



## **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN**

### **TESIS**

**ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO PARA LA  
COMBUSTIÓN DE ACEITE CRUDO DE PALMA  
AFRICANA EN CALDERAS DE SISA DE C.V., EN EL  
COMPLEJO INDUSTRIAL PAJARITOS, DE  
COATZACOALCOS VER.**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA**

PRESENTA:

**ING. FRANCISCO VÁZQUEZ GORDILLO**

ASESOR:

**DR. ROBERTO RAMÍREZ MESA**



Minatitlán Ver., Noviembre de 2008



## **DEDICATORIA**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta Tesis a la memoria de mi padre, Sr. Ernesto Vázquez Nájera acaecido el día 18 de Agosto de 2006 y con profundo amor a mi madre, Sra. María Gordillo Espinosa quién con sus oraciones y plegarias me ha apoyado siempre para seguir adelante.

A mi esposa Rosy, por el cariño y la comprensión que me ha brindado y por alentarme en la realización de este objetivo que me propuse alcanzar.

A mis hijos Francisco Ernesto y Rodolfo, que fueron mi motivo para emprender esta meta y que espero que cuando ellos alcancen la mayoría de edad y cursen su educación Universitaria, este que es mi legado, les sirva como estándar de familia y les impulse a superarse y alcanzar metas cada vez mayores.

A mis hermanos Bertha, Candelaria, Segundo, Roberto (q.e.p.d.) y a mis sobrinos Henry, Maria Luisa, Rosalba.

A mis amigos y compañeros de trabajo, a Javier por ser el emprendedor también de una Maestría antes que yo, lo cual fue motivador para decidirme a hacer lo propio.

## **AGRADECIMIENTO**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco los apoyos obtenidos de parte de la empresa para efecto de llevar a cabo esta Maestría, la cual es sin duda un incentivo para mi desarrollo profesional y representa la satisfacción personal de crecimiento en la preparación y el conocimiento de nuevas herramientas, cuya aplicación pueden significar la diferencia entre dejar las cosas como están o de reencausar las acciones para mejorar las áreas de oportunidad en los campos de trabajo de la empresa.

Mis agradecimientos son en tal sentido para; Ing. Domingo Arzani Capelini, Ing. Hugo Guerrero Pompermayer y para Ing. Héctor C. Rebolledo Martínez.

Agradezco a mis maestros; Dr. Lázaro Valentín García Aguilar, Dr. Hernando Romero Paredes Rubio, MC. Arturo Casados, MC. René Yamamoto Arana, MC. Andrés Álvarez Alvarado y a mi asesor de Tesis y especialmente al Dr. Roberto Ramírez Mesa, mismo que tuvo a bien la función de ser coordinador de la Maestría y profesor en materias trascendentes de la misma, por todo ello les agradezco sus conocimientos, tiempo y esfuerzo que me brindaron para hacer realidad este logro.

Agradezco a mis compañeros de grupo, sus atenciones para con mi persona y por haber demostrado fuerza de voluntad y esmero para haber llevado juntos a feliz término la meta trazada.

## ÍNDICE

# ÍNDICE

CONTENIDO	PÁGINA
<b>RESUMEN</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	xii
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN</b> .....	2
1.1 Justificación y viabilidad técnica, económica y social.....	2
1.1.1 El interés en biocombustibles.....	2
1.1.2 Antecedentes.....	5
1.1.3 Viabilidad técnica.....	7
1.2 Impacto Ecológico.....	8
1.3 Objetivo General del Proyecto.....	10
1.4 Objetivos específicos.....	10
1.5 Problema científico al que obedece.....	11
1.6 Preguntas de investigación.....	11
1.7 Hipótesis científica.....	13
1.8 Tipo de diseño de experimento.....	13
1.9 Formas de recopilación de datos experimentales.....	14
1.10 Valoración de los beneficios de la Tesis.....	14
1.11 Tipo de modelación y/o simulación matemática.....	14
1.12 Métodos de optimización a emplear.....	14
<b>CAPÍTULO II DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA EMPRESA SISA DE C.V.</b> .....	16
2.1 Historia.....	16
2.2 Misión.....	16
2.3 Visión.....	16
2.4 Política de Calidad.....	16
2.5 Giro.....	17
2.6 Capacidad productiva.....	17
2.7 Organigrama.....	17
2.8 Descripción del proceso.....	18

2.9	Proceso de extracción y elaboración de sal.....	19
2.10	Datos de consumos históricos de gas natural.....	20
2.11	Planos de localización.....	22
	<b>CAPÍTULO III ANÁLISIS TEÓRICO DE LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO, USOS DEL BIODIÉSEL, SU PRODUCCIÓN Y COSTOS.....</b>	<b>28</b>
3.1	Concepto de Agro-energética en México.....	28
3.2	Biomasa.....	28
3.2.1	Formas de obtención de la biomasa.....	28
3.2.2	Energía de la biomasa.....	29
3.2.3	Procesamiento de la biomasa con fines energéticos.....	29
3.2.4	Procesos derivados de la conversión termoquímica de la biomasa.....	30
3.3	Usos de la Biomasa y de los cultivos energéticos en México.....	31
3.4	Análisis crítico del libro Energías Renovables.....	32
3.5	Nuevas Agroindustrias.....	33
3.5.1	Clasificación de las nuevas agroindustrias.....	34
3.5.2	Potencialidad de los cultivos energéticos en México.....	35
3.6	Proceso de producción del Biodiésel a base del aceite de palma Africana y su disponibilidad.....	36
3.6.1	Clasificación y características de la palma de aceite.....	37
3.7	Producción mundial de aceites y grasas vegetales.....	39
3.8	Rendimientos de las plantaciones de palma de aceite.....	43
3.9	Localización y capacidad de procesamiento de las plantas Extractoras de aceite de palma en México.....	44
3.10	Esquemas de costos de oportunidad del Biodiésel según la Fuente.....	45
3.11	Emisiones del Biodiésel a base de aceite de palma Africana.....	47
3.12	Disponibilidad del Biodiésel a base de aceite de palma Africana en México.....	48
	<b>CAPÍTULO IV DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA LA COMBUSTIÓN DEL ACEITE CRUDO DE PALMA</b>	

<b>AFRICANA EN UNA CALDERA RADIANTE DE S.I.S.A. DE C.V.....</b>	<b>52</b>
4.1 Características de los materiales grasos en la naturaleza.....	52
4.2 Sistema de preparación del combustible.....	53
4.3 Composición de los diferentes tipos de aceites, de acuerdo al contenido de ácidos grasos que los constituyen.....	55
4.4 Composición química del aceite de palma Africana.....	56
4.5 Propiedades físicas y químicas del aceite de palma Africana.....	58
4.6 Poder calorífico del aceite crudo de palma Africana y/o biodiésel B100.....	61
4.7 Selección de la caldera de trabajo.....	65
4.8 Cálculo de la combustión.....	68
4.9 Cálculo de la capacidad del ventilador de tiro forzado.....	74
4.10 Cálculo de los volúmenes de los productos de la combustión mediante ecuaciones empíricas.....	75
4.10.1 Volúmenes teóricos.....	75
4.10.2 Volúmenes reales.....	76
4.10.3 Determinación de las entalpías del aire y de los GPC.....	78
4.11 Balance térmico de la caldera.....	82
4.11.1 Calor disponible o potencial.....	82
4.11.2 Determinación de las pérdidas de calor.....	83
4.12 Cálculo de las eficiencias del equipo.....	86
4.11.1 Eficiencia bruta.....	86
4.11.2 Eficiencia neta.....	87
4.13 Cálculo de las exergías de las corrientes del lazo energético.....	87
4.14 Cálculos termoeconómicos.....	91
<b>CAPÍTULO V RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>94</b>
5.1 Comprobación de hipótesis.....	94
5.2 Respuesta a la pregunta de investigación.....	95
5.3 Demanda anual de aceite crudo de palma Africana para la caldera de SISA de C.V. contra la disponibilidad en el mercado.....	95
5.4 Área de cultivo requerido para la demanda de ACP, en la caldera	

de SISA de C.V.....	96
5.5 Determinación de los beneficios por créditos de reducción de emisiones (CRE), considerando un proyecto MDL.....	97
5.6 Análisis de rentabilidad de la inversión.....	99
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>105</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>113</b>

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Declaración de variables de investigación.....	12
Tabla 1.2 Declaración de hipótesis.....	13
Tabla 2.1 Consumos de gas natural primer semestre año 2006.....	20
Tabla 2.2 Consumos de gas natural segundo semestre año 2006.....	21
Tabla 3.1 Oferta mundial de los 12 principales aceites y grasas.....	40
Tabla 3.2 Consumo mundial de los 12 principales aceites y grasas.....	40
Tabla 3.3 Estructura de la producción mundial de aceite de palma.....	42
Tabla 3.4 Participación de países del continente Americano en la producción mundial de aceite de palma.....	42
Tabla 3.5 Rendimientos de cultivos.....	43
Tabla 3.6 Localización de las plantas extractoras en México.....	44
Tabla 3.7 Informe de precios del mercado de aceites, al primer semestre de 2008, fuente: Lípidos Santiga S.A., España.....	47
Tabla 3.8 Emisiones atmosféricas del aceite de palma Africana.....	48
Tabla 3.9 Superficies de cultivo de palma Africana en México / perennes / riego + temporal. Año 2003.....	49
Tabla 4.1 Ácidos grasos saturados e insaturados en aceites vegetales.....	55
Tabla 4.2 Composición química del aceite de palma Africana.....	57
Tabla 4.3 Propiedades físicas y químicas de los ácidos grasos presentes en el aceite de palma Africana.....	58
Tabla 4.4 Principales propiedades del aceite crudo de palma (acp) y su	

comparativo con la normatividad del diesel de petróleo y del Biodiésel refinado destinado para uso en vehículos automotores.....	60
Tabla 4.5 Capacidades y condiciones de diseño de calderas de SISA.	67
Tabla 4.6 Características de la caldera seleccionada.....	67
Tabla 4.7 Cálculo de la masa molecular y masa gravimétrica del aceite de palma Africana.....	69
Tabla 4.8 Cálculo de la masa molecular y masa gravimétrica del aire....	70
Tabla 4.9 Cálculo de la masa molecular y gravimétrica de los GPC.....	70
Tabla 4.10 Balance de reactivos y GPC teórico.....	70
Tabla 4.11 Balance másico teórico.....	71
Tabla 4.12 Cálculo de la masa molecular y la masa gravimétrica del aceite de palma Africana.....	71
Tabla 4.13 Cálculo de la masa molecular y masa gravimétrica del aire.	72
Tabla 4.14 Cálculo de la masa molecular y gravimétrica de los GPC.....	72
Tabla 4.15 Balance de reactivos y GPC real.....	72
Tabla 4.16 Balance másico.....	73
Tabla 4.17 Volúmenes ideales de gases, con los coeficientes de la ecuación unitaria.....	73
Tabla 4.18 Presiones parciales de Dalton.....	74
Tabla 4.19 Entalpías de los gases.....	79
Tabla 4.20 Temperaturas por secciones de la caldera.....	79
Tabla 4.21 Entalpía teórica de gases.....	79
Tabla 4.22 Entalpía teórica del aire.....	80
Tabla 4.23 Entalpía de los productos de la combustión.....	80
Tabla 4.24 Resumen de entalpías de los productos de la combustión....	81
Tabla 4.25 Cálculo de entalpías de vapores de agua.....	85
Tabla 4.26 Entalpías y entropías de corrientes.....	89
Tabla 4.27 Balance termoeconómico.....	92
Tabla 5.1 Costos de energéticos.....	94
Tabla 5.2 Alcance de modificaciones.....	100
Tabla 5.3 Estimado de costos para manejo de aceite crudo de palma...	100

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ciclo de Carbóno.....	9
Figura 2.1 Organigrama de SISA de C.V.....	18
Figura 2.2 Diagrama de flujo del proceso de producción de sal.....	19
Figura 2.3 Croquis general de localización de la empresa SISA de C.V.	22
Figura 2.4 Croquis de ubicación de SISA de C.V.....	23
Figura 2.5 Plano de localización del proceso y de las calderas.....	23
Figura 2.6 Parte frontal de caldera.....	24
Figura 2.7 Trenes de alimentación de combustibles a caldera .....	24
Figura 2.8 Parte frontal de quemadores de caldera.....	25
Figura 2.9 Parte lateral de caldera.....	26
Figura 2.10 Parte posterior de caldera.....	26
Figura 3.1 Reacción de obtención del Biodiésel.....	36
Figura 3.2 Cadena agroalimentaria e industrial de la palma de aceite....	38
Figura 3.3 Estructura de la producción mundial de aceites y grasas vegetales.....	39
Figura 3.4 Producción mundial del aceite de palma.....	41
Figura 3.5 Comparación del precio internacional del aceite de palma CIF Rotterdam vs. Aceite de soya FOB dutch.....	46
Figura 4.1 Bomba de calor.....	63
Figura 4.2 Cálculo de Hg y Hf mediante TPX.....	65
Figura 4.3 Lazo termodinámico de la caldera de trabajo.....	68
Figura 4.4 Entalpías de los productos de la combustión.....	81
Figura 4.5 Lazo energético de la caldera.....	88
Figura 5.1 Ejemplo de gráfica de precio y volúmenes de ton CO2 comerciadados en la Unión Europea.....	98
Figura 5.2 Lay Out de las instalaciones de descarga y alimentación de combustible a caldera.....	101
Figura 5.3 Indicadores financieros.....	102
Figura 5.4 Palma de colza.....	107

Figura 5.5 Campo de cultivo de colza.....	108
Figura 5.6 Campo de cultivo de girasol.....	108
Figura 5.7 Planta de soya y semillas.....	109
Figura 5.8 Campo de cultivo de soya.....	109
Figura 5.9 Palma de aceite Africana.....	110
Figura 5.10 Racimo con frutos de la palma de aceite Africana.....	110
Figura 5.11 Frutos de palma Africana y aceite extraido.....	111
Figura 5.12 Campo de cultivo de palma Africana productor de Biodiésel	111

## **RESUMEN**

## RESUMEN

La presente investigación esta referida al campo de los combustibles alternativos, como es el Biodiésel, con un claro enfoque de propuesta de su uso a nivel industrial en equipos de fuentes fijas como son calderas, teniendo como propósito el de reducir el consumo de combustibles de fuentes fósiles como actualmente ocurre con la quema de gas natural, combustóleo y diésel.

El material base que se plantea ocupar como biodiésel, es el aceite crudo de palma africana, por lo cual en este trabajo se explorará todo lo referente a la producción del aceite de palma, los cultivos y sus rendimientos, los niveles de producción mundial, la disponibilidad en los campos de cultivo Mexicanos y de centro y sur América y un comparativo contra otros aceites, como soya, colza, etc., los precios internacionales, la factibilidad técnica y los volúmenes de consumo en calderas.

Este trabajo se desarrollará en SISA de C.V. localizada en el complejo Industrial Pajaritos, de Coatzacoalcos Ver., empresa dedicada a la producción de sal comestible al alto vacío, misma que para tal efecto emplea generadores de vapor como medio de calentamiento del proceso productivo y donde el factor de consumo de energéticos tiene alta importancia ya que representa el 80 % de los costos de producción.

La investigación bibliográfica se inició durante el segundo semestre de 2007, pasando enseguida a la integración del marco teórico sobre las formas de obtención de los biocombustibles en México y en el extranjero, la disponibilidad, volúmenes de producción y costos, para después continuar con la determinación de las propiedades fisicoquímicas, los balances térmicos y másicos, así como la metodología de cálculo del generador de vapor y su eficiencia, que es objeto de la presente Tesis, hasta llegar con el planteamiento a la Administración de la Empresa para fines de implementación de pruebas, en caso de ser favorables.

Para la integración de la documentación bibliográfica del tema, se recurrió a fuentes de información como el Plan Rector de Cultivo Palma de Aceite del Estado de Veracruz y del estado de Chiapas, a FEDEPALMA de Colombia, a datos aportados por la Universidad de Strathclyde de Glasgow Escocia, de quién se

obtuvo un simulador para seleccionar el tipo de aceite y del cual se obtiene como resultante la cantidad de terreno requerido para los cultivos y la cantidad de CO<sub>2</sub> que se dejan de emitir al ambiente.

Seguidamente se procedió a evaluar la infraestructura requerida para el acopio y almacenamiento del aceite, las facilidades de transferencia y de alimentación a calderas, haciendo énfasis en la preservación del producto limitado a sus propiedades físicas.

Con lo anterior, se plantea el alcance de las adecuaciones y modificaciones necesarias que dan lugar al estimado de costos y que es la base del monto de inversión del proyecto con el cual se sustenta el análisis de rentabilidad del mismo.

Para efectos de la ejecución del presente proyecto, se emitirá un reporte técnico que se entregará a la empresa con los resultados obtenidos y respaldado por un archivo electrónico conteniendo los ejercicios de evaluación correspondientes.

## **ABSTRACT**

## **ABSTRACT**

The present investigation this referred to the field of alternative fuels, as it is the Biodiésel, with a clear approach of proposal of its use at industrial level in equipment of fixed sources as they are boilers, having as intention the one to reduce the fuel consumption of fossil sources as at the moment it happens with it burns the natural gas, oil number six and diésel.

The material base that considers to occupy like biodiesel, is the crude oil of African palm, this is the reason why in this work one will be able to explore all the referring one to the production of the palm oil, the cultivations and their yields, the levels of world-wide production, the availability in the Mexican cultivations fields and center and the south America and a comparative one against other oils, like soya, the international oilseed rape, etc., prices, the technical feasibility and the volumes of consumption in boilers.

This work will be developed in SISA de C.V. located in the Complejo Industrial Pajaritos, of Coatzacoalcos Ver., company dedicated to the salt production food the high vacuum, the process use to use water steam from boilers, like means of heating of the productive process and where the factor of consumption of power has discharge importance since it represents 80% of the production costs.

The bibliographical investigation began during the second semester of 2007, happening immediately to the integration of the theoretical frame over the obtaining forms of the biofuels in Mexico and abroad, the availability, volumes of production and costs, later to continue with the determination of the physico-chemical properties, the heat balances and mass, as well as the methodology of calculation of the steam generator and its efficiency, that is object of the present Thesis, until arriving with the exposition at the General Manager of the Company in order to implementation of tests, in case to obtain benefits.

For the integration of the bibliographical documentation of the subject, the sources of intelligence were; The Governing Plan of Oil Palm Cultivations from Veracruz and the Chiapas Estates, to FEDEPALMA of Colombia, data contributed by the University of Strathclyde Glasgow Scotland, from whom a simulator was obtained to select the type of oil and from which the amount of land required for the cultivations

and the amount of CO<sub>2</sub> is obtained like resultant that are stopped emitting to the atmosphere.

Next it was come to evaluate the infrastructure required for the storing and storage of the oil, the facilities of boiler transference and feeding, doing emphasis in the preservation of the product limited his physical properties.

Acording with the previous thing, one considers the reach of the adjustments and necessary modifications that they give rise the considered one of costs and that is the base of the amount of investment of the project with which the analysis of yield of the same is sustained.

In order to make the present project, a technical report will be emitted that will be given to the company with the obtained results and endorsed by an electronic file containing the corresponding exercises of evaluation.

# **CAPÍTULO I**

## **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Justificación y viabilidad técnica, económica y social**

A continuación se presentan los factores que han inducido la expansión del uso de biocombustibles en todo el mundo y en particular, en América Central, así como antecedentes del presente estudio, sus objetivos y la metodología adoptada.

#### **1.1.1 El Interés en Biocombustibles**

La biomasa, principalmente la leña, fue durante siglos el principal combustible para la humanidad. Con el crecimiento de la demanda energética, a partir de la Revolución Industrial, que incluyó la introducción del carbón mineral y el petróleo, asociado a una amplia adopción de tecnologías adecuadas para su uso, la matriz energética se transformó, para ceder el paso a la utilización de recursos no renovables y la biomasa fue paulatinamente perdiendo importancia.

Posteriormente, a partir de las crisis del petróleo de los años setenta, los combustibles derivados de la biomasa o biocombustibles vuelven a ser considerados alternativas capaces de sustitución, con ventajas, de los derivados del petróleo. Particularmente en Brasil, se intensificó el empleo del alcohol de caña de azúcar o etanol como combustible automotor, mezclado con gasolina o puro.

De acuerdo con Horta Nogueira Luís Augusto, consultor del proyecto para Unidad de Energía de la sede subregional de la CEPAL en México (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) [14], actualmente cerca de 18'000,000 de automóviles brasileños, es decir, la totalidad de la flota de vehículos livianos en este país, utiliza alcohol en sus motores, 3 millones de unidades consumen alcohol hidratado puro y 15'000,000 consumen gasolina con 25% de alcohol anhidro. Hace muchos años que ya no existen más autos a gasolina pura en Brasil.

La motivación inicial para la implementación de un programa de biocombustibles, como en el caso del alcohol energético, fue reducir la dependencia externa en el suministro de combustibles y asegurar el abastecimiento del mercado nacional a partir de fuentes locales, con potenciales ventajas en términos de balanza de pagos y equilibrio fiscal. Estas razones aun deben ser considerados vigentes, pero en la actualidad otros aspectos se agregan para promover los biocombustibles en un gran número de países desarrollados o en desarrollo. Así, pueden ser citados:

- La sustentabilidad ambiental de los biocombustibles, por ser una forma renovable de energía, o por presentar un menor impacto ambiental en el uso final.
- La posibilidad de dinamizar las actividades agrícolas y generar empleo en el medio rural, por medio de la producción de los biocombustibles y
- La diversificación estratégica que los biocombustibles traen a los sectores agroindustriales eventualmente estancados o en retracción.

Entre los factores arriba mencionados, los aspectos ambientales han sido los más difundidos, en términos locales y globales. Con relación a los índices de emisión atmosférica de impacto local y con la significativa evolución de las tecnologías de combustión y abatimiento de gases contaminantes de los motores, independientemente del combustible adoptado, los biocombustibles siguen presentando ventajas comparativas frente a los combustibles fósiles, especialmente en cuanto a la emisión de partículas y compuestos de azufre.

Desde el punto de vista de las emisiones de impacto global, asociadas al efecto invernadero, los biocombustibles son nítidamente superiores y permiten un sensible beneficio ambiental, ya que el dióxido de carbono liberado en su combustión resulta del carbono atmosférico secuestrado durante la fotosíntesis.

Por todos estos motivos, con diferentes grados de prioridad, los biocombustibles vienen despertando efectivo interés, más allá de las fronteras brasileñas. Un ejemplo de este nuevo escenario puede ser el significativo crecimiento de la demanda de alcohol energético en los Estados Unidos, con un consumo actual del orden de 8 billones de litros, así como la implementación del uso de biodiesel en Europa, cuya demanda anual pasa de un billón de litros.

También pueden ser citados los diversos estudios, muy avanzados en algunos casos, para la introducción de mezclas de gasolina/alcohol en países asiáticos y latinoamericanos. Seguramente de forma más concreta que cualquier otra fuente renovable o innovadora para la producción de combustibles, la ruta fotosintética se muestra atractiva y con una clara expansión a medio plazo.

En el ámbito Latinoamericano y principalmente Centroamericano están presentes, en distintos niveles de importancia, todos los factores referidos de

estímulo a los biocombustibles. Cabe señalar que esta región importa prácticamente todo el combustible que necesita, ya que en Guatemala la escasa producción, no basta para atender el mercado, por su volumen y calidad. “Durante el año 2002, los países de la región (excluyendo Belice) consumieron 88´400,000 de barriles de combustibles derivados del petróleo, siendo 28.5% correspondiente a la gasolina y 36.7% al diésel, significando un gasto en divisas de 2´683,000 de dólares. Si se sustituyera el 10% de la gasolina consumida por etanol, la economía tendría un ahorro previsible del orden de 76´000,000 de dólares anuales.”<sup>1</sup>

De acuerdo con Plata Juan Carlos, del departamento de Comunicación Social de la Universidad Veracruzana [19], México a pesar de ser uno de los principales productores de petróleo en el mundo, importa siete mil 350 millones de dólares al año en gasolinas, alrededor del 30 por ciento del consumo nacional; esto debido a que Petróleos Mexicanos (PEMEX) no ha incrementado su capacidad de refinación en los últimos 25 años.

“El país consume aproximadamente 680 mil barriles diarios de gasolina, de los cuales entre 200 y 220 mil son importados, lo que representa anualmente siete mil 350 millones de dólares y si a esto se le suma las importaciones de productos petroquímicos y petrolíferos como gas natural, diésel, disolventes, benceno, etcétera, la cifra llega a nueve mil 700 millones de dólares. Además el consumo de gasolinas aumenta un 4.2 por ciento al año.”<sup>2</sup>

Trinidad S., en el seminario internacional de alcohol carburante, [26], se menciona que “Otro resultado económico importante se obtendría con el incremento de la exportación de alcohol a países como Estados Unidos y Japón, países que muestran una expansión en su demanda y dependencia de importaciones para el abastecimiento de su mercado interno de aditivos oxigenados para la gasolina. Un estudio sobre las perspectivas a mediano plazo para el mercado de alcohol etílico

---

<sup>1</sup> Horta, Nogueira Luis Augusto; Perspectivas de un programa de Biocombustibles en América Central, CEPAL en México, <http://www.eclac.org>, Marzo de 2004. pág. 2

<sup>2</sup> Plata, Juan Carlos, “Caña de azúcar; Alternativa para problemas energéticos, ecológicos y económicos”, Universidad Veracruzana, México, Universo: El periódico de los universitarios-No\_ 221.mht, Junio 2006. pag.1

carburante estima para el 2010 una demanda de entre 45'000,000 y 62'500,000 de metros cúbicos.”<sup>3</sup>

Asimismo, contribuye de modo importante a aumentar el interés en los biocombustibles la experiencia y los efectos de las crisis en los sectores agrícolas exportadores tradicionales, como es el caso del café, el algodón y el azúcar. Tales productos son los componentes básicos de la exportación de estos países, y la depresión o excesiva volatilidad de los precios constituyen la causa principal del estancamiento de amplios sectores rurales y de la difícil situación social prevaleciente. Como ejemplo: en Guatemala se menciona que 500,000 trabajadores quedaron desempleados debido a la crisis del café de las últimas décadas. En este sentido, la introducción de los biocombustibles puede representar un factor relevante de diversificación y para dinamizar la actividad económica y del incremento del nivel de empleo. Sin incluir los empleos generados en la construcción de las unidades productoras, se estima un aumento de 14,000 empleos directos en la industria y en la agricultura, para atender una demanda de alcohol anhidro correspondiente a 10% del consumo de gasolina en toda la región.

