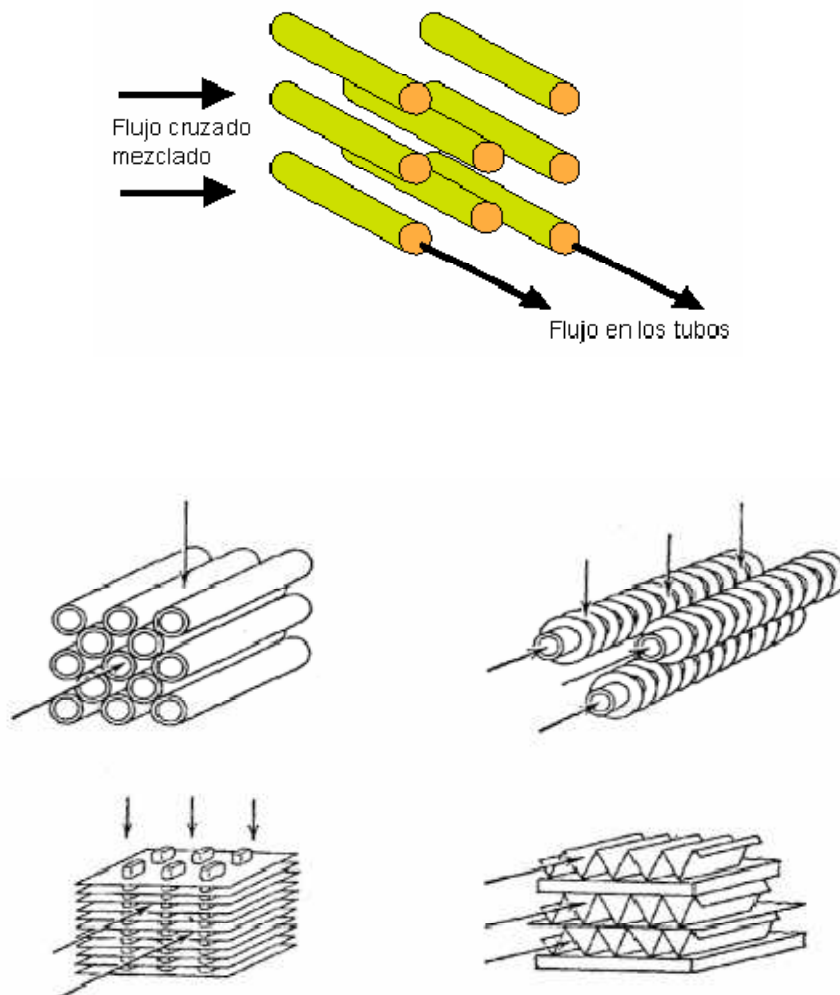


Figura 2.12. Intercambiadores de calor compactos de flujo cruzado.

2.2.2.2 Regeneradores

Son intercambiadores de calor en los que el espacio por donde circulan el fluido caliente y el fluido frío es el mismo, estos ingresan alternadamente con tan poca mezcla física como sea posible entre las dos corrientes, es decir, el proceso de Transferencia de Calor se da a través de la superficie de circulación ya que al pasar el fluido caliente la superficie recibe la energía térmica para luego transferir el calor al fluido frío, por esta razón es muy importante su diseño. Las propiedades del material de la superficie, la geometría del sistema, las propiedades de los fluidos y del flujo de las corrientes son cantidades que se deben de conocer para poder diseñar los regeneradores. Se los puede clasificar en dos tipos:

2.2.2.2.1 Configuración Fija

Los fluidos caliente y frío pasan a través de un intercambiador estacionario de forma alternada, y para una operación continua se requieren dos o más matrices.

2.2.2.2.2 Regenerador Rotatorio

Donde la matriz circular gira y expone de manera alterna una parte de superficie al fluido caliente y luego al frío.

2.3 METODOS DE DISEÑO, SELECCIÓN Y EVALUACION DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Para el análisis de intercambiadores de calor en general se usan los siguientes métodos:

1. Método de la diferencia media logarítmica de temperaturas (DMLT).
2. Método de la efectividad (ϵ), número de unidades de Transferencia de Calor (NUT).

2.3.1 DEFINICIONES

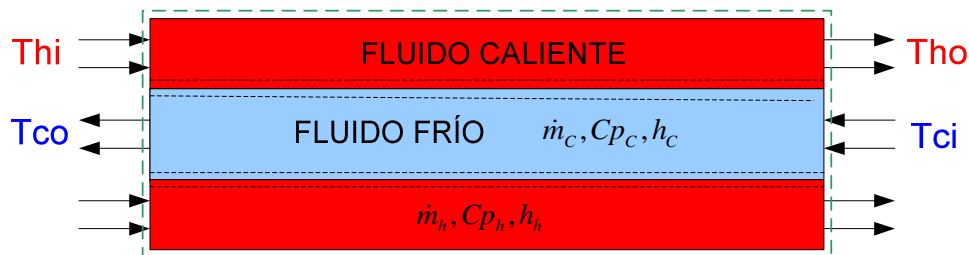


Figura 2.13. Balance de energía en un intercambiador de calor.

FLUIDO CALIENTE:

T_{hi}, T_{ho} : Temperatura de ingreso y salida del fluido caliente [°C]

C_{p_h} : Calor específico del fluido caliente [J/kg °C]

\dot{m}_h : Flujo másico del fluido caliente [kg/s]

h_h : Coeficiente de transferencia de calor del fluido caliente [W/m² °C]

FLUIDO FRÍO:

T_{ci}, T_{co} : Temperatura de ingreso y salida del fluido frío [°C]

C_{p_c} : Calor específico del fluido frío [J/kg °C]

\dot{m}_c : Flujo másico del fluido frío [kg/s]

h_c : Coeficiente de transferencia de calor del fluido caliente [W/m² °C]

GEOMETRÍA:

A_i, A_o : Áreas de Transferencia de Calor interna y externa [m²]

2.3.2 MÉTODO DE LA DIFERENCIA MEDIA LOGARÍTMICA DE TEMPERATURAS

Para diseñar o predecir el rendimiento de un intercambiador de calor, es esencial relacionar la Transferencia total de Calor con cantidades tales como las temperaturas de entrada y salida del fluido, el coeficiente global de transferencia de calor, y el área superficial total para la Transferencia de Calor.

Dichas relaciones se pueden obtener fácilmente al realizar un balance de energía a los fluidos frío y caliente, pero tomando en consideración las siguientes restricciones:

1. El análisis se realiza en el estado estable.
2. Los calores específicos de los fluidos se mantienen constantes.
3. Los intercambiadores de calor son adiabáticos, esto significa que el intercambio de calor es entre los fluidos.
4. No se considera la Transferencia de Calor en la dirección axial, es predominante en la dirección radial.
5. El coeficiente global de Transferencia de Calor es uniforme a lo largo del intercambiador de calor.
6. Los cambios en la energía cinética y potencial son despreciables.

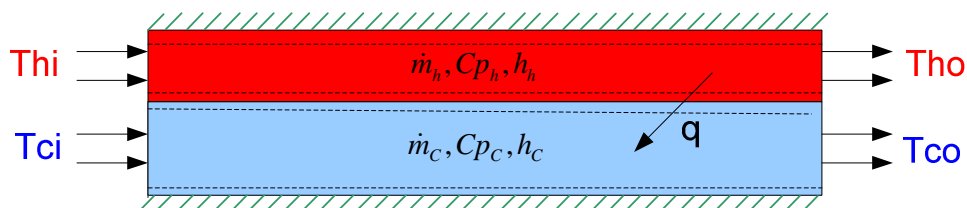


Figura 2.14. Balance global de energía para los fluidos caliente y frío en un intercambiador de calor.

Aplicando un balance de energía se tiene que:

$$q_h = \dot{m}_h C_{p_h} (T_{h_i} - T_{h_o}) = C_h (T_{h_i} - T_{h_o}) \quad (2.26)$$

$$q_c = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{c_o} - T_{c_i}) = C_c (T_{c_o} - T_{c_i}) \quad (2.27)$$

Donde las temperaturas que aparecen en las expresiones se refieren a las temperaturas medias del fluido en las posiciones que se señalan. Estas ecuaciones son independientes del arreglo del flujo y del tipo de intercambiador de calor.

Se obtiene otra expresión útil al relacionar la Transferencia de Calor q con la diferencia de temperaturas ΔT entre los fluidos caliente y frío, donde

$$\Delta T \equiv T_h - T_c \quad (2.28)$$

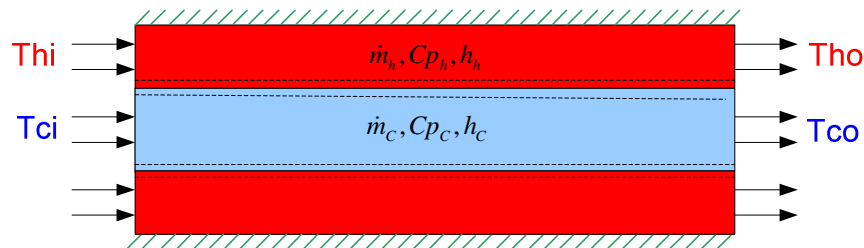
Tal expresión es una extensión de la ley de enfriamiento de Newton, pero tomando en cuenta que se usa el coeficiente global de transferencia de calor U en lugar del coeficiente único de convección h .

Se debe tener en cuenta también que ΔT varía con la posición en el intercambiador de calor, por lo que es necesario trabajar con una ecuación de flujo de la forma:

$$q = UA\Delta T_m \quad (2.29)$$

Donde ΔT_m es una diferencia de temperaturas media apropiada. Sin embargo, se debe establecer la forma específica de ΔT_m .

2.3.2.1 Tubos concéntricos flujo paralelo



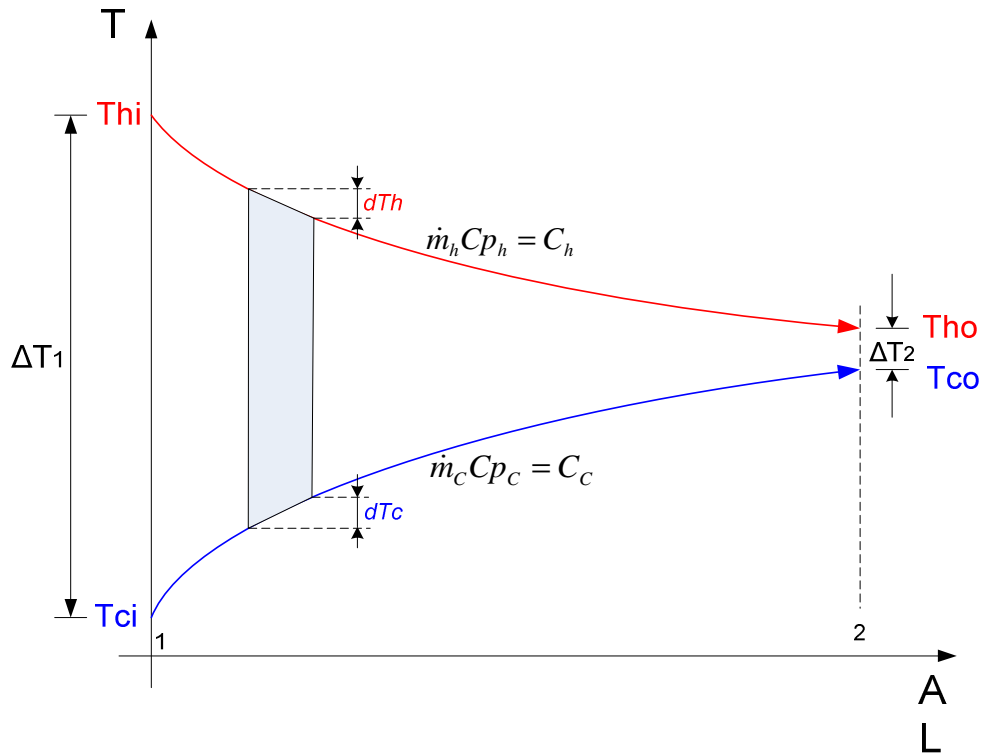


Figura 2.15. Distribuciones de temperatura para un intercambiador de calor de flujo paralelo.

$$dq = -\dot{m}_h C_{p_h} dT_h \equiv -C_h dT_h \quad (2.30)$$

$$dq = \dot{m}_c C_{p_c} dT_c \equiv C_c dT_c \quad (2.31)$$

La Transferencia de Calor a través del área superficial dA , también se puede expresar como

$$dq = U \Delta T dA \quad (2.32)$$

Para determinar la forma integrada de la ecuación anterior se sustituyen las ecuaciones (2.30) y (2.31) en la forma diferencial de la ecuación (2.28)

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c$$

$$d(\Delta T) = -dq \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right)$$

Al sustituir para dq de la ecuación (2.32) e integrar se obtiene

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \int_1^2 dA$$

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right)$$

Remplazando C_h y C_c de las ecuaciones (2.26) y (2.27) se obtiene

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{Th_i - Th_o}{q} + \frac{Tc_o - Tc_i}{q} \right)$$

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -\frac{UA}{q} [(Th_i - Tc_i) - (Th_o - Tc_o)]$$

$$\Delta T_1 = (Th_i - Tc_i), \quad \Delta T_2 = (Th_o - Tc_o)$$

$$q = UA \Delta T_{ml} = UA \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} \quad (2.33)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} \quad (2.34)$$

$$q_h = \dot{m}_h C_{p_h} (Th_i - Th_o) = C_h (Th_i - Th_o)$$

$$q_c = \dot{m}_c C_{p_c} (Tc_o - Tc_i) = C_c (Tc_o - Tc_i)$$

$$q_h = q_c$$

2.3.2.2 Tubos concéntricos en contraflujo

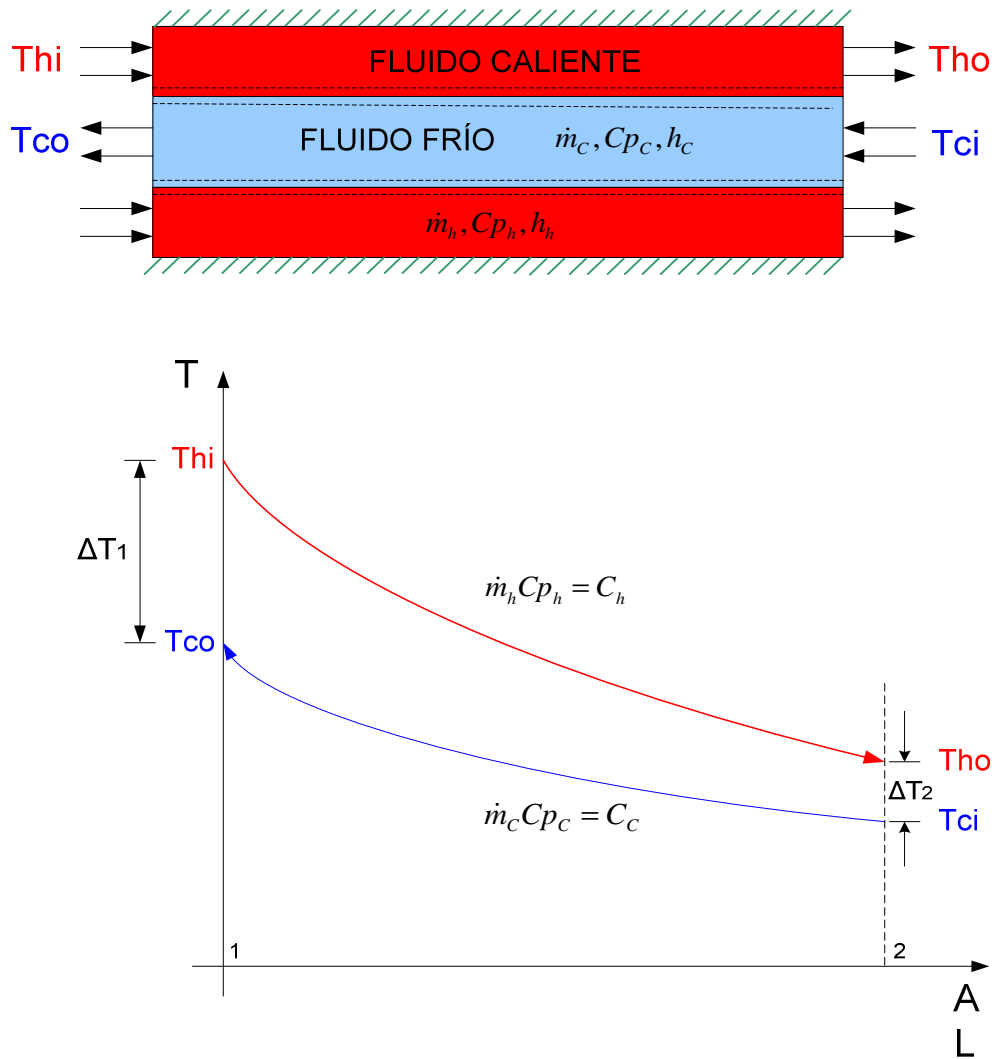


Figura 2.16. Distribuciones de temperatura para un intercambiador de calor de contraflujo.

$$\Delta T_1 = (Th_i - Tc_o) , \Delta T_2 = (Th_o - Tc_i)$$

$$q = UA\Delta T_{ml} = UA \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

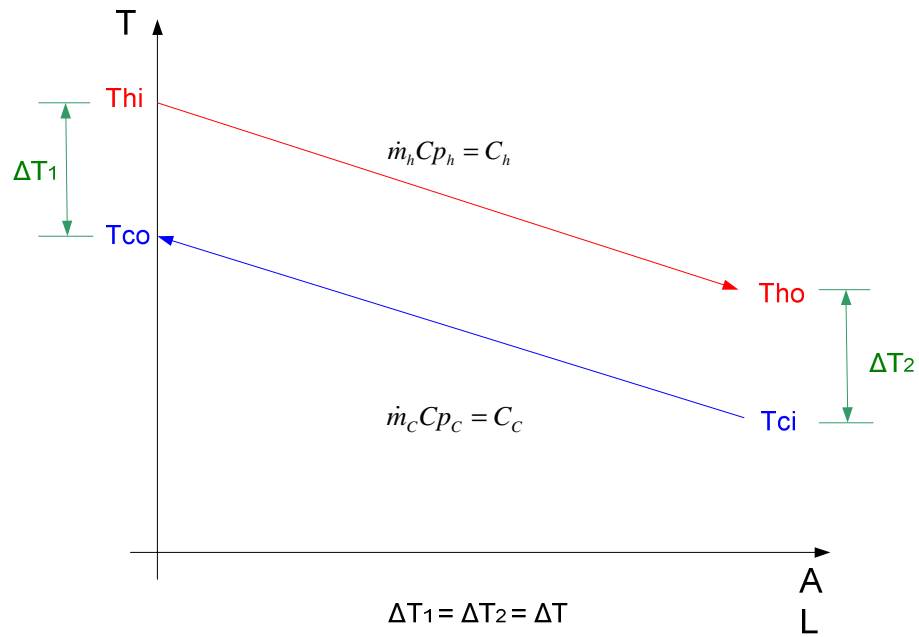
$$q_h = \dot{m}_h C_{p_h} (Th_i - Th_o) = C_h (Th_i - Th_o)$$

$$q_c = \dot{m}_c C_{p_c} (Tc_o - Tc_i) = C_c (Tc_o - Tc_i)$$

$$q_h = q_c$$

2.3.2.3 Tubos concéntricos en contraflujo con capacidades calóricas semejantes

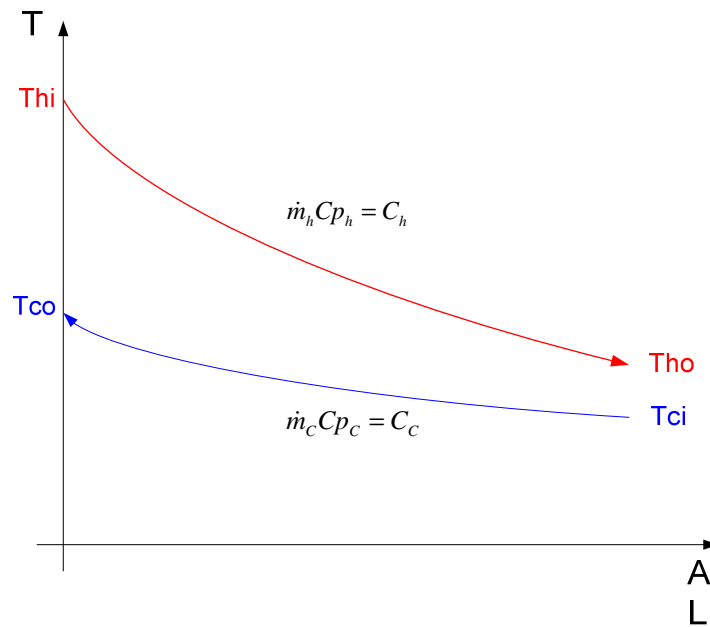
$$C_c \cong C_h$$



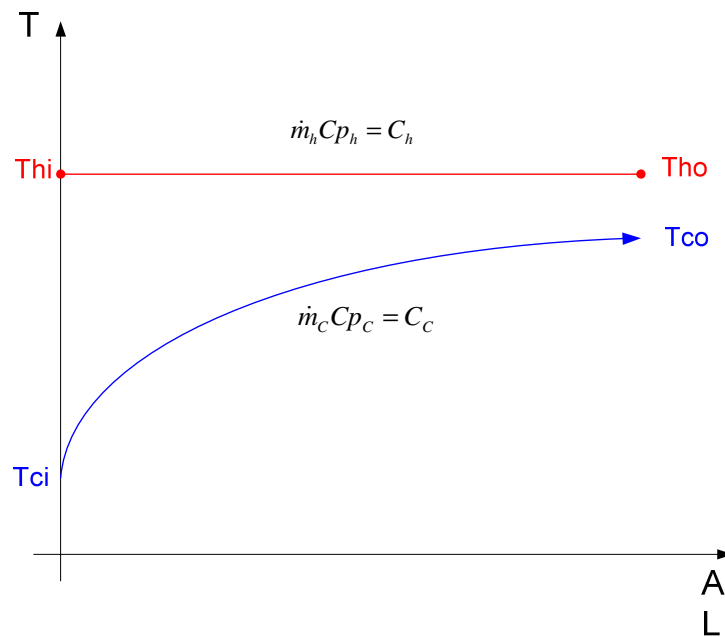
$$q_h = \dot{m}_h C_{p_h} (Th_i - Th_o) = C_h (Th_i - Th_o)$$

$$q_c = \dot{m}_c C_{p_c} (Tc_o - Tc_i) = C_c (Tc_o - Tc_i)$$

2.3.2.4 Calentador – Enfriador



2.3.2.5 Calentador – Condensador



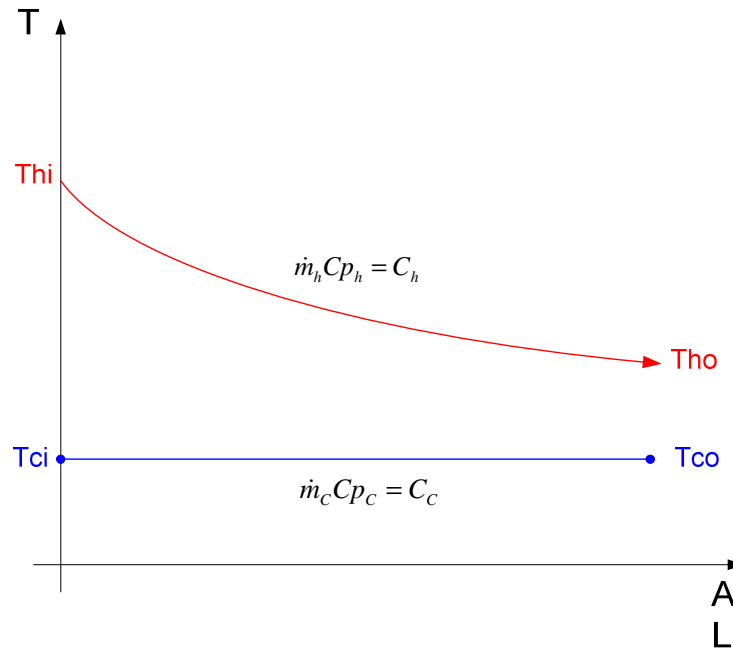
$$q_c = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{c_o} - T_{c_i}) = C_c (T_{c_o} - T_{c_i})$$

$$C_h \gg \gg C_c$$

$$C_h \longrightarrow \infty$$

$$q_h = \dot{m}_h h_{fg}$$

2.3.2.6 Enfriador – Evaporador



$$q_h = \dot{m}_h C p_h (Th_i - Th_o) = C_h (Th_i - Th_o)$$

$$q_c = \dot{m}_c h_{fgc}$$

2.3.3 MÉTODO DE LA EFECTIVIDAD (E), NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA DE CALOR (NUT).

Es más sencillo utilizar el método de la diferencia media logarítmica de temperaturas para analizar un intercambiador de calor, cuando se conocen las temperaturas de entrada de los fluidos y las temperaturas de salida se especifican o se determinan con facilidad a partir de las expresiones de balance de energía.

Sin embargo, si solo se conocen las temperaturas de entrada, el uso de la diferencia media logarítmica de temperaturas requiere un proceso iterativo, para estos casos es aconsejable utilizar el método de la eficiencia-NUT como un método alternativo de cálculo.

2.3.3.1 Definiciones

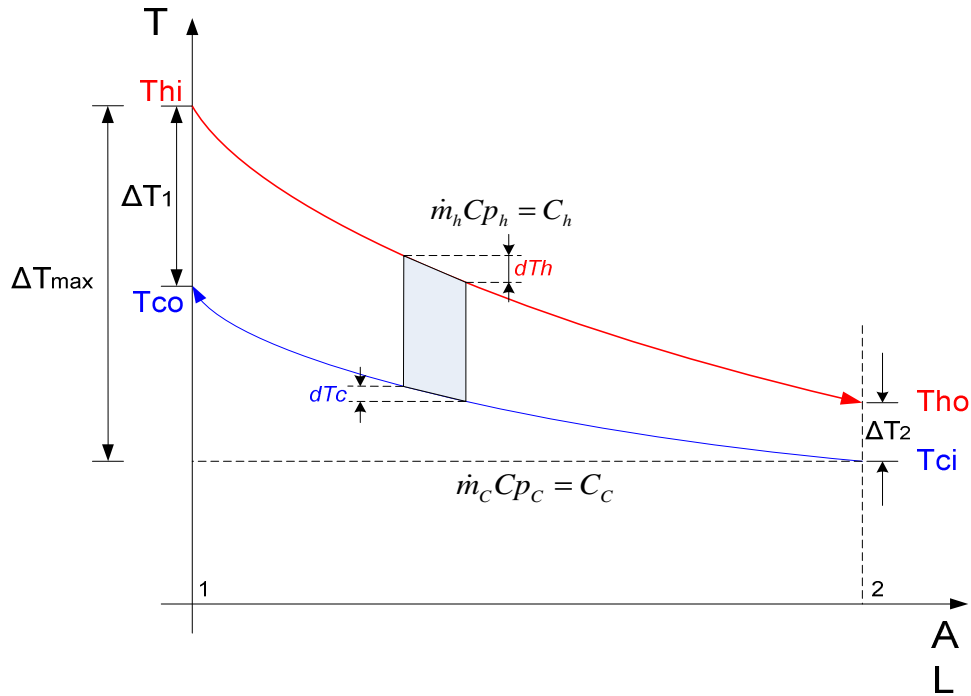


Figura 2.17. Definiciones usadas en un intercambiador de calor.

2.3.3.1.1 Transferencia máxima de Calor posible

En principio esta Transferencia de Calor se puede conseguir en un intercambiador de calor en contraflujo (figura superior) de longitud infinita. En este intercambiador uno de los fluidos experimentaría la diferencia de temperaturas máxima posible, $Th_i - Tc_i$.

Se puede observar en la gráfica también que si $C_h < C_c$, el fluido caliente experimentará el cambio de temperatura más grande y si se enfriaría a la temperatura de entrada del fluido frío, entonces $Tho = Tc_i$, de donde se tiene:

$$q_{m\acute{a}x} = C_h (Th_i - Tc_i)$$

A partir de esta ecuación se puede deducir que si $C_c < C_h$, entonces:

$$q_{m\acute{a}x} = C_c (Th_i - Tc_i)$$

En base a estos resultados se puede expresar la ecuaci3n general:

$$q_{m\acute{a}x} = C_{m\acute{i}n} (Th_i - Tc_i) \quad (2.35)$$

Donde $C_{m\acute{i}n}$ es igual a la menor capacidad cal3rica de los fluidos. Esta expresi3n proporciona la Transferencia de Calor m\acute{a}xima que podr\iacutea entregar el intercambiador.

2.3.3.1.2 Eficiencia ε

Es la raz3n entre la transferencia real de calor para un intercambiador de calor y la transferencia de calor m\acute{a}xima posible.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} \quad (2.36)$$

De donde se sigue que:

$$\varepsilon = \frac{q_h}{q_{m\acute{a}x}}$$

$$\varepsilon = \frac{q_c}{q_{m\acute{a}x}}$$

$$\varepsilon = \frac{C_h (Th_i - Th_o)}{C_{m\acute{i}n} (Th_i - Tc_i)}$$

$$\varepsilon = \frac{C_c (Tc_o - Tc_i)}{C_{m\acute{i}n} (Th_i - Tc_i)}$$

$$\text{Si } C_h = C_{m\acute{i}n}$$

$$\text{Si } C_c = C_{m\acute{i}n}$$

$$\varepsilon = \frac{(Th_i - Th_o)}{(Th_i - Tc_i)}$$

$$\varepsilon = \frac{(Tc_o - Tc_i)}{(Th_i - Tc_i)}$$

Para cualquier intercambiador de calor la eficiencia es

$$\varepsilon = f\left(\text{NUT}, \frac{C_{m\acute{i}n}}{C_{m\acute{a}x}}\right) \quad (2.37)$$

El número de unidades de Transferencia de Calor NUT es un parámetro adimensional que se usa ampliamente para el análisis de intercambiadores de calor y se define como

$$\text{NUT} = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (2.38)$$

CAPÍTULO 3

MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

3.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MOTOR ALTERNATIVO DE COMBUSTIÓN INTERNA

3.1.1 INTRODUCCIÓN

Desde siempre la primera energía mecánica utilizada por el hombre fue su propia energía muscular, incrementada a través de mecanismos simples como la palanca y la polea. Un paso importante en la obtención de la energía necesaria para realizar labores extenuantes consistió en la domesticación de los animales para la sustitución de la energía humana por la animal. Tal habilidad del hombre le ha permitido desarrollar herramientas que faciliten su vida. En 1678, el francés Abbé Jean de Hautefeuille, a quien la historia ha acreditado con el origen del motor de combustión con pistón, propuso usar la capacidad explosiva de la pólvora en un cilindro para mover un pistón y obtener trabajo. Sin embargo, fue solo hasta 1680 cuando los Franceses Huygens y Papin lograron construir un motor de este tipo.²⁰

3.1.2 MOTORES TÉRMICOS

Se define como el conjunto de elementos mecánicos, que permite obtener energía mecánica a partir de la energía térmica obtenida en un proceso de combustión tradicional o por una reacción nuclear. Los motores térmicos transforman la energía calorífica del combustible en energía mecánica, aprovechando la fuerza expansiva de los gases inflamados.