Cabe hacer notar que la agroindustria de la caña de azúcar ya está presente en el escenario centroamericano y su eventual diversificación y dinámica no impone nuevas pautas culturales ni incide en temas totalmente innovadores, como a veces sucede con sistemas energéticos alternativos.

Recientemente se ha vuelto más relevante la cultura de la caña de azúcar y la producción de alcohol para bebidas, ya conocida en México y Centroamérica desde los tiempos coloniales, en que siempre fue una actividad importante, coadyuvante de los principales productos agrícolas, como el añil, el plátano y el café.

### **1.1.2 Antecedentes**

La propuesta de implementar el uso de biocombustibles en países de América Central ya ha sido objeto de estudio así como de inversiones significativas aun en los años ochenta, básicamente buscando reproducir la experiencia brasileña de la época. Así, en países como Guatemala, El Salvador y Costa Rica, se estuvo cerca de viabilizar la producción y uso de etanol de caña de azúcar. Sin embargo,

---

<sup>3</sup> Trindade, S., “The basis for a Sustainable World Fuel Ethanol Market, Seminario Internacional de Alcohol carburante”, ASOCAÑA/CORPODIB/TECNICAÑA, Santiago de Cali, Colombia, junio de 2003. pag. 8

diversos factores, como dificultades operacionales, caída de los precios del petróleo a partir de 1985 y falta de una adecuada planificación llevaron al fracaso estas iniciativas, que en su mayor parte no llegó a la efectiva comercialización de combustibles o la mantuvo apenas por poco tiempo. Desde entonces, la producción y uso de biocombustibles quedaron prácticamente olvidados y desacreditados en la región.

De acuerdo con Díaz M., Veras M.A., en el libro *Experiencia y Perspectivas en América Latina sobre Alcohol Carburante* [9], es un documento esencial, referencia obligada de proyectos y planes de los años ochenta tendientes a introducir alcohol carburante en América Latina y eventual punto de partida para nuevos intentos.

Esta obra conjunta de organizaciones de la región Latinoamericana y del Caribe, discute la importancia del alcohol para la región (con estudios para diversos países, entre ellos Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Panamá), comenta los aspectos metodológicos necesarios a la formulación y desarrollo de programas de alcohol carburante y evalúa las herramientas de análisis de inversiones y aspectos legales en programas de este tipo.

Como se menciona en el punto anterior, con la evolución del sector energético, asociada a la necesidad de diversificación del sector de la caña de azúcar, retornó a la región el interés por los biocombustibles, en especial el alcohol. Por este motivo, en la Reunión Anual de Directores de Hidrocarburos de Centroamérica, realizada en San José, Costa Rica, en abril del 2003, se acordó realizar un estudio sobre las perspectivas de un programa de biocombustibles en América Central. Tal estudio pretende fundamentar un proyecto más amplio sobre este tema, que efectivamente incentive el uso de biocombustibles en el sector de transporte y oriente la formación del necesario marco legal y reglamentación, a ser establecido de forma coordinada y armonizada entre los países interesados.

Para avanzar en la comprensión del contexto y en la definición de las perspectivas para los biocombustibles en México y Centroamérica, se considera de suma importancia tener identificados los indicadores de productividad y

competitividad, indicadores sobre aspectos agrícolas, industriales y condiciones de uso y del mercado de los combustibles en los países considerados.

Mientras el cultivo de la caña de azúcar y su procesamiento pertenecen a la realidad Centroamericana, habiendo ocurrido iniciativas concretas para implementar programas de alcohol carburante en diversos países, México no es la excepción, el 14 de Marzo de 2007 la empresa Varium del Sureste, dio a conocer un ambicioso proyecto de inversión denominado “Desarrollo Agroindustrial Etanol”, con un monto aproximado de 200 millones de dólares, en una primer etapa se proyecta invertir un monto de 12.5 millones de dólares para instalar a mediano plazo una planta de Etanol en el municipio de Champotón en el Estado de Campeche, la propuesta es fomentar el cultivo y aprovechamiento de 60 mil hectáreas de “yuca”, como materia prima de biomasa del tipo amiláceo, de donde se fermenta el almidón del tubérculo, para obtener etanol [6].

Lo anterior es un claro ejemplo de la diversificación de los cultivos energéticos para la elaboración de biocombustibles y como se verá más adelante, en el presente trabajo se explora un importante campo de fuentes de cultivos alternos como tal es el caso de la producción de Biodiésel a partir de ésteres de aceites vegetales como sustituto del diésel derivado de petróleo, aun cuando algunos autores consideran que se encuentra todavía a nivel especulativo en los países en desarrollo, no deja por demás ser inquietante una tendencia de crecimiento en los más recientes años.

En 1992 el Departamento de Energía de Estados Unidos hizo un reconocimiento oficial por de los llamados Combustibles Alternativos, amigables con el Medio Ambiente, dentro de los cuales destaca como una opción muy atractiva el Biodiésel.

### **1.1.3 Viabilidad técnica**

El presente trabajo está orientado a una investigación en el campo de la optimización de calderas, los combustibles y su combustión y obedece a una línea de trabajo directamente ligada al ahorro de energía y la conservación del medio ambiente.

Desde el punto de vista técnico se considera que no existe inconveniente de realizar tal propuesta, por lo que se percibe que es 100 % factible de ejecutarse.

Los beneficios que se pueden obtener derivados de quema del aceite crudo de palma Africana en calderas, son entre otros los siguientes:

- Tener operaciones que pueden permitir alcanzar la acreditación de “Industria limpia” ante las autoridades competentes como la expedida por PROFEPA, evitando el pago de multas y sanciones por no cumplir parámetros de control de emisiones.
- Tener la oportunidad de participación en el mercado internacional de los Bonos de Carbón, al propiciar que el CO<sub>2</sub> quemado y liberado a la atmósfera, vuelva a ser fijado y el ciclo tenga como resultado un balance cero, en lo que a emisiones se refiere, no habiendo acumulación de gases de efecto invernadero. Con utilidades que van desde 10 a 20 u.s.d. por tonelada de Carbón.
- Tener la posibilidad de que los costos de Inversión en este proyecto, pueda ser financiado, por empresas consultoras acreditadas según el protocolo de Kyoto.
- Tener la posibilidad de reducir el costo unitario de generación de vapor, debido a diferenciales de precios entre el aceite de palma Africana y la escalada de precios de los energéticos derivados del petróleo.

## **1.2 Impacto Ecológico**

La extracción y consumo de combustibles de fuentes fósiles ha generado grandes emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente, las cuales a su vez han afectado la capa de ozono, contribuyendo de forma directa al efecto invernadero y a los cambios climáticos del planeta.

Debido a lo anterior, como una forma de disminuir los problemas ocasionados por las industrias petroleras y con el fin de darle valor agregado a productos que actualmente no están siendo económicamente aprovechables, surge la inquietud de realizar este proyecto, con el propósito de promover una alternativa de combustible sostenible (Biodiésel), producido a partir de “Ésteres metílicos” .

Como ya se comentó, el Biodiésel es un combustible alternativo renovable, hecho de triglicéridos (aceites, grasas, aceites vegetales usados etc.), bien como Biodiésel puro o mezclado en cualquier proporción con petrodiésel. Al mismo tiempo, este tipo de combustible está exento desde su origen de emanaciones de azufre, las cuales son responsables de las lluvias ácidas y reduce significativamente la emisión de partículas a la atmósfera. Además, la producción de Biodiésel a partir de aceites vegetales es una forma de reciclar el CO<sub>2</sub> de la atmósfera y ahorrar el consumo de combustibles fósiles.

La diferencia del diésel del petróleo y del Biodiésel, es que siendo un recurso renovable crea menos contaminación que el primero, pues aunque el Biodiésel emite casi la misma cantidad de dióxido de carbono que los combustibles fósiles, el CO<sub>2</sub> emanado por éste, es vuelto a fijar por la masa vegetal a través del proceso de la fotosíntesis, de esta forma se produce un “ciclo de carbono”, (ver Figura 1.1), que hace que el CO<sub>2</sub> quemado y liberado a la atmósfera, vuelva a ser fijado y el ciclo tenga como resultado un balance cero, no habiendo acumulación de gases. Esta característica le confiere al presente estudio la oportunidad de participación en el mercado de los Bonos de Carbono, mediante la utilización del aceite de palma Africana en calderas.

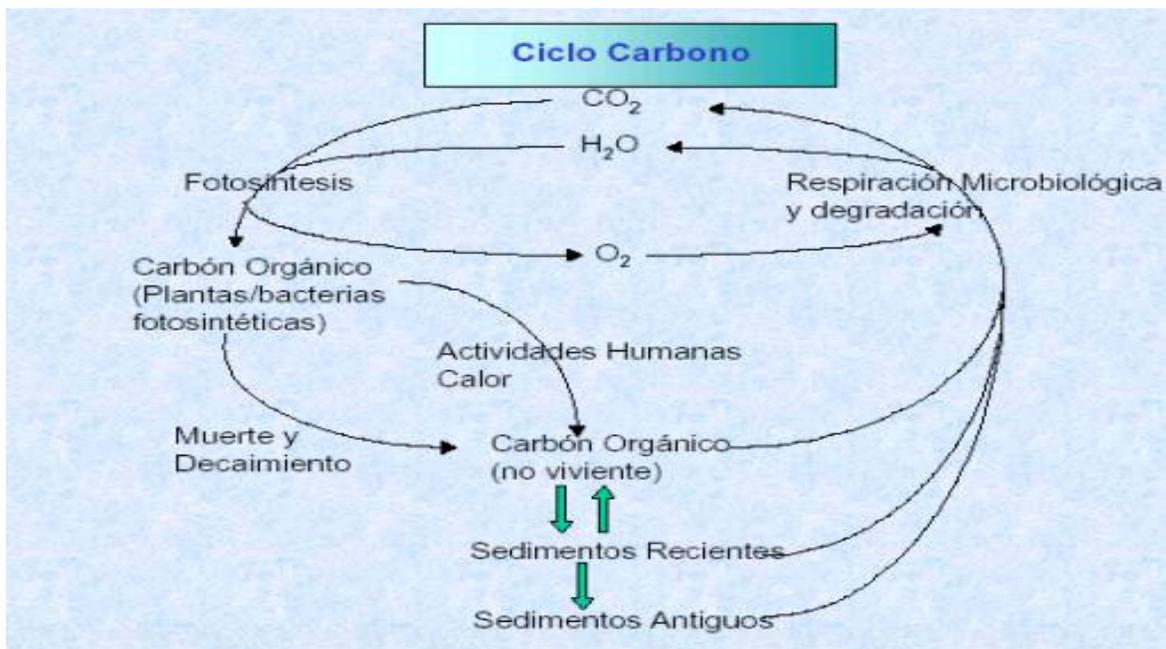


Figura 1.1 Ciclo de Carbono, [18]

El ciclo descrito contrasta notoriamente con lo que sucede con la emisión de CO<sub>2</sub> producido por la quema de los combustibles fósiles. En este proceso el carbón liberado, fijado hace miles de millones de años, es quemado y vuelto a liberar, causando la acumulación de los mismos en la atmósfera, el efecto invernadero y el calentamiento global.

La combustión del Biodiésel genera menos elementos nocivos que los combustibles tradicionales, reduciendo las posibilidades de producir cáncer y de crear irritaciones en la epidermis de la piel humana. Por último, su transporte y almacenamiento resulta más seguro que el de los petro - derivados ya que posee un punto de ignición más elevado, el Biodiésel tiene un punto de ignición de 148 °C , contra los escasos 51° C del diésel de petróleo.

El ciclo biológico del Biodiésel reduce aproximadamente en 80% las emisiones de anhídrido carbónico y casi 100 % las emanaciones de dióxido de azufre, la combustión de Biodiésel disminuye en 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados y entre 75-90% en los hidrocarburos aromáticos. El Biodiésel proporciona reducciones significativas en la emanación de partículas de monóxido de carbono comparado con el diésel de petróleo. Además proporciona un leve incremento o decremento en óxidos de nitrógeno dependiendo del tipo motor.

### **1.3 Objetivo General del Proyecto**

Evaluar técnico económicamente la alternativa de conversión de un sistema de combustión convencional a base de aceite crudo de palma Africana en generadores de vapor Industriales, que permita reducir y/o prescindir del uso de combustibles de fuentes fósiles, por una fuente de energía 100 % renovable.

### **1.4 Objetivos Específicos**

- Desarrollar los balances de materia y energía junto con los modelos matemáticos correspondientes, con la propuesta de conversión para quemar aceite de palma Africana, sumados a la ingeniería de procesos requerida para las condiciones de operación en calderas existentes.
- Evaluar los rendimientos del consumo del aceite de palma Africana, comparado contra el uso de energéticos de fuentes fósiles, con un claro enfoque de reducción de su uso, motivo de que las reservas se

encuentran en franco agotamiento y que además incorporan emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del cambio climático.

- Incentivar la demanda del aceite de palma Africana para el auge de palmiticultores en la región sur de Veracruz.
- Ocupar una fuente de energía alternativa 100 % renovable y autóctona, que permita participar como un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), contemplado en los compromisos del protocolo de Kyoto.

### **1.5 Problema científico al que obedece**

La búsqueda de combustibles amigables con el Medio Ambiente, el incremento en los precios del petróleo y la reflexión sobre lo limitado de este recurso, son los motivadores para la búsqueda de combustibles alternativos, como es la propuesta de utilización del Biodiésel obtenido del aceite de palma Africana. El Biodiésel referido, no es tóxico, es biodegradable, es seguro de manejar y almacenar, es menos irritante, de aroma agradable, menos ruidoso y alarga la vida de los motores. Sus buenas cualidades son una fuente importante de incentivos, sobre todo desde el punto de vista social, para impulsar crecientemente su uso, ya que reduce estratégicamente la dependencia tecnológica, genera gran cantidad de fuentes de trabajo y promueve el desarrollo agroindustrial.

### **1.6 Preguntas de Investigación**

¿Cual será la eficiencia de operación de una caldera radiante marca Cerrey, de 68,100 Kg/Hr de capacidad de vapor sobrecalentado, a una presión de 45.71 Kg/cm<sup>2</sup> y 400 °C, que es convertida para quemar Biodiésel a base de aceite crudo de palma Africana, comparado contra el actual sistema que quema combustóleo?

¿Cual será el área de cultivo requerido, para asegurar un suministro confiable de aceite crudo de palma Africana, en función de los rendimientos de producción de aceite/ Ha de cultivo, para los volúmenes que demanda la operación de la caldera en forma anual?

De acuerdo a los datos posibles de ser estudiados de una caldera, en la Tabla 1.1 se enuncian las variables a analizar y medir, de los cuales surgen los parámetros fisicoquímicos, termodinámicos, matemáticos y económicos para su estudio y búsqueda de la respuesta a la pregunta de investigación planteada.

Tabla 1.1. Declaración de variables de investigación.

<b>NOMBRE DE LA VARIABLE</b>	<b>DECLARACIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DEFINICIÓN OPERACIONAL</b>	<b>CLASIFICACIÓN</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Costo u.s.d./año	Esta variable define los costos de uso de un tipo de sistema vs. el relacionado con el combustóleo.	Esta variable se tomará como los costos fijos totales reportados en los estados financieros de la empresa.	Cuantitativa, Dinámica, Dependiente, Económica	Se medirá en forma mensual y con ajuste de la paridad cambiaria promedio mensual, de Enero a Diciembre.
Tipo de sistema	Esta variable define el lazo termodinámico relacionado de un sistema vs. el relacionado con el combustóleo.	Esta variable se medirá en función de la cantidad de recursos energéticos para su operación óptima.	Termodinámica, Dinámica, Independiente	Se medirá los índices unitarios de consumos de energéticos por tonelada de vapor producida.
Flujo de calor kj / hr	Esta variable define la carga térmica requerida en cada sistema.	Esta variable estará en función del poder calorífico de cada combustible y determinará la eficiencia del equipo.	Cuantitativa, Dinámica, Independiente, Económica	Se medirá en forma acumulativa mensual, al corte del informe de resultados del mes.

### 1.7 Hipótesis Científica

Los costos de operación de la caldera convertida para quemar Biodiésel, están mayormente influenciados por la escasés de cultivos y la oferta de mercado, que por los costos de inversión de las modificaciones requeridas y/o que del poder calorífico del mismo material, comparado contra el combustóleo.

La Tabla 1.2, define la declaración de la hipótesis.

Tabla 1.2. Declaración de hipótesis

HIPÓTESIS	CLASIFICACIÓN	COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS
<p>Los <u>costos</u> de <u>operación</u> de la caldera están mayormente influenciados por la <u>escasés de cultivos</u> y la <u>oferta de mercado</u>, que por los <u>costos</u> de <u>inversión</u> de las modificaciones requeridas y/o que del <u>poder calorífico</u> del mismo material, comparado contra el combustóleo.</p>	<p>Hipótesis de investigación, subclasificada como hipótesis de causalidad</p>	<p>Esta hipótesis será comprobada a través de hojas de cálculo de Excel y su complemento TPX.</p>

### 1.8 Tipo de diseño de experimento

El experimento consistirá en tomar las mediciones de las variables involucradas en la combustión por cada uno de los tipos de combustibles en una caldera existente y hacer un manejo apegado a la bibliografía reportada, de tal suerte que permita comprobar la hipótesis. El experimento se considera que será del tipo pasivo, ya que no se podrá actuar sobre las variables, el muestreo de

parámetros, la determinación del número de variables, el tamaño de la muestra y el tiempo de medición entre variable y variable se hará con apoyo del programa STAT.

### **1.9 Forma de recopilación de datos experimentales**

La recopilación de datos operativos se hará del registro histórico de la base de datos de un Sistema de Control Distribuido Delta2 series Foxboro, los demás datos no disponibles vía electrónica se tomarán de la bitácora de operación de la caldera.

### **1.10 Valoración de los beneficios de la Tesis**

Se procesará estadísticamente toda la información obtenida, incluyendo diagramas, nomogramas, tablas y modelos matemáticos que permitirán analizar e interpretar los resultados obtenidos con mayor facilidad y poder realizar las generalidades que procedan.

### **1.11 Tipo de modelación y/o simulación matemática**

Los modelos matemáticos resultantes del estudio de Investigación, como son la determinación del valor calórico bajo del combustible, los balances térmicos y másicos de las reacciones, la determinación de los volúmenes de los productos de la combustión, entalpías, así como del balance térmico del generador de vapor, los cálculos energéticos y termoeconómicos, adicionalmente a la cuantificación de variables como presión, temperatura, densidad, etc., se considera que podrán ser evaluados con ayuda de hojas de cálculo de Excel y de su complemento TPX.

### **1.12 Métodos de optimización a emplear.**

La investigación buscará llevar a su mínima expresión los costos de operación de generadores de vapor del tipo radiante, apoyados en el uso de combustibles alternos o de una combinación de ambos, buscando la óptima eficiencia de combustión, en equilibrio con las emisiones al ambiente. Para esto se caracterizarán los indicadores de eficiencia de transformación de los energéticos, los índices de emisiones, el exceso de aire, los indicadores de kw.hr utilizados, entre otros, los cuales son razón de ser de dicha propuesta.

## **CAPÍTULO II**

## **CAPÍTULO II DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA EMPRESA SISA DE C.V.**

### **2.1 Historia**

La información que a continuación se presenta, fue recabada del manual de aseguramiento de calidad (MQA) de la empresa.

SISA de C.V. es una empresa de capital privado 100 % Mexicana, que inició operaciones en el año de 1967, arrancando con una capacidad de 525 toneladas por día de sal Industrial, mismas que en 1981 se incrementaron hasta 1,200 toneladas por día.

En 1996 se obtuvo la certificación ISO-9002. En el lapso de 1998 y 1999 se obtuvieron reconocimientos diversos como Proveedor Confiable y premios tanto internos como externos, destacando el Shigeo Shingo de Norteamérica referido a Buenas Prácticas de Manufactura, del 2000 al 2008 se ha logrado la acreditación como Industria Limpia y la certificación de ISO-14001, entre otros.

A la fecha se cumplen 41 años de dedicarse a la producción de sal comestible extraída de pozos profundos en forma ininterrumpida, dichos pozos se encuentran enclavados sobre formaciones geológicas denominadas domos salinos en el municipio de Ixhuatlán del Sureste, en tanto que las instalaciones productivas se encuentran localizadas en el Complejo Industrial Pajaritos, de Coatzacoalcos Veracruz.

### **2.2 Misión**

Ser una empresa de clase mundial

### **2.3 Visión**

Mejorar continuamente nuestros productos, procesos y servicios para alcanzar o exceder los requerimientos de nuestros clientes, maximizando la rentabilidad y manteniendo su posicionamiento dominante en el mercado de sal comestible.

### **2.4 Política de Calidad**

Trabajar en un Proceso de Mejora Continua para satisfacer las necesidades de nuestros clientes, con enfoque en seguridad, cuidado del medio ambiente y productividad. Esto nos compromete a participar y desarrollar permanentemente

acciones de adecuación a sus requisitos con un sistema de Gestión de Calidad basado en el estándar internacional ISO-9001:2000 y especificaciones a normas acordadas.

Propiciar con el Proceso de Administración por Calidad, la participación creativa del personal en equipos, a través de Proyectos de Mejora Continua (PMC's) y sugerencias de mejora, para asegurar su desarrollo como personas y conducir a nuestra empresa al logro de su Misión.

Nuestro Objetivo es; Crear valor a los clientes, a nuestro personal, a los accionistas y a la comunidad.

## **2.5 Giro**

La actividad preponderante de la empresa es la extracción, elaboración y envasado de sal comestible (cloruro de sodio), mediante el proceso de Evaporación por Compresión Térmica de los vapores, en un circuito cerrado de múltiples etapas de evaporadores al alto vacío, cumpliendo con las normas sanitarias de salud vigentes en México y en los mercados de exportación correspondientes.

## **2.6 Capacidad Productiva**

A la fecha, los volúmenes de producción son de 1,200 ton /día, operando con tres turnos durante las 24 Horas del día, los 365 días del año, exceptuando los tiempos necesarios para el mantenimiento anual programado de las instalaciones.

## **2.7 Organigrama**

A continuación se representa en la Figura 2.1 el esquema organizacional de la empresa SISA de C.V.

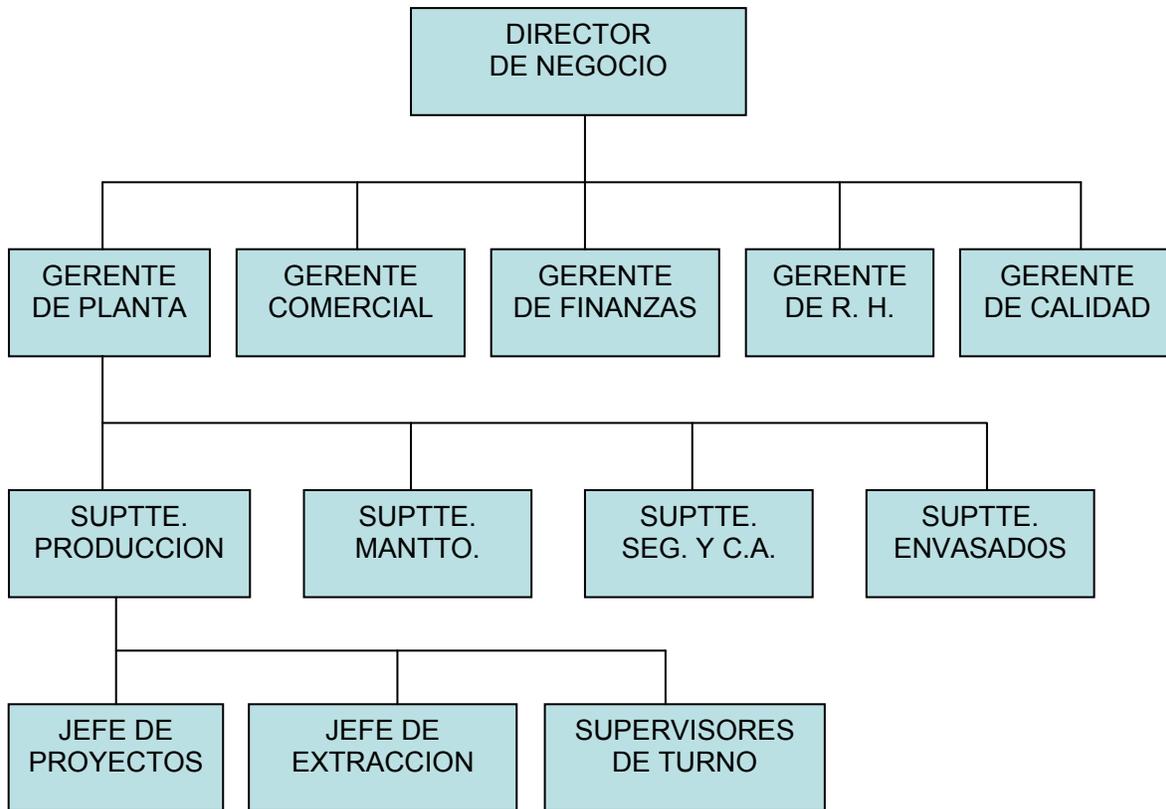


Figura 2.1 Organigrama de SISA de C.V.

## 2.8 Descripción del Proceso

Para llevar a cabo las operaciones de cristalización de la sal, se requiere vapor y energía eléctrica. El primero es usado como medio de calentamiento en la sección de Evaporación del sistema y el segundo para mantener accionados los motores de las bombas de recirculación y de los servicios periféricos de la planta.

Para el caso de la generación de vapor, se requiere del consumo de energéticos para combustionar en las calderas, para el caso de la energía eléctrica, esta se suministra mediante la red de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

El vapor generado en las calderas es utilizado en el primer efecto de evaporación el cual incorpora un termostato, del cual se autoabastece del medio de calentamiento para hacer hervir la salmuera, separar los cristales de sal formados y el vapor excedente es alimentado al segundo efecto en forma serial, hasta llegar al quinto efecto, de tal suerte hasta que se agota la máxima entalpía disponible del vapor, la sal producto de cada cristizador es llevada a un filtro para



## 2.10 Datos de consumos históricos de Gas Natural

En las Tablas 2.1 y 2.2 se presentan los datos de los consumos de gas natural al primer y segundo semestre respectivamente tenidos durante el año 2006, en su modalidad de base firme anual (B.F.A.), base firme mensual (B.F.M.) y base variable (B.V.)

Tabla 2.1. Consumos de gas natural primer semestre año 2006

	CONSUMO	P.U.	TOTAL
<b>ENERO</b>	<b>GCAL</b>	<b>\$ / GCAL.</b>	<b>\$</b>
B.F.A.	524.84	306.71	160,973.7
B.F.M.	54.087	307.16	16,613.4
B.V.	4664.46	308.5	1,438,985.3
<b>TOTAL</b>			<b>1,616,572.3</b>
<b>FEBRERO</b>			
B.F.A.	476	280.34	133,441.8
B.F.M.	56	280.78	15,723.7
B.V.	17,040.98	282.1	4,807,260.5
<b>TOTAL</b>			<b>4,956,426.0</b>
<b>MARZO</b>			
B.F.A.	503.682	260.64	131,279.7
B.F.M.	58	261.07	15,142.1
B.V.	21466.06	262.39	5,632,479.5
<b>TOTAL</b>			<b>5,778,901.2</b>
<b>ABRIL</b>			
B.F.A.	510	272.77	139,112.7
B.F.M.	60	273.22	16,393.2
B.V.	25,500	274.57	7,001,535
<b>TOTAL</b>			<b>7,157,040.9</b>
<b>MAYO</b>			
B.F.A.	374	280.54	104,922.0
B.F.M.	52	281.01	14,612.5
B.V.	22,100	282.39	6,240,819.0
<b>TOTAL</b>			<b>6,360,353.4</b>
<b>JUNIO</b>			
B.F.A.	510	236.48	120,604.8
B.F.M.	60	236.95	14,217.0
B.V.	23,357.8	238.35	5,567,331.6
<b>TOTAL</b>			<b>5,702,153.4</b>

Tabla 2.2. Consumos de gas natural segundo semestre año 2006

	CONSUMO	P.U.	TOTAL
<b>JULIO</b>	GCAL	\$ / GCAL.	\$
B.F.A.	474	239.32	113,437.7
B.F.M.	62	239.32	14,867.6
B.V.	23,761.8	241.23	5,732,059.0
<b>TOTAL</b>			<b>5,860,346.3</b>
<b>AGOSTO</b>			
B.F.A.	520	290.34	150,976.8
B.F.M.	50	279.3	13965.0
B.V.	16,040.98	242.1	3,883,521.25
<b>TOTAL</b>			<b>4,048,463.0</b>
<b>SEPTIEMBRE</b>			
B.F.A.	494	269.32	133,044.0
B.F.M.	42	239.32	10,051.4
B.V.	25,761.8	251.23	6,472,137.0
<b>TOTAL</b>			<b>6,615,232.4</b>
<b>OCTUBRE</b>			
B.F.A.	500	280.34	140,170.0
B.F.M.	50	280.3	14,015.0
B.V.	22,040.58	242.1	5,336,024.4
<b>TOTAL</b>			<b>5,490,209.4</b>
<b>NOVIEMBRE</b>			
B.F.A.	550	285.0	156,750.0
B.F.M.	45	245.5	11,047.5
B.V.	24,300	250.0	6,075,000.0
<b>TOTAL</b>			<b>6,242,797.5</b>
<b>DICIEMBRE</b>			
B.F.A.	400	285.5	114,200.0
B.F.M.	50	280.3	14,015.0
B.V.	20,030.2	242.1	4,849,311.42
<b>TOTAL</b>			<b>4,977,526.4</b>

## 2.11 Planos de localización

La localización de las instalaciones de la empresa SISA de C.V. , puede verse según la ilustración de las Figuras 2.3 y las instalaciones productivas en la Figura 2.4 , referidas a las vistas aéreas de la zona, en tanto que en la Figura 2.5 se observa el plano de ubicación del proceso y del sitio donde se tienen instaladas las calderas.

Las facilidades correspondientes a la caldera en particular que se considera factible de poder implantar la quema del Biodiésel, se puede ver en las Figuras 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 y Figura 2.10.



Figura 2.3 Croquis general de localización de la empresa SISA de C.V.



Figura 2.4 Croquis de ubicación de SISA de C.V.

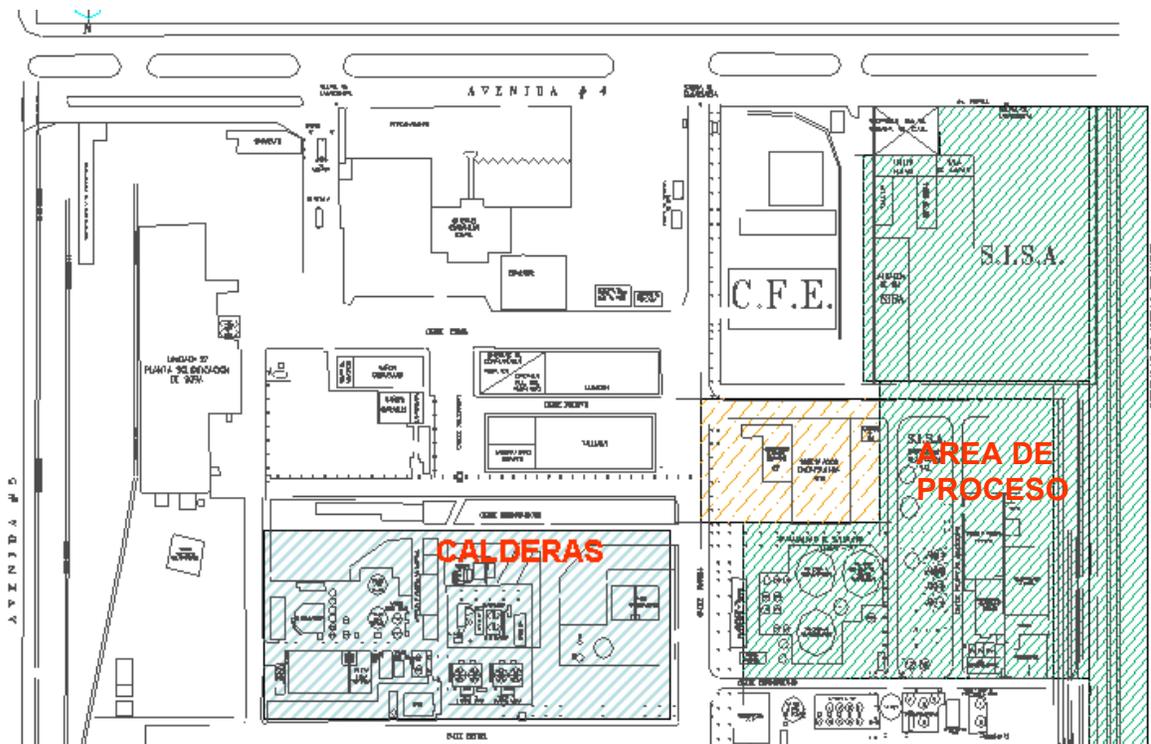


Figura 2.5 Plano de localización del proceso y de las calderas



Figura 2.6 Parte frontal de caldera



Figura 2.7 Trenes de alimentación de combustibles a caldera

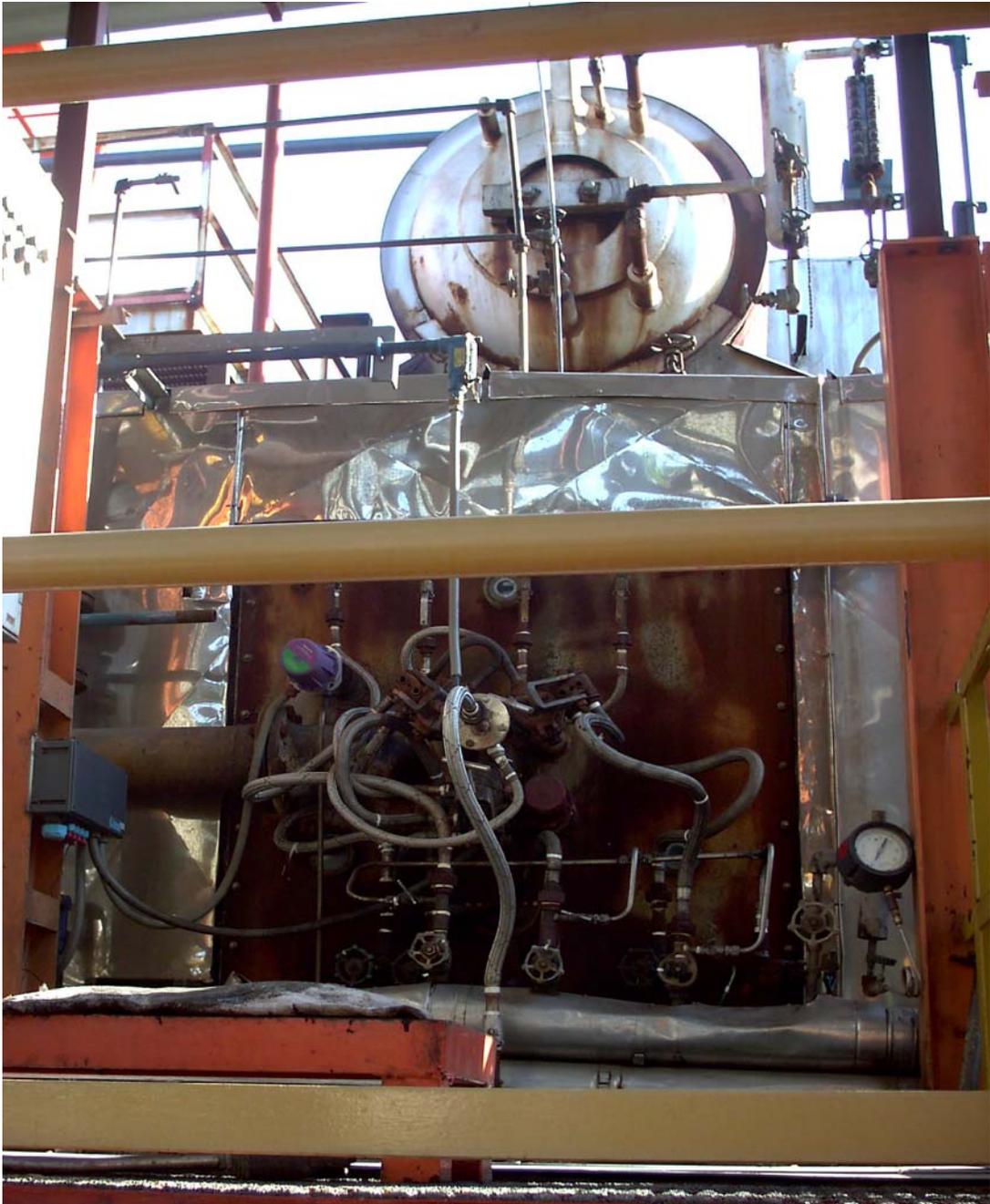


Figura 2.8 Parte frontal de quemadores de caldera



Figura 2.9 Parte lateral de caldera



Figura 2.10 Parte posterior de caldera

## **CAPÍTULO III**

## CAPÍTULO III ANÁLISIS TEÓRICO DE LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO, USOS DEL BIODIÉSEL, SU PRODUCCIÓN Y COSTOS.

### 3.1 Concepto de Agroenergética en México

De acuerdo con Guillén Solís Omar [11], “La agroenergética es una nueva faceta de la agricultura, en la que se pretende la producción de biomasa mediante cultivos específicos y la transformación de ésta en productos energéticos de fácil utilización, en sustitución de los combustibles tradicionales.”<sup>3</sup>

El desarrollo de esta actividad agrícola en el corto plazo a mediano plazo, en suelo Mexicano depende principalmente de:

- La identificación de especies vegetales adecuadas para producir biomasa en las tierras agrícolas disponibles.
- La disponibilidad de tecnología necesaria para hacer competitiva la Producción de biocombustibles.
- El interés de la sociedad por conservación y protección del medio ambiente.
- El establecimiento de políticas adecuadas para estimular al agricultor y al industrial a iniciar esta actividad.

### 3.2 Biomasa

La biomasa, en su definición más amplia, es toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial.

#### 3.2.1 Formas de obtención de biomasa

La biomasa puede ser obtenida de tres formas:

- La biomasa natural. Es la que se produce en la naturaleza sin la intervención humana.
- La biomasa residual. Es la que genera cualquier actividad humana, en los procesos agrícolas, ganaderos y los del propio hombre, tal como basuras y aguas residuales.
- La biomasa producida. Es la cultivada con el propósito de obtener biomasa transformable en combustible, en vez de producir alimentos.

<sup>3</sup> El uso de cultivos energéticos en México”, Mexico, <http://www.tuobra.unam.mx>, Junio de 2007, pag. 2

### 3.2.2 Energía de la biomasa

La energía de la biomasa, es aquella que se obtiene de la vegetación, cultivos acuáticos, residuos forestales y agrícolas, urbanos, desechos animales, etc.

Genéricamente las fuentes de la biomasa se pueden clasificar como primarias (recursos forestales) y secundarias (básicamente los residuos como aserrín, residuos de las hojas de árboles, los agrícolas, pajas rastrojos y los urbanos).

La biomasa, es decir, la materia vegetal utilizada como fuente de energía, se percibe como una alternativa prometedora a la energía fósil y nuclear, que son contaminantes.

Desde el punto de vista energético, la biomasa se puede aprovechar de dos maneras; quemándola para producir calor o transformándola en combustible para su mejor transporte y almacenamiento.

La naturaleza de la biomasa es muy variada ya que depende de la propia fuente, pudiendo ser animal o vegetal, pero generalmente se puede decir que se compone de hidratos de carbono, grasas y proteínas. Siendo la biomasa vegetal la que se compone mayoritariamente de hidratos de carbono y la animal de grasas y proteínas.

### 3.2.3 Procesamiento de la biomasa con fines energéticos

La utilización con fines energéticos de la biomasa requiere de su adecuación para utilizarla en los sistemas convencionales. Estos procesos pueden ser:

- Físicos. Son procesos que actúan físicamente sobre la biomasa y están asociados a las fases primarias de transformación, dentro de lo que puede denominarse fase de acondicionamiento, como; triturado, astillado, compactado e incluso secado.
- Químicos. Son los procesos relacionados con la digestión química generalmente mediante hidrólisis, pirolisis y gasificación.
- Biológicos. Son los llevados a cabo por la acción directa de microorganismos o de sus enzimas, generalmente llamado fermentación. Son procesos relacionados con la producción de ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas y polímeros.

- Termoquímicos. Están basados en la transformación química de la biomasa, al someterla a altas temperaturas (300 °C a 1,500 °C). Cuando se calienta la biomasa se produce un proceso de secado y evaporación de sus componentes volátiles, seguido de reacciones de craqueo o descomposición de sus moléculas, seguidas por reacciones en la que los productos resultantes de la primera fase reaccionan entre sí y con los componentes de la atmósfera en la que tenga lugar la reacción, de esta forma se consiguen los productos finales.

#### **3.2.4 Procesos derivados de la conversión termoquímica de la biomasa**

Según el control de las condiciones del proceso se consiguen productos finales diferentes, lo que da lugar a los tres procesos principales de la conversión termoquímica de la biomasa:

- Combustión. Se produce en una atmósfera oxidante, de aire u oxígeno, obteniendo cuando es completa, dióxido de carbono, agua y sales minerales (cenizas), obteniendo calor en forma de gases calientes.
- Gasificación. Es una combustión incompleta de la biomasa a una temperatura de entre 600 °C a 1,500 °C en una atmósfera pobre de oxígeno, en la que la cantidad disponible de este compuesto está por debajo del punto estequiométrico, es decir, el mínimo necesario para que se produzca la reacción de combustión. En este caso se obtiene principalmente un gas combustible formado por monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano.
- Pirólisis. Es el proceso en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia total de oxígeno. En procesos lentos y temperaturas de 300 °C a 500 °C el producto obtenido es carbón vegetal, mientras que en procesos rápidos (segundos) y temperaturas entre 800 °C a 1,200 °C se obtienen mezclas de compuestos orgánicos de aspectos aceitosos y de bajo ph, denominados aceites de pirólisis.

Pudiéndose obtener combustibles sólidos (leña, astillas, carbón vegetal), líquidos (biocarburantes, aceites, aldehídos, alcoholes, cetonas, ácidos orgánicos) y gaseosos (biogás, hidrógeno).

### **3.3 Usos de la Biomasa y de los Cultivos Energéticos en México**

Según Guillén Solís Omar, en su obra Energías Renovables [12], La forma de aprovechar la biomasa como energético puede ser a través de la combustión directa, como tradicionalmente se ha aprovechado en México la leña y el bagazo de caña, o bien mediante la conversión de la biomasa en diferentes hidrocarburos a través de diferentes tipos de procesos, dentro de los cuales se tienen:

- La combustión directa. Es la que se conoce como el proceso por el que se aprovecha el poder calorífico de la biomasa, siguiendo métodos tradicionales para producir carbón. Además la pirólisis del carbón puede dar lugar a líquidos como el alquitrán que es un combustible con cierto poder calorífico alto de unas 9,000 o 10,000 kilocalorías por litro y también da lugar a la producción de monóxido de carbono que es un gas que puede emplearse como combustible.
- Por el otro lado se tienen los procesos biológicos. Como la producción de alcohol a partir de productos celulosos, tradicionalmente la producción de alcohol a través de una fermentación de caña. Cuando el azúcar está disponible para otros fines, como los alimenticios entre ellos, se puede pensar en residuos, como la celulosa, darles un tratamiento con ácido clorhídrico a alta temperatura, gasificarlos, llegar a la glucosa, fermentarlos y producir el alcohol.
- El proceso de la fermentación anaeróbica. Puede ser empleado en muchos casos, por un lado el proceso produce fertilizantes ó un abono orgánico, más que un fertilizante es un acondicionador de suelos y en muchos casos se han hecho experimentos para emplearlo como un complemento alimenticio y por el otro, se tiene un combustible que es el conocido como biogás. Hay una gran variedad de residuos que pueden aprovecharse, agrícolas, animales, algas que se generan en grandes cantidades en las costas, el lirio acuático por ejemplo que es una plaga

en las presas de México y la basura que se está generando todos los días.

### **3.4 Análisis crítico del libro Energías Renovables del autor Omar Guillén Solís**

Desde la perspectiva del autor Guillén Solís Omar, afirma que no existe en realidad escasez de recursos energéticos, el problema actual consiste en que la sociedad ha hecho un uso preferencial de los hidrocarburos con su impacto ecológico y ambiental sobre la naturaleza y en detrimento del desarrollo tecnológico y la viabilidad económica de otras fuentes de energía.

En su libro Energías Renovables el autor analiza esta situación y propone como alternativa la aplicación de la energía proveniente de fuentes renovables que si bien consumen combustibles fósiles, se caracterizan por respetar el medio ambiente.

El autor aborda cada una de las fuentes de energía renovable disponibles en el mundo y sus aplicaciones potenciales. Además, hace referencia a los análisis económicos y financieros de proyectos energéticos susceptibles de realizarse. También hace referencia que las especies vegetales de interés agrícola han sido seleccionadas a lo largo de la historia, de acuerdo con sus posibilidades de producir alimentos de forma rentable. Esta condición ha impuesto tal cantidad de restricciones, que solamente unas pocas especies de plantas superiores, entre más de 250,000 especies existentes, han podido ser objeto de agricultura extensiva. Se calcula que el hombre a lo largo de la historia ha cultivado solamente unas 3,000 especies para fines alimentarios de las que solamente unas 150 lo han sido a escala comercial. Hoy en día, la alimentación mundial está basada en 20 cultivos principales, de los cuales 4 de ellos (caña de azúcar, maíz, arroz y trigo) representan el 61% de la producción agrícola mundial.

Existen casos en que la sobreproducción de algunos cultivos provoca una sobreoferta, lo que puede suponer un grave problema y llegar a fomentar e incentivar el abandono de tierras de cultivo para productos alimentarios tradicionales y se fomenten las alternativas de cultivos con fines no alimentarios, enfocándolos a la producción de energía.

Para garantizar la continuidad de las actividades del sector agrícola es necesario pensar en otro tipo de cultivos alternativos a los alimentarios, que puedan dar rentabilidad a las tierras agrícolas retiradas de la producción de alimentos y cuyas producciones no estén sujetas a causa de contingencias por la saturación del mercado. Deben ser cultivos de gran demanda, susceptibles de producirse a partir de biomasa vegetal generada en plantaciones extensivas y con un costo de producción tal, que haga rentable su comercialización. Para que se den estas circunstancias hay que pensar necesariamente en el sector energético per cápita es varias veces superior al alimentario.

Como los objetivos perseguidos en los cultivos energéticos son distintos a los alimentarios, es de esperarse que las especies seleccionables para este uso sean distintas a las empleadas como alimento. Las especies dedicadas a producir biomasa con fines energéticos pueden ser de tipo herbáceo o leñoso y a veces pueden coincidir con especies utilizadas en cultivos agrícolas tradicionales o en aprovechamientos silvícolas clásicos. La principal condición que debe darse para el desarrollo de cultivos energéticos es la necesidad de que la producción sea económicamente rentable, para lo cual deben alcanzarse elevados rendimientos de biomasa con bajos costos de producción, recolección, almacenamiento y procesado para su transformación.

### **3.5 Nuevas Agroindustrias**

El desarrollo de cultivos energéticos no tiene sentido si a la par no se desarrolla la correspondiente industria agroenergética que utilice la biomasa producida como materia prima. Los sistemas agroenergéticos constituyen verdaderas agroindustrias en las que la producción y la transformación deben estar íntimamente relacionadas, desde el punto de vista técnico, económico y geográfico, como en los aspectos contractuales que obliguen a los productores a suministrar la materia prima necesaria para el funcionamiento de la industria, así como esta a aceptar la producción al precio estipulado.

Una característica específica de las agroindustrias energéticas es la necesidad de que el centro de transformación se encuentre próximo a los lugares de

producción, ya que es inconcebible gastar en transporte más energía de la que se puede obtener del cultivo.

### 3.5.1 Clasificación de las nuevas agroindustrias

Entre las nuevas agroindustrias que podrían crearse a futuro en base a producción de biomasa para fines energéticos, cabe citar:

- Bioaceites carburantes o Biodiésel. Son obtenidos de semillas oleaginosas para utilizarse en motores diésel en sustitución del combustible fósil convencional, ya sea directamente o tras un proceso de transformación adecuado (transesterificación). Los aceites vegetales utilizados directamente en motores sin precámara de inyección no resultan adecuados, debido a la aparición de residuos carbonosos y por las dificultades del sistema de inyección, al ser mucho más viscoso que el diésel. Pero utilizados en motores de inyección indirecta o de precámara, sí resultan eficaces. También pueden utilizarse los aceites sin modificar, mezclados en pequeñas proporciones con diésel, lo que no impide que el motor se deteriore con el tiempo, aunque puede funcionar sin problemas durante un período mucho mayor que si se utilizara aceite vegetal solo.
- Bioetanol carburante. Producido por fermentación de materias primas azucaradas o de materias amiláceas tras un proceso de hidrólisis previa. El etanol deshidratado puede utilizarse en mezclas de 5 al 15% con gasolina para incrementar el octanaje y eliminar el uso de aditivos con plomo.
- Biocombustibles sólidos. Para su empleo en calefacción doméstica o para usos industriales. La biomasa es idónea para este tipo de utilización es la biomasa lignocelulósica, ya sea de origen herbáceo o leñoso. Los procesos de transformación pueden ir desde simples mecanismos de astillado, compactación o peletización, hasta la obtención de carbón vegetal.
- Agroelectricidad. Que consiste en la producción de energía eléctrica a partir de biocombustibles producidos en las inmediaciones de una

central. También en este caso la biomasa más adecuada resulta ser la de tipo lignocelulósico, por ser más barata y de precio competitivo contra los combustibles tradicionales que se utilizan para generación de electricidad (carbón y combustóleo).

La biomasa que se produce en el país sin aprovechamiento para consumo humano como el bagazo del agave (producción de tequila), la cascarilla de café, de arroz, de trigo, lirio acuático, estiércol y muchos otros, también puede emplearse como energético. Ejemplos de aprovechamiento actual son la leña y el bagazo de la caña de azúcar, sin embargo, las demás no se aprovechan. Algunos estados como Durango, Sonora, Sinaloa, Querétaro, Veracruz y Chiapas pueden contribuir con este recurso a disminuir el consumo de productos petrolíferos. La ventaja estratégica y cuanto a la balanza de pagos del país, resulta al sustituir a los combustibles producidos a partir del petróleo, suponiendo la disminución de dependencia del manejo del costo del barril de petróleo en el concierto internacional, además de un ahorro de divisas.

Entre los obstáculos a vencer de los biocarburantes y biocombustibles en su penetración en el mercado energético, destaca la necesidad de tener un precio inferior a los carburantes y combustibles tradicionales.