El motor térmico permite obtener energía mecánica a partir de la energía térmica asociada a un fluido por medio de un proceso de combustión. Si la energía

²⁰ AGUDELO John, Principios Básicos del MCI, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería Mecánica, Medellín, 2000.

térmica se transmite a través de una pared al fluido de trabajo, se tiene un motor de combustión externa (MCE). Si, por el contrario, la energía térmica se produce en el propio fluido de trabajo, el motor será de combustión interna (MCI).

Los MCI pueden transmitir la potencia al exterior mediante la transformación de un movimiento alternativo en rotativo a través de un mecanismo biela – manivela o directamente sin necesidad de este mecanismo. A éstos últimos se les conoce con el nombre de MCI rotativos. En esta categoría están la turbina de gas y el motor Wankel.

3.1.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

El motor alternativo de combustión interna consta básicamente de un mecanismo cilindro pistón. El cilindro es el elemento que aloja al pistón en su interior, este pistón se encuentra acoplado con una biela, la misma que transmite la fuerza de la expansión de los gases productos de la combustión al codo del cigüeñal. Estos elementos constituyen el mecanismo biela-manivela mediante el cual se transforma el movimiento rectilíneo alternativo del pistón en movimiento rotacional en el cigüeñal.

3.1.4 DEFINICIONES BÁSICAS DE UN MOTOR

La posición máxima que alcanza el pistón en el cilindro se denomina **punto muerto superior (PMS)**, y la posición mínima se denomina **punto muerto inferior (PMI)**, estos dos puntos determinan el desplazamiento que tiene el pistón dentro del cilindro. La distancia recorrida por el pistón entre el PMS y el PMI se denomina **carrera (H)**. En una vuelta completa del cigüeñal el pistón hará una carrera ascendente y una descendente.

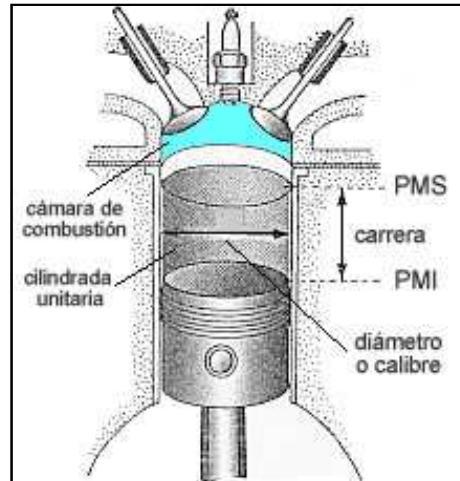


Figura 3.1. Definiciones básicas de un motor.

Cilindrada unitaria o volumen de barrido: es el volumen comprendido entre el PMS y el PMI en un cilindro y se le puede calcular con la siguiente fórmula.

$$V_u = \frac{\pi}{4} \times (\text{diámetro})^2 \times H \quad (3.1)$$

Cilindrada total: es volumen total de todos los cilindros que tiene el motor.

$$V_T = \frac{\pi}{4} \times (\text{diámetro})^2 \times H \times \#\text{cilindros} \quad (3.2)$$

Espacio muerto (v): es el espacio formado por la cabeza del pistón, la culata y el cilindro, cuando el pistón se encuentra en el PMS, este espacio también se conoce como cámara de combustión.

Volumen total, es la suma de la cilindrada unitaria y el volumen del espacio muerto.

Relación de compresión: es la relación entre el volumen total y el volumen del espacio muerto.

$$r_c = \frac{V_u + v}{v} \quad (3.3)$$

3.2 MOTOR DIESEL

El motor Diesel es un motor de combustión interna cuyo funcionamiento se basa en un ciclo termodinámico, en el cual el autoencendido del combustible se logra por la elevada temperatura que se produce por la compresión del aire en el interior del cilindro. Fue inventado y patentado por Rudolf Diesel en 1892, del cual deriva su nombre. Su logro era crear un motor con alta eficiencia. 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 coco.

3.2.1 CICLO TERMODINÁMICO

El ciclo diesel es el ciclo ideal para motores reciprocantes de encendido por compresión, en el cual la combustión se realiza a presión constante. El método utilizado aquí es elevar la temperatura del aire por encima de la temperatura de autoencendido del combustible, utilizando relaciones de compresión en el intervalo de 14:1 a 24:1 y presiones de compresión de 400 a 700 psi.

El ciclo diesel se ejecuta en un dispositivo cilindro embolo, que forma parte de un sistema cerrado. Consta de cuatro procesos termodinámicos, en los que se omiten las fases de renovado de la masa y se asume que el fluido termodinámico es un gas perfecto, en general aire. Además, se acepta que todos los procesos son ideales y reversibles, y que se realizan sobre el mismo fluido.

Consta de los siguientes procesos:

1. **Compresión isoentrópica, proceso 1-2:** Representa el proceso de compresión de la masa fresca en el motor real, en el que en el pistón, estando en el punto muerto inferior (PMI), empieza su carrera de ascenso, comprimiendo el aire contenido en el cilindro. Esto eleva el estado termodinámico del fluido, aumentando su presión, su temperatura y disminuyendo su volumen específico, en virtud del efecto adiabático. En forma ideal, el proceso está gobernado por la ecuación de la isoentrópica $P * v^k = cte$, con k índice de politropicidad isentrópico.

2. Adición de calor a presión constante, proceso 2-3: idealmente es un proceso isobárico. Sin embargo, la combustión Diesel es mucho más compleja, en el entorno del PMS (en general un poco antes de alcanzarlo debido a problemas relacionados con la inercia térmica de los fluidos), se inicia la inyección del combustible. El inyector pulveriza el combustible, que en contacto con la atmósfera interior del cilindro, comienza a evaporarse. El combustible de un motor Diesel tiene que ser auto-inflamable (gran poder detonante), para que mucho antes de que haya terminado la inyección de todo el combustible, las primeras gotas de combustible inyectado se auto-inflan y den comienzo a una primera combustión caracterizada por ser muy turbulenta e imperfecta, al no haber tenido la mezcla de aire y combustible tiempo suficiente como para homogeneizarse.

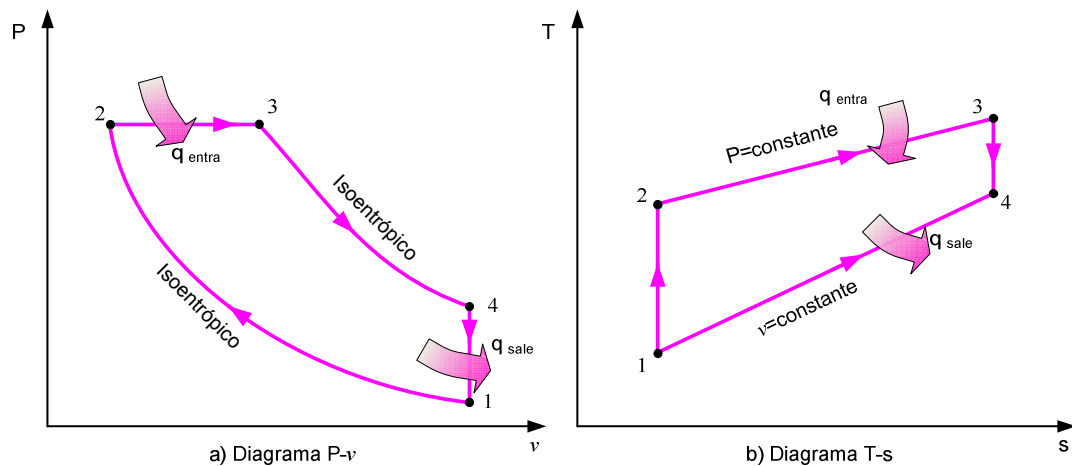


Figura 3.2. Ciclo Diesel Ideal. a) Diagrama P-v. b) Diagrama T-s.

3. Expansión isentrópica, proceso 3-4: representa la expansión del fluido termodinámico, hasta el volumen específico que se tenía al inicio de la compresión. En la realidad, la expansión se produce como consecuencia del elevado estado termodinámico de los gases luego de la combustión, que empujan al pistón desde el PMS hacia el PMI, produciendo trabajo mecánico.

- 4. Rechazo de calor a volumen constante, proceso 4-1:** proceso por el cual se reduce el estado termodinámico del fluido hasta el estado inicial, con lo cual se renueva el ciclo.

3.2.2 CICLO OPERATIVO

Se denomina ciclo operativo a la sucesión de procesos que se realizan en el interior del cilindro y se repiten con ley periódica. La duración de este ciclo se mide por el número de carreras del pistón necesarias para realizarlo. Así se dice que los motores alternativos son de cuatro tiempos, cuando el ciclo completo se realiza en cuatro carreras del pistón, y de dos tiempos, cuando son suficientes dos carreras para completar el ciclo. El ciclo de trabajo del motor a diesel de cuatro tiempos es similar al de gasolina, se realiza en dos vueltas del cigüeñal y sus carreras son: admisión, compresión, combustión y escape.

Primer tiempo: Admisión

El pistón efectúa la carrera o desplazamiento desde el PMS al PMI, aspirando sólo aire de la atmósfera, el cual debe ser purificado al pasar a través de un filtro. El aire ingresa hacia el cilindro por el colector y la válvula de admisión, que se supone se abre instantáneamente y permanece abierta con el objeto de llenar todo el volumen del cilindro. Durante este tiempo, el cigüeñal gira 180°. Al llegar al PMI la válvula de admisión se cierra instantáneamente.

Segundo tiempo: Compresión

Con las válvulas completamente cerradas el pistón comprime el aire a gran presión, hasta reducir el todo el volumen del aire al volumen de la cámara de combustión. El cigüeñal gira otros 180° y completa su primera vuelta.

La presión alcanzada en el interior de la cámara de combustión mantiene la temperatura del aire por encima de los 540°C, superior al punto de inflamación del combustible, para lo cual la relación de compresión tiene que ser del orden de 16 a 18.²¹

²¹ <http://www.proyectosfindecarrera.com/definicion/relacion-compresion.htm>

Tercer tiempo: Trabajo

Al final de la compresión con el pistón en el PMS se inyecta el combustible en el interior del cilindro, en una cantidad que es regulada por la bomba de inyección. Como la presión en el interior del cilindro es elevada, para que el combustible pueda entrar la inyección debe realizarse a una mayor presión. El combustible, que debido a la alta presión de inyección sale finamente pulverizado a través del inyector, se inflama al entrar en contacto con el aire caliente, produciéndose la combustión del mismo, lo que eleva la temperatura interna en el cilindro. La presión mientras dura la inyección o adición de calor se supone constante y a continuación, se realiza la expansión de los gases lo que produce el desplazamiento del pistón hacia el PMI. Durante este tiempo o carrera de trabajo, el pistón efectúa su tercer recorrido y gira otros 180°.

Cuarto tiempo: Escape

Durante este tiempo la válvula de escape se abre instantáneamente y permanece abierta para evacuar los gases producto de la combustión con la ayuda del movimiento ascendente del pistón. El cigüeñal efectúa otro giro de 180°, completando dos vueltas que corresponde al ciclo completo de trabajo.

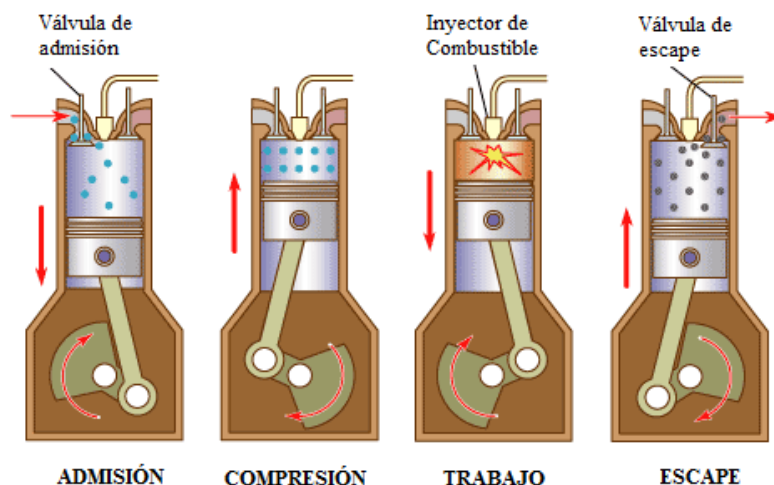


Figura 3.3. Ciclo operativo del motor diesel.

3.2.3 CICLO REAL

El ciclo real es el que refleja las condiciones efectivas de funcionamiento de un motor y cuando se representa en un diagrama P-v, se denomina diagrama indicado. Las diferencias que existen entre un ciclo indicado y un ciclo teórico están causadas por:

- Pérdidas de calor, las cuales son importantes en el ciclo real, ya que el cilindro debe estar refrigerado, para conservar las propiedades de los materiales. Una parte del calor generado en la combustión se transmite hacia las paredes cilindro lo que produce que el proceso no sea reversible.
- Tiempo de apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape, aunque en el ciclo teórico se supone que la apertura y cierre de las válvulas es instantáneo, físicamente sería imposible, esta acción tiene lugar en un tiempo relativamente largo, por lo que para mejorar el llenado y vaciado del cilindro, las válvulas de admisión y escape se abren con anticipación lo que provoca una pérdida de trabajo útil.
- Combustión no instantánea, ya que en el ciclo teórico se supone que la combustión se realiza instantáneamente, en el ciclo real la combustión dura cierto tiempo. Por ello, si la inyección tuviese lugar justamente en el P.M.S, la combustión ocurriría mientras el pistón se aleja de dicho punto, con la correspondiente pérdida de trabajo. Para evitar esto se recurre al adelanto de la inyección de forma que la combustión tenga lugar, en su mayor parte, cuando el pistón se encuentre en la proximidad del P.M.S., lo que en el ciclo se representa por un redondeamiento de la línea isobárica de adición de calor, y por lo tanto, una pérdida de trabajo útil.
- Pérdidas de energía por la renovación de masa, el ciclo teórico no considera que exista una renovación del fluido de trabajo, lo que en el ciclo real es necesario para que se produzca la combustión. Una vez que se toma en cuenta esto el fluido de trabajo debe ingresar por los conductos de admisión lo que genera rozamiento y en el ciclo esto aparece como una pérdida energética.

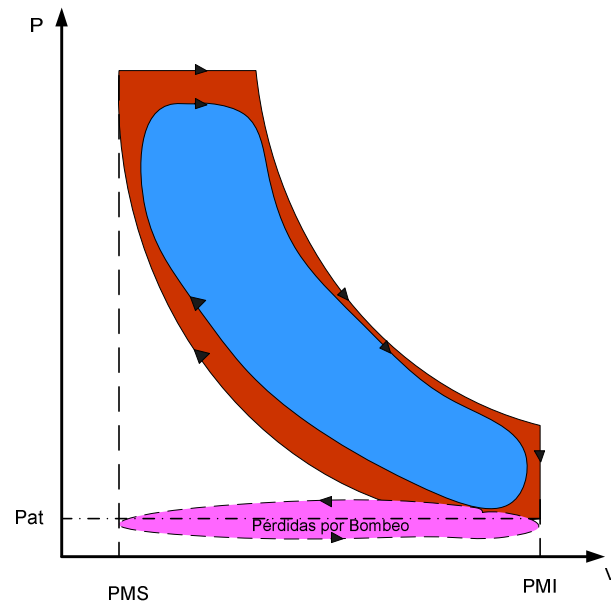


Figura 3.4. Comparación entre los ciclos Diesel teórico e indicado.

3.2.4 SISTEMAS DE UN MOTOR A DIESEL

3.2.4.1 Sistema de Distribución

Es el sistema encargado de sincronizar el movimiento del cigüeñal con el movimiento del árbol de levas y el movimiento de la bomba de inyección, en las relaciones de transmisión adecuadas.

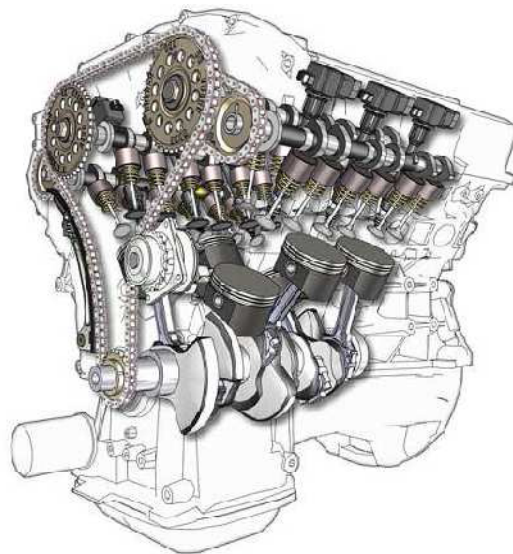


Figura 3.5. Sistema de Distribución.

3.2.4.2 Sistema de Lubricación

La lubricación forma una parte fundamental para la buena operación de un motor de combustión interna, tiene varios objetivos. Entre ellos se pueden mencionar los siguientes:

- Reducir el rozamiento o fricción para optimizar la duración de los componentes.
- Disminuir el desgaste de las piezas con movimiento relativo.
- Reducir el calentamiento de los elementos del motor que se mueven unos con respecto a otros.

Además para la lubricación de un motor se deben tener en cuenta dos factores importantes:

- Temperatura del motor.
- Distribución adecuada del aceite.

Temperatura

Las elevadas temperaturas que alcanzan ciertos elementos del motor, pese al sistema de refrigeración, exige que el aceite no pierda sus propiedades lubricantes en estas condiciones de trabajo.

Distribución adecuada del aceite

En los primeros motores la lubricación se hacía por borboteo o salpicado, esto tenía el inconveniente de que al descender el nivel de aceite por el consumo del mismo, el motor perdía poco a poco su lubricación, llegando a trabajar sin lubricación lo que ocasionaba una reducción en el tiempo de vida del motor.

Estos inconvenientes dieron origen a la adopción del sistema de lubricación forzada a presión, mediante el empleo de bombas acopladas al cigüeñal para llevar al lubricante desde el cárter hacia todos los elementos del motor.

Las partes a lubricar en un motor son: paredes del cilindro, cojinetes de biela, cojinetes de bancada, árbol de levas, taqués, guías de válvulas, balancines, engranajes, etc.

A continuación se muestra un circuito de lubricación y las partes que lo componen:

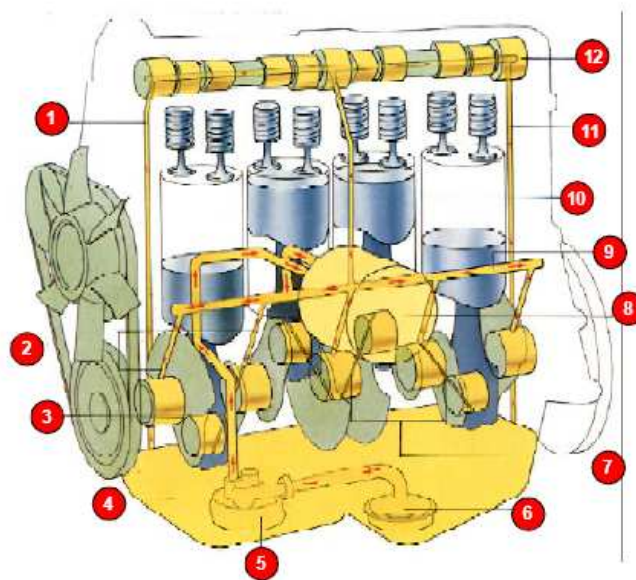


Figura 3.6. Sistema de lubricación y sus partes.¹¹

- 1) Retorno del aceite al cárter
- 2) Conductos del aceite para los cojinetes
- 3) Cigüeñal
- 4) Aceite en el cárter
- 5) Bomba del aceite
- 6) Primer filtro de aceite (interno)
- 7) Canales de aceite para los muñones
- 8) Filtro de aceite
- 9) Conducto principal del aceite (en el bloque)

¹¹ www.geocities.com/motorcity/pit/9975/databysubjet/alimentationsystem.html

- 10) El aceite llega al árbol de levas
- 11) Retorno del aceite al cárter
- 12) Conducto de lubricación para el árbol de levas

3.2.4.3 Sistema de Inyección de Combustible

Este sistema es el encargado de proporcionar el combustible necesario para que se produzca la combustión al interior del cilindro en el instante requerido, es decir al término del tiempo de compresión.

En el caso de motores a diesel este sistema es muy importante y tiene componentes muy sensibles fabricados con gran exactitud, por lo que realizar el mantenimiento de este sistema es de vital importancia.

En el pasado el sistema de inyección de combustible se constituía solo de elementos mecánicos, pero en la actualidad gracias a la ayuda de la electrónica, se tienen sistemas modernos que funcionan mejor.

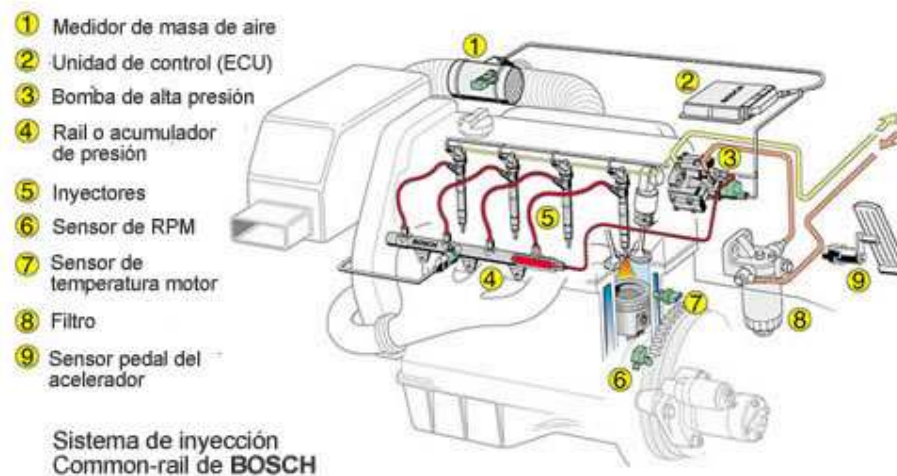


Figura 3.7. Sistema de Inyección Common Rail.

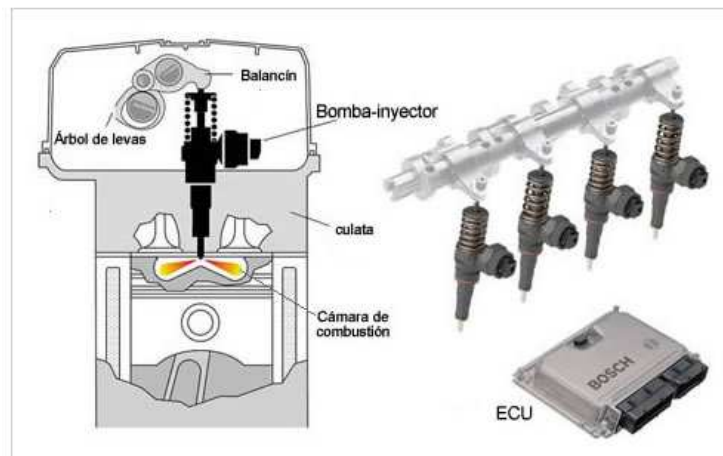


Figura 3.8. Sistema de Inyección Bomba-Inyector.

3.2.4.4 Sistema de Refrigeración

Del calor producido en la combustión, solo una parte se transforma en trabajo mecánico, el resto del calor es absorbido por las paredes del cilindro y de la cámara de combustión. Las temperaturas que se alcanzan son muy elevadas y los materiales pueden perder sus propiedades mecánicas lo que produciría la deformación de los mismos y por lo tanto el mal funcionamiento del motor, llegando incluso a dañarlo totalmente.

Para lograr mantener una temperatura apropiada de funcionamiento se necesita del sistema de refrigeración, el cual por medio de una mezcla refrigerante, en general agua más algún aditivo, extrae el calor que se acumula en las partes calientes del motor y lo desecha al ambiente.

Las partes que conforman el sistema de refrigeración son:

- Radiador.
- Termostato.
- Bomba de agua.
- Conductos y mangueras.
- Ventilador.
- Sensor de Temperatura.

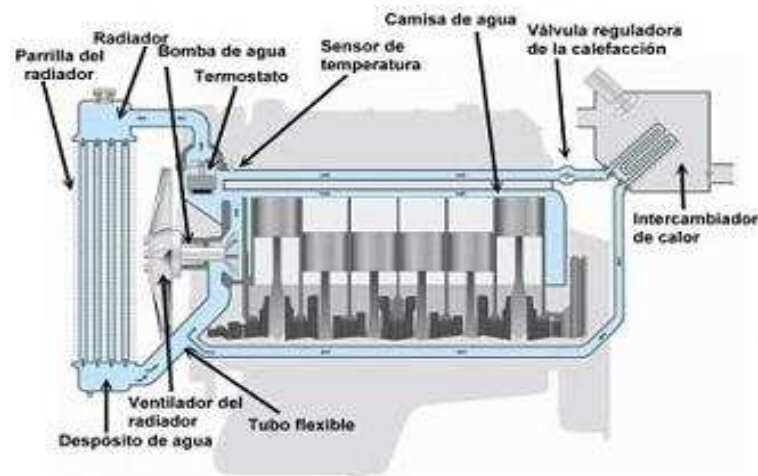


Figura 3.9. Sistema de Refrigeración y sus partes.²³

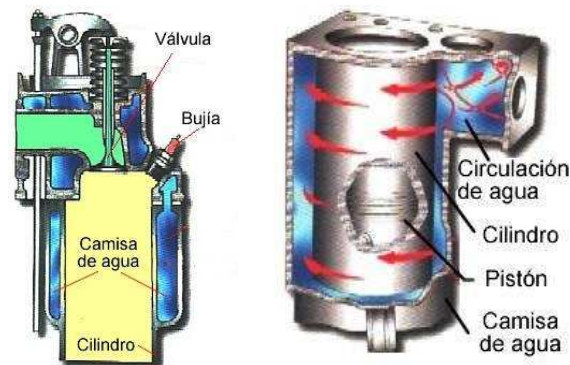


Figura 3.10. Conductos por los que circula el líquido refrigerante en el motor.²⁴

3.3 EMISIONES CONTAMINANTES

Los contaminantes del aire son sustancias que, están presentes en la atmósfera, afectan de manera adversa la salud de humanos, animales, plantas o vida microbiana, dañan materiales o interfieren con la calidad de vida.

En buena medida, los contaminantes del aire son subproductos directos e indirectos de quemar carbón, gasolina, diesel y otros combustibles, así como los desechos (papeles, cartón, trapos, aserrín, etc.). En la siguiente tabla se puede observar cuales son las principales fuentes de contaminación.

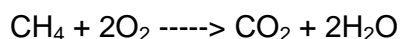
²³ <http://webdelautomovil.com/2007/09/sistema-de-refrigeracion/comment-page-1>

²⁴ <http://foro.loquo.com/viewtopic.php?t=52197>

Tabla 3.1 Principales fuentes de contaminación.²⁵

<i>Fuente</i>	<i>Porcentaje de contaminación</i>
Motores a gasolina	60%
Procesos industriales	16%
Plantas de potencia	14%
Hornos	5,7%
Plantas incineradoras	3,6%
Motores a diesel	0,9%

Los combustibles son compuestos orgánicos generalmente hidrocarburos, cuando se queman por completo, los subproductos son dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua (H₂O), como se ve en la siguiente fórmula de la combustión del metano:



Sin embargo, la oxidación rara vez es completa y participan sustancias mucho más complejas que el metano.

3.3.1 CONTAMINANTES PRIMARIOS

Los contaminantes primarios son los que se producen directamente en el proceso de combustión entre los que se tiene: partículas de carbón, compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx) y plomo.

Cuando los combustibles se queman vierten a la atmósfera partículas compuestas de carbono y que son las que se ven como hollín y humo. Además, algunos fragmentos de las moléculas de los combustibles que quedan sin combustionar, que son compuestos orgánicos volátiles. El resultado de la oxidación incompleta del carbono es el monóxido de carbono (CO), mientras que el de la completa es el dióxido (CO₂).

²⁵ Fundación Natura-D.M.Q., Control de Emisiones Vehiculares, Quito.

Para la combustión se utiliza aire, que es 78% de nitrógeno y 21% de oxígeno. A temperaturas de combustión elevadas, una parte del nitrógeno se oxida y forma óxido nítrico (NO). En el aire, este gas reacciona de inmediato con más oxígeno y se convierte en dióxido de nitrógeno (NO₂) y tetra óxido de nitrógeno (N₂O₄), compuestos que se conocen como óxidos de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno absorbe la luz y causa en gran parte el color pardo del smog fotoquímico.

Además de materiales orgánicos, los combustibles contienen impurezas y aditivos que también son expulsados al ambiente durante la combustión. Tal es el caso del azufre que al quemarlo, se oxida y produce dióxido de azufre, que es el precursor de la lluvia ácida.

3.3.2 CONTAMINANTES SECUNDARIOS

Algunos de los contaminantes primarios siguen reaccionando en la atmósfera y producen otros compuestos no deseables, los llamados contaminantes secundarios.

El ozono y numerosos compuestos orgánicos reactivos se forman como resultado de reacciones químicas entre óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles con la ayuda de la energía que procede de la luz solar.

Los ácidos sulfúrico y nítrico también se consideran contaminantes secundarios, puesto que son producto de la reacción del dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno con la humedad del aire y oxidantes como el hidroxilo.

3.3.3 EMISIONES CONTAMINANTES DE TIPO VEHICULAR.

Gran parte de la contaminación se debe al inmenso parque vehicular que existe en las ciudades del mundo, el cual es el generador mayoritario de los gases contaminantes. En su gran mayoría el parque vehicular de una ciudad está constituido de vehículos con motores de combustión interna de ciclo Otto y Diesel, que son utilizados para movilidad de personas y cosas.

Cuando se habla de la composición de los gases de escape de un vehículo se utilizan siempre los mismos términos: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas de hollín o hidrocarburos. En este contexto, no se menciona que estas sustancias sólo representan una fracción del total de la cantidad de gases de escape. En las siguientes figuras se muestra la composición aproximada de los gases que despiden los motores diesel y de gasolina.