### **3.5.2 Potencialidad de los cultivos energéticos en México**

Las opciones que se tienen en México y que pueden utilizarse para producir cultivos energéticos son las siguientes:

- Cultivos oleaginosos para obtención de Biodiésel. Puede utilizarse el girasol, la soya, la palma africana, principalmente. Otros cultivos son cártamo, cardo, cacahuate y otros cultivos enfocados a la producción de aceites.
- Cultivos alcoholígenos. La materia prima para obtención de bioetanol puede proceder de una biomasa de tipo azucarado (glucosa, fructosa o sacarosa), o de biomasa de tipo amiláceo (almidón o inulina) dentro de los que se encuentran el maíz y la yuca. Es preciso que la materia prima de partida sea lo más barata posible. El etanol obtenido por destilación de excedentes de vinos y cuyo almacenamiento durante

prolongados períodos de tiempo pueda representar un alto costo; podría resultar económico para estas aplicaciones. Entre los cultivos convencionales dedicados a este fin pudieran considerarse a la remolacha y los cereales.

- Cultivos productores de biomasa lignocelulósica. Para utilizar biomasa con fines térmicos, se requiere de un tipo e biomasa de bajo costo, competitivo con carburantes de sustitución y con alto rendimiento por unidad de superficie. Podrían utilizarse los chopos, acacias, eucaliptos y robinia. Pueden plantarse estas especies con una alta densidad (unas 10,000 plantas/ha) y con turnos de corta de 4 a 6 años, aprovechando la capacidad de rebrote para continuar la plantación en años sucesivos. Cabe señalar que las especies leñosas tienen el inconveniente de ocupar el terreno por un cierto número de años y al querer recuperar las tierras para fines agrícolas, se requiere de fuertes inversiones para remover lo que no es atractivo.

### 3.6 Proceso de producción del Biodiésel a base del aceite de palma Africana y su disponibilidad

La producción de biocombustibles como es el Biodiésel, se logra por un proceso químico llamado trans-esterificación de los glicéridos, partiendo de un éster (aceite vegetal) y que mediante uso de catalizadores se logra la sustitución del alcohol del aceite vegetal (glicerina ó glicerol), por uno más simple (metanol ó etanol). De este proceso se obtienen dos productos; la glicerina misma y el **Éster de metilo**, que es el nombre químico del Biodiésel, a continuación en la Figura 3.1 se presenta la reacción correspondiente:

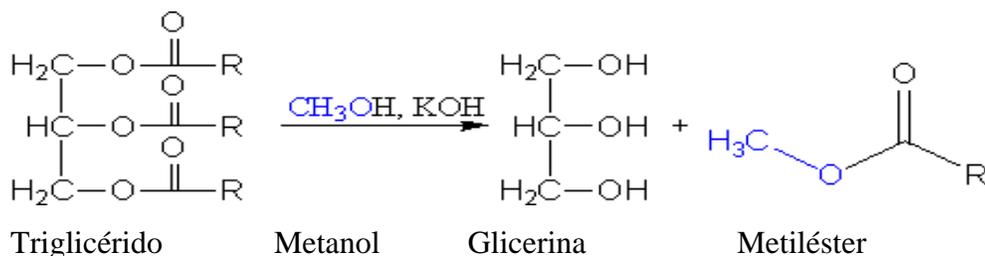


Figura 3.1 Reacción de obtención del Biodiésel

Comercialmente, el Biodiésel hoy en día puede ser producido a base de gran variedad de oleaginosas, como girasol, cacahuete, colza/canola, algodón, copra, olivo, entre otras, sin embargo por los volúmenes de producción a nivel mundial, quienes destacan son el frijol de soya y el aceite que se extrae del fruto de la palma **Elaeis Guineensis**, comúnmente conocida como palma Africana, misma que ocupa el primer lugar en comercialización a nivel mundial, con una participación del 49.2 %, su más cercano competidor el aceite de soya participa con el 21 %.

### 3.6.1 Clasificación y características de la palma de aceite.

**Elaeis** (Jacquin, 1763), es un Género de palmas que comprende tres especies de **palma aceitera**, las cuales son:

- La **palma Africana**, cuyo nombre científico es *Elaeis guineensis*.
- El **Nolí** o palma Americana, de nombre científico *Elaeis oleifera* y
- El **Corozo colorado** denominado científicamente *Elaeis odora*.

Las características de este género se describen a continuación:

Son monoicas de troncos solitarios, hojas pinnadas con peciolos ligeramente espinosos, foliolos insertados irregularmente dando un aspecto plumoso, las flores masculinas con 6 estambres y fruto ovoide.

**E. guineensis**, es originaria de África occidental, de ella ya se obtenía aceite hace 5000 años, especialmente en la Guinea Occidental de allí paso a América introducida después de los viajes de Colón y en épocas más recientes fue introducida a Asia desde América. Su cultivo es de gran importancia económica, provee la mayor cantidad de aceite de palma y sus derivados a nivel mundial.

**E. oleifera**, es Americana, considerada como amazónica, aunque algunos autores, la consideran común en toda la América tropical. Su cultivo es de importancia económica hasta hace muy poco tiempo, es de hacer notar que estuvo a punto de extinguirse en grandes áreas del continente Americano.

**E. odora**, es también Americana, propio de las selvas húmedas tropicales, no es muy conocido, aunque es muy promisorio.

El cruce entre las *E. guineensis* x *E. oleifera*, produce una población híbrida con ventajas agronómicas, al mejorar los cultivos frente a plagas, enfermedades y condiciones físicas.

Las tres se desarrollan en climas tropicales cálidos lluviosos (selva lluviosa tropical), como cultivo requieren del mismo manejo.

El aceite de palma es un alimento natural que se viene consumiendo desde hace 5,000 años. Se refina sin necesidad de disolventes químicos, por lo que se reduce el riesgo de contaminación por residuos. El aceite de palma contiene iguales proporciones de ácidos grasos saturados y no saturados; alrededor del 40% de ácido oleico (no monosaturado), 10% de ácido linoléico (no polisaturado), 44% de ácido palmítico (saturado) y 5% de ácido esteárico (saturado). Éste aceite es una fuente natural de vitamina E, tocoferoles y tocotrienoles y el aceite de palma sin refinar también es una fuente importante de vitamina A. Este a su vez tiene un contenido glicérico sólido alto que lo hace semisólido normalmente se usa en estado natural, sin hidrogenar.

A continuación se presenta en la Figura 3.2, la cadena agroalimentaria e industrial de la palma de aceite.

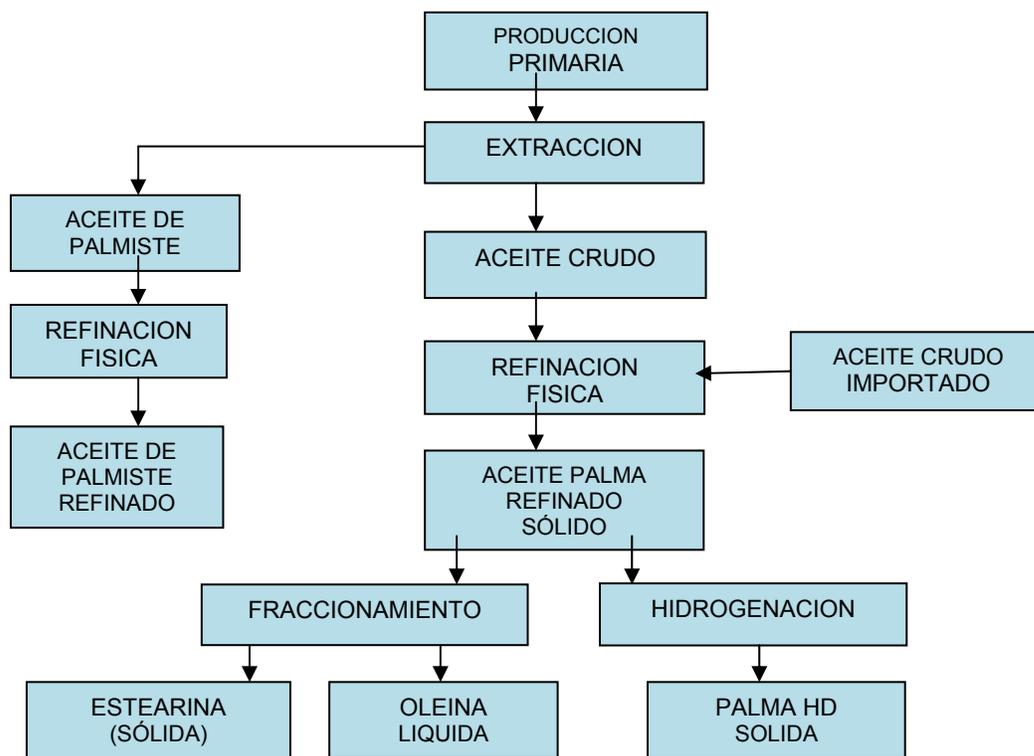


Figura 3.2 Cadena agroalimentaria e industrial de la palma de aceite; fuente: Fomento Económico de Chiapas A.C.[22]

### 3.7 Producción Mundial de Aceites y Grasas Vegetales

De acuerdo con datos de Fechis, México [22], En 2003 se alcanzó una producción mundial aproximada de aceites vegetales de 105 millones de toneladas, en donde los aceites con mayor participación fueron los de soya, palma, colza/canola, girasol y maní (ver Figura 3.3).

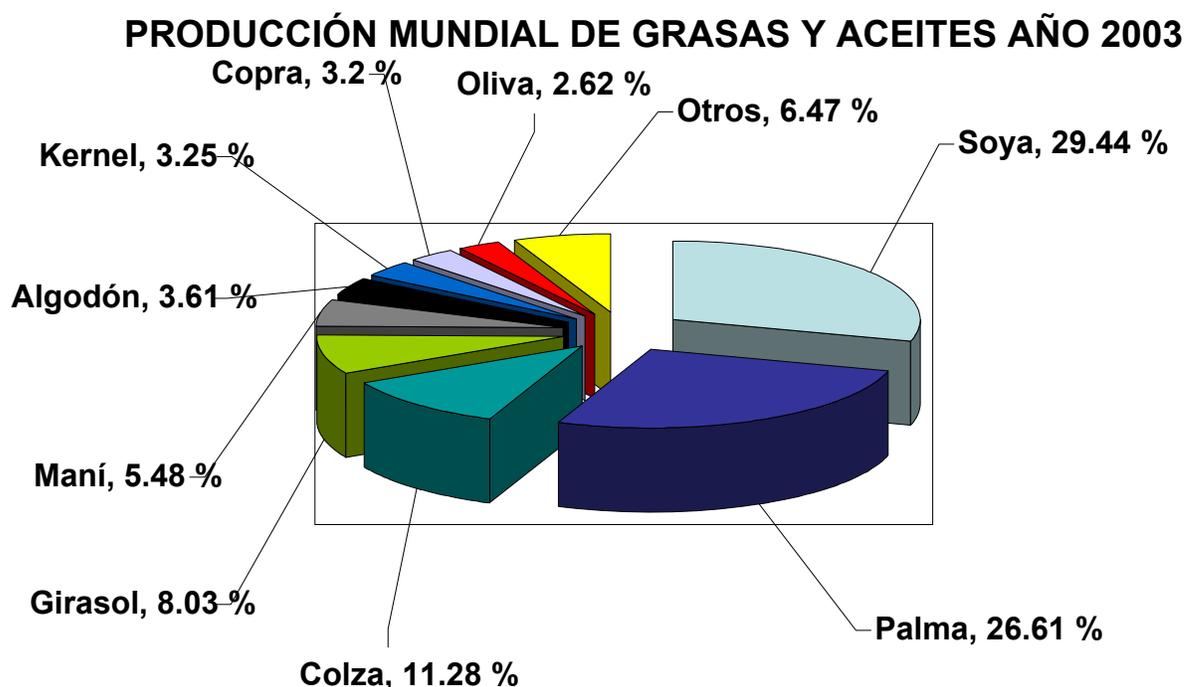


Figura 3.3 Estructura de la producción mundial de aceites y grasas vegetales; fuente: Fechis, A.C, con datos de la FAO, [22]

Lo anterior concuerda con lo reportado por Fedepalma (Federación Nacional de cultivadores de Palma de Aceite), Colombia [10] en su más reciente reporte anual al año 2006, presentado en la Tabla 3.1 y 3.2, referido a la estructura del mercado mundial de aceites y grasas de los doce principales productos, según fuentes de Oil World Annual.

Tabla 3.1. Oferta mundial de los 12 principales aceites y grasas (miles de toneladas);

Fuente: Fedepalma, [10]

PRODUCTO	2002	2003	2004	2005	2006	VARIACIÓN / TASA DE CRECIMIENTO %
Aceite de palma	25.407	28.257	30.985	33.846	37.151	9,8
Aceite de soya	29.850	31.241	30.729	33.612	35.313	5,1
Aceite de colza	13.343	12.698	15.088	16.294	18.423	13,1
Aceite de girasol	7.610	8.917	9.423	9.785	11.166	14,1
Sebo y grasas	8.062	8.018	8.230	8.386	8.451	0,8
Aceite de algodón	4.221	3.987	4.367	4.978	4.898	-1,6
Aceite de maní	5.178	4.508	4.706	4.506	4.427	-1,8
Aceite de palmiste	3.044	3.347	3.581	3.976	4.342	9,2
Aceite de coco	3.098	3.270	3.040	3.237	3.101	-4,2
Aceite de oliva	2.773	2.904	3.110	2.965	2.775	-6,4
Aceite de maíz	2.016	2.017	2.025	2.133	2.264	6,1
Otros aceites y grasas	16.120	16.456	16.937	17.267	17.673	2,4
<b>Producción Total</b>	<b>120.722</b>	<b>125.620</b>	<b>132.221</b>	<b>140.985</b>	<b>149.984</b>	<b>6,4</b>

Tabla 3.2. Consumo mundial de los 12 principales aceites y grasas (miles de toneladas); Fuente: Fedepalma, [10]

PRODUCTO	2002	2003	2004	2005	2006	VARIACIÓN / TASA DE CRECIMIENTO %
Aceite de palma	25.420	28.233	30.049	33.400	36.254	8,5
Aceite de soya	29.964	31.231	31.103	32.890	34.767	5,7
Aceite de colza	13.528	12.787	15.010	16.134	18.182	12,7
Aceite de girasol	7.658	8.859	9.622	9.676	11.078	14,5
Sebo y grasas	8.022	8.138	8.166	8.405	8.513	1,3
Aceite de algodón	4.249	3.994	4.313	4.971	4.854	-2,4
Aceite de maní	5.261	4.527	4.671	4.508	4.482	-0,6
Aceite de palmiste	3.136	3.472	3.607	3.931	4.138	5,3
Aceite de coco	3.232	3.346	3.030	3.119	3.240	3,9
Aceite de oliva	2.776	2.816	2.906	2.902	2.897	-0,2

Aceite de maíz	2.025	2.004	2.046	2.106	2.205	4,7
Otros aceites y grasas	16.106	16.484	16.865	17.300	17.699	2,3
V. Cambio en inventarios	-672	-473	271	1.479	745	<i>n.a</i>
<b>Consumo Mundial</b>	<b>121.377</b>	<b>125.891</b>	<b>131.388</b>	<b>139.342</b>	<b>148.309</b>	<b>6,4</b>

Por otro lado, las estadísticas de la producción mundial del aceite de palma a través de los ciclos de cosecha de los más recientes 7 años, presentan un creciente dinamismo en comparación con las otras fuentes de oleaginosas y pese a ocupar el segundo lugar en la producción mundial de aceites y grasas, resulta ser que su participación en términos de comercialización, ocupa el primer lugar con una participación del 49.2 % mundial, dejando atrás al aceite de soya con una participación del 21 % del comercio mundial, a continuación la estadística de la producción mundial de aceite de palma (ver Figura 3.4) muy congruente con lo reportado por Fedelpalma .

**Producción Mundial del Aceite de Palma**  
( x 1000 Ton )

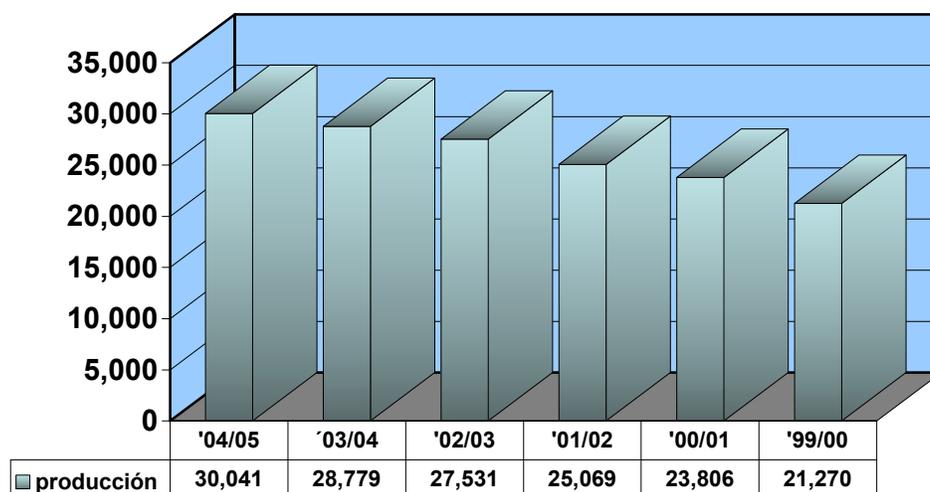


Figura 3.4 Producción mundial del aceite de palma; fuente: Fechis A.C. con datos de la Oil World Statistics, [22]

A continuación se presenta la estructura de participación de los países más destacados, con lo que se fundamenta los volúmenes de producción mundial de aceite de palma (Figura 3.4), en base a las estadísticas reportadas al año 2004 (ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Estructura de la producción mundial de aceite de palma  
(x 1000 ton), [22]

PAÍS	'04/05	% PARTICIPACIÓN	'03/04	% PARTICIPACIÓN
Malasia	13,930	45.82	13,257	46.06
Indonesia	11,800	38.81	11,040	38.86
Nigeria	798	2.62	789	2.74
Tailandia	700	2.30	663	2.30
Colombia	638	2.10	596	2.07
Papúa /N.G.	356	1.17	349	1.21
Otros	2,179	7.16	2,085	7.24
<b>Total</b>	<b>30,401</b>		<b>28,779</b>	

A nivel Latinoamérica, la estructura de producción del aceite de palma se desglosa a continuación (ver Tabla 3.4), por los niveles de producción en relación al total mundial se incluyen en la categoría “otros”.

Tabla 3.4 Participación de países del continente americano en la producción mundial de aceite de palma (x 1000 ton), [22]

PAÍS	'04/05	% PARTICIPACIÓN	'03/04	% PARTICIPACIÓN
Venezuela	85	0.25	81	0.28
Guatemala	92	0.28	89	0.31
Honduras	144	0.45	142	0.49
Brazil	149	0.42	134	0.47
Costa Rica	189	0.52	191	0.66
Ecuador	262	0.81	249	0.87
<b>Total</b>	<b>921</b>	<b>2.73 %</b>	<b>886</b>	<b>3.08 %</b>

Se estima que México tiene una participación mundial que oscila entre el 0.10 % y 0.15 %, localizándose las plantaciones en cuatro estados, destacando por orden de importancia en cuanto a niveles de producción los siguientes; Chiapas, Campeche, Tabasco y Veracruz, con una aportación total del orden de 45,000 a 50,000 ton/año.

En la actualidad México Importa el 1% de la producción mundial con un volumen de aproximadamente 166,725 ton/año.

### 3.8 Rendimientos de las Plantaciones de palma de aceite

La Tabla 3.5 muestra los rendimientos de los cultivos más competitivos en cuanto a la productividad anual de aceite vs. la palma Africana.

Tabla 3.5. Rendimientos de cultivos [21]

CULTIVO	RENDIMIENTO RFF (kg/Ha) *	CONTENIDO DE ACEITE (%)	RENDIMIENTO DE ACEITE (ton/Ha)
Soya	1,600	18.5	0.296
Algodón	1,010	19.0	0.192
<b>Palma de aceite</b>	18,000	21.0	<b>3.780</b>

\*Donde; RFF = RACIMOS DE FRUTA FRESCA

La palma africana, con las variedades que se manejan en estos momentos, producen entre 2,500 y 4,500 litros de aceite por hectárea al año. (3 toneladas de aceite de palma y 780 Kg de aceite de palmiste.)

Ahora incluso hay variedades mejoradas trabajadas por la empresa ASD (Costa Rica), que dejan un rendimiento entre 8,000 y 10,000 kilos de aceite por hectárea.

Las plantaciones de palma comienzan a producir frutos a los 4-5 años de Implantadas usando variedades seleccionadas y clonadas y alcanzan su mayor producción entre los 20 y 30 años, luego de lo cual declinan por la altura a la que se encuentran los frutos.

Los racimos, que pesan unos 15-25 kilos, están conformados por unos 1000 a 4000 frutos de forma ovalada, de 3 a 5 cms. de largo.

El procesamiento de los frutos de la palma de aceite se lleva a cabo en la planta de beneficio o planta extractora. Ahí se desarrolla el proceso de extracción del aceite crudo de palma y de las almendras o del palmiste.

Este es un proceso simple que consiste en esterilizar los frutos, desgranarlos de racimo, macerarlos, extraer el aceite de la pulpa, clarificarlo y recuperar las almendras del bagazo resultante.

El procesamiento del aceite crudo resulta en dos productos diferentes:

- 1) La estearina de palma y
- 2) La oleína de palma.

La estearina (sólida a temperatura ambiente) es destinada casi exclusivamente a usos industriales, tales como cosméticos, jabones, detergentes, velas, Grasas lubricantes.

En tanto que la oleína (líquida a temperatura ambiente), es utilizada exclusivamente como comestible (aceite para cocinar, margarinas, cremas, confitería).

### 3.9 Localización y capacidad de procesamiento de las Plantas Extractoras de aceite de palma en México

En la Tabla 3.6 se presenta la localización de las plantas Extractoras de Aceite de Palma Africana, en los Estados de Chiapas, Campeche, Veracruz y Tabasco, según:

Tabla 3.6. Localización de las plantas extractoras en México, [22]

EXTRACTORA	MUNICIPIO	CAPACIDAD (Tmrff / Hr) *	PROPIETARIO	SECTOR
La Lima	Villa Comaltitlán, Chiapas	2	C. Juan Yamazaki Liliam Bernstorf	PRIVADO
El Desengaño	Villa Comaltitlán, Chiapas	6	C. Everardo Bernstorf	PRIVADO
Agroimsa	Mapastepec, Chiapas	10 ( ampliable de 20 a 40 )	Agroindustrias de Mapastepec/Oleomex	PRIVADO
Bepasa	Acapetahua,	6	Beneficiadora de	SOCIAL

	Chiapas		palma Africana	
Propalma	Acapetahua, Chiapas	10 ( ampliable de 20 a 40 )	Productora de palma de aceite	PRIVADO
Palma Tica de México	Palenque, Chiapas	18	Ing. Rodrigo Ovando P.	PRIVADO
Agroipsa	Palenque, Chiapas	8	C. José L. Pérez Moret	PRIVADO
Cia. ACE- Campechana	Escárcega, Campeche	6		MIXTA
Aceites de Palma	Acayucan, Veracruz	10	Ing. Rogelio Lemarroy	PRIVADO
Soc. Productora de palma	Jalapa, Tabasco	6		PRIVADO

\*Donde; Tmrrf = Tonelada metrica de racimos de fruta fresca

### 3.10 Esquemas de costos de oportunidad del aceite según su origen vegetal de donde proviene

Hoy en día la reducción de los costos de producción, son factor determinante para poder tener presencia competitiva en los mercados tanto de la talla nacional como internacionales, el costo de los energéticos juegan un papel muy importante en los costos asociados de producción, de aquí que la búsqueda de alternativas que optimicen su consumo, hacen la diferencia entre permanecer o desaparecer del mercado.

Los resultados esperados de este estudio son; determinar la factibilidad económica de uso del Biodiésel en calderas, toda vez que técnicamente se evaluará y calculará las eficiencias pertinentes de su aplicación, documentando mediante un balance de materiales, de energía y de exergías, por lo que respecta a la aplicación de su uso en calderas se estima que no existe inconveniente para lograrlo.

Por otro lado es determinar los costos de inversión que se requieren hacer tanto en equipo, los relacionados a la instalación de los mismos y de los rendimientos asociados a los materiales de consumo, siendo el costo inicial de

compra del insumo y sus indicadores económicos, factores importantes a ser tratados.

La propuesta de uso del aceite de palma Africana como combustible biodiesel en sustitución de los provenientes de fuentes fósiles, se basa ante todo en lo referido en el Epígrafe 3.7, donde el aceite de dicha fuente en términos de comercialización, ocupa el primer lugar con una participación del 49.2 % mundial, dejando atrás al aceite de soya con una participación del 21 % del comercio mundial.

Un punto importante es que los costos internacionales del aceite refinado para uso alimenticio, el que proviene de la palma Africana resulta más barato, comparado contra el de soya, girasol y colza, esta afirmación se fundamenta con los datos que son observables de la Figura 3.5 referidos al año 2003 y al analizar los datos de la Tabla 3.7 referidos al año 2008, los diferenciales de precios se mantienen evidentemente muy consistentes aún después de haber transcurrido 5 años. Las diferencias de precios son del orden de un 20% más barato el aceite de palma que el de soya.