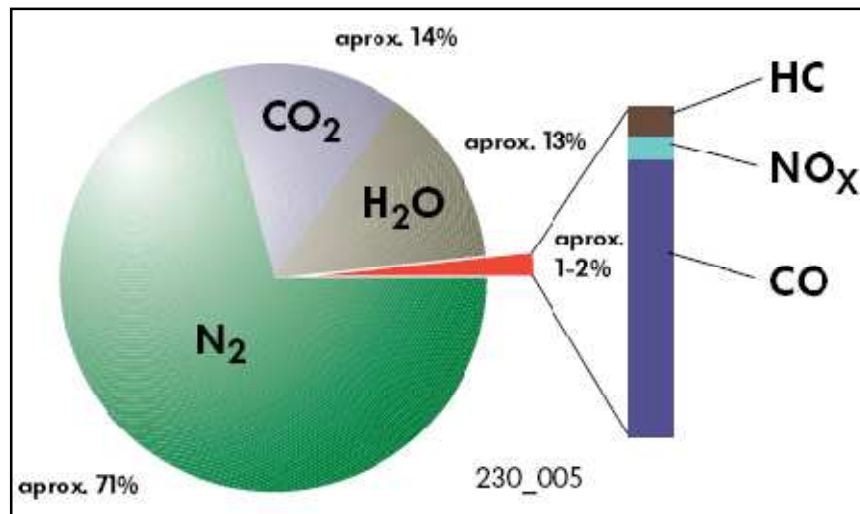


Figura 3.11. Composición de los gases de escape en motores a gasolina.

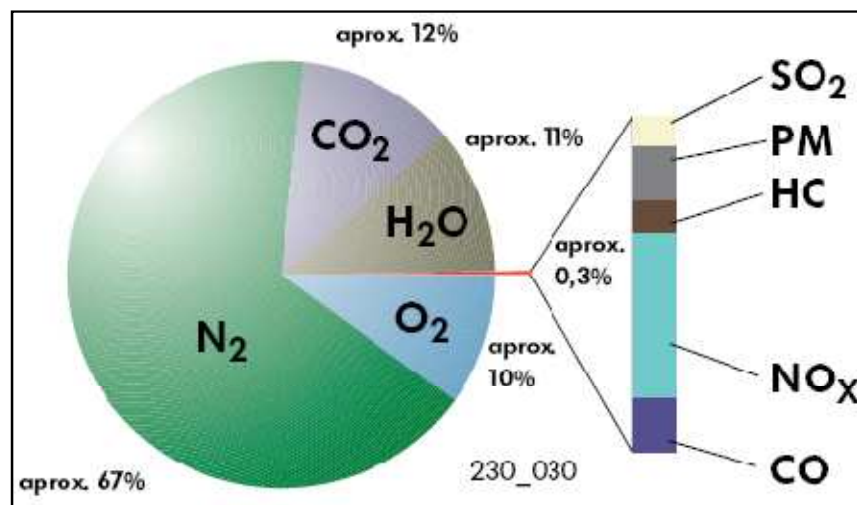


Figura 3.12. Composición de los gases de escape en motores diesel.

Como se puede observar en las figuras anteriores el mayor porcentaje de los gases de escape son subproductos propios de la combustión ideal del diesel o gasolina respectivamente, solo una pequeña fracción de contaminantes nocivos es la que se produce en la combustión, pero es este pequeño porcentaje el que genera preocupación ya que son sustancias nocivas para la salud.

3.3.3.1 Emisiones Contaminantes en Motores Diesel

Los motores diesel trabajan con mezclas pobres es decir con exceso de aire, adicional a esto el proceso de combustión se realiza por la inyección de combustible en el cilindro en donde se encuentra aire a alta temperatura y presión. Estos factores inciden en la producción de contaminantes nocivos para la salud generados por estos motores. Entre los que se tiene material particulado, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno entre otros.

Los óxidos de nitrógeno (NOx) se generan por la reacción del oxígeno y del nitrógeno bajo condiciones de alta presión y temperatura en el interior de cilindro. Los NOx consisten en óxido nítrico (NO) y un bajo porcentaje de dióxido de nitrógeno (NO₂).

El dióxido de azufre (SO₂) se genera por el azufre presente en el combustible, y su concentración depende de la cantidad de azufre que contenga el combustible. El dióxido de azufre es un gas tóxico incoloro, con la característica de emitir un olor irritante. La oxidación del (SO₂) produce trióxido de azufre, precursor del ácido sulfúrico, responsable de las partículas de sulfato en las emisiones diesel. Los óxidos de azufre tienen un profundo impacto en el medio ambiente es la mayor causa de la lluvia ácida.

El material particulado del diesel (MPD) o partículas, es un complejo agregado de materiales sólidos y líquidos, su origen se debe a partículas de carbono, generadas en el cilindro durante la combustión. Generalmente, el MPD está dividido en tres partes básicas.

- Sólidos - partículas de carbón seco, conocido como hollín.
- FOS - hidrocarburos pesados absorbidos y condensados en partículas de carbón, llamados fracción orgánica soluble.
- SO₄ - radical sulfato, ácido sulfúrico hidratado.

La composición del material particulado depende del motor, su carga y la velocidad. Las partículas "húmedas", pueden contener hasta un 60% de hidrocarburos (FOS), mientras que las partículas "secas", consisten mayormente en carbón seco. La cantidad de sulfatos dependen directamente de la cantidad de azufre presente en el combustible. Las partículas del Diesel son muy finas. Las partículas de carbón (núcleo) tiene un diámetro entre 0,01 - 0,08 micras, mientras que el diámetro de las partículas aglomeradas se encuentra en el rango de 0,08 - 1 micras. Por lo tanto el material particulado del Diesel es totalmente respirable y tienen un impacto significativo en la salud humana. Se ha clasificado por varios gobiernos como "cancerígeno o probablemente cancerígeno para el hombre".²⁶

3.3.4 CONTROL DE EMISIONES

En el Ecuador se cuenta con la normativa para el control de emisiones en fuentes móviles y fijas, las cuales mencionan el procedimiento de medida de las emisiones y los rangos admisibles de las mismas. Las normativas nacionales para el control de emisiones contaminantes son menos rígidas en comparación con la normativa existente en Europa que es una de las más exigentes y ambiciosas ya que se vuelven más estrictas al pasar de los años. A continuación se detallan algunas especificaciones de las normas que regulan las emisiones contaminantes.

²⁶ [http://starmedia.autocity.com/documentos-tecnicos/index.html?cat=\\$cat&codigoDoc=133](http://starmedia.autocity.com/documentos-tecnicos/index.html?cat=$cat&codigoDoc=133)

3.3.4.1 Norma INEN NTE 2204

La Norma INEN NTE 2204, **Gestión ambiental. Aire, vehículos. Automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina.** Es la norma que rige en nuestro país para controlar los límites admisibles de emisiones contaminantes para fuentes móviles de gasolina.

De acuerdo con la norma se debe realizar un análisis de gases en condición estática, es decir que el motor este funcionamiento en condición de marcha mínima o ralentí y temperatura normal de operación, una vez cumplidos estos requisitos el vehículo analizado no debe emitir al aire monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) en cantidades superiores a las señaladas en la siguiente tabla.

Tabla 3.2. Valores admisibles de contaminantes para motores a gasolina.

Año modelo	% CO		ppm HC	
	0 -1500	1500 – 3000	0 – 1500	1500 – 3000
2000 y posteriores	1.0	1.0	200	200
1990 a 1999	3.5	4.5	650	750
1989 y anteriores	5.5	6.5	1000	1200

3.3.4.2 Norma INEN NTE 2207

La Norma INEN NTE 2207, **Gestión ambiental. Aire, vehículos. Automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de diesel.** Es la norma que rige en nuestro país para controlar los límites admisibles de emisiones contaminantes para fuentes móviles de diesel.

La norma especifica que toda fuente móvil con motor diesel, en condición de aceleración libre, no podrá descargar al aire gases con opacidades superiores a las indicadas en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Valores admisibles de opacidad para motores Diesel.

Año Modelo	% Opacidad
2000 y posteriores	50
1999 y anteriores	60

En esta norma se menciona que se debe realizar el procedimiento de aceleración libre el cual consiste en el aumento de las revoluciones del motor de la fuente móvil, llevado rápidamente a máxima aceleración estable, sin carga y en marcha neutra (para cajas manuales) y en parqueo (para cajas automáticas).

Además de esto se define el significado de la opacidad, como la medida del ennegrecimiento del color de humo que emiten los motores diesel. La opacidad es proporcional a la cantidad de material particulado, mientras más negro sea el color del humo más material particulado existe.

3.3.4.3 Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas de Combustión

Esta norma tiene como objetivo principal el preservar o conservar la salud de las personas, la calidad del aire ambiente, el bienestar de los ecosistemas y del ambiente en general. Para cumplir con este objetivo, esta norma establece los límites permisibles de emisiones contaminantes que puede expulsar al aire una fuente fija de combustión de acuerdo a la actividad productiva que realice. La norma provee los métodos y procedimientos destinados a la determinación de las emisiones al aire, que se verifiquen que son procesos de combustión en fuentes fijas. Provee también de herramientas de gestión destinadas a promover el cumplimiento con los valores de calidad del aire establecidos en esta normativa.

Se define como fuente fija a la instalación o conjunto de instalaciones, que tiene como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios, y que emite o puede emitir contaminantes al aire, debido a proceso de combustión, desde un lugar fijo o inamovible.

Dentro de la norma se establece límites máximos permisibles de contaminantes para algunos procesos específicos, para el caso de motores de combustión interna se tiene los siguientes límites admisibles:

Tabla 3.4. Límites máximos permisibles de emisiones al aire para motores de combustión interna.

CONTAMINANTE EMITIDO	OBSERVACIONES	FUENTES EXISTENTES	FUENTES NUEVAS	UNIDADES [a]
Partículas Totales	--	350	150	mg/m ³
Óxidos de Nitrógeno	--	2 300	2 000	mg/m ³
Dióxido de Azufre	--	1 500	1 500	mg/m ³

Nota:

[a] mg/m³: miligramos por metro cúbico de gas a condiciones normales de 1013 milibares de presión y temperatura de 0 °C, corregidos a 15% de O₂, en base seca.

La norma también establece que el lugar en donde se debe realizar las medidas de los contaminantes, será a una distancia de al menos ocho diámetros de chimenea corriente abajo y dos diámetros de chimenea corriente arriba de una perturbación al flujo normal de gases de combustión. Se entiende por perturbación cualquier codo, contracción o expansión que posee la chimenea o conducto.

3.3.4.4 Normas EURO

En Europa se tiene un estricto control de emisiones contaminantes, el cual se endurece con el pasar de los años, esto hace que los fabricantes de vehículos desarrollen sistemas que reduzcan estas emisiones de acuerdo a la normativa vigente. El objetivo de los europeos es tener vehículos de cero emisiones.

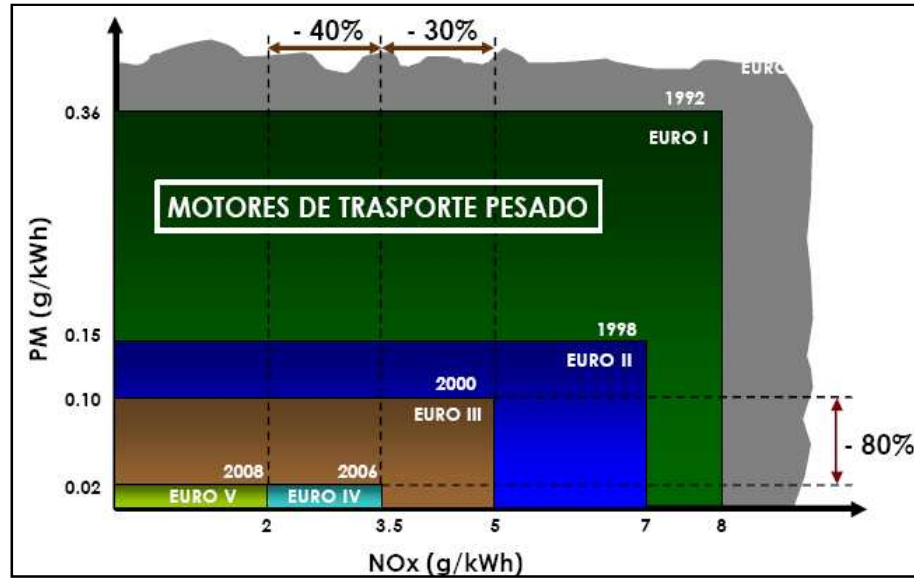


Figura 3.13. Evolución de las normas EURO.

En Europa se tiene en vigencia las normas EURO que establecen los límites de contaminantes para motores, en la figura 3.13 se puede observar que se establecen límites para el material particulado, los NOx y a medida que las normas EURO van evolucionando las exigencias son mayores.

3.4 BALANCE DE ENERGÍA

El balance de energía permite conocer como se distribuye la energía entregada por el combustible al motor, que cantidad de energía realmente se convierte en trabajo y qué cantidad de energía es evacuada por los sistemas de refrigeración, gases de combustión, fricción, ruido, radiación, etc.

Una forma de representar los resultados del balance de energía es utilizar el diagrama Sankey. El cual representa la distribución de energía entregada por el combustible en porcentajes.

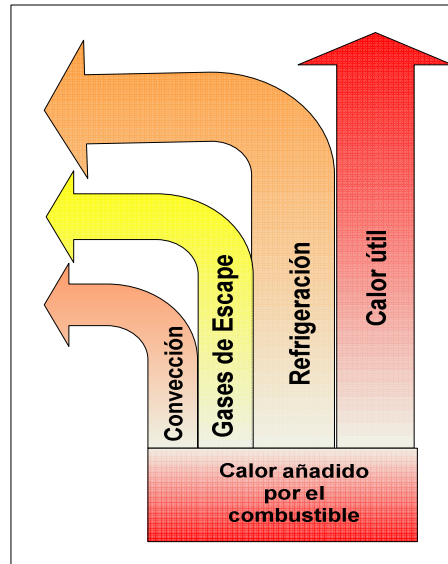


Figura 3.14. Diagrama Sankey.

Este diagrama toma como base el calor añadido del combustible y luego se procede al cálculo de los porcentajes de la energía transformada en potencia y de las pérdidas de energía en los diferentes sistemas del motor.

3.4.1 CALOR AÑADIDO O POTENCIA TEÓRICA

El calor añadido es la energía entregada por el combustible al motor. Esta depende directamente del tipo de combustible que se utilice. Se la puede calcular con la siguiente fórmula.

$$P_T = P_C * \dot{m} \quad (3.4)$$

Donde:

P_T : Potencia teórica. [W]

P_C : Poder calórico del combustible. [J/g]

\dot{m} : Flujo másico de combustible. [g/s]

3.4.2 POTENCIA DEL MOTOR

Es la fuerza que ejercen los gases producto de la combustión sobre el pistón, multiplicada por la carrera del pistón en el tiempo de trabajo. Esta potencia no es transferida totalmente hacia el cigüeñal debido a que existen pérdidas de calor, rozamiento, vibraciones, entre otros, que reducen la potencia.

En el motor se tiene tres diferentes tipos de potencia: indicada, efectiva y absorbida.

- **Potencia indicada:** Es la potencia desarrollada por el fluido de trabajo dentro del cilindro y se la calcula con ayuda del diagrama indicado del motor.
- **Potencia efectiva y Par Motor:** estos se obtiene de la pruebas de banco con ayuda de un freno.

Par Motor: es la fuerza que empuja al pistón y que hace girar el codo del cigüeñal mediante el mecanismo biela-manivela, es decir el torque que produce el movimiento de rotación.

Potencia efectiva: Se obtiene al multiplicar el par motor por la velocidad de rotación, también es conocida como potencia al freno debido a que es obtenida mediante la aplicación de un freno al motor.

$$P_e = \tau * \omega \quad (3.5)$$

Donde:

P_e : Potencia efectiva. [W]

τ : Torque del motor. [N*m]

ω : Velocidad de rotación del motor [rad/s]

- **Potencia absorbida:** Esta se obtiene de la diferencia entre la potencia indicada y la potencia al freno. Esta es la utilizada para vencer el rozamiento de los elementos que conformar el motor (pistones, cigüeñal, cojinetes) y también para mover elementos complementarios del motor como son la bomba de agua, bomba de aceite, alternador, etc.

3.4.3 CALOR RECHAZADO – PÉRDIDAS

No toda la energía del combustible es transformada en energía mecánica, en el caso de un motor se tiene una serie de pérdidas entre las cuales se pueden distinguir dos: las pérdidas mecánicas y las térmicas:

- Pérdidas mecánicas: estas son las que se generan por rozamiento o utilización de energía para sistemas complementarios. Este tipo de pérdidas se puede contabilizar del cálculo de la potencia absorbida.
- Pérdidas térmicas: dentro de las pérdidas térmicas más representativas se tiene las producidas por el sistema de refrigeración que es indispensable para un correcto funcionamiento del motor y el calor rechazado por los gases de escape, una vez que estos gases entregan su energía al motor salen todavía con un poco de energía térmica.

3.4.4 EFICIENCIA

La eficiencia de un motor es la cantidad de potencia útil generada, respecto a la cantidad de energía térmica utilizada para producirla. Si se considera que la potencia teórica producida por el combustible es de 100% en el motor se pueden diferenciar varios tipos de eficiencias como son:

- Eficiencia termodinámica indicada= $\text{Potencia indicada} / \text{Potencia teórica}$.
- Rendimiento Mecánico= $\text{Potencia efectiva} / \text{Potencia indicada}$.
- Eficiencia Termodinámica= $\text{Potencia efectiva} / \text{Potencia Teórica}$.

3.5 CURVAS CARACTERÍSTICAS

Las curvas características de un motor indican cual es el funcionamiento de este, respecto a cargas aplicadas a diferentes regímenes de trabajo. Estas curvas permiten comparar motores entre sí para poder ver cuál es el más conveniente respecto a potencia o consumo.

Los motores generalmente son sometidos a diferentes tipos de aplicaciones en la industria, por lo cual se tiene dos tipos de curvas para evaluar su comportamiento. A continuación se analiza cuales son estas curvas.

3.5.1 CURVAS DE VELOCIDAD

Este tipo de curvas son utilizadas para analizar el comportamiento de motores que son utilizados para el transporte, ya que estas son las que mejor simulan las condiciones de trabajo en este tipo de aplicación.

En este tipo de curvas la velocidad de rotación del motor y la carga varían, mientras el acelerador se mantiene en una misma posición. Las curvas en este caso están en función de la velocidad de rotación del motor y se pueden obtener las siguientes curvas:

- Torque (τ) vs RPM
- Potencia al freno (P_f) vs RPM
- Eficiencia (η) vs RPM
- Consumo específico de combustible (*c. e. c.*) vs RPM

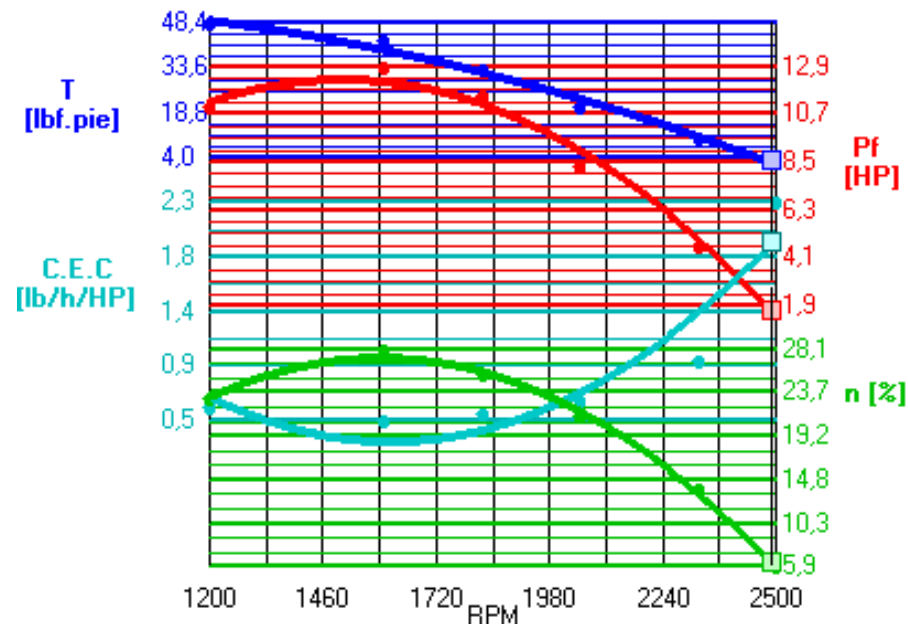


Figura 3.15. Curvas características de velocidad²⁷

²⁷ Programa GZ-MOTOR, ZURITA Gabriela, 2007, Curvas de velocidad.

3.5.2 CURVAS DE CARGA

Cuando el motor requiere funcionar a una velocidad de rotación constante se utiliza este tipo de curvas características. Este comportamiento se tiene en motores que son utilizados en la generación de energía eléctrica o en motores utilizados en sistemas de bombeo, en estas aplicaciones es indispensable tener la velocidad de rotación del motor constante, por ejemplo en la generación eléctrica la frecuencia de la electricidad está directamente relacionada con la velocidad del motor y el tipo de generador.

Para obtener estas curvas las RPM del motor permanecen constantes mientras se varía la carga y el acelerador. Las curvas van a estar en función de la potencia al freno y se pueden obtener las siguientes curvas.

- Eficiencia (η) vs Potencia al freno (P_f)
- Consumo específico de combustible (*c. e. c.*) vs Potencia al freno (P_f)
- Consumo de combustible (*c. c.*) vs Potencia al freno (P_f)

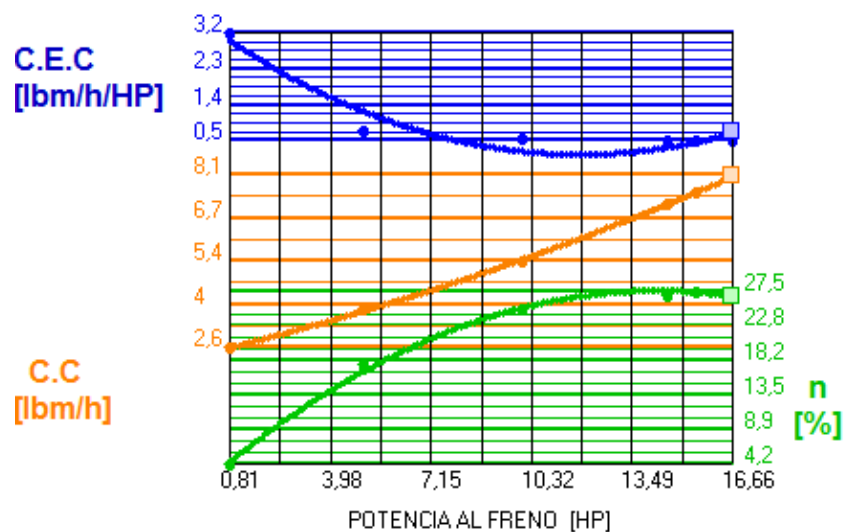


Figura 3.16. Curvas características de carga.²⁸

²⁸ Programa GZ-MOTOR, ZURITA Gabriela, 2007, Curvas de carga.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL EQUIPO

4.1 ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD

El presente estudio tiene como propósito establecer la viabilidad de utilizar aceite vegetal de *Jatropha* en motores Diesel para reducir las emisiones contaminantes producidas al utilizar combustibles fósiles.

4.1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El diseño del sistema para utilizar aceite vegetal como combustible está definido en base al requerimiento del motor diesel y a la condición inicial del aceite.

- **Condición inicial.**

Aceite vegetal con alta viscosidad.

- **Requerimiento.**

Aceite vegetal usado como combustible en motores Diesel.

4.1.2 ESTUDIO DE MERCADO

El estudio de mercado permite ver el entorno que rodea al proyecto, es decir la demanda que existe y cuál es el posible mercado consumidor.

4.1.2.1 Demanda de combustibles.

El mercado que debe abarcar el aceite vegetal de *Jatropha*, es aquel que requiere diesel como combustible. En el Ecuador existe una demanda de diesel que es solventada por la producción que se tiene en las refinerías y también por la importación de derivados de petróleo.

En nuestro país el diesel es utilizado como fuente de energía para la industria y también en el sector del transporte. El mercado ecuatoriano consta de diferentes

tipos de diesel que pueden ser utilizados de acuerdo a las necesidades. Por ejemplo se tiene el Diesel No. 1 que se utiliza en maquinaria que tiene grandes cambios de velocidad y carga. El Diesel No.2 en cambio se utiliza en motores de combustión interna de autoignición y el Diesel No.2 de bajo contenido de azufre que se utiliza en automotores diesel que lo requieran.²⁹

En el siguiente gráfico se puede ver la demanda que existe de estos productos de acuerdo a los datos de la Dirección Nacional de Hidrocarburos.

Tabla 4.1. Venta de derivados de petróleo en barriles.

Derivado	Año	2002	2003	2004	2005
DIESEL OIL No. 1		282.512	277.129	806.631	203.549
DIESEL OIL PREMIUM		383.729	61.709	616.430	146.514
DIESEL OIL No. 2		16.793.511	17.176.383	17.772.233	20.631.775

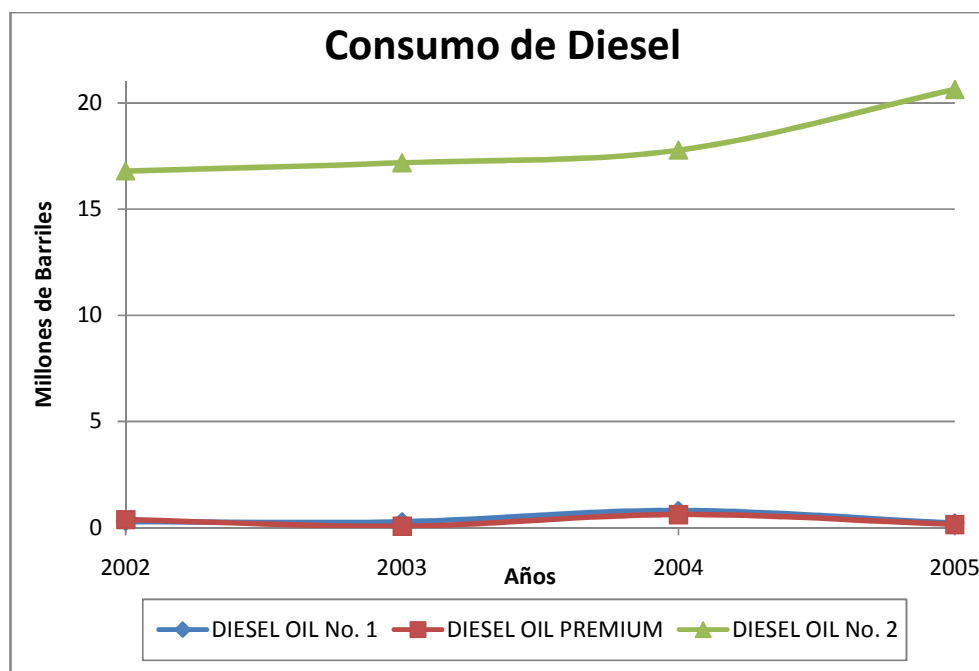


Figura 4.1. Venta de combustibles en barriles

²⁹ Fuente: Norma NTE INEN 1489, Productos derivados del Petróleo. Diesel Requerimientos.

El Ecuador cuenta con algunas refinerías las cuales son las encargadas de producir una parte de los derivados que demanda el país, en la siguiente tabla se puede ver la producción de los diferentes tipos de diesel.

Tabla 4.2 Producción de diesel en el Ecuador en barriles.

DERIVADOS	2002	2003	2004	2005
DIESEL 1	536439	515841	549148	454094,8
DIESEL 2	12177618	11148888	12046836	12499261
DIESEL PREMIUN	460165	87520	801352	110448

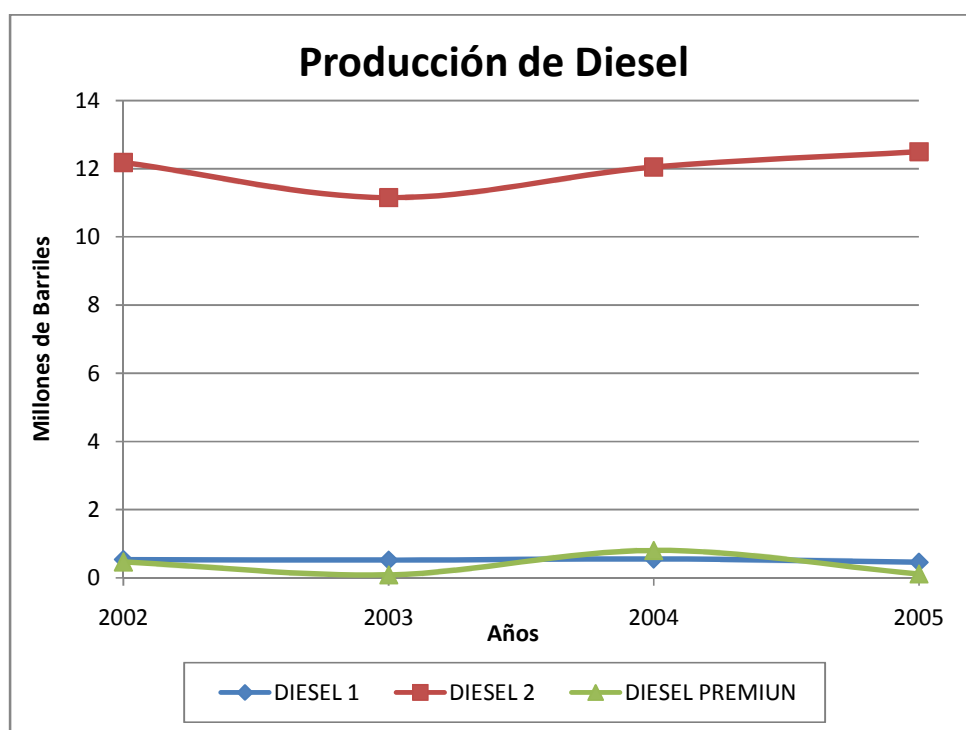


Figura 4.2 Producción de diesel en el Ecuador en barriles año.

4.1.2.2 Estudio de mercado de los motores Diesel³⁰

Se debe tener en cuenta que el presente estudio de mercado toma en cuenta los motores diesel usados en automotores, y que se asume que los tipos de vehículos vans, camiones y buses, son los más representativos.

³⁰ http://www.aeade.net/index.php?option=com_content&task=view&id=16&Itemid=44

Cabe recalcar también que el segmento de camionetas y vehículos todo terreno tiene varios modelos que funcionan a diesel, pero no se los tomará en cuenta en el presente estudio.

Tabla 4.3. Ventas anuales de automotores en el Ecuador.