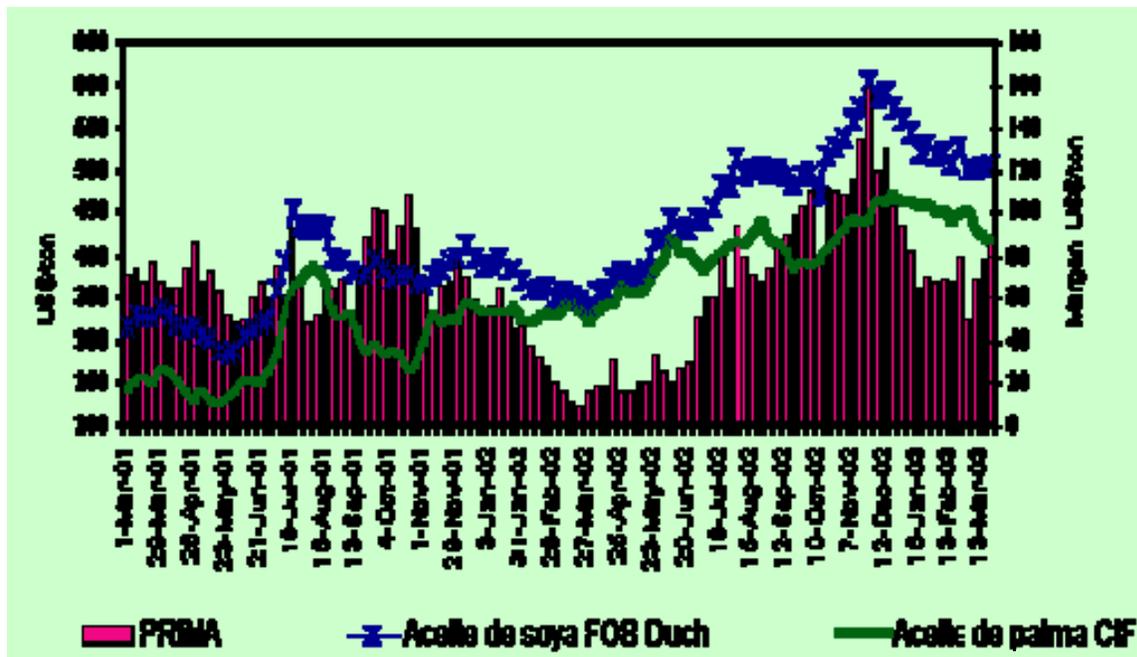


Figura 3.5 Comparación del precio internacional del aceite de palma, incluye seguro y flete (CIF Rotterdam) vs. Aceite de soya, libre a bordo (FOB Dutch); fuente: Oil World.

Tabla 3.7. Informe de precios del mercado de aceites, al primer semestre de 2008  
(usd/ton) fuente: Lípidos Santiga S.A., España

TIPO DE ACEITE	COTIZACIÓN Semana 23 AÑO 2008	COTIZACIÓN Semana 21 AÑO 2008
Paridad USD/EURO	1.5379	1.5729
Aceite crudo de palma, incluye seguro y flete Rotterdam	1195	1220
Aceite crudo de palma, libre a bordo Indonesia	1165	1185
Aceite crudo kernel de palma, incluye seguro y flete Rotterdam	1440	1435
Aceite crudo de coco, incluye seguro y flete Rotterdam	1610	1510
Aceite de soya, Dutch Mill	997€	940€
Aceite de soya, libre a bordo Argentina	1350	1330
Aceite de colza, Rotterdam	975€	1000€
Aceite de girasol, libre a bordo 6-port	2100	1935
Diesel Mediterraneo, incluyendo seguro y flete	1227	1319
Brent	127.5	130.5

Como se pudo notar, los precios anteriores son del mercado internacional y estan referidos para el aceite refinado. Cabe mencionar, que los precios actuales a Septiembre 2008, para el aceite crudo de palma africana disponible en la región de Veracruz y Chiapas, se mueven en el rango de entre los 760 a 900 u.s.d. / ton. Estos precios se rigen de acuerdo a la cotización promedio del mes anterior base el aceite en Rotterdam, más 35 u.s.d.

### 3.11 Emisiones del biodiésel a base de aceite de Palma Africana

Las emisiones el Biodiésel en su modalidad mezclado con Petrodiésel en proporción del 20% (B20) o 100% Biodiésel (B100) presenta importantes reducciones de todas las emisiones excepto por las emisiones de Óxido de Nitrógeno, como se indica a continuación en la Tabla 3.8

Tabla 3.8. Emisiones atmosféricas del aceite de palma Africana

<b>TIPO DE EMISIÓN REGULADA</b>	<b>BIODIÉSEL B100</b>	<b>BIODIÉSEL B20</b>
Hidrocarburos totales	-67	-20
Monóxido de carbono	-48	-12
Partículas	-47	-12
NOx	+10	+2
<b>TIPO DE EMISIÓN NO REGULADA</b>		
Sulfatos	-100	-20
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	-100	-20
HAP nitrados	-90	-50
Ozono potencial de HC especiales	-50	-10

El biodiésel produce casi la misma cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> que el diésel común, sin embargo las emanaciones de CO<sub>2</sub> generados en la combustión del biodiésel son fijados nuevamente a la masa vegetal. El biodiésel tiene un impacto mucho menor al del diésel debido principalmente a que el ciclo biológico del Biodiésel reduce aproximadamente en 80% las emisiones de anhídrido carbónico, y casi 100% las de dióxido de azufre.

### **3.12 Disponibilidad del Biodiésel a base de aceite de palma Africana en México**

Para comprender la situación, se analizará la Tabla 3.9, que conceptualiza las superficies involucradas de terreno destinado para esta actividad en México y de los volúmenes de cosecha, con lo cual se puede hacer una reflexión en términos comparativos contra otros países, así se tiene:

Tabla 3.9 Superficies de cultivo de palma Africana en México / perennes / riego + temporal (Año 2003), [21]

ESTADO	SUPERFICIE SEMBRADA (Ha)	SUPERFICIE COSECHADA (Ha)	PRODUCCIÓN (Tmrff) *	RENDIMIENTO PRODUCCIÓN/ SUPERFICIE COSECHADA	PRECIO PROMEDIO RURAL (USD/Tmrff)
Veracruz	2,024	2,023	8,179	4.0	50
Tabasco	4,350	716	8,319	11.7	45
Campeche	6,000				
Chiapas	16,793	10,819	200,492	18.5	68
<b>Total</b> Región Sureste	29,167	13,558	217,063	16.0	66

\*Donde; Tmrff = Tonelada metrica de racimos de fruta fresca

El precio de la fruta fresca está directamente relacionado con el precio internacional del aceite de palma, el cual es un commodity, al igual que los otros aceites de oleaginosas. Los precios se rigen de acuerdo a la cotización promedio del mes anterior base el aceite en Rotterdam más 35 u.s.d.

El precio de referencia de la fruta fresca es del orden de un 12.5 % del precio internacional del aceite crudo, lo cual es totalmente congruente con los datos de la figura 3.5, de donde puede observarse un precio aproximado para el aceite del orden de 550 u.s.d. / ton. En el año 2003.

De acuerdo a lo observado en la tabla 3.8, se desprende que México, como país, tiene el reto que significa afrontar, el área potencialmente de oportunidad que se presenta, en cuanto a promover e incentivar el desarrollo de mayores áreas de cultivo de la palma Africana, ya que su aportación dentro del escenario mundial, es indudablemente casi nula.

Colombia es en claro ejemplo a seguir en esta materia y aún cuando existen en el continente Americano otros países destacados, Colombia se posiciona como

líder por los esfuerzos en tal sentido y que les ha redituado una excelente forma de creación de valor.

Por lo que respecta al ámbito local, es destacable el mérito de los esfuerzos realizados en el Estado de Chiapas, quedando tarea por hacer en lo que respecta al Estado de Veracruz.

## **CAPÍTULO IV**

## **CAPÍTULO IV DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA LA COMBUSTIÓN DEL ACEITE CRUDO DE PALMA AFRICANA EN UNA CALDERA RADIANTE DE SISA DE C.V.**

### **4.1 Características de los materiales grasos en la naturaleza**

Los materiales “grasos” son producidos en la naturaleza tanto por organismos vegetales y animales, en el primer caso se llaman grasas vegetales o de origen vegetal, en el segundo caso se denominan grasas de origen animal.

Las grasas de origen vegetal se clasifican de acuerdo con la planta que las produce y por lo general reciben el nombre de ella.

A temperatura ambiente, las grasas tienen diferente consistencia; las líquidas reciben el nombre de aceites, las semisólidas se llaman mantecas y las sólidas se denominan sebos. Las grasas están constituidas por la combinación de ácidos grasos con la glicerina, de aquí que los principales ácidos grasos son el esteárico, el palmítico y el oléico, no obstante existen otros más que frecuentemente entran en la composición de las grasas.

Las grasas son siempre mezclas de varios glicéridos y su consistencia depende de la proporción en que estos se encuentren en ellos, así si es dominante el glicérido del ácido palmítico ó del esteárico, la grasa es más ó menos sólida y si domina el del ácido oleico la grasa es más o menos líquida. Por ejemplo, los aceites de oliva, almendra, cacahuate, algodón, soya, palma etc., formados principalmente por glicéridos del ácido oléico son líquidos, en tanto que las grasas de cerdo, la mantequilla, el sebo y la manteca de cacao que contiene gran proporción de glicéridos de ácidos esteárico y palmítico son más o menos sólidas.

También las ceras son sustancias análogas a las grasas, las mejor conocidas pertenecen al reino animal, como las de abeja, la lanolina, la esperma de ballena etc.

#### **▪ Propiedades de las grasas**

Las grasas son insolubles en agua y muy solubles en éter común, acetona, alcohol, cloroformo, bencol, sulfuro y tetracloruro de carbón, etc., en contacto con aire y del efecto del tiempo, dejan en libertad los ácidos grasos que contienen, produciéndose “enranciamiento” debido a hidrólisis que se genera.

Las grasas no pueden ser destiladas porque se descomponen a una temperatura inferior a la de su punto de ebullición, produciéndose acroleína ( $\text{CH}_2\text{-CH-CH-O}$ ), que es un líquido de olor desagradable y que causa irritación de los ojos.

#### **4.2 Sistema de preparación del combustible**

El aceite crudo de palma, requiere de un acondicionamiento desde su recepción, almacenamiento y alimentación a la caldera, lo anterior permitirá obtener el mayor rendimiento de su utilización.

Las condiciones de temperatura, humedad y materiales de diseño de los equipos son fundamentales, por lo cual se presenta a continuación las recomendaciones en este sentido.

- Transporte y almacenamiento. El transporte del aceite crudo de palma debe ser realizado en camión cisterna a temperatura ambiente, la descarga puede ser efectuada empleando bombas del tipo centrífugo, ya que la viscosidad del fluido lo permite (5.4 cSt), no así para aquellos como el combustóleo que requiere del uso de bombas de desplazamiento positivo, por su alta viscosidad (1100 cSt). La recepción del material debe de ser almacenado en tanque cerrado con el volumen necesario para garantizar cuando menos 5 días de operación continua. Si los niveles de consumo esperados son del orden de  $115 \text{ m}^3/\text{día}$ , se recomienda un tanque de  $600 \text{ m}^3$  de capacidad. Después del tanque almacén, debe de considerarse la instalación de un tanque de diario, es decir un tanque de  $115 \text{ m}^3$  de capacidad también cerrado y en el cual se montan las bombas de alimentación que dirigen el combustible al quemador de la caldera, en este caso si se recomienda la ocupación de bombas de desplazamiento positivo para garantizar una presión constante en el quemador y un control de la flama.
- Para evitar la degradación del aceite, durante el tiempo que permanezca almacenado, debido a reacciones de oxidación espontánea con la presencia del oxígeno del aire y de la temperatura, estos son agentes que provocan enranciamiento, para tener control de esta oxidación será necesario llevar a cabo determinaciones de índice de peróxidos:

Para evitar el enranciamiento, deberá de agregarse agentes antioxidantes como BHA (butil hidroxianisol), BHT (butil hidroxitolueno), tocoferoles, o el TBHQ (2-(1,1-dimetil)-1,4-bencenadiol), mismos que frecuentemente se les agrega ácido cítrico o un derivado, tal como un agente quelante.

- Así también, los tanques para el almacenamiento del aceite, deberán contar con mecanismos para purgar el agua que puede contener el material y que al cabo de un tiempo se depositarán por densidad en el fondo, el agua deberá de ser retirada para evitar que ésta sea precursora de reacciones enzimáticas, las cuales ocasionan la formación de ácidos grasos libres y que en consecuencia incrementan el grado de acidez del material, el cual para su neutralización será necesario la ocupación de sosa cáustica (NaOH) y centrifugación, operaciones que incrementarían los costos del combustible (esto se realiza cuando el aceite está destinado para uso alimenticio, mismo que requiere un proceso de refinación del aceite).
- Alimentación del aceite crudo de palma hacia el quemador. Requiere de un precalentamiento para mantenerlo dentro de un rango de entre 75 a 85 °C, manejarlo a menor temperatura no es conveniente ya que se incrementa la viscosidad, en cambio a partir de los 75 °C se incrementa la solubilidad de las gomas en el aceite asegurando su quemado.
- Los materiales de fabricación para tanques deberá de utilizarse acero inoxidable tipo 304, incluyendo tuberías de conducción y partes internas de equipos en contacto con el aceite, deberá evitarse el uso de materiales ahulados, ya que son atacados por la acidez del producto, el precalentamiento del aceite para alimentación a calderas podrá realizarse mediante intercambiadores de tubo y coraza, no se recomienda hacerlo en aquellos tipo placas, debido a que estos requieren el uso de empaques con materiales ahulados.

### 4.3 Composición de los diferentes tipos de aceites, de acuerdo al contenido de ácidos grasos que los constituyen

A continuación se referirá para la mayor parte de aceites comúnmente utilizados hoy en día, su composición porcentual de ácidos grasos presentes en base a su estructura molecular, es decir si se encuentra saturada o insaturada y al tipo de enlaces entre los átomos de carbóno, de aquí que se puedan clasificarlos como:

- Ácidos grasos saturados, son aquellos que solo tienen enlaces simples entre los átomos de carbóno.
- Ácidos grasos insaturados, son aquellos que tienen uno ó varios enlaces dobles entre átomos de carbóno.

En la Tabla 4.1 se presenta un listado de los aceites y su composición mayoritaria de ácidos grasos saturados e insaturados presentes.

Tabla 4.1. Ácidos grasos saturados e insaturados en aceites vegetales

ACEITE	% ÁCIDO GRASO SATURADO	% ÁCIDO GRASO MONOSATURADO	% ÁCIDO GRASO POLIINSATURADO
Cacahuete	19	48	29
Cártamo	10	13	72
Colza	85	6.6	1.7
Coco	7	57	32
Girasol	12	20	63
Maíz	13	25	58
Oliva	14	70	11
Palma	45	42	8
Algodón	26	21	48
Soya	15	23	57
Manteca de cerdo	41	44	9
Mantequilla	54	20	2.6
Margarina blanda	25	31	22
Margarina dura	36	33	9
Sebo	48	32	2

#### 4.4 Composición química del aceite de palma Africana

Debido a que el presente trabajo está referido al uso del aceite de palma Africana como componente en la fabricación de Biodiésel, es por tanto que la recopilación se centrará en conjuntar la información correspondiente en torno a este material.

El aceite de palma Africana, se constituye principalmente de ácido palmítico y oléico lo cual le dan la característica de tener un aspecto físico líquido a temperatura ambiente, sumados estos dos componentes representan el 85 % del total del aceite.

De acuerdo con Querini, Carlos, investigador independiente del Conicet de Argentina, La cantidad de ácido oléico presente en un aceite determina el grado de perfección que se puede llegar a tener en la fabricación de Biodiésel, de aquí que si se pudiera seleccionar la semilla y diseñar su genética para crear el Biodiésel perfecto, tendría que conseguirse una con componentes totales de ácido oléico, aceite graso monoinsaturado. La aplicabilidad del concepto antes citado será válido una vez que se encuentre el equilibrio al conjugar otras razones como son:

- Conseguir el menor costo al hacer el comparativo entre los diferentes aceites según su origen, en el contexto de precios del mercado internacional que los rigen.
- Definir la disponibilidad de volúmenes de materiales en cada caso y asegurar un suministro confiable.
- Situar el punto de suministro más cercano a nuestras instalaciones.
- Identificar aquellos aceites que puedan ser objeto de polémica en cuanto a si son materiales grasos para alimentación de la población o que puedan brindar el beneficio alterno para la producción de biocarburantes.

En la Tabla 4.2, puede observarse la composición química del aceite de palma africana, con la fracción de cada uno de los ácidos grasos que lo integran,

Tabla 4.2. Composición química del aceite de palma Africana

NOMBRE COMÚN	NOMBRE QUÍMICO SEGÚN IUPAC ( Ralph T. Holman )	ESTRUCT. QUÍMICA	FRACCIÓN MOLAR ( ui )	FORMULA CONDENSAD A	PESO MOLECULAR ( mi )
Ácido Palmítico	Ácido hexadecanoico (AP C16:0)	saturado	0.45	C16H32O2	256.43
Ácido Oléico	Ácido cis-9 octadecaenoico (AO C18:1 □9)	Mono-insaturado	0.40	C18H34O2	282.47
Ácido Linoléico	Ácido 9-12 todo-cis octadecadienoico (AL C18:2 □6)	Poli-insaturado	0.10	C18H32O2	280.45
Ácido Esteárico	Ácido octadecanoico (AE C18:0)	saturado	0.05	C18H36O2	284.84

De acuerdo con la composición descrita en la tabla anterior se puede calcular la masa molecular correspondiente en forma específica para el aceite de palma africana mediante la siguiente ecuación:

$$Mm = \sum_{i=1}^n Mi * ui \quad (4.1)$$

Donde:

Mm- masa molecular de mezcla, kg/kmol

Mi- peso molecular de cada componente

ui- fracción en volumen del componente

n- número de componentes presentes en la mezcla

Sustituyendo valores se tiene:

$$Mm = (256.43 * 0.45) + (282.47 * 0.40) + (280.45 * 0.10) + (284.84 * 0.05)$$

$$Mm = 270.65 \text{ kg/kgmol}$$

A continuación las formulas semidesarrolladas de cada ácido graso presente:

Ácido palmítico:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$

Ácido oléico:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

Ácido linoléico:  $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_4 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - (\text{CH}_2)_7 - \text{COOH}$

Ácido esteárico:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$

#### 4.5 Propiedades físicas y químicas del aceite de palma Africana

En la tabla anterior pudimos observar la composición química del aceite de palma Africana, mientras que las propiedades físicas y químicas de cada uno de los ácidos grasos que lo componen se presentan en la Tabla 4.3 siguiente:

Tabla 4.3. Propiedades físicas y químicas de los ácidos grasos presentes en el aceite de palma Africana

VARIABLE	UNIDAD	ÁCIDO PALMÍTICO	ÁCIDO OLÉICO	ÁCIDO LINOLÉICO	ÁCIDO ESTEÁRICO
Punto de ebullición	°C	351	360	356	376
Punto de fusión	°C	63	60	15	70
Punto de inflamación	°C	163	189	167	196
Densidad relativa al agua	kg/m <sup>3</sup>	850	895	880	870
Calor específico	kJ/kg °C	1.982	1.972	1.883	1.981

Con los datos de la tabla anterior, se pueden calcular algunas propiedades de mezcla apoyados en ecuaciones que se ilustran seguidamente.

Los resultados calculados podrán compararse con los resultados reportados de estudios experimentales de laboratorio, específicos para el aceite de palma Africana, mismos que se observan en la Tabla 4.4 siguiente, las ecuaciones de cálculo son:

$$T_{im} = \sum_{i=1}^n T_i * u_i \quad (4.2)$$

Donde:

$T_{im}$ - Temperatura de inflamabilidad de mezcla, °C

Sustituyendo valores se tiene:

$$T_{im} = (163*0.45) + (189*0.40) + (167*0.10) + (196*0.05)$$

$$T_{im} = 175.45 \text{ °C}$$

$$dm = \sum_{i=1}^n d_i * u_i \quad (4.3)$$

Donde:

$dm$ - Densidad de mezcla, relativa al agua, kg/m<sup>3</sup>

Sustituyendo valores se tiene:

$$dm = (850*0.45) + (895*0.40) + (880*0.10) + (870*0.05)$$

$$dm = 872 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{pm} = \sum_{i=1}^n c_{pi} * u_i \quad (4.4)$$

Donde:

$C_{pm}$ - Calor específico de mezcla, kj/kg °C

Sustituyendo valores se tiene:

$$C_{pm} = (1.982*0.45) + (1.972*0.40) + (1.883*0.10) + (1.981*0.05)$$

$$C_{pm} = 1.97 \text{ kj/kg °C}$$

Tabla 4.4. Principales propiedades del aceite crudo de palma (ACP) y su comparativo con la normatividad del diésel de petróleo y del Biodiesel refinado destinado para uso en vehículos automotores (fuente: Scientia et Technica), [3]

PROPIEDAD	UNIDAD	NORMA ASTM	VALOR REPORTADO PARA ACP	DIÉSEL COMUN ASTM D975	BIODIÉSEL REFINADO ASTM D6571
Densidad a 15°C	Kg/m <sup>3</sup>	D4052	872.9	865	870 - 890
DESTILACIÓN:		D86			
Punto inicial de ebullición	°C		306.9	-	-
50 % recobrado	°C		329.3	Máx. 300	
90% recobrado	°C		337.4	Máx. 360	Máx. 360
Punto final de ebullición	°C		351.6	Máx. 390	
Índice cetano		D976	56	40 - 50	46 - 62
Índice de yodo (gr I <sub>2</sub> /100gr ACP)			55.4	-	Máx. 150
Índice de saponificación (mg KOH/gr ACP)			194.5	-	195
Índice de acidez	% W	D664	3.8	-	
Punto de inflamación (Pensky-Martens)	°C	D93	162.3	52 - 71	Mín. 130
Contenido de azufre	ppm	D129/4294	0.0	Máx. 4500	Máx. 500
Viscosidad cinemática a 40°C	cSt	D445	5.4	1.3 – 4.1	1.9 – 6.0
Corrosión en lámina de cobre 3 hr a 100 °C		D130	1	Máx. No. 3	Máx. No. 3
Contenido de cenizas	% W/W	D482	trazas	Máx. 0.01	-
Contenido de agua	% V/V	D2709	0.027	Máx. 0.05	Máx. 0.05
Punto de nube	°C	D94	18	-	reportar
Poder calorífico	BTU/Lb	D240	17279.0	18500.0	17000.0
Poder calorífico por volumen	MJ/m <sup>3</sup>	D240	35,046.93	37,188.39	34,479.55

Como se podrá observar, las propiedades del aceite crudo de palma (ACP) reportadas, son casi idénticas a las especificaciones que rige la producción del

Biodiesel refinado para uso en motores vehiculares, para cuyo fin establece otras particularidades como son:

- El desgomado. Referido a la eliminación de mucílagos y ceras presentes en el aceite de origen vegetal en estado de solución y de emulsión estables (son polisacáridos capaces de absorber agua), estos pueden ocasionar incluso depósitos y oxidación en los pasos muy estrechos de los inyectores de combustible en los motores.
- La neutralización. Referido a la reducción del nivel de acidez del aceite (La acidez referida en cuanto a la cantidad de ácidos grasos en estado libre, de hecho cuando se dice que un aceite tiene dos grados de acidez quiere decir que tiene el 2 por 100 en peso de ácidos grasos libres). Este aspecto tiene efecto sobre los materiales de fabricación de las mangueras de conducción del combustible al motor, los cuales son fabricados normalmente de hule y que pueden verse afectados por la acidez del combustible.
- Existen otras consideraciones como son la decoloración, la deodorización y secado del aceite, aspectos a considerar cuando el fin es para uso vehicular.

Cabe comentar que el Biodiésel utilizado para uso vehicular, puede ser preparado base 100 % aceite, comúnmente denominado Biodiésel B100 ó en diferentes proporciones porcentuales en volúmen, así se tiene el Biodiésel B20 este se encuentra en una proporción de 20% de Biodiésel y 80 % de petrodiesel, el B50 contiene 50% de Biodiésel y 50% de petrodiesel, en consecuencia las propiedades de estos biocarburantes tendrán algunas diferencias entre si. Para fines prácticos y como referencia de los cálculos que se presentan en esta Tesis, se considerará las propiedades del aceite crudo de palma reportado en la Tabla 4.4 y/o de su más inmediato predecesor llamado Biodiésel B100.

Para el propósito de quemar el aceite en calderas de naturaleza y para uso industrial, los requisitos del material no necesariamente deberá de cumplir con las especificaciones y normativas que le corresponden al Biodiésel para uso vehicular, donde el control de calidad del mismo se somete al cumplimiento de parámetros

estandarizados, en cambio para su uso industrial puede regirse al cumplimiento de otros parámetros sino laxos, si con tolerancias debido a que los materiales que se ocupan en la fabricación de los equipos, estos presentan mayor robustez que un motor de combustión interna, a la vez que pueden adaptarse modificaciones y mejorarse los propios materiales de fabricación de los equipos.

Solventando las características que presenta el aceite crudo de palma Africana visto en la Tabla 4.4, un aspecto muy importante a considerar para su uso en calderas industriales, es la propiedad referida al poder calorífico del combustible, tema del cual se revisará a continuación.

#### 4.6 Poder calorífico del aceite crudo de palma Africana y/o Biodiésel B100

El poder calorífico, es la cantidad de energía que la unidad de masa del material puede desprender al producirse una reacción química de oxidación (quedan excluidas las reacciones nucleares, de fisión ó fusión nuclear, ya que para ello se usa la formula  $E=mc^2$ ).

La magnitud del poder calorífico puede variar según como se mida. Así se tiene la expresión; poder calorífico superior ( $Q_{bc}$  sup), mismo que algunos autores también denominan poder calorífico bruto y el poder calorífico inferior ( $Q_{bc}$  inf), también llamado poder calorífico neto.

El poder calorífico, puede ser determinado mediante tres formas a saber:

- Mediante reportes de ensayos realizados en laboratorio, utilizando el aparato de Junkers (ver Figura 4.1) o bomba de calor.
- Mediante ecuaciones de cálculo criterios de Dulong, desarrolladas para combustibles fósiles y del cual existen fórmulas definidas cuando se queman hidrocarburos gaseosos, líquidos y sólidos como es el caso del carbón, así se tiene la ecuación 4.5 para combustibles líquidos (diésel, combustóleo) y sólidos:

$$Q_{bc} = 339.147C + 1256.1H + 108.86(S - O) - 25.12(9H + W) \quad (4.5)$$

Donde:

Q bc- Valor calórico bajo del combustible, kj/kg

W- Humedad presente en el combustible, % v

C,H,S,O- Cantidad de carbóno, hidrógeno, azufre y oxígeno presentes, % v

- Otro método es mediante balance energético en el combustor.