MERCADO NACIONAL	2003	2004	2005	2006	2007
AUTOMOVILES	26313	28474	41695	42710	38565
CAMIONETAS	13472	14198	17734	18940	20660
TODO TERRENO	8639	10009	12647	15384	19769
VANS	2813	2372	2054	1555	1917
CAMIONES Y BUSES	4219	4099	6280	5916	10867
TOTAL	55456	59151	80410	84505	91778

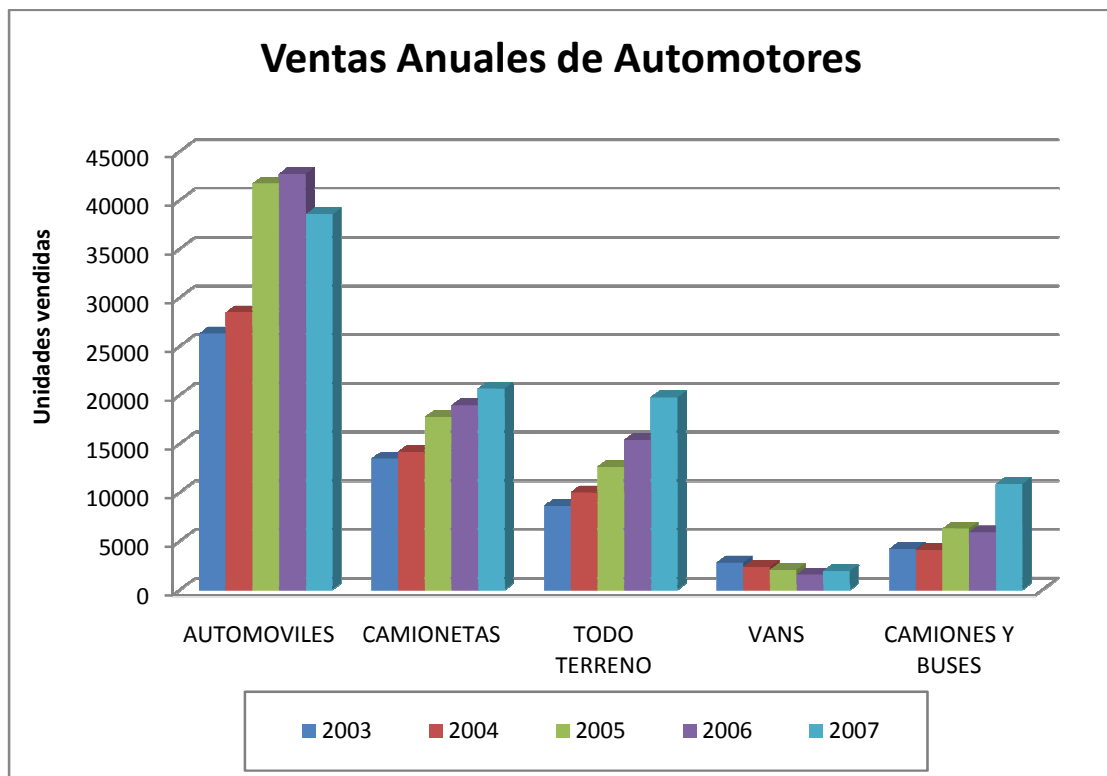


Figura 4.3. Ventas anuales de automotores en el Ecuador.

Tabla 4.4. Composición de las ventas de automotores en el Ecuador.

COMPOSICIÓN DE LAS VENTAS EN ECUADOR					
AÑO	ENSAMBLAJE LOCAL	%	IMPORTACIONES	%	TOTAL
2001	20316	37,85	33357	62,15	53673
2002	21047	30,34	48325	69,66	69372
2003	22768	41,06	32688	58,94	55456
2004	22230	37,58	36921	62,42	59151
2005	29528	36,72	50882	63,28	80410
2006	31496	37,27	53009	62,73	84505
2007	32591	35,51	59187	64,49	91778

Tabla 4.5. Ventas anuales por tipo de vehículos en el Ecuador

VENTAS ANUALES POR TIPO DE VEHÍCULO						
AÑO	AUTOMÓVILES	CAMIONETAS	TODO TERRENO	VANS	CAMIONES Y BUSES	TOTAL
2001	21616	12973	12762	1349	4973	53673
2002	29296	16103	12910	2664	8399	69372
2003	26313	13472	8639	2813	4219	55456
2004	28474	14198	10009	2372	4098	59151
2005	41695	17734	12647	2054	6280	80410
2006	42710	18940	15384	1555	5916	84505
2007	38565	20660	19769	1917	10867	91778

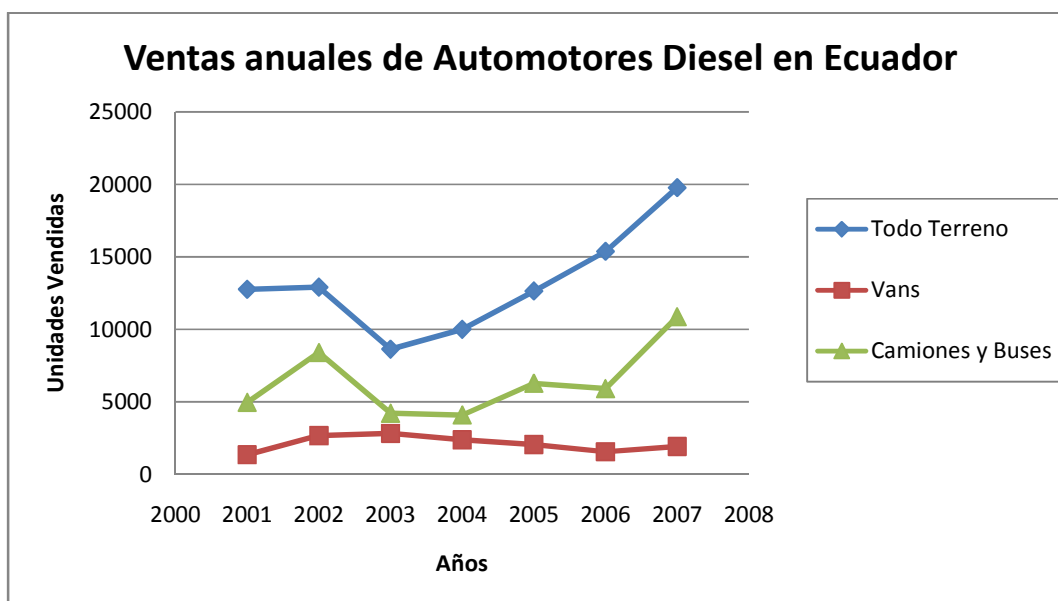


Figura 4.4. Ventas anuales de automotores en el Ecuador.

Tabla 4.6. Vehículos matriculados en el 2008.

COSTA				
	MENOR	LIVIANO	PESADO	TOTAL
EL ORO	5164	7250	1214	13628
ESMERALDAS	2982	2314	725	6021
LOS RIOS	11155	12086	3108	26349
MANABÍ	8238	16827	2574	27639
SANTA ELENA	1409	2335	389	4133

SIERRA				
	MENOR	LIVIANO	PESADO	TOTAL
AZUAY	1663	27323	3125	32111
BOLIVAR	327	3271	637	4235
CAÑAR	1702	5962	1032	8696
CARCHI	820	4969	1018	6807
COTOPAXI	1552	10585	1842	13979
CHIMBORAZO	676	9251	1296	11223
IMBABURA	1294	10895	1456	13645
LOJA	887	9150	1213	11250
PICHINCHA	7828	101307	7085	116220
TUNGURAHUA	1005	21320	2725	25050
SANTO DOMINGO DE LOS TSACHILAS	4646	8528	2535	15709

AMAZONÍA				
	MENOR	LIVIANO	PESADO	TOTAL
MORONA SANTIAGO	364	624	220	1208
NAPO	327	663	170	1160
PASTAZA	281	873	274	1428
ZAMORA	409	670	184	1263
SUCUMBIOS	1806	653	308	2767
ORELLANA	1277	712	386	2375

REGIÓN INSULAR				
	MENOR	LIVIANO	PESADO	TOTAL
GALÁPAGOS	119	219	51	389

TOTAL PAIS	55931	257787	33567	347285
-------------------	--------------	---------------	--------------	---------------

4.1.3 ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE MERCADO

Como se observa en el estudio de mercado se tiene una demanda de combustibles mayor a la capacidad de producción de las refinerías estatales. Este déficit es cubierto por la importación de combustibles, lo que representa un gran problema para el estado ecuatoriano ya que éste subsidia los combustibles generando un gasto elevado para el gobierno.

Como se puede apreciar claramente en los datos consultados, el parque automotor con motores diesel crece cada año, lo cual indica que se tiene un gran mercado al cual se puede ofertar combustibles que son una alternativa al diesel como son el biodiesel y el aceite de Jatropha objeto de este estudio.

Adicional a esto se tienen también datos de los vehículos matriculados en el Ecuador en el año 2008 a excepción de la provincia del Guayas, entonces se toma en cuenta solo los automotores del tipo pesado, que complementan el criterio anterior del mercado de motores Diesel que existe en el país.

El crecimiento del parque automotriz en el país es notorio lo que da una buena perspectiva para el uso de diferentes tipos de combustibles y tecnologías que ayuden a reducir el consumo de derivados del petróleo.

Uno de los principales problemas del crecimiento del parque automotor en el Ecuador es el incremento en las emisiones contaminantes, esto impulsa la búsqueda de nuevos combustibles que reduzcan o atenúen la producción de contaminantes.

4.1.4 RESTRICCIONES Y LIMITACIONES

Dentro del proyecto se debe considerar las diferentes limitaciones que presenta el medio para el desarrollo del diseño y la fabricación del precalentador de combustibles para motores Diesel, por lo cual se deben considerar los siguientes factores:

4.1.4.1 Restricciones Económicas y Financieras

Dentro de nuestro medio una de las restricciones más grande es el aspecto económico, el cual tienen varios puntos importantes que son necesarios analizar.

- **Capital inicial:**

Uno de los inconvenientes dentro de la implementación de un nuevo proyecto es el capital inicial, este debe ser considerable por que debe solventar todos los gastos requeridos en el desarrollo, producción y comercialización del mismo. Estas sumas son elevadas debido a que se requiere mano de obra, maquinaria, instalaciones, entre otros.

- **Créditos:**

Para la obtención de un crédito, la Banca Nacional solicita una serie de garantías dependiendo del monto del crédito por lo que es sumamente difícil empezar con un pequeño proyecto, debido a que las garantías generalmente son el doble del monto pedido.

- **Intereses:**

El desarrollo de un país se basa en la economía, por lo que el emprender un proyecto no es muy viable si las tasas de interés son altas, además hay que considerar que este país posee una moneda fuerte como es el dólar pero las entidades bancarias tienen altas tasas de interés. La tasa de interés en este país para créditos con fines productivos es de 10.21%³¹ anual, que comparado con otros países como E.E.U.U. que posee una tasa de interés de 4.75%³², que es baja lo que incentiva a la producción y al desarrollo.

4.1.4.2 Restricciones Tecnológicas

Nuestro país tiene serias restricciones tecnológicas debido a que no se invierte lo suficiente en el desarrollo e investigación de nueva tecnología, por lo que no existen motores a diesel que hayan sido diseñados exclusivamente para funcionar con aceites vegetales puros, ya que en el Ecuador es nuevo el uso de este tipo de combustibles. Por otra parte, el total desconocimiento que tiene el público en

³¹<http://www.bce.fin.ec/docs.php.documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasInteres/Indice.htm>

³²<http://www.imconsultingcr.com/?p=875>

general sobre el uso de combustibles no tradicionales dificulta el desarrollo de este tipo de proyectos.

4.1.5 ESPECIFICACIONES DEL BANCO DE PRUEBAS DE MOTOR DIESEL DEL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA³³

Para realizar las pruebas utilizando aceite vegetal como combustible, se va a utilizar el banco de pruebas de motor Diesel del Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, que consta de los siguientes elementos:

- Un motor Diesel de marca Perkins, sus especificaciones se mencionan a continuación.

Tabla 4.7. Especificaciones del motor diesel del laboratorio de termodinámica.

Tipo	Diesel
No. De cilindros	Cuatro (cuatro tiempos)
Sistema de refrigeración	Circulación forzada de agua por bomba
Volumen de cilindrada	24,75 pulg ³
Relación de compresión	20:1
Campo de revoluciones	0 a 5000 rpm
Lubricación	Aceite SAE 30 para motor diesel
Alimentación de combustible	Por gravedad
Arranque	Motor eléctrico de arranque.
Orden de encendido	1-3-4-2

³³ ZURITA M., Creación de un software didáctico para el reconocimiento de las prácticas de motores diesel y gasolina, Tesis de Ingeniería Mecánica, EPN, Quito, 2007.

- Un freno hidráulico con las siguientes especificaciones:

Tabla 4.8. Especificaciones del freno hidráulico.

Tipo	Hidráulico- Froude
Potencia efectiva	150 BHP a 7500 rpm
Campo de revoluciones	500 a 7500 rpm
Brazo de potencia	14 pulg.

- Caja de aire, este sirve para medir el flujo de aire que ingresa al motor.

Diámetro de la placa orificio 1,3745 pulg.

Los datos que se pueden obtener en el banco de pruebas son: Torque en el eje del motor, Potencia al freno, Potencia media efectiva al freno, consumo de combustible.

4.1.6 PARÁMETROS DE DISEÑO.

El objetivo principal del diseño del precalentador es hacer posible el uso de aceites vegetales como combustible en los motores Diesel, por ello se requiere establecer cuáles son los parámetros que condicionan el diseño del precalentador.

Al realizar la recolección de información se tiene un mejor panorama sobre el diseño del precalentador, donde los principales parámetros a ser tomados en cuenta son:

- **Propiedades físicas del Aceite:** dentro de estas propiedades las más importantes para diseñar el precalentador de aceite vegetal son: la conductividad térmica del aceite, su calor específico, y la viscosidad, se debe poner especial énfasis en esta propiedad ya que es la razón por la que se desea construir el precalentador debido a que la viscosidad del aceite vegetal de *Jatropha* a temperatura ambiente es mayor que la posee el diesel.

Por este motivo es indispensable conocer el comportamiento de la viscosidad del aceite vegetal con respecto a la temperatura, ya que esto permitirá conocer la temperatura ideal de calentamiento a la que debe llegar el aceite, para poder ser usado en motores diesel.

- **Temperaturas de entrada y salida del aceite de Jatropha:** una vez obtenido el comportamiento que presenta la viscosidad del aceite vegetal de Jatropha respecto a la temperatura, se puede establecer la temperatura a la que se debe calentar al aceite para que tenga una viscosidad similar a la del diesel.

Esta sería la temperatura que debe poseer el aceite de Jatropha luego de haber ingresado al precalentador, la temperatura de ingreso depende de las condiciones ambientales.

- **Fuente de energía para calentar el aceite vegetal de Jatropha:** el proyecto desea aprovechar las pérdidas de energía térmica que posee un motor de combustión interna, es decir, se plantea usar como fuente de energía el calor contenido en los gases de escape que se expulsan al ambiente y/o el calor que se extrae mediante el sistema de refrigeración.
- **Ubicación y tamaño:** el precalentador va a ser ubicado en el banco de pruebas de motor diesel del laboratorio de termodinámica, se debe tener en cuenta que al ser un banco de pruebas no se pueden realizar modificaciones al mismo, por lo que el tamaño y forma del precalentador debe adaptarse al espacio físico con el que se cuenta en dicho banco.

Además se debe mencionar que el precalentador va a funcionar con un sistema de alimentación de combustible adicional, por lo que se requiere otro tanque de combustible a través del cual se alimente el aceite de Jatropha.

- **Arranque del motor en frío y apagado:** debido a la viscosidad que posee el aceite de *Jatropha* a temperatura ambiente, es necesario arrancar el motor utilizando diesel hasta conseguir la temperatura normal de funcionamiento, mientras esto sucede el aceite contenido en el precalentador se calentará hasta adquirir la temperatura deseada. Una vez logrado esto se puede cambiar el combustible de diesel a aceite sin que el motor se detenga, es decir, siga funcionando. Antes de apagar el motor se debe cambiar el combustible nuevamente a diesel, con el fin de limpiar de aceite de *Jatropha* el sistema de alimentación de combustible, para que los elementos que conforman el mismo no sufran ninguna avería debida a la alta viscosidad del aceite al descender la temperatura del motor.

4.1.7 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACEITE DE JATROPHA

Para obtener las propiedades físicas del aceite se realizó un estudio titulado **“Caracterización del aceite obtenido de variedades locales de piñón”**, que fue elaborado por el Ingeniero Oswaldo Proaño en los laboratorios de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional los resultados están tabulados en la tabla 1.2.

Además de las propiedades que se tiene en la tabla 1.2 se requiere conocer la conductividad térmica y el calor específico, para los cálculos del precalentador.

4.1.7.1 Conductividad Térmica

La conductividad térmica es la propiedad inherente de un fluido y se define como la capacidad que tiene el mismo para transferir calor entre sus moléculas.

$$\text{Conductividad térmica: } k \text{ [W/m}^\circ\text{C]} = 0,169^{34}$$

Este valor de conductividad es un valor promedio para todas las grasas y aceites vegetales.

³⁴ HELDMAN D., Handbook of Food Engineering, Editorial Board, 1992, Pag. 250.

4.1.7.2 Calor Específico

El calor específico es la cantidad de energía interna que puede almacenar un cuerpo para incrementar en una unidad de temperatura una unidad de masa, es decir para aumentar 1 °C a un 1Kg de masa. En las tablas 4.9 y 4.10 se observan las propiedades físicas de diferentes sustancias.

Tabla 4.9. Valores de algunas propiedades físicas.³⁵

Sustancia	Peso específico [kg/dm ³]	Punto de fusión [°C]	Punto de ebullición [°C]	Calor específico [kcal/kg°C]
Aceite de colza	0,91	- 3,5	300	0,47
Aceite combustible	0,92	- 5	175 a 350	-
Aceite diesel	0,88	- 5	175	-
Aceite de linaza	0,94	-20	316	-
Aceite gas	0,86	-	200 á 350	-
Aceite de máquina	0,91	- 5	380 á 400	0,40
Aceite resina	0,96	-20	150 á 300	-
Acero	~7,85	~1350	2500	0,11
Ácido cianhídrico	0,7	-15	27	-
Ácido nítrico	0,99	-92,5	19,5	-
Ácido sulfuroso	1,49	-73	-10,0	0,32
Ácido sulfúrico cristalino	1,84	10 á 0	330	0,33
Ágata	~2,6	~1600	~2600	0,19
Algodón	1,5	-	-	0,324
Aluminio	2,6	658	~2200	0,216
Aluminio	2,7	658	~2200	0,216
Aluminio bronce	7,7	1040	~2300	0,104

Tabla 4.10. Valores de calor específico de diversos líquidos.³⁶

Líquido	Calor específico $\left[\frac{kJ}{kg K}\right]$
Alcohol	2,43
Aceite vegetal	1,97
Leche	3,90
Agua	4,19

³⁵ http://www.sapiensman.com/conversion_tables/peso_especifico.htm

³⁶ <http://www.info@ld-didactic.de.html>.

De la tabla 4.9 se puede observar el valor del calor específico para el aceite de colza es de $1,96 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{C}$, y de la tabla 4.10 el valor para el aceite vegetal es de $1,97 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{C}$. De estos valores se asume para el aceite de Jatropha un valor aproximado de **$1,97 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{C}$** .

4.1.7.3 Viscosidad

Uno de los problemas que se tiene con el aceite vegetal es que la viscosidad del mismo es alta en comparación al diesel, por lo que es necesario conocer cuál es el comportamiento de la viscosidad respecto a la temperatura. Para lo cual se tomaron los valores de la viscosidad a diferentes temperaturas las cuales están tabuladas en la tabla 4.11, y representadas en la figura 4.5.

Tabla 4.11. Comportamiento de la viscosidad del aceite respecto a la temperatura.

Temperatura [°C]	Viscosidad [cts]
40	33,67
60	17,78
80	11,044
90	10,141

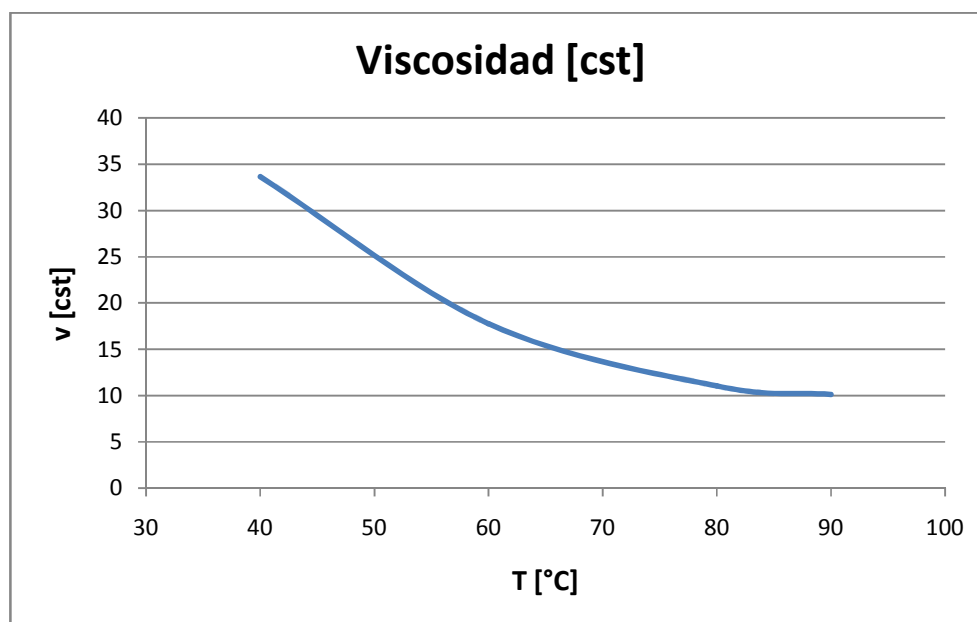


Figura 4.5. Gráfico de la viscosidad del piñón respecto a la temperatura.

Tabla 4.12. Comparación entre el aceite de piñón y el diesel N° 2.³⁷

REQUISITOS	UNIDAD	DIESEL No. 2		ACEITE	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Punto de inflamación	°C	51	-	220	-
Agua y sedimento	% en volumen	-	0,05	-	0,0
Residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación	% en peso	-	0,15	-	0,315
Cenizas	% en peso	-	0,01	-	0,027
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	360	-	320
Viscosidad cinemática a 37,8°C	cSt	2,5	6	-	40,8
Azufre	% en peso	-	0,7	-	-
Corrosión a la lámina de cobre	-	-	No. 3	-	No. 1
Índice de cetano calculado	-	45		51	-

En la tabla 4.12 se puede observar la comparación de las propiedades como combustible del aceite vegetal de *Jatropha* y el Diesel No 2. Estos valores son los requerimientos que debe cumplir un combustible para motores diesel.

4.2 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

Este estudio permite escoger la mejor alternativa para la implementación del precalentador de combustible, esta debe cumplir con los requerimientos de trabajo del equipo y presentar ventajas económicas, de diseño, facilidad de uso de elementos normalizados en su construcción, facilidades de montaje y desmontaje, y mantenimiento.

En la tabla 4.13 se muestran las especificaciones que debe cumplir el precalentador, es importante recalcar que estas especificaciones son planteadas por los diseñadores del sistema de acuerdo a las necesidades del proyecto.

³⁷ Fuente: Norma NTE INEN 1489, Productos derivados del Petróleo. Diesel Requerimientos.

Tabla 4.13. Tabla de especificaciones.

Empresa Cliente: E.P.N		Producto: Precalentador de combustible		Fecha inicial: 30/11/2008 Ultima revisión: 07/05/2009
Empresa de Ingeniería: Pillajo & Salazar S.A.				Página 1 de 2
ESPECIFICACIONES				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	12/12/08	I	R	Elevar la temperatura del aceite vegetal de Jatropha para ser utilizado como combustible en motores diesel.
Dimensiones	12/12/08	I	R	Las dimensiones están restringidas al tamaño del banco de pruebas del motor diesel del laboratorio de Termodinámica.
Movimiento	12/12/08	I	R	Para el intercambio de tipo de combustible se requiere el uso de válvulas, que permitan el cambio mientras el motor este en uso.
Fuerzas	12/12/08	I	R	Peso máximo del tanque de combustible 20kg.
Materiales	12/12/08	I	R+D	Resistencia a la corrosión (Acero inoxidable, o acero común con un proceso de cromado).
		I	R	Alto coeficiente de conducción térmica.
Señales y control	12/12/08	I	R	Sensores de temperatura. Mantener constante la temperatura del aceite antes de ingresar al motor.
		I	R	
		C	R	Propuesta: existencia de un tablero de control de fácil utilización.

Costos	12/12/08	I	R	Moderado; tomando en cuenta la mano de obra nacional y selección las mejores alternativas que se encuentren en el mercado.
Seguridad y ergonomía	12/12/08	I I I I C	R R R R D	Aislamiento térmico. Estructura para montaje sobre el motor. Hermeticidad del sistema. Facilidad en la manipulación de los dispositivos. Altura recomendada para comodidad de los operarios 1,50 m. Facilidad para realizar el cambio de combustible a otro.
Energía	12/12/08	I	R	Utilización de energía eléctrica.

Donde:

- I = Ingeniería
- R = Requerimiento
- C = Cliente
- D = Deseo

4.2.1 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Si se estudia el funcionamiento de un motor diesel, se comprende que el sistema de refrigeración sirve para extraer una parte del calor generado por la combustión con el fin de preservar las propiedades de los materiales que constituyen los elementos del motor. Además parte de la energía producida por la combustión es desechada en los gases de escape.

El estudio de las alternativas para precalentar el combustible consiste en aprovechar el calor desechado por el motor al ambiente a través de los sistemas anteriormente mencionados.

4.2.1.1 Alternativa A

Esta alternativa consiste en aprovechar la energía desechada por el motor en los gases de escape, para lo cual es recomendable que el precalentador sea un intercambiador de calor de flujo cruzado, debido a que uno de los fluidos es un gas y el otro fluido es el aceite de Jatropha.

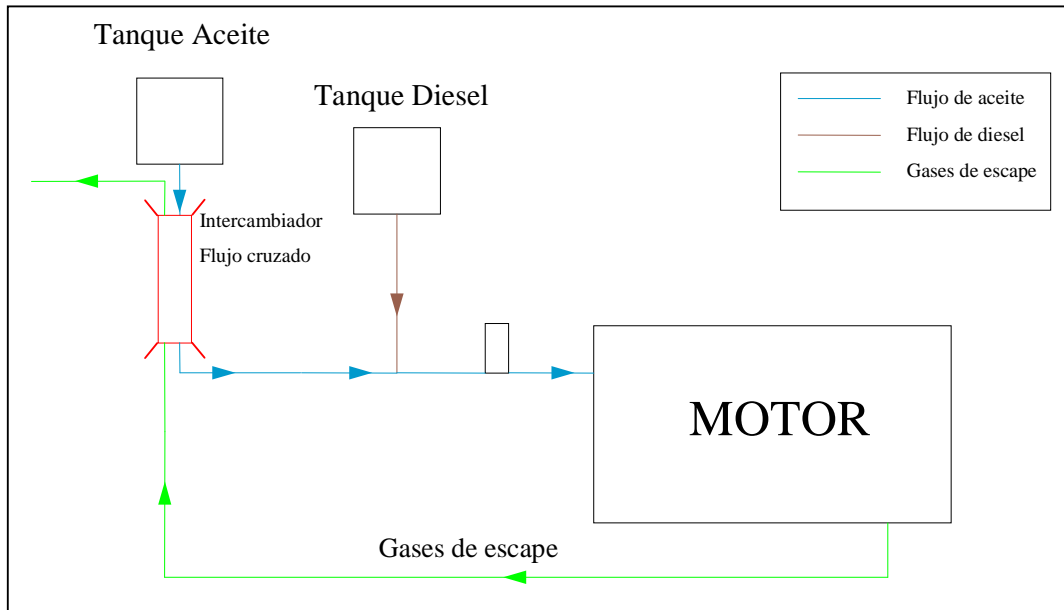


Figura 4.6. Esquema de la alternativa A.

Como se observa en la figura 4.6 el sistema de precalentamiento de combustible planteado consta de un intercambiador de flujo cruzado, un tanque de almacenamiento para el aceite de Jatropha y las válvulas para hacer el intercambio de combustibles.

Se debe considerar que el intercambiador va a estar expuesto a la acción corrosiva de los gases de escape, por lo que se debe realizar el mantenimiento del equipo en forma exhaustiva, ya que uno de los fluidos es un combustible y el contacto con los gases de escape puede producir una explosión.

4.2.1.2 Alternativa B

Consiste en aprovechar el calor que recoge el sistema de refrigeración del motor para calentar el aceite vegetal que se desea utilizar como combustible. El motor diesel del banco de pruebas del laboratorio de Termodinámica cuenta con un circuito abierto de refrigeración, es decir, que el agua utilizada para refrigerar el motor es la de la red de agua potable y una vez que refrigera el motor esta agua es desechada a un sumidero.

El sistema de precalentamiento de combustible consistiría básicamente en utilizar el agua de refrigeración del motor para que intercambie calor con el aceite de Jatropha en un intercambiador de calor de tubos concéntricos. Como se mencionó anteriormente el sistema de refrigeración del motor es abierto por lo que el agua de refrigeración no alcanza la temperatura a la que se requiere calentar el aceite, por este motivo se ha planteado utilizar adicionalmente una resistencia eléctrica que permita llevar al aceite a la temperatura requerida.

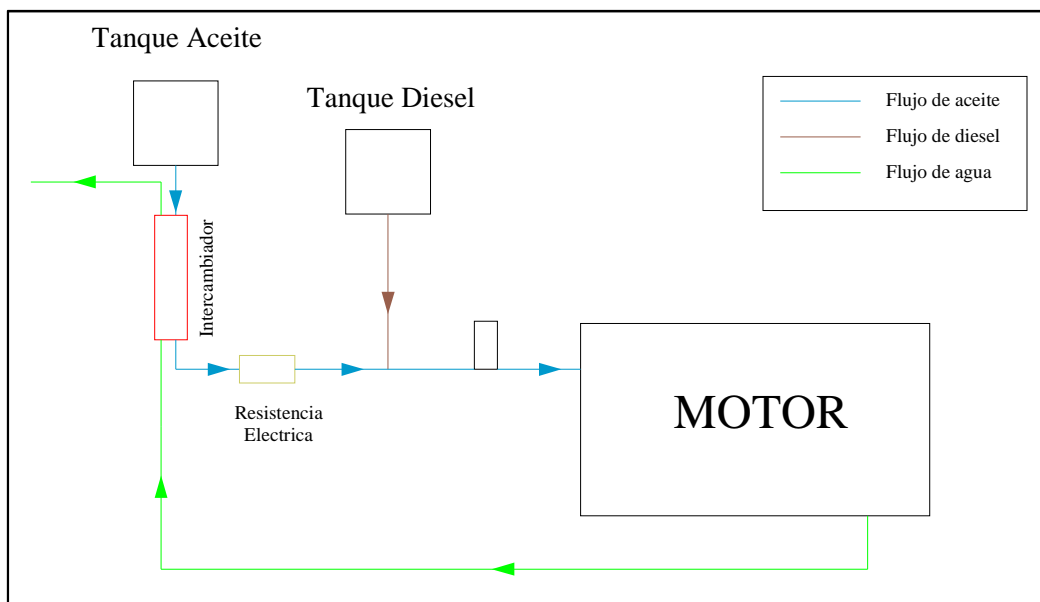


Figura 4.7. Esquema de la alternativa B.