Figura 4.1 Bomba de calor

El poder calorífico superior, mide la cantidad total de calor que se produce mediante la combustión. Sin embargo, una parte de ese calor permanece en el calor latente de la evaporación del agua existente en el combustible. El poder calorífico inferior, excluye el calor latente del agua, que al disminuir por debajo de la temperatura límite a la presión parcial del agua en los gases de combustión, la misma genera condensación ácida y corrosión. Por consiguiente, el valor térmico más bajo es la cantidad de calor disponible realmente en el proceso de combustión para captarlo y utilizarlo.

Cuanto mayor sea el contenido de humedad de un combustible, mayor será la diferencia entre el  $Q_{bc\ sup}$  y el  $Q_{bc\ inf}$  y menor será la energía total disponible, estos parámetros se expresan generalmente en megajulios por kilogramo ó por metro cúbico.

El valor calorífico del aceite crudo de palma reportado en la Tabla 4.4, fue determinado experimentalmente por Benjumea y Agudelo de la Universidad Nacional de Colombia [3].

Otros estudios relacionados con el Biodiésel en general, sin hacer mención del origen de aceite, fueron realizados en el Laboratorio de Química de la

Universidad de Strathclyde Escocia [4], reportando un poder calorífico para el biodiésel B100 del orden de 33,187.66 Mj/m<sup>3</sup> dato muy aproximado y dentro del rango de aceptación a lo antes mencionado.

La determinación del valor calórico superior para aceites vegetales, mediante métodos teóricos fue desarrollado por Ayhan Demirbas del Departamento de Ciencias de la Facultad Educacional en la Universidad Técnica del Mar Negro de Turquía [8], el modelo matemático se basa en las propiedades físicas y químicas de aceites de origen vegetal y define el valor calórico superior de los aceites, como una función de los índices de saponificación (*iS*) y de los índices de Iodo (*iY*), mediante la ecuación 4.6, con un coeficiente de correlación de 0.9999.

A continuación se procederá a calcular el valor calórico superior para el aceite crudo de palma africana:

$$Q_{bc \text{ sup}} = 49.43 - [0.041(iS) + 0.015(iY)] \quad (4.6)$$

Donde:

*Q bc sup*- Valor calórico superior, Mj/kg

*iS*- índice de saponificación obtenido de la Tabla 4.4, mg KOH/gr ACP

*iY*- índice de Iodo obtenido de la Tabla 4.4, gr I<sub>2</sub>/100 gr ACP

Sustituyendo valores se tiene:

$$Q_{bc \text{ sup}} = 49.43 - [0.041 * (194.5) + 0.015 * (55.4)]$$

$$Q_{bc \text{ sup}} = 40.625 \text{ Mj/kg}$$

$$Q_{bc \text{ sup}} = 35,461.56 \text{ Mj/m}^3$$

El valor antes calculado coincide con el reportado experimentalmente en la Tabla 4.4, con lo que se demuestra la validez de éste método y lo útil de su aplicación, ya que puede tener cabida para cualquier aceite vegetal.

Como se indicó anteriormente, el valor calórico bajo (*Qbc inf*) es el de verdadero interés, así que se procederá a su cálculo correspondiente y para ello se determinará el calor latente de evaporación del agua contenido en el aceite crudo de palma. El procedimiento de cálculo a seguir es el siguiente:

- Mediante uso del software TPX de excel, se procederá a determinar las entalpías de la fase líquida (*hf*) y de la fase vapor (*hg*) del agua a la presión parcial de la misma, haciendo la correspondencia de un título de

$x=1$  y de  $x=0$  respectivamente. Con los valores de  $h_f$  y  $h_g$ , mediante la ecuación 4.7 se procederá a calcular  $\lambda$ .

$$\lambda = h_g - h_f \quad (4.7)$$

Donde:

$\lambda$ - Calor latente de evaporación del agua, a presión parcial de 0.08 bar, kj/kg

$h_g$ - Entalpía de la fase líquida del agua a la presión parcial del agua, kj/kg

$h_f$ - Entalpía de la fase vapor del agua a la presión parcial del agua, kj/kg

Los resultados obtenidos de TPX son los siguientes ( ver Figura 4.2 ):

$$h_g = 2676.82 \text{ kj/kg}$$

$$h_f = 421.06 \text{ kj/Kg}$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$\lambda = 2676.82 - 421.06$$

$$\lambda = 2255.76 \text{ kj/kg}$$

USO DE SOFTWARE TPX; CÁLCULO DE Hg Y Hf		
	CÁLCULO DE hg	CÁLCULO DE hf
T [°K]	373.6345	373.6345
P [ bar ]	1.0299	1.0299
D [ Kg/m <sup>3</sup> ]	0.6068	957.9574
Ve [ m <sup>3</sup> /kg ]	1.6481	0.0010
U [ Kj/kg ]	2507.0885	420.9601
H [ Kj/kg ]	2676.8282	421.0676
S [ kj/kg ° K ]	7.3496	1.3123
X	1.0000	0.0000

Figura 4.2 Cálculo de Hg y Hf mediante TPX

Habiendo determinado el calor latente del agua, entonces se procederá a calcular el valor calórico bajo ( $Q_{bc \text{ inf}}$ ), mediante la ecuación 4.8:

$$Q_{bc \text{ inf}} = Q_{bc \text{ sup}} - \lambda \quad (4.8)$$

Donde:

$Q_{bc \text{ inf}}$ - Valor calórico bajo del aceite crudo de palma, kj/kg

Sustituyendo valores se tiene:

$$Q_{bc \text{ inf}} = 40625 - 2255.76$$

$$Q_{bc \text{ inf}} = 38,369.24 \text{ kj/kg}$$

$$Q_{bc \text{ inf}} = 38.36 \text{ Mj/kg}$$

$$Q_{bc \text{ inf}} = 33,492.07 \text{ Mj/m}^3$$

Para cálculos posteriores se tomará como referencia el valor calórico inferior antes indicado.

#### 4.7 Selección de la caldera de trabajo

La planta SISA de C.V. cuenta con tres calderas, una en operación y dos en reserva, mismas que están habilitadas para quemar el energético que en su oportunidad presente el menor costo, los escenarios de operación se ajustan haciendo algunas mezclas de combustibles, según se requiera:

- Caldera #1.
  - Proceso 1) Combustión de Gas natural al 100%
  - Proceso 2) Combustión de Gas natural al 60% y 40% Hidrógeno
- Caldera #2.
  - Proceso 3) Combustión de Combustóleo al 100 %
  - Proceso 4) Combustión de Combustóleo al 60% y 40% Gas natural
- Caldera #3.
  - Proceso 5) Combustión de pet-coke al 60% y 40 % Combustóleo
  - Proceso 6) Combustión de pet-coke al 60% y 40 % Gas natural

La capacidad de diseño de cada caldera es de 68,100 Kg/Hr de vapor sobrecalentado, a 45.71 Kg/cm<sup>2</sup> y 400 °C, operando una a la vez para mantener la demanda de la planta de sal. La propuesta de aplicación de un séptimo esquema de operación, como es el de quemar **aceite crudo de palma Africana**, se considera más factible de realizarse en la caldera #2, que ya está equipada para la quema de un combustible líquido como el combustóleo e incorpora todos los periféricos como el tren de descarga de producto, almacenamiento, precalentamiento, regulación de la alimentación y de inyección de combustible a quemadores, no así la caldera #1, ni la #3. En la Tabla 4.5 se representa las capacidades y condiciones de diseño de las calderas.

Las operaciones son en régimen continuo, durante las 24 Hr. del día, los 365 días del año, excepto en paro anual programado para mantenimiento y paros no administrados debido a falla de la red de energía eléctrica.

Tabla 4.5. Capacidades y condiciones de diseño de las calderas de SISA

CALDERA	CAPACIDAD ( kg/hr )		PRESIÓN ( kg/cm <sup>2</sup> )		TEMPERATURA (°C)	
	DISEÑO	NORMAL	DISEÑO	OPERACIÓN	DISEÑO	OPERACIÓN
1	68,100	55,000	45.71	39.7	400	360
2	68,100	55,000	45.71	39.7	400	360
3	68,100	55,000	45.71	39.7	400	360

Las restricciones ambientales, son las vigentes según las Normas en materia de emisiones de fuentes fijas, para lo cual se cumple cuando se opera con gas natural al 100% y/o mezclado con hidrógeno, no siendo así cuando se quema combustóleo y pet-coke en los parámetros referidos a partículas suspendidas y azufre.

En la Tabla 4.6 se presenta las características de la caldera seleccionada para implantar la quema del aceite crudo de palma Africana.

Tabla 4.6. Características de la caldera seleccionada

<b>SELECCIÓN DE LA CALDERA</b>			
<b>MARCA: CERREY, TIPO 12F31 A14-42</b>			
<b>PARÁMETROS NOMINALES</b>		<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>
Capacidad de generación de vapor		68,100	kg/hr
Presión de diseño		45.71	kg/cm <sup>2</sup>
Presión de operación		39.7	kg/cm <sup>2</sup> abs
Temperatura de vapor sobrecalentado		400	°C
Temperatura de vapor saturado		246	°C
Temperatura del agua de alimentación		95	°C
Temperatura del aire ambiente		30	°C
Temperatura del aire a la combustión		321	°C
Flujo de aire de entrada		38377	cfm
Flujo de gases de salida		40800	cfm
Potencia de la caldera		40800000	kcal/hr
		47464	kw
Combustible	<b>TEMPERATURA ENTRADA °C</b>	<b>PRESIÓN ENTRADA</b>	<b>FLUJO</b>
Combustóleo		118	kg/cm <sup>2</sup> 10.54

A continuación en la Figura 4.3, se presenta el lazo termodinámico de la caldera y sus condiciones particulares de operación.

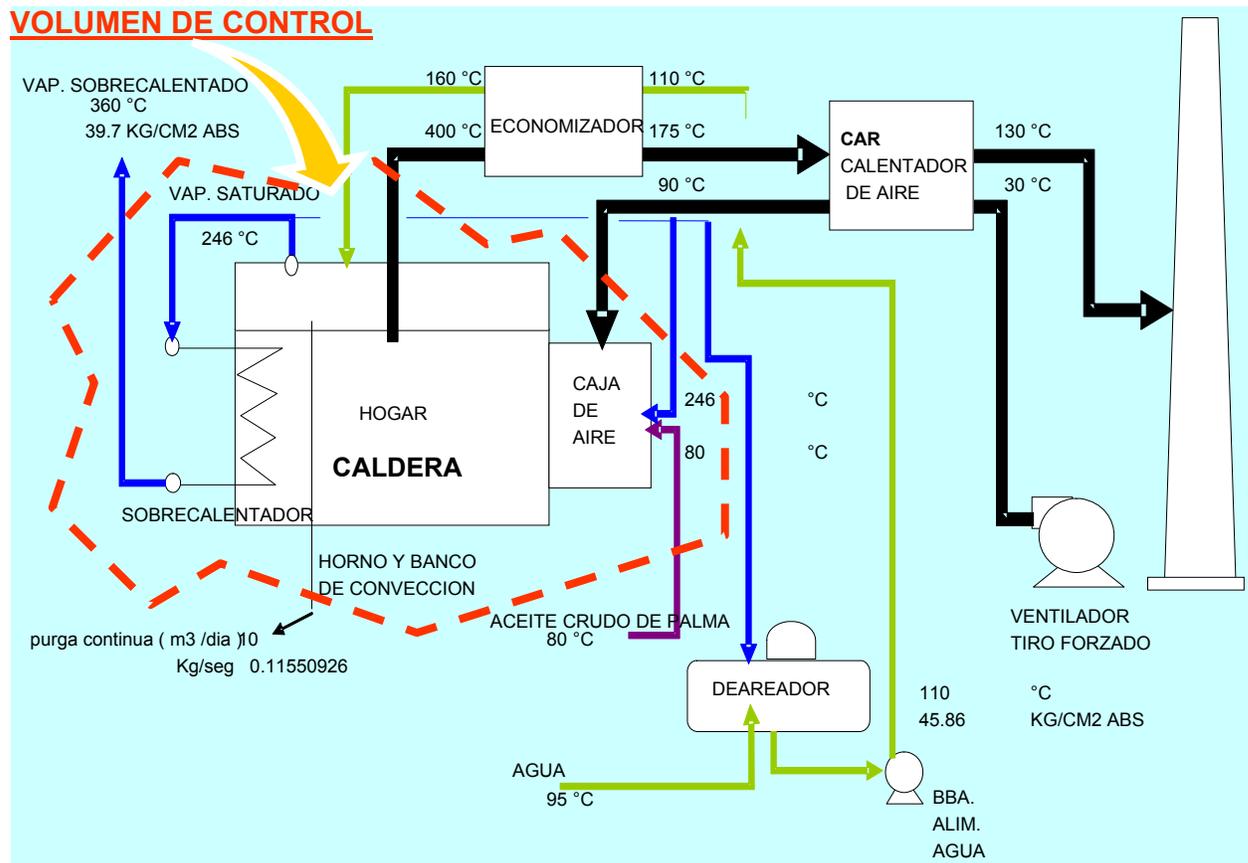


Figura 4.3 Lazo termodinámico de la caldera de trabajo

#### 4.8 Cálculo de la combustión.

El cálculo de la combustión incorpora la realización de un balance térmico y másico de las reacciones, desde dos aspectos:

- El balance teórico
- El balance real.

Con respecto al balance teórico, éste no considera ningún exceso de aire más que el requerido de acuerdo a la estequiometría de la reacción, en tanto que el real sí considera un exceso de aire, el cual se define por la letra griega alfa ( $\alpha$ ). Para el primer caso  $\alpha = 1$ , para el segundo caso  $\alpha > 1$ , matemáticamente " $\alpha$ " se denota mediante la ecuación siguiente:

$$\alpha = 21 / (21 - O_2) \quad (4.9)$$

Donde:

$\alpha$ - Exceso de aire, %

O<sub>2</sub>- Cantidad de oxígeno medido en la salida de gases de la caldera, %

Para el caso real, el porcentaje de oxígeno medido con un Orsat, fué de 4.1 %, sustituyendo valores en la ec. 4.9 se tiene:

$$\alpha = 21 / (21 - 4.1)$$

$$\alpha = 1.243$$

El valor de “ $\alpha$ ” antes determinado será el ocupado en cálculos posteriores.

A partir de la composición química del aceite crudo de palma Africana enunciado en la Tabla 4.2 y que el ácido oléico es el elemento que de acuerdo a la bibliografía, otros investigadores en la materia lo toman como base para referir las características principales del aceite, además de tener la representatividad del peso molecular del material, en este caso también se tomará dicho ácido como base de los balances de las reacciones involucradas. De acuerdo con lo comentado, a continuación se presentan las Tablas 4.7, 4.8 y 4.9 que describen el cálculo de las masas moleculares y gravimétricas del, aceite crudo de palma Africana, del aire y de los gases producto de la combustión (GPC) desde la perspectiva del balance teórico, posteriormente se presentará lo correspondiente al balance real.

Tabla 4.7. Cálculo de la masa molecular y masa gravimétrica del aceite de palma Africana

COMPONENTES		COMPOSICIÓN QUÍMICA % u <sub>i</sub>	PESO MOLECULAR KG/KMOL m <sub>i</sub>	MASA MOLECULAR KG/KMOL tot M <sub>mi</sub> =U <sub>i</sub> *M <sub>i</sub>	FRACCIÓN GRAVIMÉTRICA G <sub>i</sub> =r <sub>i</sub> *M <sub>mi</sub> /M <sub>mtot</sub>	FRACCIÓN MOLAR o VOLUMÉTRICA r <sub>i</sub> =G <sub>i</sub> *M <sub>mtot</sub> /M <sub>mi</sub>
Carbóno	C	76.54	12.011	9.193	0.826	0.765
Hidrógeno	H	12.13	1.008	0.122	0.011	0.121
Nitrógeno	N	0.00	14.007	0.000	0.000	0.000
Oxígeno	O	11.33	16.000	1.813	0.163	0.113
Azufre	S	0.00	32.066	0.000	0.000	0.000
Agua	H <sub>2</sub> O	0.03	18.016	0.005	0.000	0.000
<b>Total</b>		<b>100.027</b>		<b>11.133</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>

Tabla 4.8. Cálculo de la masa molecular y masa gravimétrica del aire

COMPONENTES		PESO MOLECULAR kg/kmol mi	FRACC. MOLAR o VOLUMÉTRICA $r_i = G_i \cdot M_{\text{mtot}} / M_{\text{mi}}$	MASA GRAVIMÉTRICA $G_i = r_i \cdot M_{\text{mi}} / M_{\text{mtot}}$
Oxígeno	O <sub>2</sub>	32.000	0.739	23.650
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.014	2.779	77.849
<b>Total</b>			<b>3.518</b>	<b>101.499</b>

Tabla 4.9. Cálculo de la masa molecular y masa gravimétrica de GPC

COMPONENTES		PESO MOLECULAR kg/kmol mi	FRACC. MOLAR o VOLUMÉTRICA $r_i = G_i \cdot M_{\text{mtot}} / M_{\text{mi}}$	MASA GRAVIMÉTRICA $G_i = r_i \cdot M_{\text{mi}} / M_{\text{mtot}}$
Bióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44.011	0.765	33.685
Agua	H <sub>2</sub> O	18.016	0.061	1.093
Bióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	64.066	0.000	0.000
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.014	2.779	77.849
<b>Total</b>			<b>3.605</b>	<b>112.627</b>

A continuación la ecuación de balance molar teórico:

Combustible + Aire → GPC

$$0.765C + 0.121H + 0.113O + 0.0N + 0.0S + 0.0H_2O + a \cdot O_2 + a \cdot 3.76N_2 \Rightarrow bCO_2 + cH_2O + dSO_2 + fN_2 \quad (4.10)$$

Calculando los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  y  $f$  y sustituyendo en la ecuación 4.10 se obtiene el balance molar de reactivos vs. GPC, lo cual se ilustra en la Tabla 4.10 siguiente:

Tabla 4.10. Balance de reactivos y GPC teórico

REACTIVOS		GPC	
Combustible	1.000		kmol
Aire	3.518		kmol
<b>Totales</b>	<b>4.518</b>	<b>VS.</b>	<b>3.605</b> kmol

El balance no es igual por tratarse de un balance con fracciones molares.

En tanto la ecuación 4.11 describe la ecuación de balance másico teórico quedando expresada según:

$$11.133\text{Kg}/\text{Kmolcomb} + 101.499\text{Kg}/\text{Kmolair} \Rightarrow 112.63\text{Kg}/\text{KmolGPC} \quad (4.11)$$

Seguidamente se presenta la Tabla 4.11 como un resumen de lo anterior.

Tabla 4.11. Balance másico teórico

<b>COMBUSTIBLE</b>	11.133		<b>GPC</b>	
<b>AIRE</b>	101.499			
<b>TOTAL</b>	<b>112.632</b>	Kg r / Kmolr	<b>112.627</b>	Kg gpc/Kmol gpc

Ahora bien en las Tablas 4.12, 4.13 y 4.14 que a continuación se presentan, estas describen los cálculos de las masas moleculares y gravimétricas del; aceite crudo de palma Africana, del aire y de los GPC, resultantes del balance real.

Tabla 4.12. Cálculo de la masa molecular y masa gravimétrica del aceite de palma Africana

COMPONENTES		COMPOSICIÓN QUÍMICA % ui	PESO MOLECULAR Kg/kmol mi	MASA MOLECULAR Kg/kmol tot Mmi=ui*mi	FRACCIÓN GRAVIMÉTRICA Gi=ri*Mmi/Mmtot	FRACCIÓN MOLAR o VOLUMÉTRICA ri=Gi*Mmtot/Mmi
Carbóno	C	76.538	12.011	9.193	0.826	0.765
Hidrógeno	H	12.133	1.008	0.122	0.011	0.121
Nitrógeno	N	0.000	14.007	0.000	0.000	0.000
Oxígeno	O	11.329	16.000	1.813	0.163	0.113
Azufre	S	0.000	32.066	0.000	0.000	0.000
Agua	H2O	0.027	18.016	0.005	0.000	0.000
<b>Total</b>		<b>100.027</b>		<b>11.133</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>

Tabla 4.13. Cálculo de la masa molecular y masa gravimétrica del aire

COMPONENTES		PESO MOLECULAR Kg/kmol mi	FRACCIÓN MOLAR o VOLUMÉTRICA $r_i = G_i \cdot M_{\text{mtot}} / M_{\text{mi}}$	MASA GRAVIMÉTRICA $G_i = r_i \cdot M_{\text{mi}} / M_{\text{mtot}}$
Oxígeno	O <sub>2</sub>	32.000	2.518	80.586
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.014	4.291	120.203
<b>Total</b>			<b>6.809</b>	<b>200.789</b>

Tabla 4.14. Cálculo de la masa molecular y masa gravimétrica de GPC

COMPONENTES		PESO MOLECULAR Kg/kmol mi	FRACCIÓN MOLAR o VOLUMÉTRICA $r_i = G_i \cdot M_{\text{mtot}} / M_{\text{mi}}$	MASA GRAVIMÉTRICA $G_i = r_i \cdot M_{\text{mi}} / M_{\text{mtot}}$
Bióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44.011	0.765	33.685
Agua	H <sub>2</sub> O	18.016	0.061	1.093
Bióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	64.066	0.000	0.000
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.014	4.291	120.203
Oxígeno	O <sub>2</sub>	32.000	1.600	51.198
<b>Total</b>			<b>6.717</b>	<b>206.179</b>

A continuación la ecuación de balance molar Real:

Combustible + Aire → GPC

$$0.765C + 0.121H + 0.113O + 0.0N + 0.0S + 0.0H_2O + \alpha \cdot a \cdot O_2 + \alpha \cdot a \cdot 3.76N_2 \Rightarrow bCO_2 + cH_2O + dSO_2 + fN_2 + gO_2$$

(4.12)

Calculando los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  y  $f$  y sustituyendo en la ecuación 4.12 se obtiene el balance molar de reactivos vs. GPC, lo cual se ilustra en la Tabla 4.15 siguiente:

Tabla 4.15. Balance de reactivos y GPC real

REACTIVOS		GPC	
Combustible	1.000		kmol
Aire	5.432		kmol
<b>Totales</b>	<b>6.432</b>	<b>VS.</b>	<b>6.717</b> kmol

Al igual que en el balance anterior, el balance real no es igual por tratarse de un balance con fracciones molares.

En tanto la ecuación 4.13 describe la ecuación de balance másico Real quedando expresada según:

$$11.133\text{Kg} / \text{Kmolcomb} + 200.189\text{Kg} / \text{Kmolair} \Rightarrow 206.179\text{Kg} / \text{KmolGPC}$$

(4.13)

Seguidamente se presenta la Tabla 4.16 como un resumen de lo anterior.

Tabla 4.16 Balance másico

<b>COMBUSTIBLE</b>	11.133		GPC + O <sub>2</sub>
<b>AIRE</b>	200.789		
<b>TOTAL</b>	<b>211.921</b>	Kg r / Kmolr	<b>206.179</b>

A partir de la información de las tablas anteriores se procederá a determinar la ecuación unitaria o índice (Ec. 4.14), la cual permitirá finalmente llegar a encontrar la relación de los volúmenes ideales de los gases, como es la cantidad de aire expresada como kg aire/kg de combustible y de los kg de GPC/kg de combustible, datos necesarios para los cálculos posteriores que determinan el tamaño del ventilador del tiro forzado, mismo que permitirá alimentar adecuadamente las cantidades de aire necesarias para la combustión.

$$(11.133\text{kgC}) + (80.586\text{kgO}_2 + 120.203\text{kgN}_2) \Rightarrow (33.685\text{kgCO}_2) + (1.093\text{kgH}_2\text{O}) + (0.0\text{kgSO}_2) + (120.203\text{kgN}_2) + (51.198\text{kgO}_2)$$

(4.14)

Dividiendo la Ec. 4.14 entre la masa molecular del combustible, se obtiene la Tabla 4.17 que relaciona las cantidades de aire y de GPC por kilogramo de combustible:

Tabla 4.17 Volúmenes ideales de gases con los coeficientes de la ecuación unitaria

<b>Kg aire/Kg c =</b>	7.239 Kg O <sub>2</sub> /Kg c + 10.797 Kg N <sub>2</sub> /Kg c =	<b>18.036</b>
<b>Kg GPC/Kg c =</b>	3.026 kg CO <sub>2</sub> /kgc + 0.098 Kg H <sub>2</sub> O/kgc + 0.000 Kg SO <sub>2</sub> /kgc + 10.797 Kg N <sub>2</sub> /Kgc + 4.599 Kg O <sub>2</sub> /kg c =	<b>18.520</b>

#### 4.9 Cálculo de la capacidad del ventilador de tiro forzado.

El ventilador de tiro forzado (VTF), es el equipo encargado de alimentar la cantidad de aire para la combustión, en los volúmenes de acuerdo a la capacidad de la caldera. Cálculos previos serán realizados como son, la determinación de la temperatura límite (T lim), de los gases que salen por chimenea mediante cálculo de las presiones parciales según Dalton, más un margen de temperatura adicional, para asegurar no tener condensación del agua presente en los gases, considerando dicho margen en 60 °C adicionales a la temperatura de salida. La ecuación 4.15 permite el cálculo de las presiones parciales de Dalton, mismas que se resumen en la Tabla 4.18.

$$Mi/Mm = Pi/PT = ri \quad (4.15)$$

$$Pi = ri * PT$$

Donde:

Pi- Presión parcial de cada componente, kg/cm<sup>2</sup> o kpa

PT- Presión total del sistema, 1.05 kg/cm<sup>2</sup> ABS.