El esquema de la figura 4.7 muestra las partes constitutivas de la alternativa planteada, la cual está conformada de un tanque de almacenamiento de aceite, un intercambiador de tubos concéntricos, una resistencia de calentamiento y las válvulas para que el sistema permita el intercambio de combustibles.

4.2.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVA

Para seleccionar la alternativa más óptima para el diseño del precalentador de combustible se debe conocer cuáles son las desventajas y ventajas de cada alternativa con el fin de tener una idea clara de por qué se seleccionaría cualquiera de las dos. En la siguiente tabla se describen las ventajas y desventajas de cada alternativa.

Tabla 4.14. Ventajas y desventajas de las alternativas.

ALTERNATIVA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alternativa A	<ul style="list-style-type: none"> • Aprovechamiento de la energía desechada por el motor en los gases de escape. • Los gases de combustión salen a altas temperaturas. • Las dimensiones del intercambiador son pequeñas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Intercambiador complejo. • Precio del intercambiador relativamente caro. • La temperatura de los gases de escape varía en función de la carga del motor. • Los gases de escape son corrosivos.
Alternativa B	<ul style="list-style-type: none"> • Aprovechamiento de la energía térmica del agua de refrigeración. • Fácil adquisición de la materia prima. • Facilidad de construcción. • Precio relativamente bajo. • Seguro. 	<ul style="list-style-type: none"> • El agua no alcanza la temperatura requerida. • Uso de la resistencia eléctrica. • Sistema de control. • La temperatura del agua varía en función de la carga del motor.

A más de conocer cuáles son las ventajas y desventajas de cada alternativa, también se va a analizar algunos criterios que son importantes para tomar una decisión. Entre los más representativos tenemos los siguientes:

- **Seguridad**

La seguridad siempre es uno de los parámetros más importantes a tomar en cuenta, ya que siempre hay que salvaguardar la integridad de las personas que van a operar el equipo.

- **Costo de fabricación**

Este criterio se relaciona con la fase de construcción del equipo, es decir los materiales que se van usar, la forma de sujeción de los mismos y todos los equipos que se van usar en el montaje de las partes del equipo.

- **Costo de operación**

El costo de operación tiene que ver con el uso de energía por parte del equipo.

- **Costo de mantenimiento**

Este criterio considera el uso de elementos de fácil montaje para el ensamble y desensamble del equipo con el objetivo de facilitar su mantenimiento. Su valoración dependerá de la cantidad de elementos que constituyan el sistema.

- **Confiabilidad y eficiencia**

Los parámetros que intervienen dentro de este criterio corresponden al correcto funcionamiento del equipo el momento de su uso. La funcionalidad se refiere al desempeño que tendrá un sistema o elemento en la aplicación para la que fue diseñado.

- **Disponibilidad de materiales en el mercado**

Con respecto a la construcción y reparación del equipo se hace necesario disponer de todos los materiales en el mercado nacional.

- **Estética**

Este parámetro corresponde a la apariencia que presenta el modelo ante el consumidor.

- **Disponibilidad de la energía**

Se refiere a la disponibilidad de energía térmica que se tiene para calentar el aceite.

- **Tipo de control**

Esto depende si se requiere algún tipo de control electrónico, o también a la complejidad del mismo.

- **Fácil montaje**

Un fácil montaje tiene que ver con la complejidad en el ensamblaje de todos los elementos que constituyen el sistema y la relación existente entre ellos.

- **Peso**

Evalúa el esfuerzo requerido para transportar, elevar y trasladar el equipo, hacia su sitio de funcionamiento.

Para evaluar estos parámetros se les va a dar un factor de incidencia a cada uno de acuerdo a la importancia que representan y se va a calificar a cada alternativa sobre 10, es decir 10 es lo mejor y 0 lo peor. La alternativa que obtenga la mayor ponderación será la más apropiada para el diseño.

Tabla 4.15. Ponderación de parámetros para cada alternativa.

Parámetros	Factor de incidencia	Alternativa A		Alternativa B	
		10	cal	10	cal
Seguridad	0,15	4	0,6	7	1,05
Costos de fabricación	0,13	2	0,26	7	0,91
Costos de operación	0,08	8	0,64	7	0,56
Costos de mantenimiento	0,05	5	0,25	5	0,25
Confiabilidad y eficiencia	0,1	8	0,8	8	0,8
Disponibilidad de materiales	0,07	7	0,49	7	0,49
Estética	0,09	6	0,54	6	0,54
Disponibilidad de energía	0,1	8	0,8	8	0,8
Tipo de control	0,1	6	0,6	4	0,4
Facilidad montaje	0,07	2	0,14	8	0,56
Peso	0,06	6	0,36	6	0,36
TOTAL	1		5,48		6,72

De acuerdo a la tabla de ponderación se tiene que la alternativa B, obtuvo una mayor calificación por lo tanto es la alternativa seleccionada.

4.2.3 TOMA DE VALORES DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

Para iniciar el diseño del precalentador, es necesario determinar los valores normales de funcionamiento del motor Diesel para diferentes condiciones de trabajo, es decir los valores de los flujos máxicos de los fluidos que ingresan y salen del motor así como también las temperaturas de los mismos. Para ello se realizaron varias pruebas en el motor diesel del laboratorio de Termodinámica.

Estas se realizaron para dos condiciones de trabajo del motor, como son: aceleración constante y velocidad constante. La condición de aceleración constante consiste en simular en el banco de pruebas las condiciones de trabajo de un motor diesel de aplicación automotriz, mientras que la condición de velocidad constante simula en el banco de pruebas las condiciones de trabajo de un motor estacionario.

Para realizar la prueba de aceleración constante se acelera el motor a un valor determinado de rpm, se procede a colocar carga con ayuda de un freno hidráulico y se toman los datos necesarios variando la carga aplicada por el freno.

En cambio para velocidad constante se escoge una velocidad a la que debe permanecer el motor durante la prueba, luego se procede a colocar carga al motor manteniendo las mismas rpm en el motor.

Tabla 4.16. Datos de Aceleración Constante

F [lbf]	RPM	Agua			Combustible
		Ti [°C]	Ts [°C]	Hcr [plg]	T50cc [s]
6	3300	18	46	1,8	123
3	2400	18	50	2	104
14,6	2000	18	51	1,9	89
24,8	1700	18	51	1,9	62
36	1200	18	53	1,8	59

Tabla 4.17. Datos de Velocidad Constante

F [lbf]	RPM	Agua			Combustible
		Ti [°C]	Ts [°C]	Hcr [plg]	T50cc [s]
1,8	1500	18	43	2,4	151
13,8	1500	18	42	2,2	95
26,2	1500	18	46	2,1	97
36	1500	18	58	2	52

Adicional a esto se midió el caudal de agua para lo cual se utilizó un tubo de Reynolds, el cual muestra el caudal en función de la altura en pulgadas, que se transforma a lb/s con la siguiente fórmula³⁸.

$$\dot{m} = \frac{8.8817 \times Hag^{0.5562}}{60} \quad (4.1)$$

Donde:

Hag = es la altura del agua que se observa en el tubo Reynolds, en pulgadas

El banco de pruebas del motor diesel permite medir el caudal de combustible a través de un medidor, para lo que cual se mide el tiempo que se demora el motor en consumir un volumen de 50 cm³ de combustible. El flujo másico de combustible depende del tipo de combustible utilizado.

Tabla 4.18. Datos calculados de Aceleración Constante

F [lbf]	RPM	Agua				Combustible	
		Ti [°C]	Ts [°C]	Hcr [plg]	Flujo másico [kg/s]	T50cc [s]	Consumo [m ³ /s]
6	3300	18	46	1,8	0,0933	123	4,06504E-07
3	2400	18	50	2	0,0989	104	4,80769E-07
14,6	2000	18	51	1,9	0,0962	89	5,61798E-07
24,8	1700	18	51	1,9	0,0962	62	8,06452E-07
36	1200	18	53	1,8	0,0933	59	8,47458E-07

³⁸ ZURITA M., Creación de un software didáctico para el reconocimiento de las prácticas de motores diesel y gasolina, Tesis de Ingeniería Mecánica, EPN, Quito, 2007.

Tabla 4.19. Datos calculados de Velocidad Constante

F [lbf]	RPM	Agua				Combustible	
		Ti [°C]	Ts [°C]	Hcr [plg]	Flujo másico [kg/s]	T50cc [s]	Consumo [m ³ /s]
1,8	1500	18	43	2,4	0,1095	151	3,31126E-07
13,8	1500	18	42	2,2	0,1043	95	5,26316E-07
26,2	1500	18	46	2,1	0,1017	97	5,15464E-07
36	1500	18	58	2	0,0989	52	9,61538E-07

4.2.4 PARÁMETROS FUNCIONALES

Para el diseño del intercambiador de calor se tomarán en cuenta los siguientes parámetros de diseño, que han sido seleccionados de acuerdo a los datos obtenidos tanto para el agua como para el aceite en las pruebas realizadas en el motor diesel del laboratorio de Termodinámica. Se ha escogido el promedio de los datos, ya que el motor trabaja a diferentes condiciones. Los parámetros de diseño se muestran en la tabla 4.20.

Tabla 4.20. Parámetros funcionales para el diseño

AGUA		
Flujo másico[kg/s]	\dot{m}	0,1
Temperatura ingreso[°C]	T_{wi}	48
Temperatura de salida[°C]	T_{wo}	Cálculo

ACEITE VEGETAL		
Caudal [m ³ /s]	Q	$6,76 * 10^{-7}$
Temperatura ingreso[°C]	T_{ai}	20
Temperatura de salida[°C]	T_{ao}	80*

*Como se observa en la figura 4.5 la viscosidad del aceite no tiene gran cambio respecto a la temperatura desde los 80°C, por lo tanto ésta es la temperatura ideal a la que se va a calentar el aceite de Jatropha para que sea utilizado como combustible en el motor.

4.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA ALTERNATIVA

La alternativa seleccionada consiste en un sistema que está conformado por un tanque de combustible para el aceite de Jatropha, un intercambiador de tubos concéntricos en contra flujo y una resistencia eléctrica.

El sistema tiene el siguiente funcionamiento, el motor Diesel inicialmente se prenderá utilizando diesel o biodiesel, para evitar cualquier problema en el arranque del motor. Una vez que el motor alcance su temperatura normal de operación, se abrirán unas válvulas que permiten el paso del aceite desde el tanque de combustible hacia el intercambiador, luego hacia la resistencia eléctrica que calentará el aceite hasta la temperatura requerida, para luego ser utilizado como combustible.

4.3.1 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS

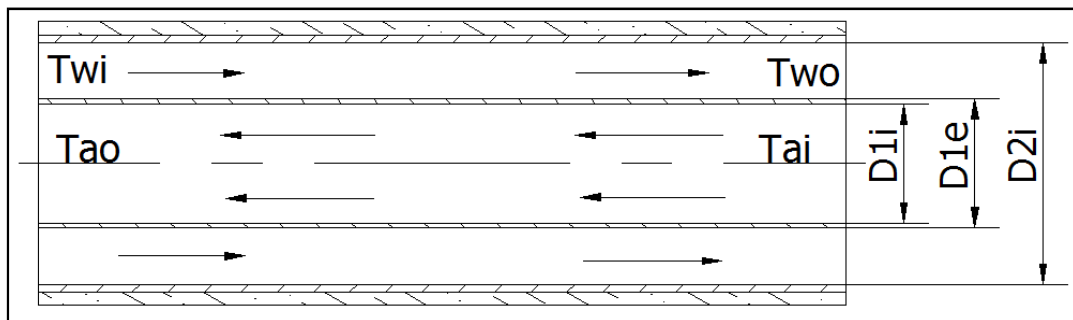


Figura 4.8. Corte transversal de un intercambiador de calor de tubos concéntricos.

Para el dimensionamiento del intercambiador se utiliza el método de la eficiencia-NUT³⁹. Para lo que se procede con los siguientes cálculos:

4.3.1.1 Balance de energías

$$\dot{E}_{entra} + \dot{E}_{generada} = \dot{E}_{almacenada} + \dot{E}_{sale} \quad (4.2)$$

$$\dot{m}_w C p_w T_{wi} + \dot{m}_a C p_a T_{ai} = \dot{m}_w C p_w T_{wo} + \dot{m}_a C p_a T_{ao}$$

$$\dot{m}_w C p_w (T_{wi} - T_{wo}) = \dot{m}_a C p_a (T_{ao} - T_{ai})$$

³⁹ INCROPERA F., Fundamentos de Transferencia de Calor, Editorial Prentice Hall, Cuarta edición, Mexico, 1999, Pag. 599

Donde:

$$\dot{m}_w = \text{Flujo másico del agua} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$Cp_w = \text{Calor específico del agua} \left[\frac{J}{kg^\circ C} \right]$$

$$T_{wi} = \text{Temperatura de entrada del agua al intercambiador} [^\circ C]$$

$$T_{wo} = \text{Temperatura de salida del agua del intercambiador} [^\circ C]$$

$$\dot{m}_a = \text{Flujo másico del aceite} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$Cp_a = \text{Calor específico del aceite} \left[\frac{J}{kg^\circ C} \right]$$

$$T_{ai} = \text{Temperatura de entrada del aceite al intercambiador} [^\circ C]$$

$$T_{ao} = \text{Temperatura de salida del aceite del intercambiador} [^\circ C]$$

4.3.1.2 Transferencia de calor máxima posible

$$C_w = \dot{m}_w Cp_w \quad (4.3)$$

$$C_a = \dot{m}_a Cp_a \quad (4.4)$$

$$q_{max} = C_{min}(T_{wi} - T_{ai}) \quad (4.5)$$

Donde

C_{min} = es el menor valor entre C_w y C_a . [W/°C]

q_{max} = es la transferencia de calor máxima posible [W]

Eficiencia del intercambiador

Para el intercambiador la eficiencia viene dada por:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} \quad (4.6)$$

Donde:

ε = Eficiencia del intercambiador [%]

q = Transferencia de calor real [W]

$$\varepsilon = \frac{(T_{ao} - T_{ai})}{(T_{wi} - T_{ai})}$$

Se conoce la temperatura de ingreso del agua $T_{wi} = 48^\circ C$, la temperatura de ingreso del aceite $T_{ai} = 20^\circ C$, y se asume una eficiencia de 70% que es recomendable para equipos de transferencia de calor, con lo que se puede evaluar la temperatura de salida del aceite T_{ao} , luego de su paso por el intercambiador de calor.

$$T_{ao} = \varepsilon(T_{wi} - T_{ai}) + T_{ai}$$

$$T_{ao} = 0.7(48^\circ C - 20^\circ C) + 20^\circ C$$

$$T_{ao} = 39,6^\circ C$$

Entonces se tiene que la temperatura de salida del aceite de Jatropha es $40^\circ C$ y que la eficiencia del intercambiador de calor aproximadamente es de 71,5 %.

Cálculo de NUT

$$NUT = \frac{1}{C_r - 1} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1} \right) \quad (4.7)$$

Donde: $C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$

La capacitancia térmica es el producto del flujo másico del fluido por el calor específico del mismo. Entonces se tiene que:

$$C_w = \dot{m}_w C_{p_w} \quad y \quad C_a = \dot{m}_a C_{p_a}$$

Tabla 4.21. Cálculo de la capacitancia térmica de los fluidos.

AGUA			ACEITE		
Flujo másico [kg/s]	Cp [J/kg °C]	C [W/°C]	Flujo másico [kg/s]	Cp [J/kg °C]	C [W/°C]
0,1	4180	418	0,0006253	1970	1,231841

Una vez calculadas las capacitancias térmicas de los fluidos, se procede a calcular el NUT.

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{1,231841}{418} = 0,002946988$$

$$NUT = \frac{1}{(2,946 * 10^{-3}) - 1} \ln \left(\frac{0,714 - 1}{0,714(2,95 * 10^{-3}) - 1} \right)$$

$$NUT = 1,254$$

Se requiere dimensionar los diámetros de las tuberías del intercambiador y la longitud del mismo, para ello se usan las siguientes relaciones:

$$NUT = \frac{UA}{C_{\min}}$$

$$UA = \frac{1}{R_T}$$

$$R_T = \frac{1}{UA}$$

$$NUT = \frac{1}{C_{\min} R_T} \quad (4.8)$$

Donde:

NUT = Número de unidades de Transferencia de Calor.

U = Coeficiente global de Transferencia de Calor $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$.

A = Área de Transferencia de Calor $[m^2]$.

R_T = Resistencia térmica total $\left[\frac{^\circ C}{W} \right]$.

La resistencia térmica se calcula en el área de Transferencia de Calor, que en este caso es el área de la tubería interior del intercambiador. Para lo cual se establece el siguiente circuito térmico.

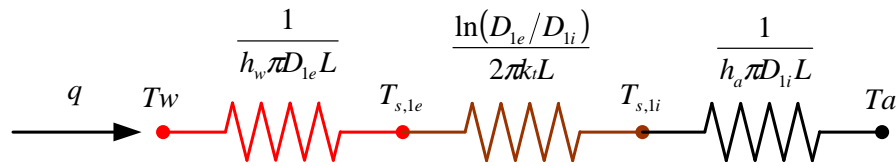


Figura 4.9. Circuito térmico del intercambiador de calor de tubos concéntricos.

$$R_T = \frac{1}{h_w \pi D_{1e} L} + \frac{\ln\left(\frac{D_{1e}}{D_{1i}}\right)}{2\pi k_t L} + \frac{1}{h_a \pi D_{1i} L} \quad (4.9)$$

Donde:

h_w = Coeficiente de convección para el agua $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$.

h_a = Coeficiente de convección para el aceite $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$.

k_t = Conductividad térmica de la tubería interior $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right]$.

D_{1e} = Diámetro exterior de la tubería interior [m].

D_{1i} = Diámetro interior de la tubería 1 (interior) [m].

L = Longitud del intercambiador de calor [m].

Entonces, se obtiene la resistencia térmica en función de los diámetros de las tuberías y la longitud del intercambiador. Los diámetros de las tuberías se deben escoger de acuerdo a las dimensiones existentes en el mercado nacional, y en base a estas dimensiones se obtendrá la longitud definitiva del intercambiador de calor. Ahora es necesario determinar los coeficientes de convección tanto para el agua como para el aceite.

4.3.1.3 Cálculo del coeficiente de convección para el agua.

Para calcular el coeficiente de convección se debe tener en cuenta que el agua circula a través del anillo formado entre los 2 tubos, por lo tanto en las relaciones se debe usar el concepto de diámetro hidráulico. En forma similar las relaciones van a quedar expresadas en función de los diámetros de las tuberías, para

después ingresarlas en una hoja de cálculo y así poder variar los valores de los diámetros para seleccionar la mejor configuración de tuberías.

$$Re_{Dw} = \frac{4\dot{m}_w}{\pi(D_{2i}+D_{1e})\mu_w} \quad (4.10)$$

Donde:

Re_{Dw} = Numero de Reynolds para el anillo de agua.

μ_w = Viscosidad dinámica del agua $\left[\frac{Ns}{m^2}\right]$.

D_{2i} = Diámetro interior de la tubería 2 [m].

A partir del número de Reynolds se puede determinar el número de Nusselt, pero como no se conoce todavía los diámetros de las tuberías, a continuación se detallan las relaciones para calcular este número, teniendo en cuenta que el flujo podría ser turbulento o laminar.

Si el flujo es turbulento con enfriamiento, ya que el agua es el fluido que está cediendo calor al aceite, se tiene entonces:

$$Nu_D = 0,023Re_{D_h}^{4/5}Pr_w^{0.3} \quad (4.11)$$

Donde:

Nu_D = Numero de Nusselt para el agua.

Pr_w = Numero de Prandtl para el agua.

El número de Nusselt también se lo puede calcular de la siguiente manera:

$$Nu_D = \frac{h_w D_h}{k_w}$$

$$D_h = D_{2i} - D_{1e}$$

Donde:

k_w = Conductividad térmica del agua $\left[\frac{W}{m^{\circ}C}\right]$.

D_h = Diámetro hidráulico para el anillo formado por las dos tuberías.

Como ya se conoce el valor del número de Nusselt, se puede entonces hallar el valor del coeficiente de convección.

En caso de ser flujo laminar se escoge el valor de Nu_D , de acuerdo a la relación de los diámetros, según la tabla 4.22.

Tabla 4.22. Numero de Nusselt para flujo laminar completamente desarrollado en un anillo de tubos circulares.⁴⁰

D_i/D_o	Nu_i	Nu_o
0	---	3.66
0.05	17.46	4.06
0.10	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.50	5.74	4.43
1.00	4.86	4.86

4.3.1.4 Cálculo del coeficiente de convección para el aceite.

Se usa la relación del número de Reynolds para el flujo de aceite que circula a través de la tubería interior.

$$Re_{D_{ha}} = \frac{4\dot{m}_a}{\pi D_{1i} \mu_a} \quad (4.12)$$

Si el flujo es turbulento con calentamiento, ya que el aceite es el fluido que gana energía térmica en el intercambiador, se tiene que:

$$Nu_D = 0,023 Re_{D_{ha}}^{4/5} Pr_a^{0.4} \quad (4.13)$$

$$Nu_D = \frac{h_a D_{1i}}{k_a}$$

$$h_a = \frac{Nu_D k_a}{D_{1i}}$$

⁴⁰ INCROPERA F., Fundamentos de Transferencia de Calor, Editorial Prentice Hall, Cuarta edición, Mexico, 1999, Pag. 455

Donde:

μ_a = Viscosidad dinámica del aceite $\left[\frac{Ns}{m^2}\right]$.

Pr_a = Numero de Prandtl para el aceite.

k_a = Conductividad térmica del aceite $\left[\frac{W}{m^{\circ}C}\right]$.

La tubería aún no ha sido seleccionada por lo que se dejará expresado el coeficiente de convección del aceite en función del diámetro.

En caso de que el flujo de aceite sea laminar entonces el número de Nusselt es una constante, $Nu_D = 3,36$ debido al concepto de temperatura superficial constante en la tubería. Se asume este criterio porque el gradiente de temperatura del agua es insignificante respecto al gradiente de temperatura del aceite.

Cálculo de la viscosidad dinámica del aceite

$$v = \mu/\rho$$

μ = Viscosidad dinámica $\left[\frac{Ns}{m^2}\right]$

v = Viscosidad cinemática $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

ρ = Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$$\mu = 33,67 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} * 925 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu = 0,0311 \frac{Ns}{m^2}$$

Este cálculo se lo hace a una temperatura promedio entre la temperatura de entrada y la temperatura de salida del aceite en el intercambiador de calor.

Al igualar las ecuaciones (4.8) y (4.9), se tiene que:

$$\frac{1}{NUT * C_{min}} = \frac{1}{h_w \pi D_{1e} L} + \frac{\ln\left(\frac{D_{1e}}{D_{1i}}\right)}{2\pi L k} + \frac{1}{h_a \pi D_{1i} L}$$

$$L = (NUT * C_{min}) \left(\frac{1}{h_w \pi D_{1e}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{1e}}{D_{1i}}\right)}{2\pi k} + \frac{1}{h_a \pi D_{1i}} \right) \quad (4.14)$$

Como se puede observar la longitud del intercambiador es una variable dependiente de los diámetros de tuberías que sean seleccionados, además todas las relaciones se han dejado expresadas en función de dichos diámetros para facilitar la iteración de los mismos en una hoja de cálculo y así determinar la mejor combinación de tuberías para el intercambiador, teniendo en cuenta también los parámetros de diseño citados anteriormente.

Se selecciona tuberías de acero inoxidable para la fabricación del intercambiador para evitar problemas de corrosión al interior del mismo y además para protegerlo de las condiciones ambientales.

Por economía y facilidad de montaje se ha escogido la tubería marca Fujinox – Hidro de la empresa ecuatoriana Conduit S.A., la cual es una tubería especialmente diseñada para el transporte de fluidos y en la que la unión de los accesorios a la tubería se realiza mediante una prensa pequeña. Esto se observará de mejor manera en el capítulo de construcción del equipo.

Para calcular la longitud del intercambiador se usará las siguientes tablas que proporcionan las características de las tuberías.

Tabla 4.23. Dimensiones y pesos de tuberías de acero inoxidable del producto FUJINOX que se encuentran en el catálogo.⁴¹

COD	DIAMETRO NOMINAL	DIAMETRO NOMINAL (mm)	ESPESOR NOMINAL (mm)	PESO (Kg/m)
C13	1/2"	15.88	0.80	0.301
C20	3/4"	22.22	1.00	0.529
C25	1"	28.58	1.00	0.687
C30	1 1/4"	34.00	1.20	0.980
C40	1 1/2"	42.70	1.20	1.240
C50	2"	48.60	1.20	1.420
C60	2 1/2"	60.50	1.50	2.200

El acero inoxidable es AISI 304 y los tubos se producen en longitudes de 4m.

Se utiliza entonces la ecuación (4.14) que permite calcular las dimensiones faltantes del diseño. Para lo cual se realizó un diseño interactivo en una hoja de cálculo de Excel que se encuentran en la Tabla 4.24, ya que todas las variables están relacionadas por los diámetros de la tubería.

Tabla 4.24. Tabla de cálculos de la longitud del intercambiador.

Tubería interior		Tubería exterior		AGUA				ACEITE				TUBERIA	
Di [m]	De [m]	Di [m]	De [m]	Flujo másico [kg/s]	Cp [J/kg C]	Ti °C	To °C	Flujo másico [kg/s]	Cp [J/kg C]	Ti °C	To °C	K [W/m K]	L
1,26E-02	1,72E-02	2,66E-02	3,34E-02	0,1	4180	48	47,9	6,25E-04	1970	20	40	14,9	0,88
1,58E-02	2,13E-02	2,66E-02	3,34E-02	0,1	4180	48	47,9	6,25E-04	1970	20	40	14,9	0,88
1,26E-02	1,72E-02	4,09E-02	4,83E-02	0,1	4180	48	47,9	6,25E-04	1970	20	40	14,9	0,91
2,10E-02	2,67E-02	4,09E-02	4,83E-02	0,1	4180	48	47,9	6,25E-04	1970	20	40	14,9	0,89
1,43E-02	1,59E-02	4,03E-02	4,27E-02	0,1	4180	48	47,9	6,25E-04	1970	20	40	14,9	0,91

Esta tabla de resultados muestra los valores de las longitudes calculadas del intercambiador para diferentes diámetros de tuberías. Como se puede apreciar la longitud del intercambiador no varía significativamente con las tuberías, por esa razón se ha visto otros parámetros adicionales como facilidad para la construcción, al momento de seleccionar las dimensiones del intercambiador.

⁴¹ <http://www.conduit.com.ec/>

Debido a esto se ha seleccionado las tuberías de $\frac{1}{2}$ y $1 \frac{1}{2}$ pulgadas para la fabricación del intercambiador ya que las dimensiones que presentan estas tuberías entre ellas nos facilita el proceso de ensamblaje. Por lo tanto la longitud del intercambiador va ser de 91cm.

Una vez dimensionado el intercambiador se procede al diseño de sus complementos. El intercambiador final puede ser visto en el ANEXO 11.

4.3.2 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA RESISTENCIA

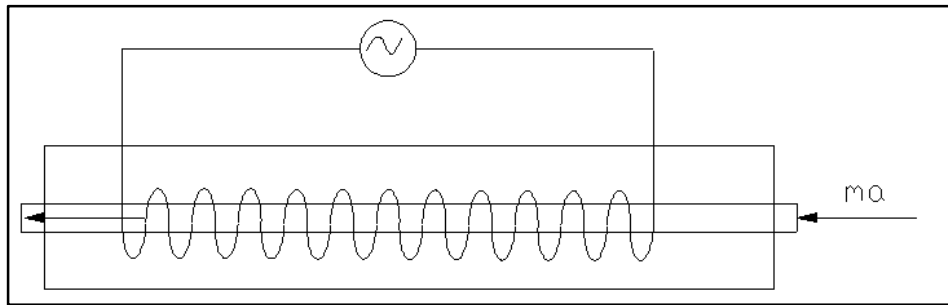


Figura 4.10. Esquema del balance energético del cálculo de la potencia de la resistencia.

4.3.2.1 Balance de energías

$$\dot{E}_{entra} + \dot{E}_{generada} = \dot{E}_{almacenada} + \dot{E}_{sale}$$

$$\dot{m}_a C p_a T_{ao} + P = \dot{m}_a C p_a T_{af}$$

$$P = \dot{m}_a C p_a (T_{af} - T_{ao}) \quad (4.15)$$

De acuerdo al balance de energías realizado para el cálculo de la potencia de la resistencia eléctrica de calentamiento, se obtiene que esta depende exclusivamente del flujo másico del aceite y de la temperatura de salida del intercambiador. Por ello el cálculo se va a realizar para las condiciones críticas de funcionamiento.

Tabla 4.25. Cálculo del valor de la potencia de la resistencia de calentamiento.

Flujo másico [kg/s]	Calor específico [J/kg°C]	T_{af} [°C]	T_{ao} [°C]	P [W]
8,89E-04	1970	84	35	85,856

Lo más recomendable sería seleccionar una resistencia de 100W, pero considerando que existen pérdidas por radiación y convección se ha decidido colocar una resistencia de 200W.

4.3.3 CÁLCULO DEL AISLAMIENTO TÉRMICO

Para calcular el aislamiento térmico del material es necesario utilizar las fórmulas de convección natural debido a que el intercambiador se va a ubicar en un lugar cubierto. Primero se calcula cual es la pérdida de calor sin aislante y después se analiza si se requiere o no aislante y en caso de necesitar aislante, se procederá a seleccionar el tipo de aislante y a dimensionar el espesor del mismo.

4.3.3.1 Cálculo de la pérdida de calor sin aislante

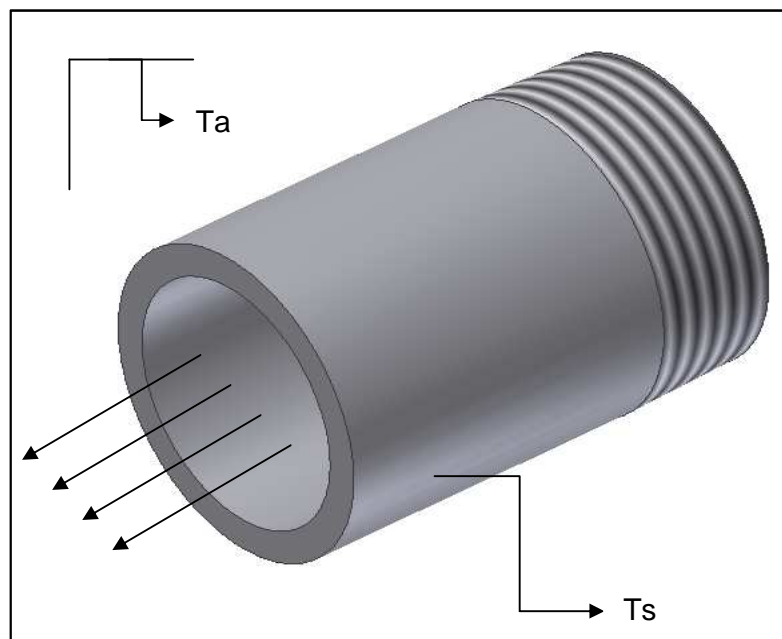


Figura 4.11. Esquema de temperaturas en la tubería exterior del intercambiador.