Mi- Fracción de cada componente

Mm- Masa molecular de la mezcla

Tabla 4.18. Presiones parciales de Dalton

COMPONENTES		% VOLUMEN	PESO MOLECULAR Kg/kmol mi	FRACCIÓN MOLAR o VOLUMÉTRICA ri=Gi*Mmtot/Mmi	PRESIÓN PARCIAL kg/cm <sup>2</sup> Pi
Bióxido de carbóno	CO <sub>2</sub>	0.114	44.011	0.765	0.804
Agua	H <sub>2</sub> O	0.009	18.016	0.061	0.064
Bióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	0.000	64.066	0.000	0.000
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.639	28.014	4.291	4.505
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0.238	32.000	1.600	1.680
<b>Total</b>		<b>1.000</b>		<b>6.717</b>	

Mediante uso de TPX o con ayuda de las tablas de vapor, se determina que a la presión parcial del agua indicada en la tabla de 0.064 kg/cm<sup>2</sup>, le corresponde una temperatura de 101.7 °C. La temperatura límite se determina mediante la ecuación 4.16 siguiente.

$$T_{lim} = T_{sat} + 60^{\circ}C \quad (4.16)$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$T_{lim} = 101.7 + 60$$

$$T_{lim} = 161.7^{\circ}C$$

Seguidamente se procederá al calcular el ventilador de tiro forzado (VTF), para esto se ocupará la ecuación 4.17 siguiente.

$$f.\text{aire VTF} = B * (\text{rel.a} / c * d) \quad (4.17)$$

Donde:

f. aire VTF- Flujo de aire del ventilador de tiro forzado, m<sup>3</sup>/hr

B- Flujo de comb. a quemar, de la Tabla 4.6 tenemos que es 4.873 m<sup>3</sup>/hr

Rel. a/c- Relación aire/ comb., se obtiene de la Tabla 4.17, igual a 18.036

d- Densidad del combustible, kg/m<sup>3</sup> (se obtiene de la Tabla 4.4)

Sustituyendo valores se tiene:

$$f.\text{aire VTF} = 4.873 * (18.036 * 872.9)$$

$$f.\text{aire VTF} = 76,718.68 \text{ kg/hr, dividiendo entre la densidad del aire (1.2276)}$$

$$f.\text{aire VTF} = 62,494.17 \text{ m}^3/\text{hr}$$

#### 4.10 Cálculo de los volúmenes de los productos de la combustión, mediante ecuaciones empíricas

Este procedimiento involucra el cálculo de los volúmenes teóricos y reales del aire seco, de los gases triatómicos que dan lugar a los GPC, del nitrógeno y del agua presentes en los gases productos de la combustión.

##### 4.10.1 Volúmenes teóricos

###### Volúmen teórico del aire seco

$${}^{\circ}Va = 0.0889 * (C + 0.375 * S) + 0.265 * H - 0.0333 * O \quad (4.18)$$

Donde:

{}^{\circ}Va- Volúmen de aire seco por kg. de combustible, m<sup>3</sup>

C, S, H, O- Cantidad de carbono, azufre, hidrógeno y oxígeno presentes, %

Los datos se obtienen de la Tabla 4.7, sustituyendo valores se tiene:

$${}^{\circ}Va = 0.0889 * (76.54 + 0.375 * 0.0) + 0.265 * 12.13 - 0.0333 * 11.33$$

$${}^{\circ}Va = 9.64 \text{ m}^3 \text{ de aire seco/kg de combustible}$$

**Volúmen teórico de los productos de la combustión**

$${}^{\circ}V_g = {}^{\circ}V_{CO_2} + {}^{\circ}V_{SO_2} + {}^{\circ}V_{N_2} + {}^{\circ}V_{H_2O} \quad (4.19)$$

Donde:

${}^{\circ}V_g$ - Volúmen de los productos de la combustión por kg de combustible, m<sup>3</sup>/kg

${}^{\circ}V_{CO_2}$ ,  ${}^{\circ}V_{SO_2}$ ,  ${}^{\circ}V_{N_2}$ ,  ${}^{\circ}V_{H_2O}$ - Cantidad teórica de bióxido de carbono, de azufre, de nitrógeno y de agua presentes, m<sup>3</sup>/kg. de combustible.

La suma de  ${}^{\circ}V_{CO_2} + {}^{\circ}V_{SO_2}$  se denominan gases triatómicos y se calculan mediante la ecuación siguiente:

$$V_{RO_2} = {}^{\circ}V_{CO_2} + {}^{\circ}V_{SO_2} = 0.01*(1.866*C + 0.7*S) \quad (4.20)$$

$${}^{\circ}V_{N_2} = 0.79*{}^{\circ}V_a + 0.008*N_2 \quad (4.21)$$

$${}^{\circ}V_{H_2O} = 0.111*H + 0.0124*W + 0.0327*{}^{\circ}V_a + 1.24*Gat \quad (4.22)$$

Gat- Consumo específico de vapor para atomización en quemadores, kg. de vapor/ kg. de combustible. Se considera un flujo de 0.5 kg vap/kg de combustible

Sustituyendo valores se tiene:

$$V_{RO_2} = 0.01*(1.866*76.54 + 0.7*0.0)$$

$$V_{RO_2} = 1.428 \text{ m}^3/\text{kg combustible}$$

$${}^{\circ}V_{N_2} = 0.79*9.64 + 0.008*0.0$$

$${}^{\circ}V_{N_2} = 7.617 \text{ m}^3/\text{kg combustible}$$

$${}^{\circ}V_{H_2O} = 0.111*12.13 + 0.0124*0.03 + 0.0327*9.64 + 1.24*0.5$$

$${}^{\circ}V_{H_2O} = 2.282 \text{ m}^3/\text{kg combustible}$$

$$\text{Por lo tanto; } {}^{\circ}V_g = 1.428 + 7.617 + 2.282$$

$${}^{\circ}V_g = 11.328 \text{ m}^3/\text{kg combustible}$$

**4.10.2 Volúmenes Reales**

Para este caso, como la caldera es de tiro forzado, se considerará constante el dato correspondiente al exceso de aire “ $\alpha$ ”. Para calderas de tiro inducido, “ $\alpha$ ” debe de calcularse para cada superficie de la caldera, desde el hogar hasta la chimenea.

**Volúmen real de gases secos**

$$V_{gs} = V_{RO_2} + {}^{\circ}V_{N_2} + (\bar{\alpha} - 1) * {}^{\circ}V_a \quad (4.23)$$

Donde:

$V_{gs}$ - Volúmen real de gases secos, m<sup>3</sup>/kg de combustible

Sustituyendo valores se tiene:

$$V_{gs} = 1.428 + 7.617 + (1.243-1)*9.64$$

$$V_{gs} = 11.385 \text{ m}^3/\text{kg combustible}$$

### **Volúmen real de vapor de agua**

$$V_{H_2O} = V_{H_2O} + 0.0327 * (\bar{\alpha} - 1) * V_a \quad (4.24)$$

Donde:

$V_{H_2O}$ - Volúmen real de vapor de agua,  $\text{m}^3/\text{kg}$  de combustible

Sustituyendo valores se tiene:

$$V_{H_2O} = 2.282 + 0.0327*(1.243-1)*9.64$$

$$V_{H_2O} = 2.359 \text{ m}^3/\text{kg combustible}$$

### **Volúmen real de gases**

$$V_g = V_{gs} + V_{H_2O} \quad (4.25)$$

Donde:

$V_g$ - Volúmen real de gases,  $\text{m}^3/\text{kg}$  de combustible

Sustituyendo valores se tiene:

$$V_g = 11.385 + 2.359$$

$$V_g = 13.744 \text{ m}^3/\text{kg combustible}$$

### **Fracciones volumétricas de los gases productos de la combustión**

Fracciones volumétricas de los gases triatómicos;  $r_{RO_2}$

$$r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_g \quad (4.26)$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$r_{RO_2} = 1.428 / 13.744 = 0.104$$

Fracción volumétrica del vapor de agua;  $r_{H_2O}$

$$r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_g \quad (4.27)$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$r_{H_2O} = 2.359 / 13.744 = 0.172$$

Fracción volumétrica total de gases;  $r_g$

$$r_g = r_{RO_2} + r_{H_2O} \quad (4.28)$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$r_g = 0.104 + 0.172 = 0.276$$

### 4.10.3 Determinación de las entalpías del aire y de los productos de la combustión

A partir de datos ya calculados y con apoyo en la Tabla 4.19 referida a las entalpías correspondientes para el bióxido de carbono, nitrógeno, agua, aire y cenizas, reportado por Herrera y Blanco [13], se procederá a determinar las entalpías del aire y de los productos de la combustión según las ecuaciones siguientes:

$$I = I_g + I_c \quad (4.29)$$

Donde:

I- Entalpías de los productos de la combustión,  $\text{kJ/m}^3$

$I_g$ - Entalpía de la parte gaseosa de los productos de la combustión,  $\text{kJ/m}^3$

$I_c$ - Entalpía de la ceniza de los productos de la combustión ( $I_c = 0$ , para combustibles líquidos).

$$I_g = \circ i_g + (\alpha' - 1) \circ i_a \quad (4.30)$$

Donde:

$\circ i_g$ - Entalpía teórica de los gases,  $\text{kJ/m}^3$

$\circ i_a$ - Entalpía teórica del aire,  $\text{kJ/m}^3$

$$\circ i_g = (V_{RO2} \circ i_{RO2}) + (\circ N_2 \circ i_{N_2}) + (\circ V_{H_2O} \circ i_{H_2O}) \quad (4.31)$$

$$\circ i_a = \circ V_a \circ i_a \quad (4.32)$$

Las propiedades de RO se toman como las del  $\text{CO}_2$ .

Las propiedades de  $i_{RO_2}$ ,  $i_{N_2}$ ,  $i_{H_2O}$  se determinan con las temperaturas de los gases según la Tabla 4.19 haciendo la sustitución de datos en las ecuaciones 4.29, 4.30, 4.31 y 4.32 obtenemos como resultados las Tablas; 4.20, referida a las temperaturas por secciones de la caldera, acorde a las reportadas en la tabla de prueba termotécnica anexa, Tabla 4.21 referida al cálculo de la entalpía teórica de los gases ( $\circ i_g$ ) por sección de la caldera, Tabla 4.22 referida al cálculo de la entalpía teórica del aire ( $\circ i_a$ ) por sección de caldera y finalmente la Tabla 4.23 referida a la entalpía de los gases producto de la combustión ( $I_g$ ).

Tabla 4.19 Entalpías de los gases

ENTALPÍAS					
TEMP. °K	i CO <sub>2</sub> kj /m <sup>3</sup>	i N <sub>2</sub> kj /m <sup>3</sup>	i H <sub>2</sub> O kj /m <sup>3</sup>	i air kj /m <sup>3</sup>	i cen kj /kg
1173	1952.3	1241.6	1526.1	1257.8	875.1
1073	1704.9	1093.6	1334.4	1107.4	767
973	1461.8	947.5	1148.8	959.6	662.3
873	1224.7	804.1	968.9	813.9	560.2
773	994.4	663.8	794.9	671.4	458.1
673	771.8	526.5	626.2	531.6	360.1
573	558.8	392	462.7	395.2	263.8
473	357.5	259.9	304.5	261.4	169.1
448	310.625	227.325	266	228.55	147.025
373	170	129.6	150.5	130	80.8
373	170	129.6	150.5	130	80.8

Tabla 4.20. Temperaturas por secciones de la caldera

SECCIONES DE CALDERA						
TEMPERATURA	HORNO		ECONOMIZADOR		CAR *	
°C	HOGAR	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
°C	700	400	400	175	175	100
°K	973	673	673	448	448	373

\*Donde; CAR = Calentador de aire

Tabla 4.21. Entalpía teórica de gases por secciones de caldera

ENTALPÍA (° i g) kj/m <sup>3</sup>						
TEMPERATURA	HORNO		ECONOMIZADOR		CAR	
°K	HOGAR	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
1173	15729.195					
1073	13810.948					
973	11927.239					
673		6542.078				
673			6542.078			
448				2782.376		
448					2782.376	
373						1573.509
373						1573.509

Tabla 4.22. Entalpía teórica del aire por secciones de caldera

ENTALPÍA (° i a) kJ/m <sup>3</sup>						
TEMPERATURA	HORNO		ECONOMIZADOR		CAR	
°K	HOGAR	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
1173	12128.030					
1073	10677.835					
973	9252.709					
673		5125.824				
673			5125.824			
448				2203.738		
448					2203.738	
373						1253.493
373						1253.493

Tabla 4.23. Entalpía de los productos de la combustión por secciones de caldera

SECCIONES DE CALDERA						
TEMPERATURA	HORNO		ECONOMIZADOR		CAR	
°K	HOGAR	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
1173	18671.498					
1073	16401.429					
973	14171.979					
673		7785.621				
673			7785.621			
448				3317.010		
448					3317.010	
373						1877.610
373						1877.610

A continuación se presenta la Tabla 4.24 que integra un resumen de las entalpías de los productos de la combustión, para efecto de tomar los datos con los cuales se generará un gráfico de entalpías del sistema identificado como Figura 4.4

Tabla 4.24. Entalpía de los productos de la combustión

ENTALPÍA DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN									
T °k	I a kj/m <sup>3</sup>	I g kj/m <sup>3</sup>	I c kj/m <sup>3</sup>	I * I r					
				superficies					
				HORNO		ECONOMIZADOR		CAR	
				αh		α''		α''	
	I	I r	I	I r	I	I r			
1173	12128.03	15729.19	0.00	18671.50	0.00	18671.50	0.00	18671.50	0.00
1073	10677.83	13810.95	0.00	16401.43	0.00	16401.43	0.00	16401.43	0.00
973	9252.71	11927.24	0.00	14171.98	0.00	14171.98	0.00	14171.98	0.00
673	5125.82	6542.08	0.00	7785.62	0.00	7785.62	0.00	7785.62	0.00
448	2203.74	2782.38	0.00	3317.01	0.00	3317.01	0.00	3317.01	0.00
373	1253.49	1573.51	0.00	1877.61	0.00	1877.61	0.00	1877.61	0.00
373	1253.49	1573.51	0.00	1877.61	0.00	1877.61	0.00	1877.61	0.00

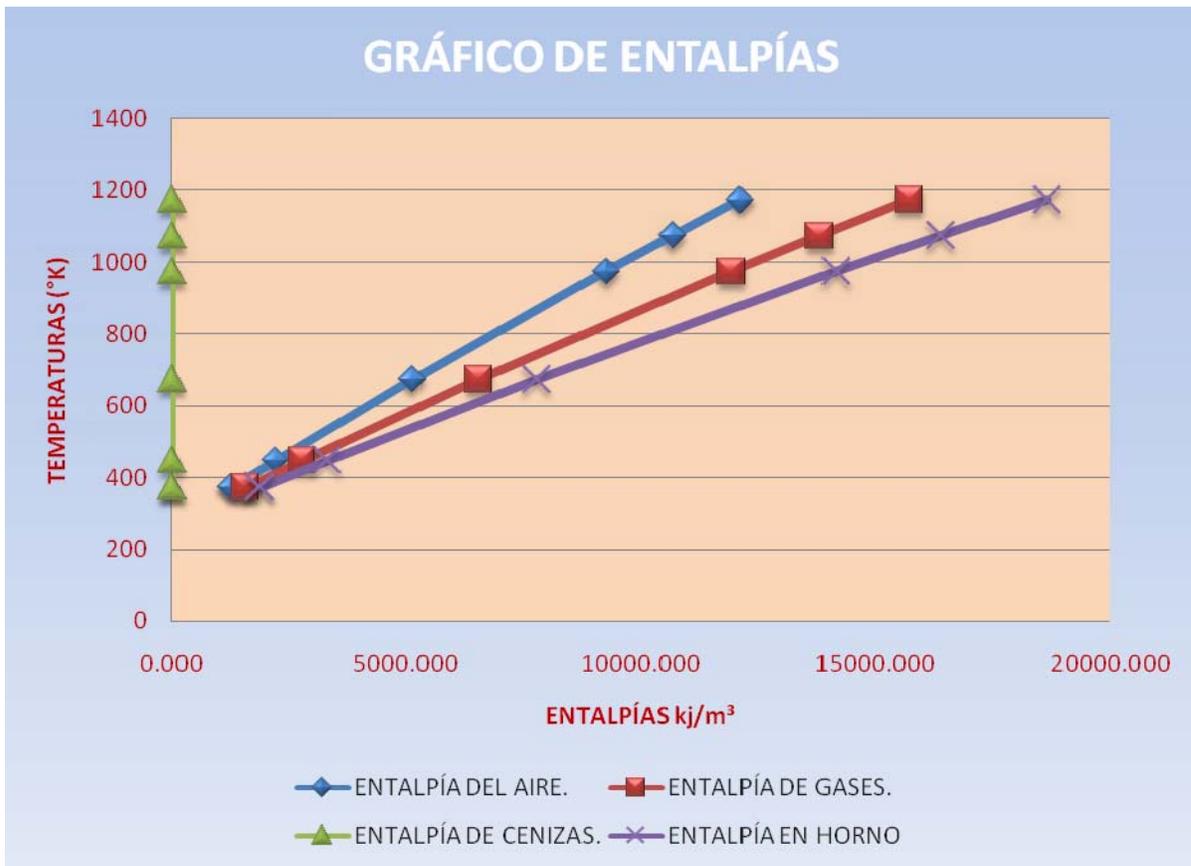


Figura 4.4 Entalpías de los productos de la combustión

#### 4.11 Balance térmico de la caldera

A continuación se procederá a realizar el balance térmico del generador de vapor, haciendo uso de las ecuaciones de referencia de Herrera y Blanco [8], mismas que permiten determinar los calores presentes como son:

- Calor potencial o disponible
- Calor físico del combustible
- Calor del vapor de atomización
- Calor físico del aire en el precalentador (PRECAR)

Así también se determinan las pérdidas de calor asociadas a:

- Los gases de escape
- Por incombustión química
- Por tipo de hogar de caldera y tipo de combustible
- Por las paredes de la caldera
- Por las cenizas
- Por los paneles y vigas del equipo

Con los datos de las pérdidas se puede calcular la eficiencia bruta ( $\eta_b$ ) de la caldera, misma que define la capacidad de calor útil disponible. Esta es la base para finalmente calcular la eficiencia neta de la caldera ( $\eta_{GV}$  neta), cuando se involucra el gasto de combustible y del calor potencial.

##### 4.11.1 Calor disponible o potencial

$$Q_d = Q_{bcinf} + Q_{pca} + Q_{at} + Q_{fc} \quad (4.33)$$

Donde:

$Q_d$ - Calor disponible o potencial, kJ/kg

$Q_{bcinf}$ - Valor calórico bajo del combustible, 38368.741 kJ/kg

$Q_{pca}$ - Calor físico del aire en el precalentador, kJ/kg

$Q_{at}$ - Calor introducido por el vapor de atomización, kJ/kg

$Q_{fc}$ - Calor físico del combustible, kJ/kg

$$Q_{pca} = (\beta_{ca} + \Delta\alpha_{ca}) * \circ Va * (\circ I_{spc} - \circ I_{af}) \quad (4.34)$$

Donde:

$\beta$ - Relación de aire/ combustible en la caldera

$\Delta\alpha$ - Infiltración de aire en el horno (para tiro inducido)

$^{\circ}I_{spc}$  = entalpía de los gases de salida producto de la combustión

$^{\circ}I_{af}$  = entalpía del aire frío

NOTA: como la caldera no tiene precalentador de aire (PRECAR), se asumirá

$Q_{pca} = 0.0$

$$Q_{at} = CP_{at} * (I_{at} - I_{vge}) \quad (4.35)$$

Donde:

CP at- Calor específico del vapor de atomización, 1.977 kJ/kg

I at- Entalpía del vapor de atomización, se obtiene mediante TPX con la presión y temperatura del vapor saturado, 1066.03 kJ/kg

I vge- Entalpía de los gases de salida, se obtiene con la presión atmosférica y la temperatura de los gases de escape, 419.02 kJ/kg

$$Q_{fc} = CP_c * (T_c + 273) \quad (4.36)$$

Donde:

CP c- Calor específico del combustible, 1.97 kJ/kg

Tc- Temperatura de alimentación del combustible, 353 °K

Sustituyendo valores en las ecuaciones 4.35, 4.36, se obtiene lo siguiente:

$$Q_{at} = 1.977 * (1066.03 - 419.02)$$

$$Q_{at} = 1278.82 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{fc} = 1.97 * (80 + 273)$$

$$Q_{fc} = 694.72 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_d = 38368.741 + 0.0 + 1278.82 + 694.72$$

$$Q_d = 40342.28 \text{ kJ/kg}$$

#### 4.11.2 Determinación de las pérdidas de calor.

$$q_2 = (I_{ge} - \alpha_{ge} * ^{\circ}I_{af}) * (100 - q_4) / Q_d \quad (4.37)$$

Donde:

**q<sub>2</sub>- Pérdidas de calor en los gases de escape, %**

I ge- Entalpía de los gases de escape, se determina con la temperatura de los gases producto de la combustión (GPC) en la Tabla 4.24; 16401.42 kJ/kg

α ge- Coeficiente de exceso de aire a la salida del GV. Nota; como es una caldera con VTF, α se considera constante.

$^{\circ}I_{af}$ - Entalpía teórica del aire frío, se determina con la temperatura  $T_{af}$  de la Tabla 4.22 ó:

$$^{\circ}I_{af} = ^{\circ}V_a * I_{af} \quad (4.38)$$

$$^{\circ}I_{af} = 9.64 * 1253.49 = 12086.50 \text{ kJ/kg}$$

**q4- Pérdidas de calor por el tipo de hogar**, de acuerdo con Herrera,  $q_4 = 0\%$ , sin embargo se considerará una pérdida de un 0.5 %.

Sustituyendo valores en la ec. 4.37 para determinar  $q_2$  se tiene:

$$q_2 = (16401.42 - 1.243 * 12086.5) * (100 - 0.5) / 40342.28$$

$$q_2 = 3.41 \%$$

### **q3- Pérdidas de calor por incombustión química**

De acuerdo con Herrera, para combustibles líquidos  $q_3 = 0.5 \%$

$$q_5 = q_{5n} * D_n / D \quad (4.39)$$

Donde:

### **q5- Pérdidas de calor al exterior a través de las paredes del generador de vapor**

$q_5 n$ - Dato obtenido de nomograma, según Herrera = 0.008%

$D_n$ - Flujo nominal de vapor de la caldera, 18.92 kg/seg

$D$ - Flujo real de vapor sobrecalentado de la caldera, 15.42 kg/seg

Sustituyendo valores se tiene:

$$q_5 = (0.008 * 18.92) / 15.42$$

$$q_5 = 0.98 \%$$

$$q_6 = (a_{esc} * i_{cen} * at) / Q_d \quad (4.40)$$

Donde:

### **q6- Pérdidas de calor por la ceniza extraída del horno**

$a_{esc}$ - Fracción de ceniza extraída del horno ( no por los gases )

$I_{cen}$ - Entalpía de la ceniza, kJ/kg

$At$ - Concentración gravimétrica de ceniza de trabajo en el combustible

si  $at < (0.0025 * Q_{bc})$ , las pérdidas de calor  $q_6$  pueden despreciarse, en este caso el combustible tiene trazas de cenizas, por lo cual  $q_6 = 0.0$

$$q_7 = (11600 * H_{vp}) / B * Q_1 \quad (4.41)$$

Donde:

**q7- Pérdidas de calor por el enfriamiento de vigas y paneles, %**

H vp- Área total de vigas y paneles, m<sup>2</sup>

B- Consumo de combustible de la caldera, kg/seg

Q1- Calor útil, kj/kg

$$B * Q1 = D * (isc - iaa) + Dvs * (i'' - iaa) + Dri * (isri - ieri) + Dp * 8i' - iaa$$

(4.42)

Donde:

D- Flujo real de vapor sobrecalentado de la caldera, kg/seg

i sc- Entalpía del vapor sobrecalentado, kj/kg

i aa- Entalpía del agua de alimentación, kj/kg

D vs- Producción de vapor saturado, kg/seg

i'' - Entalpía del vapor saturado a la presión del domo, kj/kg

D ri- Flujo de vapor al recalentamiento Intermedio, kg/seg

i sri- Entalpía del vapor a la salida del recalentamiento Intermedio, kj/kg

i eri- Entalpía del vapor a la entrada del recalentamiento Intermedio, kj/kg

Dp- Flujo de agua en la purga continua, kg/seg

i' - Entalpía del agua saturada a la presión del domo, kj/kg

Mediante uso del TPX y con las condiciones de operación en cada caso, se procede a calcular las entalpías, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.25

Tabla 4.25. Cálculo de entalpías de vapores de agua

CÁLCULO DE I sc, I aa, i', i'', MEDIANTE TPX					
		VAPOR SOBRECALENTADO	AGUA SATURADA	VAPOR SATURADO	AGUA A LA PRESIÓN DEL DOMO
t	°C	360	95	246	254.53
p	kpa	3893.24	4497.33	3893.24	4283.00
d	kg/m <sup>3</sup>	14.31	963.87	805.27	21.56
v	m <sup>3</sup> /kg	0.07	0.00	0.00	0.05
u	kj/kg	2847.46	396.65	1061.20	2601.23
h	kj/kg	3119.57	401.32	1066.03	2799.91
s	kj/kg °C	6.64	1.25	2.76	6.04
x		1	0	0	1

Con base a los datos obtenidos del TPX, se procede a sustituirlos en la ecuación 4.42, quedando indicada como sigue:

$$B*Q1 = 15.42*(3119.57 - 401.32) + 17.73*(1066.03 - 401.32) + 0.0*(0 - 0) + 0.1155*(2799.91 - 401.32)$$

$$B*Q1 = 53969.65$$

En tanto el cálculo de q7 queda como sigue:

$$q7 = (11600*10)/53969.65$$

$$q7 = 2.15 \%$$

## 4.12 Cálculo de la eficiencia del equipo

### 4.12.1 Eficiencia Bruta

La eficiencia bruta del generador de vapor se denota por la expresión siguiente:

$$\eta_b = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7) \quad (4.43)$$

Donde:

$\eta_b$ - Eficiencia bruta del generador o denominado Q útil, %

Sustituyendo valores se tiene:

$$\eta_b = 100 - (3.41 + 0.5 + 0.5 + 0.98 + 0 + 2.15)$$

$$\eta_b = 92.46 \%$$

La cantidad de calor útil puede expresarse según:

$$Q1 = \eta_b * Qd / 100 \quad (4.44)$$

Donde:

Q1- Calor útil, kj/kg

Qd- Calor disponible o potencial

Sustituyendo valores se tiene:

$$Q1 = (92.46 * 40,342.28) / 100$$

$$Q1 = 37,300 \text{ kj/kg}$$

En tanto el consumo de combustible queda definido como:

$$B = B * Q1 / Q1 \quad (4.45)$$

Donde:

B- Consumo de combustible, kg/seg

Sustituyendo valores se tiene:

$$B = 53969.65 / 37300$$

$$B = 1.447 \text{ kg/seg}$$

El consumo de combustible quemado ó de cálculo queda expresado de la forma:

$$B_c = B * (100 - q_4) / 100 \quad (4.46)$$

Donde:

B<sub>c</sub>- Consumo de combustible quemado, kg/ seg

Sustituyendo valores se tiene:

$$B_c = 1.447 * (100 - 0.5) / 100$$

$$B_c = 1.44 \text{ kg/ seg}$$

#### 4.12.2 Eficiencia neta.

La eficiencia neta se expresa de la forma:

$$\eta_{GV} = 100 - \sum_{i=1}^n q_i = Q_{\text{útil}} / B * Q_d \quad (4.47)$$

Donde:

Q útil- Es igual a Q<sub>1</sub> calculado anteriormente

$$\eta_{GV} = Q_1 / B * Q_d \quad (4.48)$$

$$\eta_{GVneta} = \eta_b * (1 - enp) \quad (4.49)$$

Donde:

enp- Energía total de insumos; 4,034.23 kj/kg dato obtenido de planta

$$enp = \text{Energía total de insumos} / Q_d \quad (4.50)$$

Sustituyendo valores en la ec 4.49 se obtiene:

$$\eta_{GVneta} = 92.46 * (1 - (4,034.23 / 40,342.28))$$

$$\eta_{GVneta} = 83.21 \%$$

#### 4.13 Cálculo de exergías de las corrientes del lazo energético

Para este caso y de acuerdo con Ramírez M. Roberto [25], los generadores de vapor o calderas, quedan comprendidos dentro del grupo 6 para efectos de su estudio termoeconómico y en donde la tasa o proporción de costos asociados de las corrientes de productos (products), con las corrientes abastecedoras de energía o combustibles (fuel), permiten seleccionar componentes de operación en estado estable. Bajo este concepto, a continuación se presenta la figura 4.5 que describe las corrientes del lazo energético base para la estructuración de las ecuaciones, con las cuales se podrá calcular las exergías de las corrientes y sus costos asociados.