Para poder evaluar las pérdidas de calor por convección se debe calcular primero el coeficiente de convección, se conocen las siguientes temperaturas:

$$T_s = 48^\circ\text{C}$$

$$T_a = 20^\circ\text{C}$$

Se evalúa las propiedades del aire a la temperatura de película⁴²:

$$T_p = \frac{T_s + T_a}{2} = 34^\circ\text{C} = 307\text{ K}$$

$$k = 26,81 * 10^{-3} [\text{W/mK}]$$

$$v = 16,59 * 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$Pr = 0,706$$

$$\beta = \frac{1}{T_p} = 0,0032 [\text{K}^{-1}]$$

Donde:

T_s = Temperatura superficial del calentador [K].

T_a = Temperatura de los alrededores (ambiente) [K].

T_p = Temperatura de película [K].

k = Conductividad térmica del aire [W/mK].

v = Viscosidad cinemática del aire [m²/s].

Pr = Número de Prandtl para el aire.

β = Coeficiente de expansión volumétrica [K⁻¹].

Para tubería horizontal:

$$Gr_D = \frac{D^3 \beta (T_s - T_a)}{v^2}$$

$$Gr_D = 1,21 * 10^5$$

⁴² INCROPERA F., Fundamentos de Transferencia de Calor, Apéndice A. Propiedades Termofísicas de la Materia. Tabla A.4

Donde:

Gr_D = Número de Grashof.

Al multiplicar el número de Grashof por el número de Prandtl, se obtiene el número de Rayleigh:

$$\begin{aligned} Ra &= Gr_D * Pr \\ Ra &= 1,21 * 10^5 * 0,706 \\ Ra &= 8,54 * 10^4 \end{aligned}$$

Debido a que se cumple que $10^4 < Ra < 10^7$, se utiliza la siguiente ecuación para calcular el número de Nusselt⁴³

$$\begin{aligned} Nu_D &= B(Ra)^e \\ B &= 0,48 \\ e &= 0,25 \end{aligned}$$

Donde:

Nu_D = Número de Nusselt para el aire.

B, e = Coeficientes adimensionales para el cálculo del número de Nusselt.

$$Nu_D = 8,03$$

$$h = \frac{Nu_D k}{D}$$

$$h = 6,45 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

Una vez que se obtiene el coeficiente de convección, se calcula el flujo de calor perdido por la tubería hacia el ambiente:

$$q_{conv} = h * \pi D_i L (T_s - T_a)$$

$$q = 28,4 W$$

⁴³ HOLMAN J., Transferencia de Calor, Mc. Graw Hill, Octava edición, España, 1998, Tabla 7.1, pag. 236

4.3.3.2 Cálculo del radio crítico

$$r_{cr} = \frac{k_{fv}}{h} \quad (4.16)$$

Donde:

r_{cr} = Radio crítico de aislamiento [m].

r_i = Radio inicial, radio de la tubería exterior del intercambiador [m].

k_{fv} = Conductividad térmica de la fibra de vidrio [W/mk].

h = Coeficiente de convección del aire.

$$r_{cr} = \frac{0,038}{6,16} = 0,0061 \text{ m}$$

$$r_i = 0,016 \text{ m}$$

Como $r_i > r_{cr}$ se tiene que al aumentar aislante se disminuye la Transferencia de Calor hacia el ambiente, entonces se selecciona un espesor de fibra de vidrio que disminuya la pérdida de energía.

4.3.3.3 Cálculo de la pérdida de calor con aislante.

Para calcular el coeficiente de convección y la pérdida de energía se sigue la siguiente metodología:

$$T_s = 48 \text{ }^\circ\text{C} = 321 \text{ K}$$

$$T_a = 24 \text{ }^\circ\text{C} = 297 \text{ K}$$

Para el cálculo se asume la temperatura T_f , que es la temperatura en la superficie exterior del aislante, y se desconoce. Debido a esto se debe verificar que en los cálculos el valor de T_f sea el correcto, para lo cual se calcula el flujo de calor que atraviesa por la fibra de vidrio, el cual debe tener el mismo valor del calor que se pierde por convección hacia al ambiente.

Temperatura en la superficie del aislante.

Se evalúan las propiedades del aire a la temperatura de película:

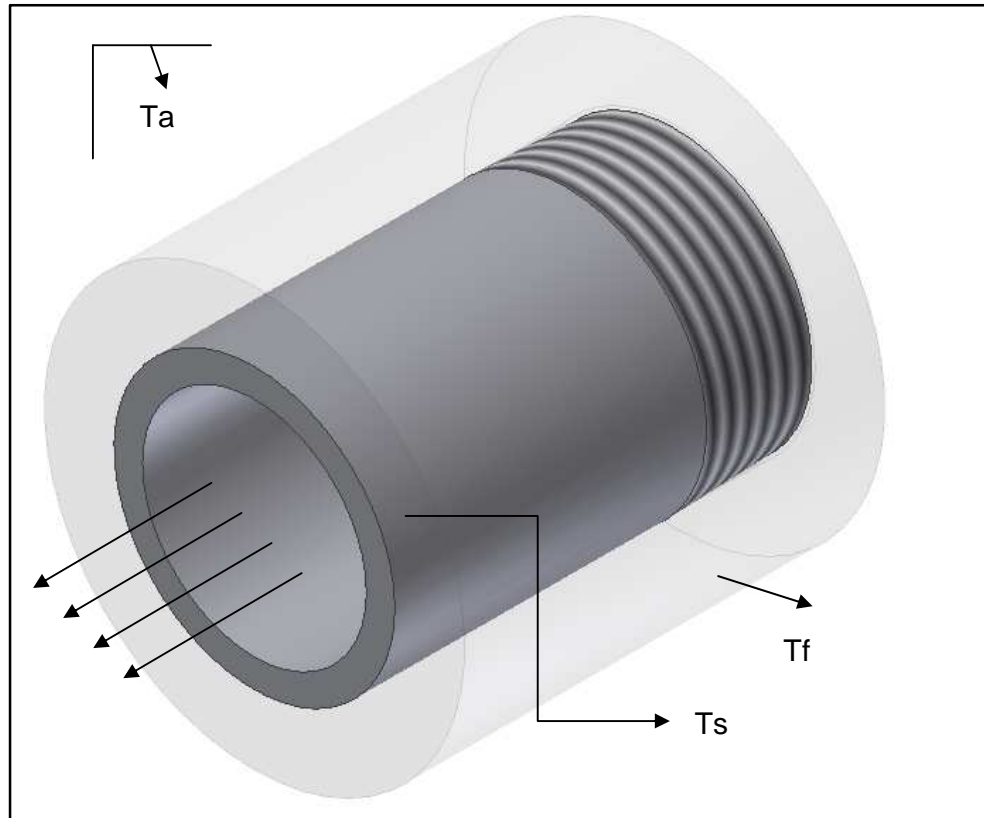


Figura 4.12. Esquema de temperaturas de la tubería exterior del intercambiador con aislante.

En forma similar que para calcular el flujo de calor que se pierde por convección al ambiente cuando la tubería no tiene aislante, se usan las siguientes ecuaciones:

Para convección natural en una tubería horizontal se debe calcular el número de Rayleigh:

Para calcular el número de Nusselt, se debe conocer el valor de las siguientes constantes⁴⁴:

$$Nu_D = B(Ra)^e$$

$$B = 0,48$$

$$e = 0,25$$

Una vez que se calcula el número de Nusselt, se puede hallar el coeficiente de convección:

$$h = \frac{Nu_D k}{D}$$

Entonces el flujo de calor perdido por convección sería:

$$q_{conv} = h * \pi DL(Tf - Ta) \quad (4.17)$$

El Flujo de calor por conducción a través del aislante es:

$$q_{cond} = \frac{2\pi Lk(Ts - Tf)}{\ln(D_f/D_i)} \quad (4.18)$$

Como se mencionó antes se debe comprobar que el flujo de calor perdido por convección y el flujo de calor perdido por conducción a través del aislante sean iguales, para saber que el valor de la temperatura superficial del aislante, que se asumió es la correcta.

Tabla 4.26. Cálculo del aislante térmico.

Di [mm]	De [mm]	Es [in]	Ts [K]	Ta [K]	Tf [K]	Tp [K]
42,7	67,7	0,50	321	293	305	299

⁴⁴ HOLMAN J., Transferencia de Calor, Mc. Graw Hill, Octava edición, España, 1998, Tabla 7.1, pag. 236

k [W/m°C]	v [m ² /s]	Pr	B [K ⁻¹]	Gr	Nu	h [W/m ² °C]	q _{conv} [W]	q _{cond} [W]
0,026	1,58E-05	0,70714	0,003344	58782,0	6,71	5,27	9,95	9,95

Tabla 4.27. Selección del espesor del aislante

Espesor [in]	Ts [K]	Ta [K]	Tf [K]	Tp [K]	K [W/m°C]	h [W/m ² °C]	q _{conv} [W]	q _{cond} [W]	q _{sin aislante} [W]	%
0,50	321	293	305	299	0,026	5,27	9,95	9,95	28,4	0,65
0,75	321	293	303,27	298,1	0,026	5,07	8,20	8,22	28,4	0,71
1	321	293	302,05	297,5	0,026	4,92	7,01	7,00	28,4	0,75

En la tabla 4.27 se puede observar el cálculo de los valores del calor perdido por convección del intercambiador, utilizando distintos espesores de aislante. También se puede ver que para el espesor de 1 pulg. de aislante la pérdida de calor se reduce en un 75%, por lo tanto se escogió como el espesor de aislante ideal.

4.3.4 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE COMBUSTIBLE

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema consta de un tanque de almacenamiento de aceite vegetal, el cual tendrá las siguientes dimensiones.

Se tiene un consumo de combustible promedio de $6,76 * 10^{-7} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$ en el motor diesel, se asume que se utiliza el banco de pruebas por 4 horas, para realizar las pruebas pertinentes en el motor, entonces se tiene que la capacidad del tanque es:

$$Capacidad = 6,76 * 10^{-7} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] * 4 * 3600 [\text{s}] = 0,00973 [\text{m}^3]$$

$$Capacidad = 2,57 \text{ Galones}$$

Por lo que tener un tanque de combustible con una capacidad de 3 galones es suficiente para que el motor funcione normalmente durante el tiempo necesario para las pruebas.

Uno de los requerimientos previstos para el precalentador de combustible es que tenga la facilidad del intercambio de combustibles, por tal motivo se debe colocar en la parte inferior del tanque una válvula para drenar los residuos de combustible usado durante las pruebas. Además el tanque debe poseer un medidor de nivel en uno de sus costados, que sirve para observar la cantidad de combustible disponible y como es lógico una fuente de acceso para poder suministrar el combustible al sistema.

Otro parámetro de diseño importante es la facilidad de montaje y el mantenimiento, por esa razón el tanque de combustible y el intercambiador están unidos mediante una unión universal, lo que permite una buena flexibilidad del sistema.

En caso de subir la presión del sistema, el tanque de combustible cuenta también con una válvula de seguridad ubicada en la parte superior, además se va a ubicar una válvula de esfera en la salida del tanque de combustible hacia el sistema como una medida adicional de protección en el sistema y también para facilitar el intercambio de combustibles.

4.3.5 SISTEMA DE CONTROL DEL SISTEMA

Debido al uso de la resistencia eléctrica de calentamiento es necesario colocar un sistema de control, que permita mantener la temperatura en un rango de 80°C hasta 90 °C. El funcionamiento de este sistema debe ser intermitente ya que al estar la resistencia sobredimensionada va a entregar un flujo de calor mayor al requerido entonces la temperatura va a elevarse, por lo que cuando llegue a la temperatura superior en el rango debe apagarse y cuando llegue a la temperatura inferior en el rango debe encenderse automáticamente.

Adicional a eso se va a colocar termocuplas para sensar las temperaturas en los puntos más importantes del sistema como son los puntos de ingreso y salida de los dos fluidos en el intercambiador de calor, y la temperatura del aceite luego de pasar a través de la resistencia, esta temperatura es muy importante ya que en base a esta se va a controlar el funcionamiento de la resistencia eléctrica.

Las temperaturas que han sido sensadas por las termocuplas van a ser mostradas en una pantalla LCD. Además el control debe poseer un interruptor principal para el encendido general del sistema de control.

Para esto el sistema de control debe constar de una fuente que alimente de energía los elementos necesarios para que cumplan su función, un control de potencia para la resistencia y un dispositivo lector de termocuplas para poder visualizar la temperatura en forma.

4.4 ANÁLISIS DE COSTOS DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE COMBUSTIBLE

El costo del diseño y fabricación del sistema de precalentamiento se detalla a continuación.

4.4.1 COSTO DE LA MATERIA PRIMA.

Para la construcción de todo el sistema de precalentamiento se requiere los elementos detallados en la siguiente tabla.

Tabla 4.28. Descripción del costo de la materia prima utilizada.

No	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo U.	Costo total
1	Tubería de acero inoxidable 1 1/2	u	1	42,33	42,33
2	Tubería de acero inoxidable 1/2	u	1	8,87	8,87
3	Tubo macho de 1/2 TMN13	u	15	3,59	53,85
4	Reducción 1 1/2 a 1/2	u	2	8,80	17,60
5	Tee de acero inox. 1 1/2	u	2	18,94	37,88
6	Unión doble 1/2	u	1	4,62	4,62

7	Tapón hembra acero inox 1 ½	u	2	7,50	15,00
8	Llave de paso esférica 2c ½	u	2	10,92	21,84
9	Codo 90° ½	u	2	1,31	2,62
10	Bushing A. Inox. 3/4 a ½	u	2	1,70	3,40
11	Reducción A. Inox 1 a ¾	u	2	3,13	6,26
12	Neplo 1x6	u	1	1,67	1,67
13	Tee inox 1/2 roscada	u	5	2,50	12,50
14	Neplo inox ½	u	2	3,00	6,00
15	Unión polipropileno de ½	u	3	0,30	0,90
16	Bushing A. Inox. 1/2 a ¼	u	2	2,00	4,00
17	Neplo inox ¼	u	6	3,00	18,00
18	Tee inox 1/4 roscada	u	1	2,50	2,50
19	Llave de paso esférica 2c ¼	u	2	13,00	26,00
20	Neplo inox 1/4 x 4	u	2	4,00	8,00
21	Unión Inox Ros. ¼	u	1	4,00	4,00
22	Teflón	m	0,5	43,00	21,50
23	Resistencia tipo abarzadera 200W	u	1	30,00	30,00
24	Unión Universal ½	u	2	1,50	3,00
25	Abrazaderas de ½	u	3	0,20	0,60
26	Manguera	m	4	0,35	1,40
27	Pintura en spray	u	2	2,00	4,00
28	Teflón para temperatura	u	2	1,50	3,00
29	Tubo de vidrio 9mm	u	1	2,00	2,00
30	Insertor macho de cobre 1/4x1/4	u	2	0,74	1,48
31	Conector Hembra-macho cobre 3/8x1/4	u	2	1,69	3,38
32	Cañería cobre 3/8	m	2	4,80	9,60
33	Termocuplas tipo J	u	5	24,48	122,40
34	Cañuela 1/2 x 90cm	u	2	5,00	10,00
35	Cañuela 1 1/2 x 90cm	u	2	6,00	12,00
36	Tanque de 3 GLS.	u	1	20,00	20,00
37	Caja de paso de 15x15cm	u	2	4,52	9,04
				Total	551,24

4.4.2 COSTOS DE FABRICACIÓN.

Para la construcción del precalentador de combustible se tiene dos tipos de costos, el primero referente al uso de herramientas empleadas para la fabricación y el otro referente al costo de la mano de obra para la fabricación, supervisión y diseño del equipo. En las siguientes tablas se detallan los rubros empleados en la fabricación del equipo.

Tabla 4.29. Costos de las herramientas utilizadas.

No	Descripción	Cantidad	Horas	Costo/h	Costo total
1	Torno	1	3	5	15
2	Taladro de columna	1	2	3	6
3	Entenalla	1	4	2	8
5	Prensa para la tubería	1	5	2	10
6	Soldadora TIG	1	3	7	21
7	Herramientas de ensamblaje	1	8	2	16
				Total	76

Tabla 4.30. Costos de la mano de obra.

No	Tipo de trabajador	Cantidad	Horas	Costo/h	Costo total
1	Ingeniero Mecánico	2	15	8	240
2	Ingeniero Electrónico	1	10	8	80
3	Plomero	1	4	6	24
4	Soldador	1	4	10	40
5	Electricista	1	4	6	24
				Total	408

4.4.3 COSTOS DEL SISTEMA DE CONTROL.

El costo de los materiales utilizados en el sistema de control del precalentador de combustible se detalla a continuación:

Tabla 4.31. Costos del sistema de control.

No	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo U.	Costo total
1	PIC 16F877A	u	1	6,75	6,75
2	LCD 4X20	u	1	24,00	24,00
3	Transformador 12V 1000mA	u	1	4,16	4,16
4	Amplificador TLM084	u	5	0,70	3,50
5	Amplificador de instrumentación AD620	u	5	12,00	60,00
6	Elementos Varios	G	1	20,00	20,00
7	Tarjeta	u	2	30,00	60,00
8	Fuente +12, -12	u	1	20,00	20,00
				Total	198,41

Cabe destacar que en esta tabla no se ha tomado en cuenta el costo que representa la mano de obra, ya que este rubro se lo considera en la tabla de costos de la mano de obra.

4.4.4 COSTO FINAL DEL PRECALENTADOR DE COMBUSTIBLE.

El costo final del precalentador de combustible para motores diesel está resumido en la siguiente tabla.

Tabla 4.32. Costo final del precalentador de combustible.

<i>No</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Costo total</i>
1	Materia prima	G	551,24
2	Costos de la herramientas usadas	G	76,00
3	Mano de obra	G	408,00
4	Costo del sistema de control	G	198,41
Total			1233,65

4.4.5 COSTOS DE PRUEBAS

Con el fin de evaluar el comportamiento del aceite vegetal de *Jatropha* en el motor diesel, se realizaron las pruebas pertinentes como son las pruebas de emisiones contaminantes, pruebas de opacidad de los gases de escape, pruebas para determinar las curvas características del motor usando el nuevo combustible y además se debe incluir el costo de los insumos necesarios para realizar estas pruebas.

Tabla 4.33. Costos de las pruebas.

<i>No</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo U.</i>	<i>Costo total</i>
1	Pruebas de Opacidad	G	15	20	300
2	Análisis de los gases de escape	G	15	20	300
3	Pruebas de curvas características del motor	G	3	100	300
4	Insumos para las pruebas	G	1	100	100
Total					1000

Se debe tener en cuenta que estos costos no son parte de los costos del sistema de precalentamiento de combustible.

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

5.1 INTRODUCCIÓN.

El presente capítulo tiene como finalidad detallar los pasos que se siguieron en la construcción del precalentador de combustible, además de las pruebas que se realizaron con el fin de verificar el funcionamiento del equipo y el comportamiento del aceite vegetal de *Jatropha* como combustible en el motor diesel.

Las partes que constituyen el precalentador son:

- Un intercambiador de tubos concéntricos.
- Un tanque de combustible.
- Una resistencia eléctrica de calentamiento.
- Sistema de control del equipo.

5.2 CONSTRUCCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS.

Para la construcción del intercambiador de calor de tubos concéntricos se utilizó tubería de acero inoxidable de 1 ½ y ½ pulgada de diámetro, para la tubería externa e interna respectivamente.

Las tuberías seleccionadas para la construcción del intercambiador son de la marca Fujinox-hidro, este tipo de tubería posee todos los accesorios necesarios para realizar cualquier clase de instalación y se diferencia con las tuberías tradicionales por la forma en que se ensamblan los acoples a la tubería, el cual se realiza por medio de una prensa pequeña. Esto hace más rápido el proceso de ensamble y por lo tanto reduce los costos de fabricación.



Figura 5.1. Tuberías y accesorios FUJINOX

En la tabla 5.1 se observan la lista de partes que conforman el intercambiador de tubos concéntricos.

Tabla 5.1. Lista de materiales utilizados para la construcción del intercambiador de tubos concéntricos.

Descripción	Cantidad	Longitud	Material
Tubería ½ pulg.	1	43 pulg.	Acero inoxidable
Neplo ½ pulg.	2	3 pulg.	Acero inoxidable
Tubería 1 ½ pulg.	1	20 pulg.	Acero inoxidable
Neplo 1 ½ pulg	2	5 pulg	Acero inoxidable
Tee 1 ½ pulg.	2	-	Acero inoxidable
Tapón hembra 1 ½ pulg.	2	-	Acero inoxidable
Reducción 1 ½ a ½ pulg.	2	-	Acero inoxidable
Unión Macho Normal ½ pulg.	2	-	Acero inoxidable

A continuación se detallan los pasos que se siguen para el ensamble y la construcción del intercambiador.

El primer paso es cortar las tuberías de acuerdo a las dimensiones especificadas.



Figura 5.2. Proceso de corte de las tuberías

Luego se procede a realizar una perforación en los tapones de acero inoxidable que se muestran en la figura 5.3. El orificio tiene un diámetro igual al de la tubería interior del intercambiador, es decir $\frac{1}{2}$ pulgada.

Para garantizar que las dos tuberías sean concéntricas, los orificios de los tapones se maquinan en un torno.



Figura 5.3. Tapón de acero inoxidable

Para realizar la perforación del tapón se siguen los siguientes pasos:

- Se ubica el tapón en el mandril del torno.
- Se centra el tapón en el mandril.
- Con la ayuda de una broca de centros se perfora el tapón.

- Se coloca una cuchilla de interiores en el porta cuchillas y se procede a aumentar el diámetro del orificio hasta la medida de la tubería interior.
- Finalmente se pasa una lima por el orificio con el fin de quitar las rebabas y darle un buen acabado.



Figura 5.4. Proceso de perforación del tapón.

A continuación, se ensambla el intercambiador para que adquiera su forma final, luego se procede a prensar los componentes. Para lo cual se siguen los siguientes pasos:

- Se colocan los componentes del intercambiador en su posición.
- Se coloca la prensa en la conexión que posee el o'ring, que es el anillo de caucho que garantiza la hermeticidad del intercambiador.
- Con la ayuda de una bomba manual se envía aceite a presión hacia la prensa hidráulica, hasta que se unan las dos mordazas que posee la prensa.
- Luego se abre la válvula de alivio en la bomba, y se retira la prensa de la unión.
- Se debe verificar que la unión este bien realizada.



Figura 5.5. Proceso de prensado de la tubería.

Una vez armado el intercambiador de tubos concéntricos, se procede a soldar la unión que existe entre el tapón y la tubería interna con el fin de evitar cualquier fuga. Para soldar esta unión se utilizó una soldadura tipo TIG (Tusteng Inert Gas) debido a las partes a ser soldadas son de acero inoxidable.



Figura 5.6. Proceso de soldadura del tapón con la tubería interior.

5.3 CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE COMBUSTIBLE.

El tanque de combustible será el encargado de almacenar el aceite de Jatropha necesario para realizar las pruebas en el motor. Su capacidad de almacenamiento es de 3 galones, que es suficiente para abastecer al motor durante su operación.

Para la fabricación se utilizó un tanque de refrigerante con capacidad de 3 galones, además de otros accesorios que permiten el llenado, y salida de combustible. Y complementario a esto se instaló un medidor de nivel que permite ver la cantidad de aceite que se tiene en el tanque. En la tabla 5.2 constan los materiales y accesorios utilizados en la fabricación.

Tabla 5.2. Lista de materiales utilizados para la construcción del tanque.

Descripción	Cantidad	Dimensión	Material
Tanque	1	3 galones.	Acero A36
Unión Macho Normal ½ pulg	2	-	Acero inoxidable
Neplo 2 pulg.	1	3 pulg.	Acero A36
Tapón 2 pulg.	1	-	Acero A36
Acoples para medidor de nivel ¼ pulg.	2	-	Acero A36
Tubo $\varnothing=11\text{mm}$.	1	20 cm.	Vidrio
Adaptadores para cañería de cobre	2	-	Bronce
Neplo ¼ pulg.	2	-	Bronce

A continuación se detallan los pasos que se siguen para la construcción del tanque de almacenamiento de combustible.

El primer paso es perforar el tanque, con las dimensiones requeridas para que acoplar los accesorios. Seguidamente se colocan los accesorios en los respectivos orificios y se procede a soldarlos.

Para el medidor de nivel se fabrican acoples que permiten colocar los accesorios de bronce que soportan el tubo de vidrio en el tanque. Estos se fabrican a partir de dos uniones de ¼ de pulgada, para lo cual se utiliza un torno.



Figura 5.7. Proceso de soldadura del tanque.

Dentro del proceso de soldadura del tanque se utilizaron dos tipos de soldadura debido a que se los materiales eran diferentes. Para soldar los accesorios de acero inoxidable se utilizo soldadura tipo TIG y para la soldadura de los acoples para el medidor de nivel se utilizó soldadura oxiacetilénica con latón como material de aporte.

Antes de proceder a pintar el tanque de combustible para evitar que este sufra corrosión, se deben realizar las pruebas de hermeticidad.



Figura 5.8. Proceso de pintura del tanque.

5.4 PRUEBAS DE HERMETICIDAD DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO.

Una vez construido el intercambiador de tubos concéntricos y el tanque de almacenamiento de combustible, es necesario realizar pruebas de hermeticidad con estos equipos para comprobar que su construcción está bien realizada.

Se realizó una prueba al intercambiador y otra al tanque de almacenamiento de combustible, esta prueba consiste en llenar con agua a presión al equipo deseado y observar si existe alguna fuga, con ello se asegura la hermeticidad del sistema.

Para realizar esta prueba se sellan todos los accesorios que se encuentran en el tanque, a excepción de uno a través del cual se llena el equipo con agua a presión, en la figura 5.9 se observa la prueba de hermeticidad realizada al tanque.



Figura 5.9. Prueba de hermeticidad del tanque de combustible.

5.5 MONTAJE DEL PRECALENTADOR EN EL MOTOR DIESEL DE TERMODINÁMICA.

Con todos los elementos que conforman el sistema de precalentamiento de combustible, listos y probados se procede al montaje de estos en el motor diesel del Laboratorio de Termodinámica. Una de las consideraciones principales para

realizar el montaje es buscar un lugar que no entorpezca el uso del motor u obstaculice el buen manejo del mismo. Además la ubicación debe facilitar el montaje y la operación del sistema de precalentamiento.

Antes de montar el sistema se debe acoplar el intercambiador con la resistencia eléctrica de calentamiento. Para esto se debe tomar en cuenta que la resistencia es de abrazadera con diámetro de 1 pulgada, esto quiere decir que a la tubería de ½ pulgada que sale del intercambiador se debe acoplar los accesorios necesarios para poder ubicar dicha resistencia.

Los accesorios usados para unir los elementos que constituyen el precalentador de combustible se describen en la siguiente tabla.

Tabla 5.3. Lista de materiales utilizados para el montaje del precalentador.

Descripción	Cantidad	Longitud	Material
Unión doble ½ pug.	1	-	Acero inoxidable
Codo 90° ½ pulg.	1	-	Acero inoxidable
Unión macho normal ½ pulg.	3	-	Acero A36
Te ½ pulg.	1	-	Acero A36
Llave de paso esférica 2c ½ pulg.	1	-	Acero A36
Unión de ½ pulg.	1		Acero inoxidable
Manguera ½ pulg.	1	4 m.	Polipropileno
adaptador a manguera ½ pulg.	2	-	Polipropileno
Resistencia de 200W	1	-	Acero inoxidable
Tee ½ pulg. roscada	5	-	Acero inoxidable
Unión Universal ½ pulg.	2	-	Acero A36
Neplo ½ pulg.	3	-	Acero A36
Reducción 1 a ½	2	-	Acero inoxidable
Neplo 1 pulg.	1	-	Acero inoxidable
Reducción ½ a ¼ pulg.	1	-	Acero inoxidable
Neplo ¼ pulg.	2	-	Acero inoxidable
Tee ¼ pulg.	1	-	Acero inoxidable
Acoples para termocuplas	5	-	Latón

Para el acople de todos los accesorios roscados se uso permatex, que es un sellante de tubería y teflón de alta densidad, que se usa para tuberías que transportan fluidos a elevada temperatura.



Figura 5.10. Unión de los accesorios del precalentador de combustible.

Para sensar la temperatura de entrada y salida de los fluidos en el intercambiador se usan termocuplas, las cuales se colocan en unos acoples de teflón maquinados específicamente con este fin, se debe tomar en cuenta que se escogió el teflón porque es un material fácil de maquinar y tiene un punto de fusión de 300 °C⁴⁵.



Figura 5.11. Acople y montaje de termocupla.

⁴⁵ <http://www.cisealco.com/contenido/productos/teflon/teflon.htm>

Los acoples de teflón se colocan en tees de $\frac{1}{2}$ pulgada, y luego se colocan las termocuplas en estos acoples, con lo que se garantiza que la termocupla se encuentra en contacto con el fluido a sensar.

En el mercado nacional la resistencia eléctrica de calentamiento tipo abrazadera tiene un diámetro mínimo de 1 pulgada, entonces esta debe ir montada sobre un neplo de 1 pulgada de diámetro. Se debe tener en cuenta que la tubería que sale del intercambiador es de $\frac{1}{2}$ pulgada, por ello se debe usar accesorios para poder acoplarla con el neplo de 1 pulgada.



Figura 5.12. Montaje de la resistencia eléctrica de calentamiento.

En el montaje del precalentador se utilizan ángulos como soporte para el equipo, los cuales fueron acoplados a la estructura que posee el banco de pruebas mediante pernos. Estos pernos deben ser montados con arandelas planas y de presión para soportar las vibraciones que produce el motor cuando está en funcionamiento.

En las figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se puede observar el montaje del precalentador de combustible en el motor Diesel del Laboratorio de Termodinámica.



Figura 5.13. Montaje del sistema de precalentamiento de combustible.



Figura 5.14. Accesorios usados para acoplar el tanque de combustible con el intercambiador de calor.



Figura 5.15. Montaje del tanque de combustible.

Para conectar el sistema de precalentamiento de combustible al sistema de combustible tradicional que posee el motor diesel, se colocó un bypass con la ayuda de dos válvulas que permite seleccionar cual de los dos sistemas van a funcionar. Para el montaje del precalentador de combustible se procedió a cambiar la tubería de cobre que va desde el tanque de almacenamiento de Diesel hacia el medidor de caudal de combustible.

En la figura 5.16 se puede observar las válvulas que controlan a los sistemas y el acople del sistema de precalentamiento de combustible.



Figura 5.16. Acople del precalentador de combustible al sistema de alimentación de combustible.

Para controlar la temperatura del aceite de Jatropha se utiliza un sistema de control que permite fijar la temperatura de calentamiento que se desea. Además el control permite observar en un LCD las temperaturas que leen las termocupas instaladas en el intercambiador de tubos concéntricos.

El montaje del sistema de control se lo debe realizar en un lugar que permita tener una buena visualización de su LCD, además que no exista peligro de que este pueda entrar en contacto con algún tipo de fluido, debido a que este sistema es delicado.



Figura 5.17. Montaje del sistema de control.

5.6 PRUEBAS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE COMBUSTIBLE.

Con el fin de probar que el precalentador de combustible cumpla con el objetivo para el cual fue diseñado y verificar el comportamiento del motor utilizando aceite vegetal de Jatropha como combustible se procedió a realizar algunas pruebas en el motor diesel. En estas pruebas se usaron varios combustibles para observar cual es el comportamiento del motor y así comparar las propiedades del motor obtenidas cuando se utilizan los diferentes tipos de combustibles. Los combustibles usados fueron: Diesel comercial, Aceite vegetal de Jatropha y Biodiesel hecho a partir de Jatropha.

Las pruebas realizadas en el motor permiten obtener los datos necesarios para realizar curvas de velocidad y curvas de gases para cada tipo de combustible usado.

5.6.1 MEDICIÓN DE TEMPERATURAS

Con el fin de comprobar el correcto diseño del intercambiador de tubos concéntricos se procede a medir las temperaturas a la entrada y la salida de los respectivos fluidos, para lo cual el sistema consta de termocuplas que se encuentran ubicadas en los lugares anteriormente mencionados. Estas temperaturas se muestran en la pantalla del sistema de control.

Además es necesario conocer cuál es la temperatura final del aceite de Jatropha después de salir del sistema de precalentamiento para poder asegurar que este tenga la viscosidad adecuada para ser usado como combustible.

5.6.2 CURVAS DE VELOCIDAD

Las curvas de velocidad del motor fueron realizadas para diferentes tipos de combustibles con el fin de conocer cuál es el comportamiento del motor. Para esto se tomaron datos para 5 velocidades distintas del motor, las que fueron 2000, 1750, 1500, 1250 y 1000 revoluciones por minuto [rpm].

Para realizar las curvas de velocidad se utilizaron los siguientes equipos:

- Tacómetro digital.
- Dos termómetros de mercurio.
- Un lector de termocuplas para los gases de escape.
- Éter para el arranque del motor.
- Desarmadores.
- Freno Hidráulico



Figura 5.18. Tacómetro digital.

Para la recolección de los datos del motor se utilizó el siguiente formato, que recoge toda la información necesaria para poder realizar las curvas de velocidad.

Tabla 5.4. Formato para la recolección de datos para realizar las curvas de velocidad.

No.	Freno		Agua			Aire		Gases de Escape	Combustible	Odómetro
	RPM	F [lbf]	Te [°C]	Ts [°C]	Hcr [pulg]	Te [°C]	Hmi [pulg]	Ts [°C]	$t_{50\text{cm}^3}$ [s]	[km]
1										
2										
3										
4										
5										

5.6.3 MONITOREO DE GASES DE ESCAPE

Para comprobar si la cantidad de emisiones contaminantes del motor cambian al utilizar diferentes tipos de combustibles se recolectaron datos con ayuda de un analizador de gases de escape para fuentes fijas, lo que permite conocer la cantidad de contaminantes emitidos al ambiente. Para realizar esta prueba de gases se debe cumplir los requerimientos dados para una fuente fija.

Los datos fueron tomados para diferentes velocidades, con el fin de poder realizar curvas de gases emitidos en función de la velocidad del motor y así conocer el comportamiento de los gases para diferentes condiciones de funcionamiento del motor.

El monitoreo de los gases de escape fue realizado por la UNIMEG de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional, el informe referente a las valores obtenidos se encuentra en el ANEXO 4.



Figura 5.19. Analizador de gases de escape para fuentes fijas.



Figura 5.20. Medición de los gases de escape en el motor diesel.

5.6.4 OPACIDAD

Otro parámetro importante que se debe conocer es el comportamiento de la opacidad de los gases de escape del motor para diferentes condiciones de trabajo. Por ello se tomaron valores de opacidad para diferentes velocidades del motor, simultáneamente mientras se realizaron las pruebas para determinar las curvas de velocidad. Las pruebas de opacidad se realizaron para los diferentes combustibles probados, se tomaron los respectivos datos y se tomó una medida de opacidad en aceleración libre como se especifica en la Norma NTE INEN 2207.



Figura 5.21. Opacómetro.

5.7 RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS

De las pruebas realizadas en el motor diesel con el sistema de precalentamiento se obtuvieron los siguientes resultados:

5.7.1 CURVAS DE VELOCIDAD DEL MOTOR

En los siguientes gráficos se muestra las curvas obtenidas en el motor utilizando diesel, aceite vegetal y biodiesel de Jatropha como combustible.

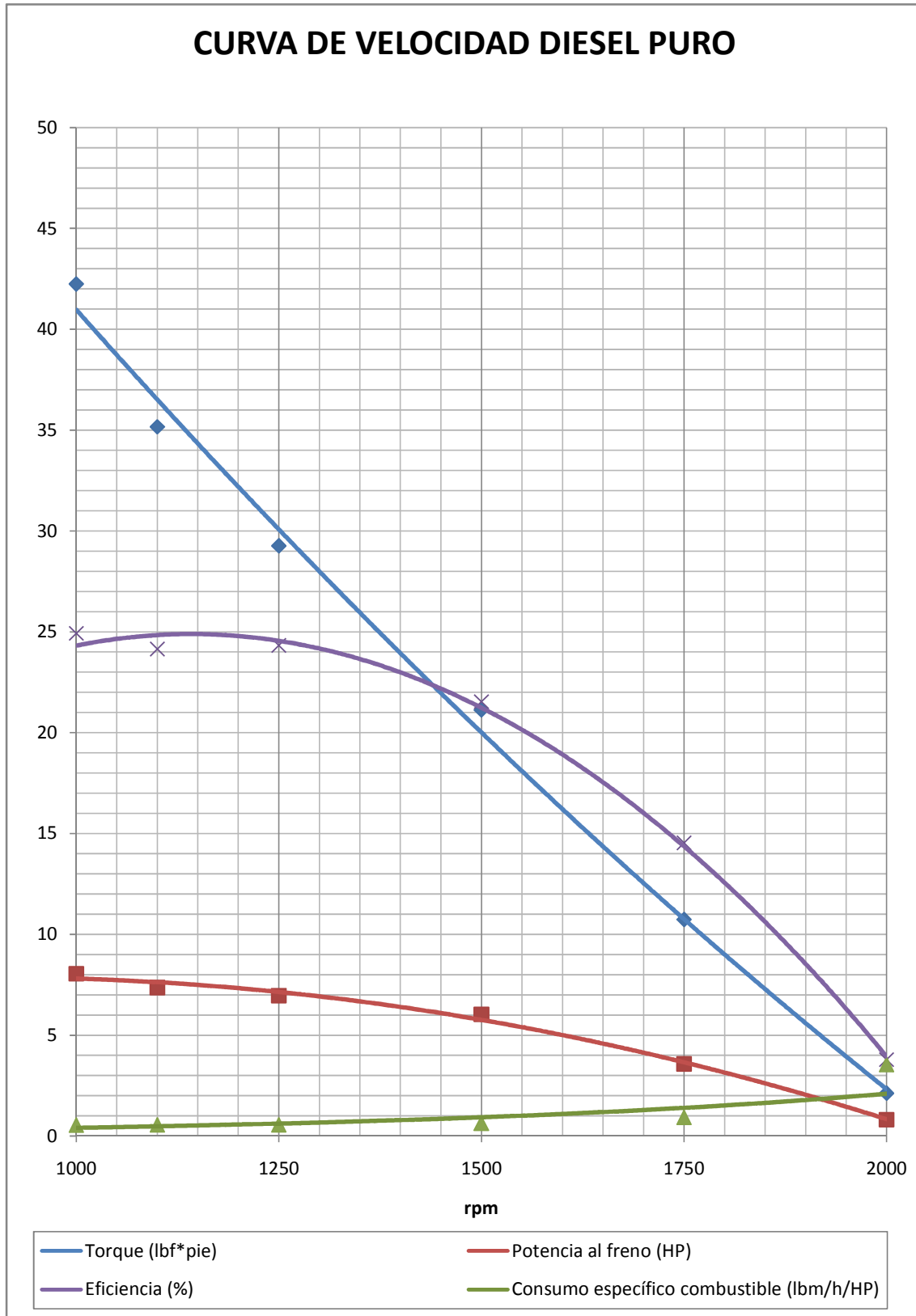


Figura 5.22. Curva de Velocidad para el diesel puro.

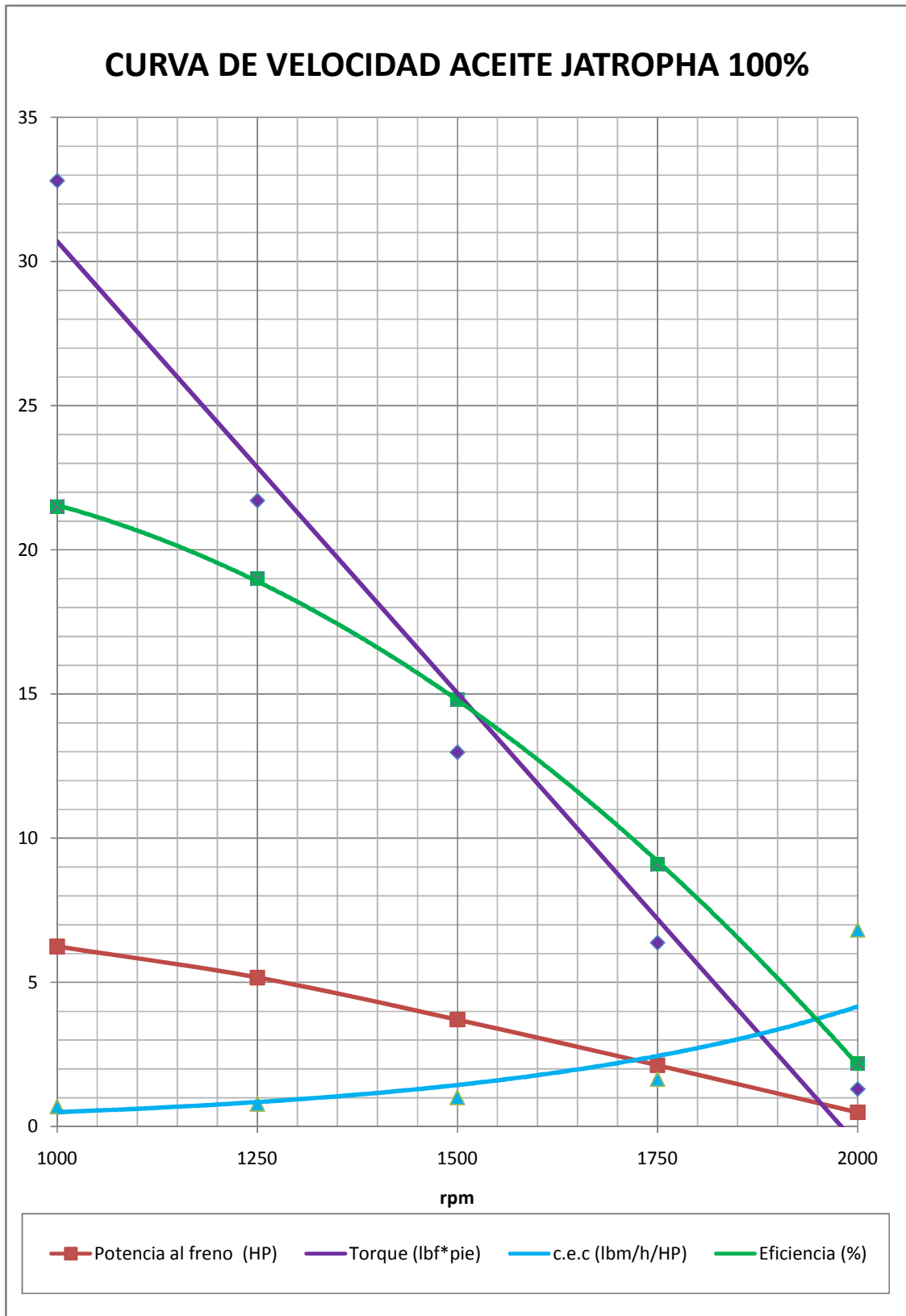


Figura 5.23. Curva de Velocidad para aceite vegetal puro.

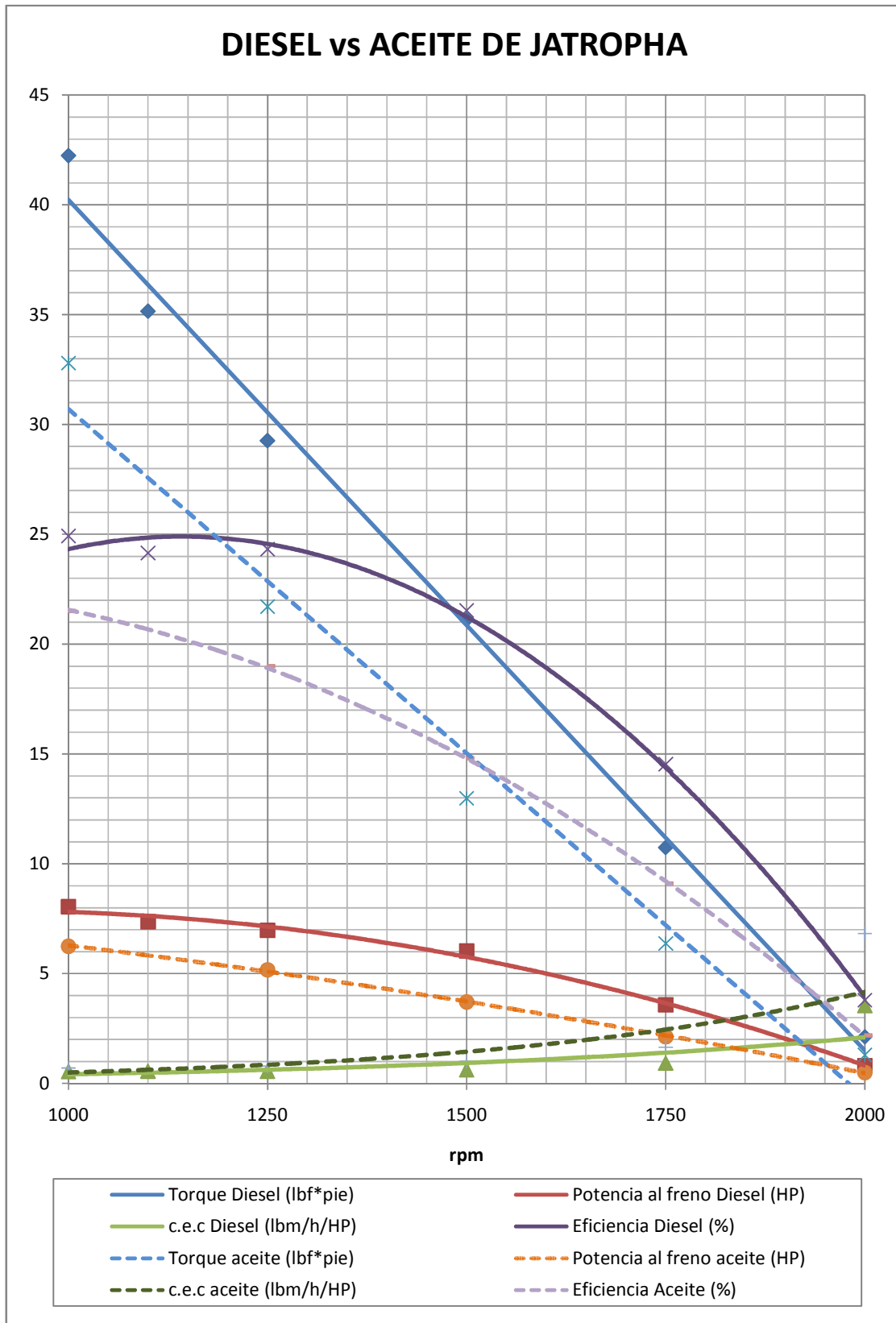


Figura 5.24. Comparación de las curvas de diesel y aceite.

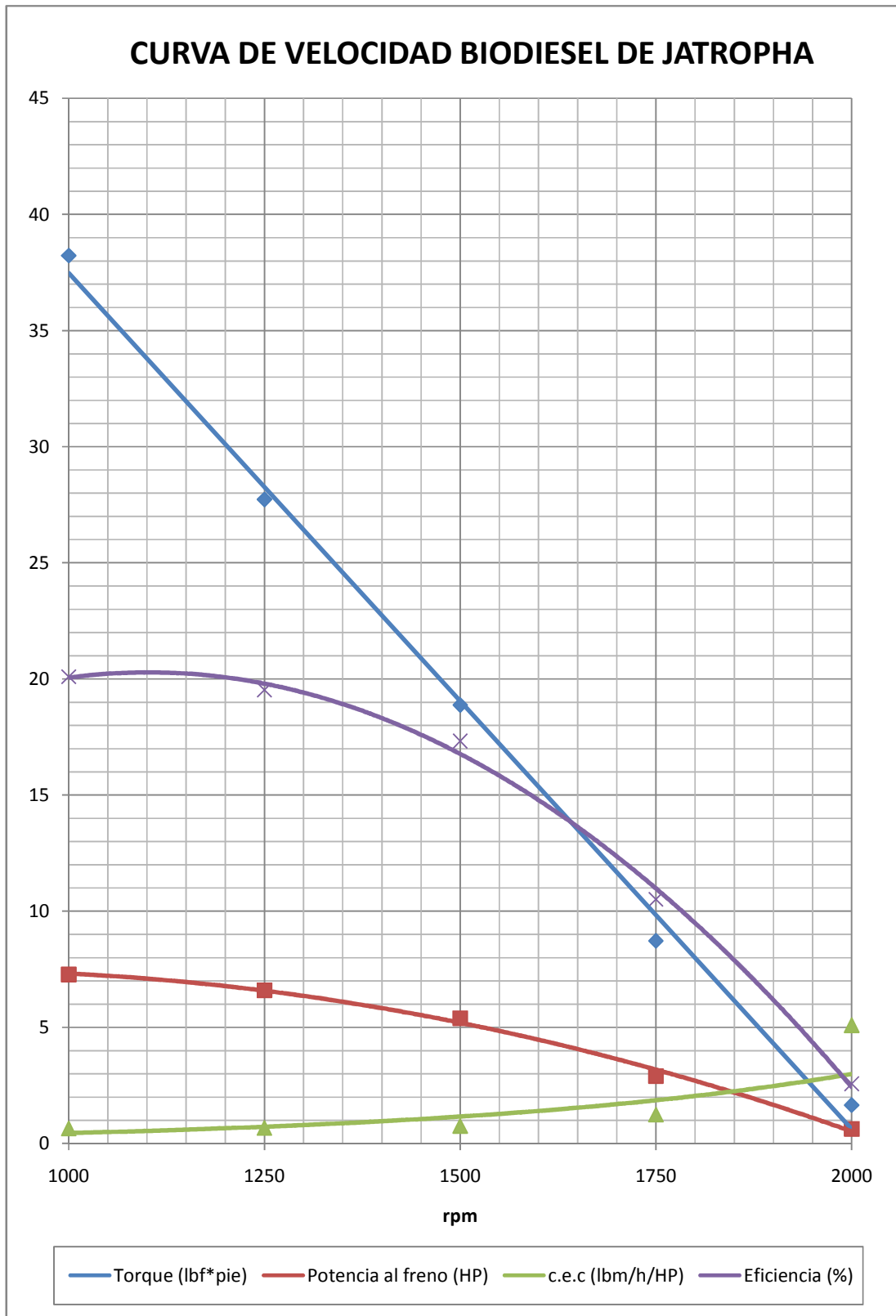


Figura 5.25. Curva de velocidad para el biodiesel de Jatropha puro

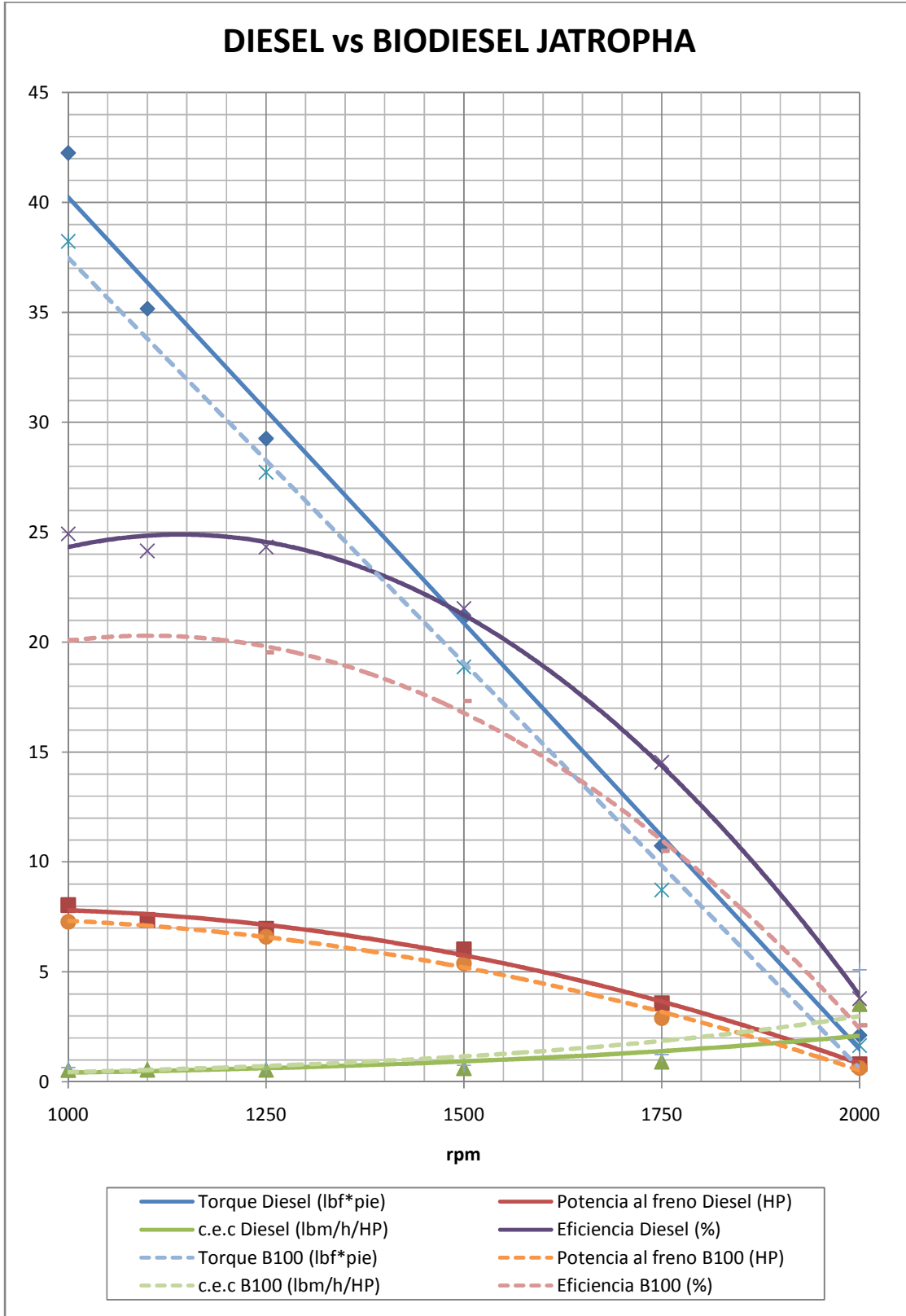


Figura 5.26. Comparación de las curvas de diesel y biodiesel.

5.7.2 CURVAS DE GASES

El momento que se tomaron los datos para obtener las curvas de velocidad del motor también se tomaron los datos necesarios para realizar curvas del comportamiento de algunos gases de escape. En las siguientes figuras se muestra las curvas para ciertos contaminantes en función de la velocidad del motor.

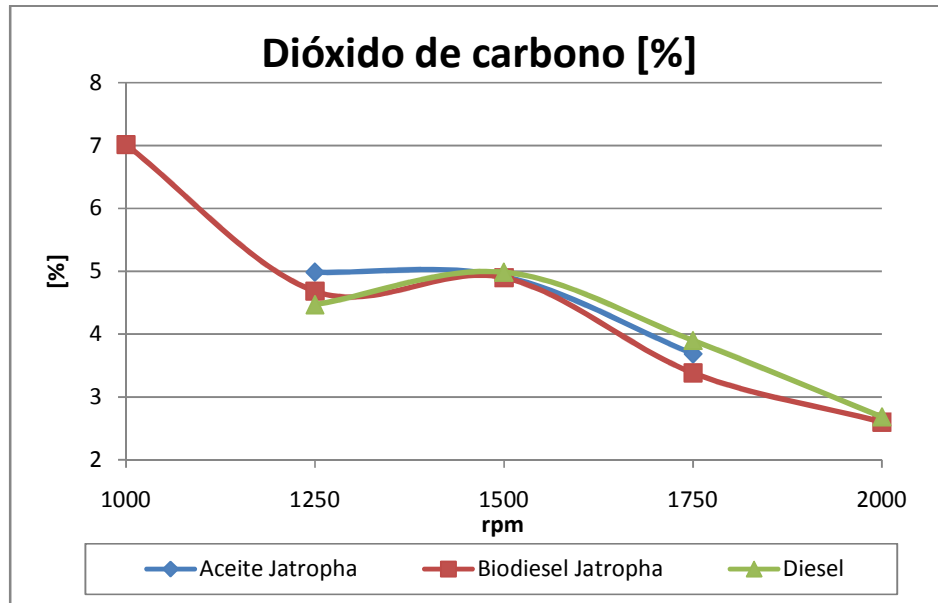


Figura 5.27. Curva de dióxido de carbono.

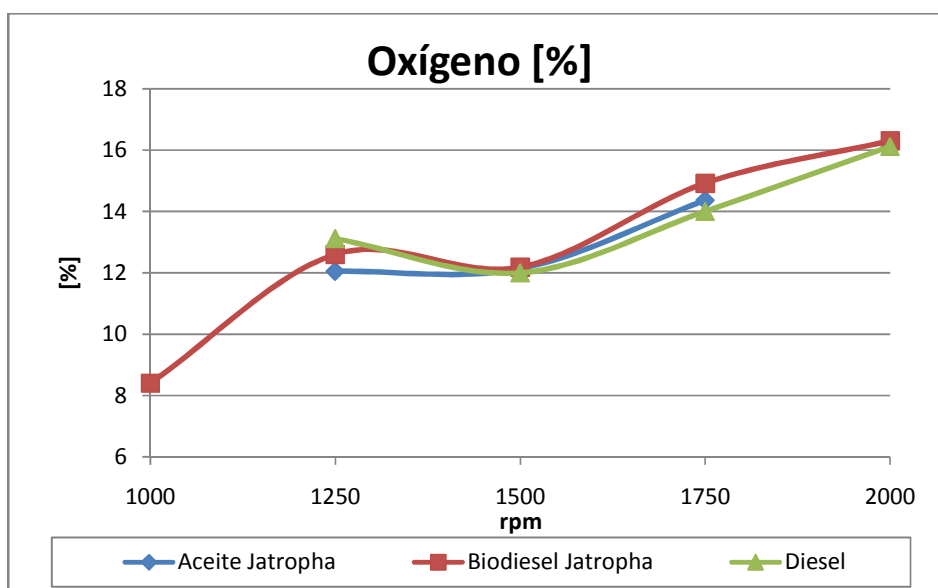


Figura 5.28. Curva de oxígeno.

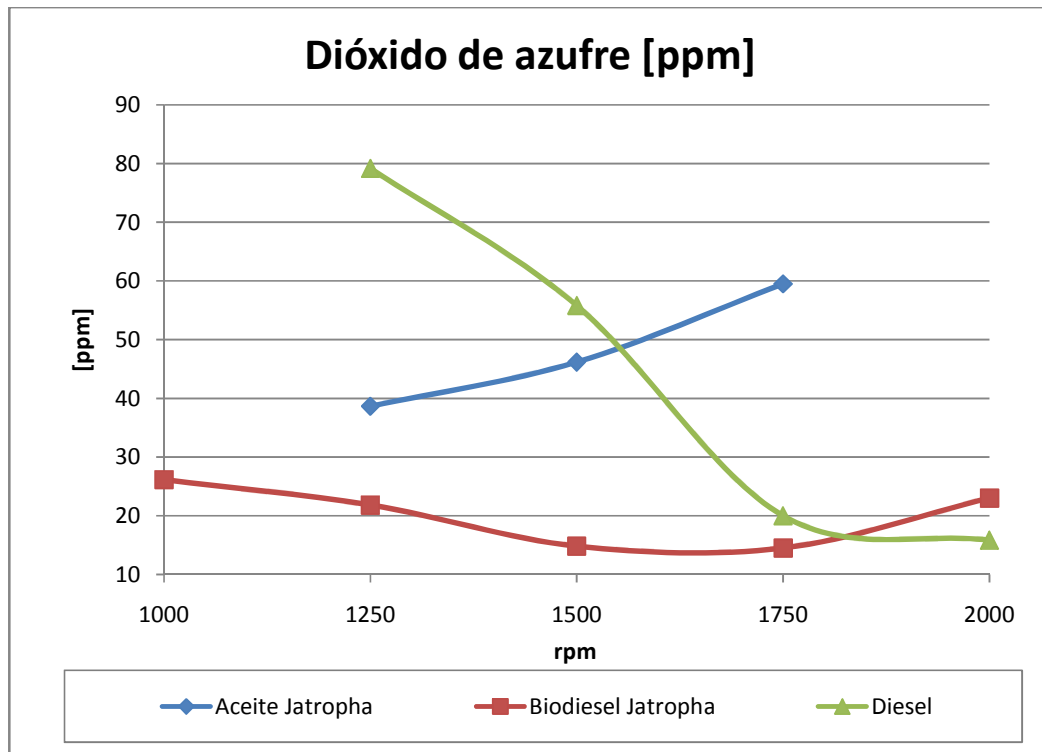


Figura 5.29. Curva de dióxido de azufre.

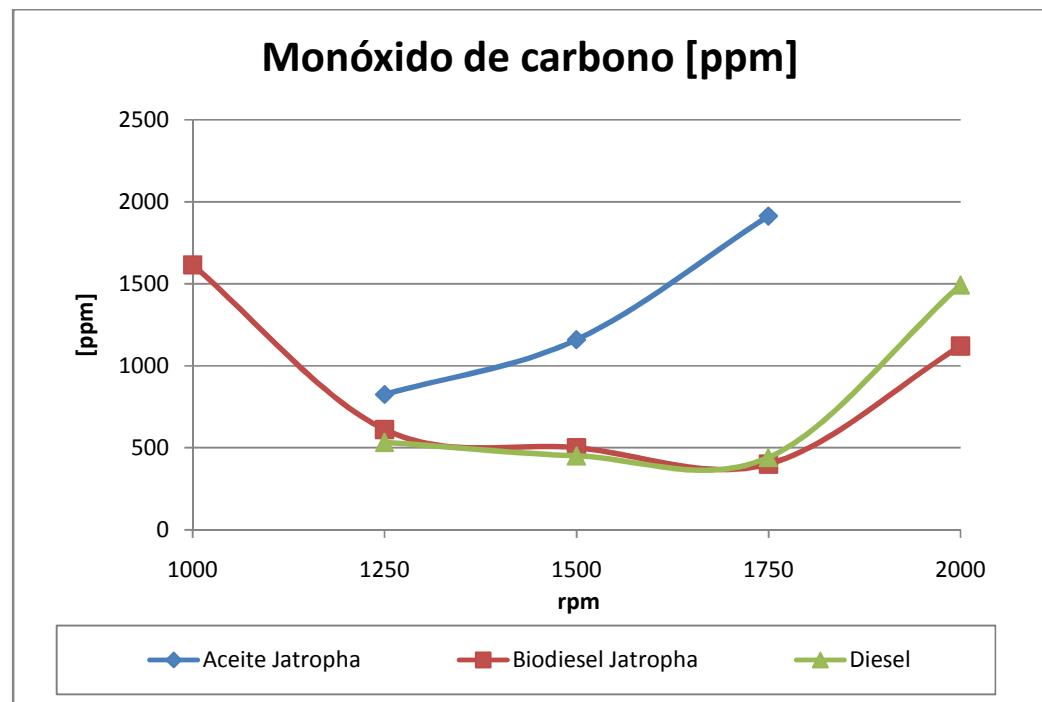


Figura 5.30. Curva de Monóxido de Carbono.

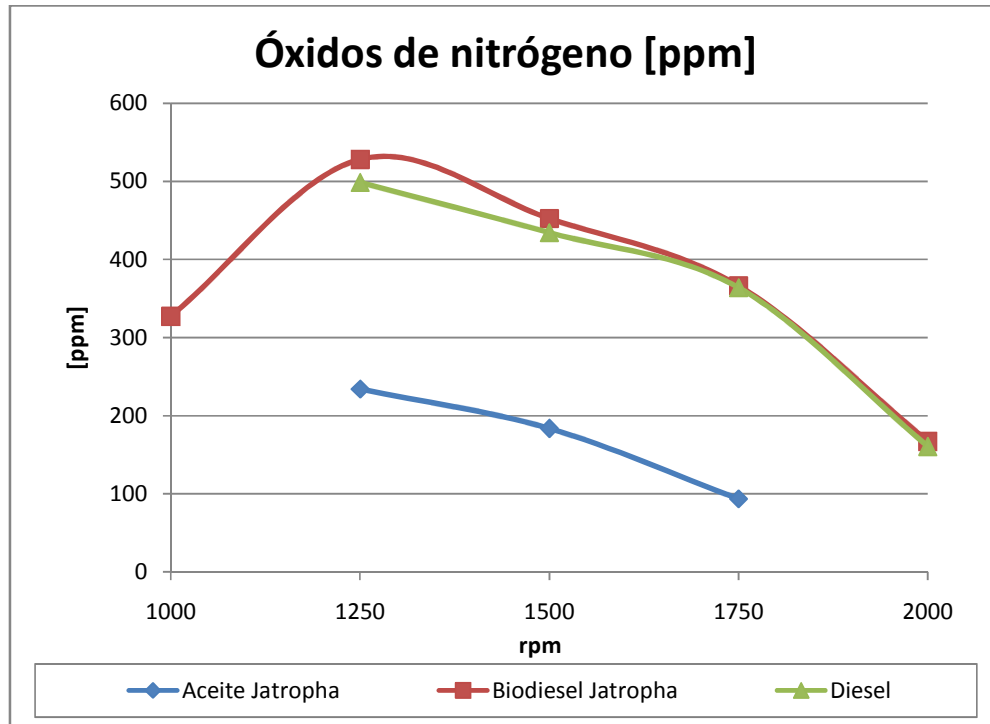


Figura 5.31. Curva de óxidos de nitrógeno.

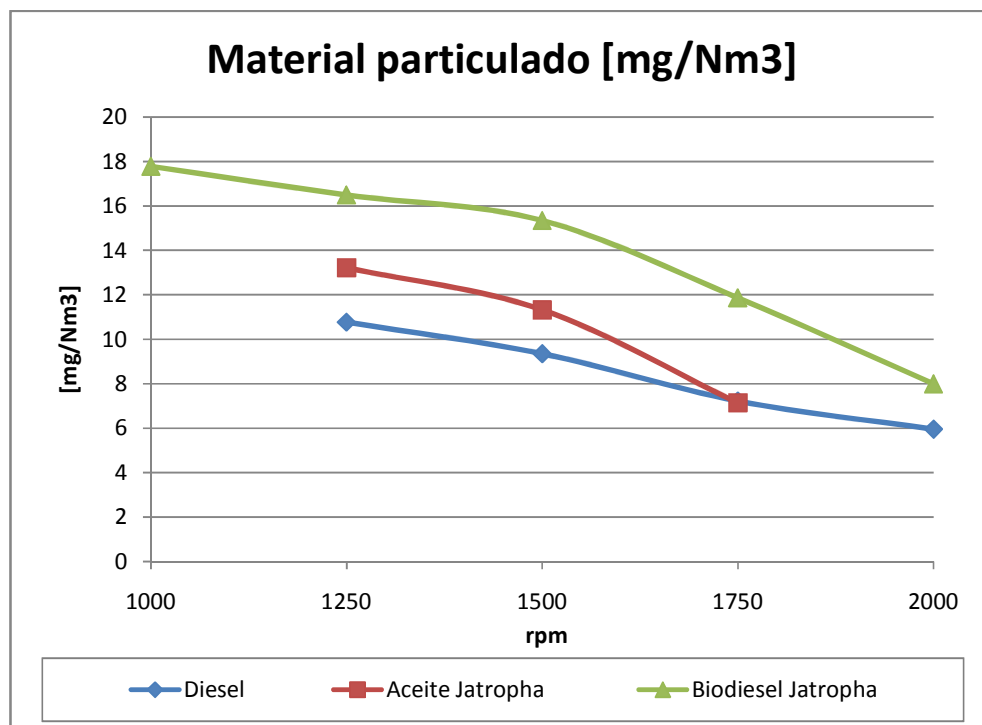


Figura 5.32. Curva de Material Particulado.

5.7.3 CURVAS DE OPACIDAD

En las siguientes gráficas se puede observar como varia la opacidad del motor respecto a la utilización de los combustibles probados.

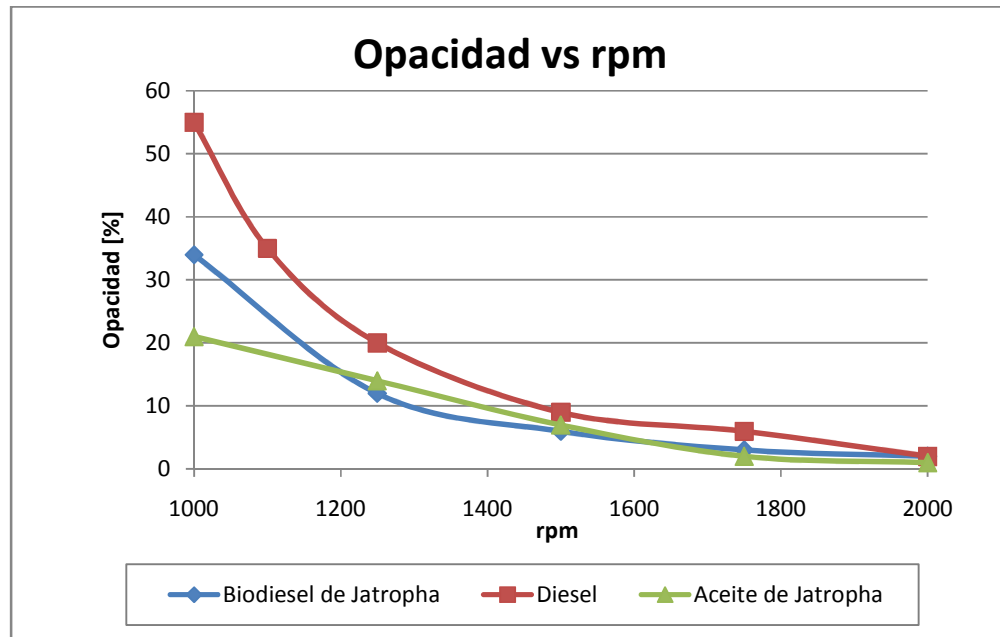


Figura 5.33. Curvas de opacidad para diesel, aceite y biodiesel.

Adicional a las curvas obtenidas de opacidad, se recogieron datos de opacidad en aceleración libre como se muestran a continuación:

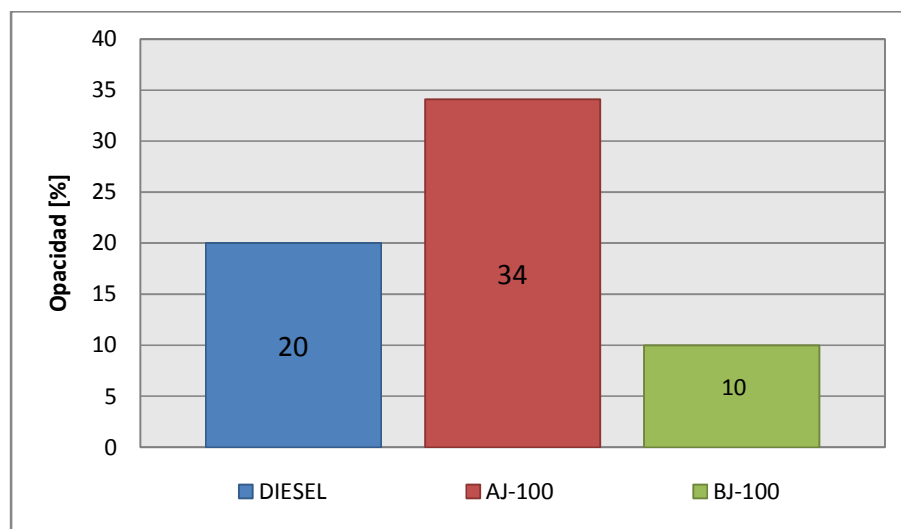


Figura 5.34. Valores de opacidad en aceleración libre.

5.7.4 RESULTADOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

Para probar experimentalmente el funcionamiento del intercambiador de calor se tomaron medidas de las temperaturas en el mismo, sin prender el sistema de control, utilizando diesel como combustible y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 5.5. Datos experimentales del intercambiador de Calor.

T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	M agua [Kg/s]	Q diesel [m ³ /s]	M diesel [kg/s]	C agua	C diesel	e
14	22	30	22	22	0,102	5,3E-07	0,000445	426,96	0,80	50,0%
14	26	32	26	22	0,102	5,3E-07	0,000445	426,96	0,80	66,7%
14	24	32	24	20	0,102	6,3E-07	0,000535	426,96	0,96	55,6%
14	26	34	26	22	0,099	6,3E-07	0,000535	415,53	0,96	60,0%
14	28	34	28	24	0,096	6,9E-07	0,000587	403,84	1,06	70,0%
14	30	36	28	24	0,096	6,9E-07	0,000587	403,84	1,06	63,6%
14	28	30	24	22	0,096	7,2E-07	0,000613	403,84	1,10	62,5%

Donde:

T_1 = Temperatura de entrada del combustible al intercambiador [°C]

T_2 = Temperatura de salida del agua del intercambiador [°C]

T_3 = Temperatura de entrada del agua al intercambiador [°C]

T_4 = Temperatura de salida del combustible del intercambiador [°C]

T_5 = Temperatura de entrada del combustible a la resistencia electrica [°C]

En la tabla 5.5 se pueden observar los datos de las temperaturas obtenidas en el intercambiador de calor de tubos concéntricos, lo que sirve para realizar el cálculo de la eficiencia del intercambiador.

Con el fin de establecer si el sistema de control funciona correctamente se procedió a tomar los datos de temperaturas con el sistema funcionando con el aceite vegetal.

Tabla 5.6. Datos experimentales del sistema de control.

T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]
18,0	37,6	41,5	82,8	90,6
19,9	37,6	41,5	84,7	96,5
19,9	37,6	43,5	88,7	96,5
19,9	39,6	39,6	90,6	96,5

5.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para determinar la reducción o aumento de las prestaciones del motor se procede a determinar el área bajo la curva para cada parámetro y se lo compara con el área del mismo parámetro obtenida para el diesel. Se debe tener en cuenta que el área bajo la curva es el resultado de integrar las ecuaciones correspondientes a cada curva. Estas ecuaciones fueron obtenidas mediante regresiones aplicadas a los datos recolectados.

Tabla 5.7. Ecuaciones obtenidas para cada curva.

ECUACIONES			
	Diesel	Aceite	Biodiesel
Torque	$y = -0,0387x + 78,974$	$y = -0,0313x + 62,044$	$y = -0,0369x + 74,34$
Potencia	$Y = -5,7E-06 * x^2 + 0,0103 * x + 3,24$	$y = -1,4E-06 * x^2 - 0,00162 * x + 9,302$	$y = -5,1E-06 * x^2 + 0,0085 * x + 3,88$
c.e.c	$y = 0,0811e^{0,0016x}$	$y = 0,0596e^{0,0021x}$	$y = 0,068e^{0,0019x}$
Eficiencia	$y = -2,8E-05 * x^2 + 0,065 * x - 12,16$	$y = -1,17E-05 * x^2 + 0,016 * x + 17,41$	$y = -2,21E-05 * x^2 + 0,048 * x - 6,56$

A continuación, en la figura 5.35 se representa el área bajo la curva obtenida con la ecuación de potencia para el diesel y en la figura 5.36 se muestra el área bajo la curva de potencia para el aceite.

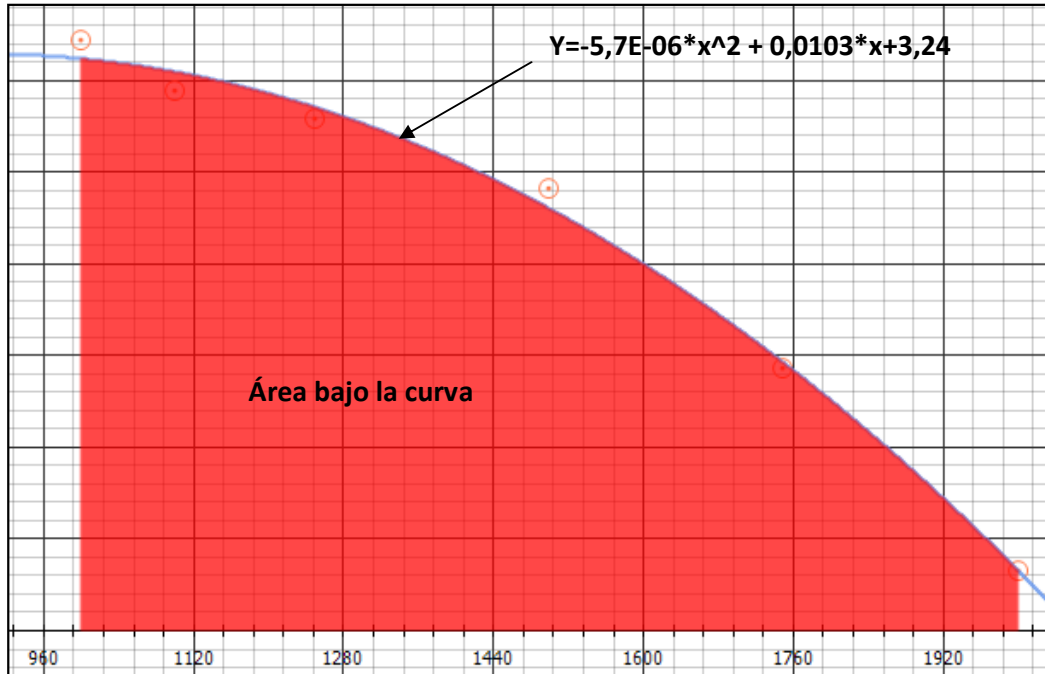


Figura 5.35. Curva de potencia del motor usando diesel como combustible.

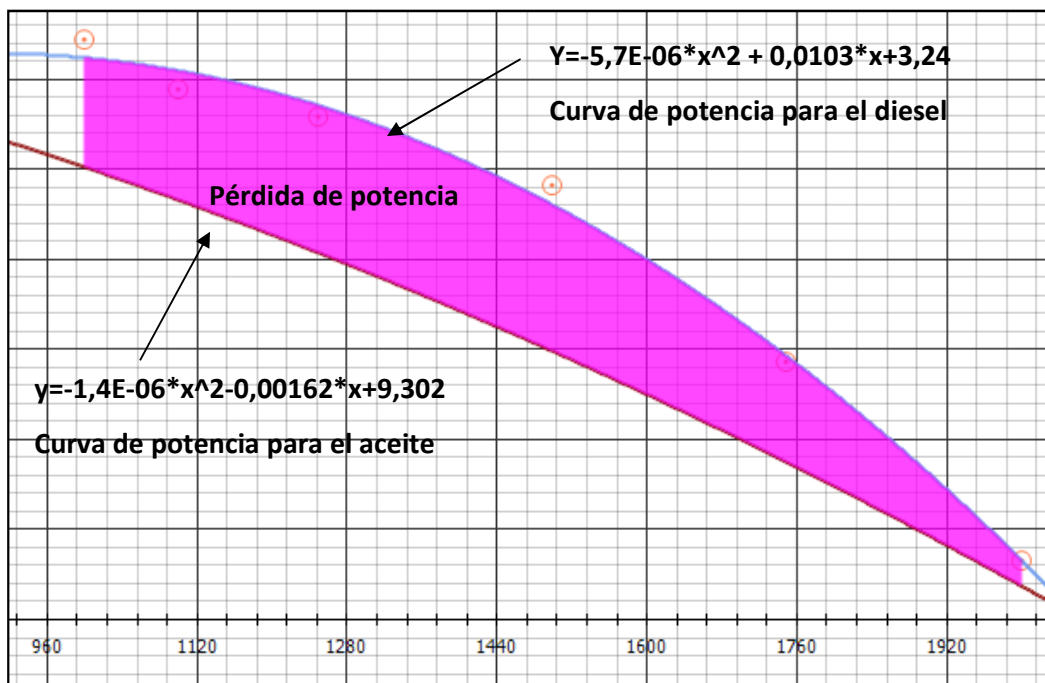


Figura 5.36. Representación de la pérdida de potencia del motor utilizando aceite de Jatropha como combustible.

Como se puede apreciar en la figura 5.36 el área comprendida entre la curva de potencia para el diesel y la curva de potencia para el aceite de Jatropha, muestra la pérdida que se tiene al utilizar el aceite en el mismo motor diesel.

Para determinar las variaciones de los otros parámetros del motor diesel como son el torque, la eficiencia y el consumo específico de combustible (c.e.c.) se siguió el mismo mecanismo de cálculo mostrado en las gráficas anteriores. Estos valores se registraron en la tabla 5.9, los valores negativos representan una reducción y los positivos representan un aumento en los parámetros analizados.

Tabla 5.8. Área bajo la gráfica de cada curva de velocidad.

Área bajo la curva			
	Diesel	Aceite	Biodiesel
Torque	20924,00	15094,0	18990,00
Potencia	5274,2214	3605,9	4775,14
c.e.c	992,17	1660,3	1360,11
Eficiencia	18870,09	13808,0	14932,13

Tabla 5.9. Porcentajes de pérdida o aumento de los parámetros del motor.

Porcentajes		
	Aceite	Biodiesel
Torque	-27,86%	-9,24%
Potencia	-31,63%	-9,46%
c.e.c	67,34%	37,08%
Eficiencia	-26,83%	-20,87%

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Para el correcto dimensionamiento del equipo fue importante contar con todos los datos necesarios y tomar en cuenta todas las restricciones, además se observó que en un proyecto de ingeniería intervienen profesionales de varias áreas, como por ejemplo, la química para definir las propiedades del aceite de Jatropha y la electrónica para facilitar el control del equipo.
- En el diseño del sistema de precalentamiento se debió prestar también especial atención al fluido a calentar, debido a que es un combustible y las fuentes de calor no deben ser ubicadas en contacto directo con el fluido para garantizar un funcionamiento seguro del equipo.
- Los materiales usados en la construcción del equipo fueron acero inoxidable para tuberías y accesorios para evitar problemas de corrosión, teflón sólido para la fabricación de los adaptadores de las termocuplas por su facilidad de maquinado, y como aislante térmico se usó fibra de vidrio.
- De la tabla de ponderación de las alternativas se seleccionó la alternativa B que está compuesta por un tanque, un intercambiador de tubos concéntricos y una resistencia eléctrica de calentamiento. Este sistema presento mayores facilidades para su construcción ya que el intercambiador no posee elementos complejos y además existen en el mercado nacional.

- Debido a las condiciones de trabajo del equipo para su construcción se utilizó tubería de acero inoxidable FUJI Hidrinox que no es convencional, es decir no roscada, con lo que se facilitó la fabricación del mismo y se redujeron los costos de materiales y accesorios.
- Se utilizó la resistencia eléctrica de calentamiento debido a que el sistema de refrigeración del motor es un circuito abierto, por lo que la temperatura del agua de refrigeración no se eleva hasta los 84°C que requiere el aceite para tener una viscosidad adecuada.
- Se seleccionó una resistencia eléctrica de calentamiento tipo abrazadera para evitar el contacto directo con el fluido debido a que es un combustible y podría inflamarse.
- Con los datos recolectados del intercambiador de tubos concéntricos se observa que los parámetros de diseño establecidos han sido los correctos y además se cumple con las expectativas planteadas. El sistema de control cumplió la función de mantener el aceite de Jatropha a una temperatura constante de 90°C, es decir el precalentador de combustible funciona correctamente.
- El uso del aceite vegetal en el motor Diesel hace que este se comporte de forma semejante, esto se lo puede observar al analizar las curvas de velocidad obtenidas, el único cambio que se tiene es el desplazamiento de estas.
- Como se puede observar en los resultados de las curvas de velocidad obtenidas con el uso del aceite vegetal se tiene una pérdida considerable de potencia, torque, eficiencia y además el consumo específico de combustible se aumenta.

- Con el uso de biodiesel de *Jatropha* en el motor se reduce la potencia, torque y rendimiento térmico en menor cantidad que al usar el aceite puro, y se aumenta ligeramente el consumo específico de combustible.
- Con respecto al dióxido de carbono se puede ver que cuando se utiliza aceite de *Jatropha* este en promedio tiene un ligero aumento, pero al utilizar el biodiesel de *Jatropha* este se reduce, lo que es importante ya que este es uno de los objetivos principales del uso de este tipo de combustibles. Se concluye que en forma global el uso del biodiesel de *Jatropha* atenuaría la producción de este gas de efecto invernadero y además este sigue el ciclo de carbono lo que reduce aun más la emisión de CO₂.
- El oxígeno de los gases de escape al utilizar aceite tiene el siguiente comportamiento, cuando la velocidad es alta (motor con poca carga) la cantidad de oxígeno aumenta indicando una mezcla más pobre y cuando la velocidad es baja (motor con mucha carga) la cantidad de oxígeno disminuye indicando una mezcla más rica. En cambio al usar el biodiesel se tiene que en promedio la cantidad de oxígeno aumenta lo que indica una mezcla más pobre.
- El aceite y el biodiesel de *Jatropha* tienen un porcentaje mínimo de azufre, por lo que se garantiza que estos van a reducir notablemente la producción de dióxido de azufre en el motor con lo que se está reduciendo considerablemente el riesgo de enfermedades producidas por este contaminante.
- El monóxido de carbono tiene un comportamiento similar entre el diesel y el biodiesel de *Jatropha* lo que indica que la combustión es completa, por lo contrario con el aceite de *Jatropha* se genera un porcentaje mayor de este contaminante que es generado por una mala combustión en el interior del cilindro.

- Utilizando aceite de *Jatropha* como combustible se observa que la cantidad de óxido de nitrógeno producido se reduce considerablemente, lo que indica que se tiene una menor temperatura en la cámara de combustión, que se vería reflejada también en la reducción de la eficiencia del motor. El biodiesel y el diesel tienen un comportamiento similar respecto al óxido de nitrógeno.
- La opacidad tuvo una reducción muy considerable al utilizar estos combustibles alternativos, el biodiesel es el que menor cantidad de opacidad genera, seguido por el aceite de *Jatropha*.
- El material particulado producido por el motor tiene un comportamiento diferente para los tres tipos de combustibles usados, se observa un aumento de las partículas al usar biodiesel, y en el caso del aceite de *Jatropha* el aumento es todavía más considerable.
- A pesar que el color de humo que se obtuvo cuando se utilizó el biodiesel era menor al que se obtuvo con el diesel, se midió una mayor cantidad de material particulado lo que indica que las partículas generadas con el biodiesel no están compuestas de carbono, sino de otro tipo de sustancias, lo mismo ocurre en el caso del aceite.
- El sonido generado por el motor cuando funcionó con aceite de *Jatropha* era diferente al sonido producido cuando funciona con diesel, lo que nos indica que el motor no está calibrado para funcionar con el aceite.
- El uso de biocombustibles es una buena alternativa ya que se reduce el riesgo potencial que tienen los combustibles tradicionales como el diesel a desastres fortuitos como son derrames, peligro en la transportación, etc.

- El biodiesel de *Jatropha* tiene un comportamiento similar al diesel cuando se usa como combustible en el motor, lo que significa que es una buena alternativa para reducir el consumo de combustibles fósiles y la producción global de emisiones contaminantes.
- El motor no tuvo el comportamiento esperado al usar aceite de *Jatropha*, lo que indica que no es tan recomendable el uso de este en motores diesel sin modificar. Es necesario buscar la manera de calibrar al motor para que este pueda mejorar su comportamiento, por ejemplo variar el tiempo y la duración de la inyección.

6.2 RECOMENDACIONES

- Uno de los mayores inconvenientes del uso del aceite vegetal de *Jatropha* como combustible es que este adquiere un grado de acidez cuando es almacenado por largos períodos de tiempo, lo que puede generar daños en el motor. Por tal motivo es recomendable realizar un estudio del almacenamiento del aceite vegetal de *Jatropha*.
- Cuando se maneje aceite vegetal de *Jatropha* es necesario utilizar guantes de nitrilo ya que este tiene un ligero grado de toxicidad. Siempre se debe utilizar un equipo de protección personal.
- Se recomienda realizar un estudio para evitar la separación y precipitación del biodiesel a bajas temperaturas, ya que esto podría generar daños en los elementos del motor.
- Para un uso más adecuado del aceite vegetal de *Jatropha* puro como combustible sería bueno utilizar motores que estén diseñados específicamente para este tipo de aplicación.

- Realizar un estudio sobre la calibración de la bomba de inyección para utilizar biocombustibles.
- Hacer un estudio sobre la composición del material particulado que se produce cuando se utilizan biocombustibles, para así conocer cuáles son sus principales componentes y determinar cómo estos afectan a la salud de los seres vivos.
- Implementar equipos similares al construido en motores Diesel con circuitos de refrigeración cerrados y evaluar el desempeño de los mismos.
- Investigar sobre nuevos productos fabricados con relación a la aplicación que se quiere construir, para elegir los materiales y accesorios más idóneos, que faciliten la construcción del equipo cumpliendo con todos los requerimientos de funcionamiento y su posterior mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- INCROPERA F., Fundamentos de Transferencia de Calor, Editorial Prentice Hall, Cuarta edición, Mexico, 1999.
- CARRIÓN, L., CASTRO, D.; Diseño y construcción de una máquina extractora de aceite de semilla; Tesis de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional; 2008; Quito - Ecuador.
- HELDMAN D., Handbook of Food Engineering, Editorial Board, 1992.
- HOLMAN P., Transferencia de Calor, Editorial Mc Graw Hill, Octava Edición, España, 1998.
- AGUDELO J., Principios Básicos del MCI, Universidad de Antioquía, Facultad de Ingeniería Mecánica, Medellín, 2000.
- ZURITA M., Creación de un software didáctico para el reconocimiento de las prácticas de motores diesel y gasolina, Tesis de Ingeniería Mecánica, EPN, Quito, 2007.
- SÁNCHEZ Santiago, Energías Renovables Conceptos y aplicaciones, Fundación Natura, Quito, Junio 2003.
- ALBUJA M., Propiedades Físico-Químicas del aceite de Colza, Seminario "Biocombustibles una opción para el futuro", Quito, EPN, Octubre 2008.
- PROAÑO Oswaldo, Propiedades y procesamiento del Piñón para Biocombustibles, Seminario "Biocombustibles una opción para el futuro", Quito, EPN, Octubre 2008.
- Norma NTE INEN 1489, Productos derivados del Petróleo. Diesel Requerimientos.

- Norma NTE INEN 2482, Biodiesel Requerimientos, Primera edición.
- Fundación Natura-D.M.Q., Control de Emisiones Vehiculares, Quito.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- <http://www.elsbett.com/es/tecnologia-de-modificacion-elsbett/automovil.html>
- <http://exterior.pntic.mec.es/pvec0002/index.html>
- <http://www.jatropha.es/aceitecombustible.html>
- <http://www.biocarburante.com/wp-content/uploads/cultivo-colza>
- http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_761566093/Cruc%C3%ADferas.html
- <http://www.enbuenasmanos.com/articulos/muestra.asp?art=1893>
- http://www.kali-gmbh.com/duengemittel_sp/img/OCOSR1
- http://www.sica.int/busqueda/busqueda_archivo.aspx?Archivo=odoc_9504_1_21062006.pdf
- <http://www.gratisweb.com/palmaceite/biodieseaceitevegetal.html>
- <http://grupoqo2.blogspot.com/2007/11/transesterificacin.html>
- <http://www.yoteca.com/pg/Informacion-de-ventajas-y-desventajas-del-biodiesel.asp>
- <http://www.elsbett.com/>

- http://journeytoforever.org/es/biodiesel_fabricar.html
- <http://www.proyectosfindecarrera.com/definicion/relacion-compresion.html>
- <http://www.geocities.com/motorcity/pit/9975/databysubjet/alimentationsystem.html>
- <http://webdelautomovil.com/2007/09/sistema-de-refrigeracion/comment-page-1>
- <http://foro.loquo.com/viewtopic.php?t=52197>
- [http://starmedia.autocity.com/documentostecnicos/index.html?cat=\\$cat&codigoDoc=133](http://starmedia.autocity.com/documentostecnicos/index.html?cat=$cat&codigoDoc=133)
- http://www.aeade.net/index.php?option=com_content&task=view&id=16&Itemid=44
- <http://www.bce.fin.ec/docs.php.documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasInteres/Indice.html>
- <http://www.imconsultingcr.com/?p=875>
- http://www.sapiensman.com/conversion_tables/peso_especifico.html
- <http://www.info@ld-didactic.de.html>
- <http://www.conduit.com.ec/>
- <http://www.cisealco.com/contenido/productos/teflon/teflon.html>

ANEXOS