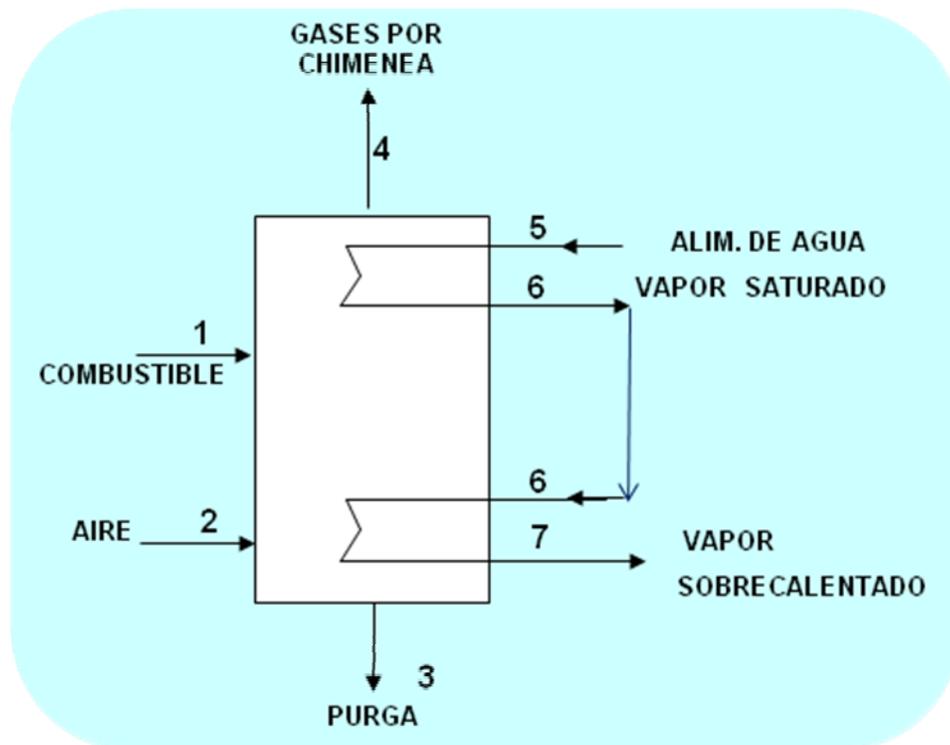


Figura 4.5 Lazo energético de la caldera

▪ **Cálculos de exergías:**

$$EP = (E5 - E4) + (E6 - E5) + (E7 - E4) + Ex \quad (4.51)$$

Donde:

EP- Tasa de exergía de los productos (Exergy rate product)

$$EF = (E1 + E2) + (E3 + E7) \quad (4.52)$$

Donde:

EF- Tasa de exergía de los combustibles (Exergy rate of fuel)

E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7- Exergías de las corrientes

$$Q = T_o * (S_o - S_a) = H1 - H_a \quad (4.53)$$

$$E = (H1 - H_a) - T_o * (S_o - S1) \quad (4.54)$$

$$Ex = Q_{vc} * [1 - (T_o / (T_f - T_o)) * \ln(T_f - T_o)] \quad (4.55)$$

Donde:

E- Ecuación para el cálculo de la exergía de cada corriente, kj/kg

Ex- Exergía de flama, 33836.39 kj/kg

To- Temperatura en el estado muerto, (T. ambiente = 30°C)

Tf- Temperatura de flama, medido en la caldera es; 1950 °C

De acuerdo a tabla de caracterización en hoja de Excel, se calcularon con el complemento TPX las Entalpías (H) y Entropías (S), de las corrientes, los resultados se presentan en la Tabla 4.26 siguiente:

Tabla 4.26. Entalpías y entropías de las corrientes del lazo energético

			To	c4	c5	c6	c7
TEMPERATURA	T	°C	30.0	95.0	246.0	360.0	235.0
PRESIÓN	P	kpa	4.24	4497.3	3893.2	18639.9	3893.2
DENSIDAD	D	kg/m <sup>3</sup>	995.68	963.87	805.27	528.22	821.39
VOLUMEN ESPECÍFICO	V	m <sup>3</sup> /kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ENERGÍA INTERNA	U	kJ/kg	125.77	396.65	1061.20	1725.43	1008.99
ENTALPÍA	H	kJ/kg	125.77	401.32	1066.03	1760.72	1013.73
ENTROPÍA	S	kJ/kg°C	0.44	1.25	2.76	3.91	2.65
TÍTULO	x		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

De acuerdo con lo anterior se calcularán las exergías correspondientes

$$E4 = (H4 - H_a) - T_o * (S_o - S4) \quad (4.56)$$

Donde:

E4- Exergía de la corriente 4: AGUA

Sustituyendo valores en la ec. 4.56 se tiene:

$$E4 = (401.32 - 125.77) - 30 * (0.44 - 1.25)$$

$$E4 = 299.84 \text{ kJ/kg}$$

$$E5 = (H5 - H_a) - T_o * (S_o - S5) \quad (4.57)$$

Donde:

E5- Exergía de la corriente 5: VAPOR SATURADO

Sustituyendo valores en la ec. 4.57 se tiene:

$$E5 = (1066.03 - 125.77) - 30 * (0.44 - 2.76)$$

$$E5 = 1009.83 \text{ kJ/kg}$$

$$E6 = (H6 - Ha) - To * (So - S6) \quad (4.58)$$

Donde:

E6- Exergía de la corriente 6: VAPOR SOBRECALENTADO

Sustituyendo valores en la ec. 4.58 se tiene:

$$E6 = (1760.72 - 125.77) - 30 * (0.44 - 3.91)$$

$$E6 = 1739.29 \text{ kJ/kg}$$

$$E7 = (H7 - Ha) - To * (So - S7) \quad (4.59)$$

Donde:

E7- Exergía de la corriente 7: PURGAS

Sustituyendo valores en la ec. 4.59 se tiene:

$$E7 = (1013.73 - 125.77) - 30 * (0.44 - 2.65)$$

$$E7 = 954.48 \text{ kJ/kg}$$

Se aplicará la ecuación 4.51 para determinar EP (Exergy rate Product)

Sustituyendo valores se tiene:

$$EP = (1009.83 - 299.84) + (1739.29 - 1009.83) + (954.48 - 299.84) + 33836.39$$

$$\mathbf{EP = 35930.47 \text{ kJ/kg}}$$

$$E1 = Q_{vcinf} + Q_{fc} \quad (4.60)$$

Donde:

E1- Exergía de la alimentación de combustible

Q vc inf- Valor calórico bajo del combustible = 38368.74 kJ/kg

Qfc- Calor físico del combustible = 694.72 kJ/kg

Sustituyendo valores se tiene:

$$E1 = 38368.74 + 694.72$$

$$E1 = 39063.46 \text{ kJ/kg}$$

$$E2 = Q_{totent} / f_{air} VTF \quad (4.61)$$

Donde:

E2- Exergía de la alimentación de aire

Q tot ent = Dato de la potencia de la caldera = 1.71E+08 kj/hr

f. aire VTF = Cantidad de aire al tiro forzado = 76717.84 kg/hr

Sustituyendo valores se tiene:

$$E2 = 1.71E+08 / 76717.84$$

$$E2 = 2225.13 \text{ kj/kg}$$

$$E3 = E1 + E2 - E6 \quad (4.62)$$

Donde:

E3- Exergía de los gases de salida

Sustituyendo valores se tiene:

$$E3 = 39063.46 + 2225.13 - 1739.29$$

$$E3 = 39549.3 \text{ kj/kg}$$

Se aplicará la ecuación 4.52, para determinar EF (Exergy rate of fuel)

Sustituyendo valores se tiene:

$$EF = (39063.46 + 2225.13) + (39549.3 + 954.48)$$

$$\mathbf{EF = 81,792.37 \text{ kj/kg}}$$

Por lo tanto:

$$\eta_{EX} = EP / EF \quad (4.63)$$

Donde:

$\eta_{EX}$ - Eficiencia exergética, %

Sustituyendo valores se tiene:

$$\eta_{EX} = (35930.47 / 81792.37) * 100$$

$$\mathbf{\eta_{EX} = 43.93 \%}$$

#### 4.14 Cálculos termoeconómicos

Para este caso, el balance termoeconómico utiliza las siguientes ecuaciones que permiten determinar los costos de cada una de las corrientes, en función de sus exergías antes calculadas, así se tiene:

$$CP = (C5 - C4) + (C6 - C5) + (C7 - C4) \quad (4.64)$$

Donde:

CP = Tasa de costo de los productos (Cost rate of Product)

$$CF = (C1 + C2) - (C3 + C7) \quad (4.65)$$

Donde:

CF = Tasa de costo de los combustibles (Cost rate of Fuel)

Mediante la Tabla 4.27 elaborada en Excel, se corrieron los cálculos correspondientes, obteniendo los resultados que a continuación de muestran.

Tabla 4.27 Balance termoeconómico

<b>BALANCE TERMEOCONÓMICO</b>					
<b>CORRIENTE DE LAZO ENERGÉTICO</b>	<b>FLUJO MÁSSICO</b>	<b>COSTO ESPECÍFICO</b>	<b>EXERGÍA</b>	<b>COSTO UNITARIO</b>	<b>COSTO EXERGÉTICO</b>
	<b>m</b>			<b>ci</b>	<b>( C=ci/E )</b>
	<b>kg/seg</b>	<b>u.s.d./kg</b>	<b>(E=Ec*m)</b>	<b>u.s.d/seg</b>	<b>u.s.d./kj</b>
			<b>kj/seg</b>		
C4	18.20	0.8	5456.63	14.56	0.00266808
C5	18.92	0.5	19102.58	9.46	0.00049513
C6	18.92	0.4	32901.58	7.57	0.00022998
C7	0.12	0.4	110.25	0.05	0.00041908
C1	1.18	0.890	46108.50	1.05	2.2792E-05
C2	21.31	0.3	47418.67	6.39	0.00013482
C3	18.82	0.5	744279.26	9.41	1.2642E-05
Tasa de costos de <b>Productos:</b> CP = -0.0046871 u.s.d./kj					
Tasa de costos de <b>combustibles:</b> CF = -0.0002741 u.s.d./kj					

## **CAPÍTULO V**

## CAPÍTULO V RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 5.1 Comprobación de hipótesis

Los costos de operación de la caldera convertida para quemar Biodiésel, están mayormente influenciados por la escasés de cultivos y la oferta de mercado, que por los costos de inversión de las modificaciones requeridas y/o que del poder calorífico del mismo material, comparado contra el combustóleo.

Esta hipótesis se acepta. Los costos de operación en base al costo por unidad de energía entre la canasta disponible de combustibles fósiles vs. el aceite crudo de palma (ACP), resulta ser más económico hoy en día usar gas natural, petcoke, combustóleo o diésel, que el ACP, la Tabla 5.1 que a continuación se presenta permite dar soporte a lo indicado.

Tabla 5.1 Costos de energéticos a Octubre de 2008

COMBUSTIBLE	PODER CALORÍFICO (kcal/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	COSTO u.s.d./m <sup>3</sup>	COSTO u.s.d./kg	COSTO u.s.d./MMbtu	COSTO u.s.d./kcal
Gas natural	9429	10.652	0.265	0.025	7.08	2.8105E-05
Combustóleo	9887430	985	510.85	0.519	13.02	5.1667E-05
Petcoke	7404223	-	220.65	0.221	7.51	2.9801E-05
Diésel	8882443	865	556.31	0.643	15.78	6.263E-05
<b>Aceite de palma</b>	8383500	872.9	777.17	0.890	23.36	9.2702E-05

En cuanto a la eficiencia de un sistema y otro, evaluado por el poder calorífico de los materiales, el combustóleo presenta mayor poder calorífico que el ACP (9'887,430 kcal/m<sup>3</sup> vs. 8'383,500), sin embargo se encontró que el aceite crudo de palma (ACP) tiene mayores bondades por ser un combustible limpio y resulta más eficiente que el uso de combustóleo, la limitación es el costo de oportunidad del ACP.

## 5.2 Respuestas a la preguntas de investigación

¿Cual será la eficiencia de operación de una caldera radiante marca Cerrey, de 68,100 kg/hr de capacidad de vapor sobrecalentado, a una presión de 45.71 kg/cm<sup>2</sup> y 400 °C, que es convertida para quemar Biodiésel a base de aceite crudo de palma Africana, comparado contra el actual sistema que quema combustóleo?

Respuesta; De acuerdo a los cálculos, la eficiencia de operación de la caldera de trabajo, sujeta a la combustión con aceite crudo de palma Africana (ACP) es mayor que el obtenido utilizando combustóleo.

La eficiencia del equipo con combustóleo según el fabricante es del 87.74 %, el calculado es 88.0 %, en tanto que el obtenido quemando ACP resultante es del 92.46 %.

La quema de combustóleo, conlleva a pérdidas de calor por el soplado de hollín de las cenizas, aunado a que afecta la transferencia de calor por los depósitos incrustantes de compuestos conteniendo vanadio sobre la fluxería, en cambio con el ACP, se considera inexistente este efecto, lo cual es un área de oportunidad para seguir explorando en este campo en el futuro.

¿Cual será el área de cultivo requerido, para asegurar un suministro confiable de aceite crudo de palma Africana, en función de los rendimientos de producción de aceite/ Ha de cultivo, para los volúmenes que demanda la operación de la caldera en forma anual?

La respuesta a esta pregunta se obtendrá del análisis que se desarrolla en los epígrafes 5.3 y 5.4 siguientes.

## 5.3 Demanda anual de aceite crudo de palma Africana para la caldera de SISA de C.V. contra la disponibilidad en el mercado

La naturaleza de la operación del proceso industrial de SISA de C.V., es continua, se laboran tres jornadas de ocho horas, durante las 24 horas del día, los 365 días del año con un factor de operación del 95 %, que permite administrar el mantenimiento programado de los equipos, lo cual da una operación efectiva de 350 días/año, en igual proporción las calderas que generan vapor para el proceso, deben de mantener una confiabilidad de su operación, de aquí que la seguridad en el suministro de los energéticos representa un factor muy importante y prioritario.

Para este caso, primeramente procederemos a determinar cual sería la demanda anual de aceite crudo de palma Africana (ACP), para la caldera de SISA de C.V. y lo compararemos contra la disponibilidad en el mercado nacional de ACP, para esto se tomará como referencia el cálculo de “B” a partir de la ecuación 4.45, quedando expresada de la manera siguiente:

$$B = 1.447 \text{ kg/seg}$$

Donde:

B- Es el consumo de combustible según la ec. 4.45

Por lo tanto:

$$B_{\text{anual}} = (B * 3600 * 24 * 350) / 1000 \quad (5.1)$$

Donde:

B anual- Demanda anual de ACP, ton/año

Sustituyendo valores se tiene:

**B anual = 43,757.3 ton/año**, dividiendo entre la densidad del aceite

$$B \text{ anual} = 43,757.3 / 0.8729 = \mathbf{50,128.65 \text{ m}^3/\text{año}}$$

La disponibilidad real de aceite crudo de palma en México es: 42,000 ton/año

#### **5.4 Área de cultivo requerido para la demanda de ACP, en la caldera de SISA de C.V.**

A manera de ejemplificar los vínculos, entre los requerimientos de suministro energético de un equipo industrial del área química o petroquímica, como es una caldera, a partir de un energético alterno, como es un aceite de origen vegetal, se determinará cual es el área de cultivo necesario para abastecer la demanda calculada.

Si el rendimiento de la producción de aceite de acuerdo a la Tabla 3.5 es conservadoramente de 3.780 ton./Ha, entonces para abastecer la demanda de la caldera se requerirá:

$$a_{\text{CULT}} = (B_{\text{anual}} / r_{\text{CULT}}) \quad (5.2)$$

Donde:

a CULT- Área de cultivo requerido, Ha

B anual- Demanda calculada de combustible anual, ton/año

r CULT- Rendimiento del cultivo de palma africana, ton/Ha año

Sustituyendo valores se tiene:

$$a \text{ CULT} = 43,757.3/3.5 = 12,502 \text{ Ha}$$

**a CULT = 12,502 Ha**

$$aCULT_{unit} = (aCULT / B_{anual}) \quad (5.3)$$

Donde:

a CULT unit- UNITARIO de área de cultivo por ton. de combustible

$$a \text{ CULT unit} = 12,502/43,757.3 = 0.285 \text{ Ha/ton de aceite}$$

**a CULT unit = 0.285 Ha/ton de aceite**

Para hacer comprensible el área de cultivo calculada (a CULT), esto es el equivalente a una extensión de terreno considerando un rectángulo de 4 km. de ancho por 31.255 km. de largo ó de 8 km. de ancho por 15.627 km. de largo.

### **5.5 Determinación de los beneficios por créditos de reducción de emisiones (CRE), considerando un proyecto de mecanismo de desarrollo limpio (MDL)**

Una probable vía de justificación de un proyecto de tal naturaleza, se considera que podría ser enfocándolo como un proyecto de mecanismo de desarrollo limpio (MDL), a través de la venta de bonos de carbóno según acuerdos del protocolo de Kyoto, a este respecto se desarrollará el siguiente ejercicio para ver su potencialidad.

Considerando el consumo de combustóleo indicado en la Tabla 4.6 de 4,284 kg/hr extrapolado al año, resulta lo siguiente:

$$B_{anual} = (4284 * 24 * 350) / 1000 \quad (5.4)$$

B anual = 35,985.6 ton/año de combustóleo

Factor de emisión: **f. emis.** = ton. CO<sub>2</sub> equiv. /ton. Combustible = 0.7

Por lo tanto:

$$B_{carbono} = (B_{anual} * f.emis) \quad (5.5)$$

Donde:

B. carbóno- Bonos de carbóno, ton. Carbóno/año

$$B. \text{ carbóno} = 35,985.6 * (0.7) = 25,189.92$$

**Bonos de carbóno = 25,189.92 ton. Carbóno/año**

De acuerdo a publicación del Instituto Nacional de Ecología (INE) [15], los certificados de reducción de emisiones (CRE), no tienen un valor “oficial” sobre el precio de una tonelada de CO<sub>2</sub> reducida o no emitida, por ejemplo, hasta 2005, el Banco Mundial emplea un precio de \$5 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente no emitida, el precio de la tonelada está sujeto a oferta y demanda de bonos de carbón en el mercado.

Dado que existen diferentes esquemas para el comercio de los bonos y diferentes sitios del mundo donde se pueden comprar y vender, pueden existir precios diferentes por cada tonelada de CO<sub>2</sub>, Por ejemplo:

- **Chicago Climate Exchange:** en operación desde diciembre del 2003; el precio ha fluctuado desde \$0.90 hasta los \$2.10 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> (datos a Junio de 2005), [15].

- **European Climate Exchange Carbóno:** en operación desde abril del 2005; el precio ha fluctuado entre \$6.40 y \$19.70 euros por tonelada de CO<sub>2</sub> (datos a junio de 2005), [15].

A continuación se presenta la Figura 5.1 que representa los precios de los bonos de carbón en la Unión Europea al año 2005.

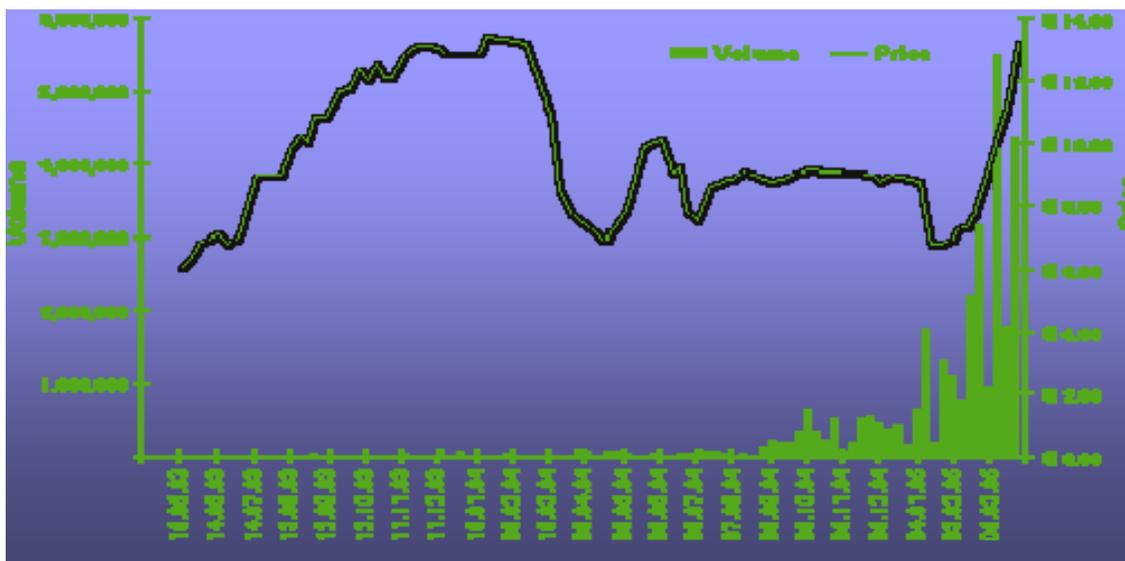


Figura 5.1 Ejemplo de gráfica de precio y volúmenes de Ton CO<sub>2</sub> comercializados en la Unión Europea, fuente; INE [15]

Para efectos de este ejercicio se considerará el precio de un bono de carbón en el mercado de: 10 u.s.d. / ton. Carbón

Por lo tanto;

$$\text{Benef.MDL} = (B.\text{carbono} * \text{precioBC.}) \quad (5.6)$$

Donde:

Benef. MDL- Beneficio aportado por la venta de bonos de carbón, u.s.d./año

$$\text{Benef. MDL} = 25,189.92 * 10 = 251,899.2 \text{ u.s.d./año}$$

**Benef. MDL = 251,899.2 u.s.d. / año**

### 5.6 Análisis de rentabilidad de la inversión

El siguiente inciso se refiere a la determinación de los indicadores financieros que permiten la objetividad en la toma de decisiones, para realizar una inversión, a este respecto se calculará el valor presente neto (VPN), el período de pago o de retorno de la inversión (Pay Back) y la tasa interna de retorno (TIR), esta última con base a una tasa de rendimiento mínima aceptable (TREMA), considerada de 15%.

El ejercicio únicamente considera la inversión sobre las modificaciones y adaptaciones que aplican a un tren existente que maneja combustóleo y que se convertirá para uso de aceite crudo de palma Africana (ACP) en calderas.

La Tabla 5.2 presenta el listado de equipos para el manejo existente del combustóleo vs. lo requerido para el manejo del aceite crudo de palma Africana, lo cual hace el alcance de las modificaciones que dan lugar al estimado de costos de la Inversión, observable en la Tabla 5.3, mientras que la Figura 5.2 ilustra el croquis de distribución de las instalaciones:

Tabla 5.2 Alcance de modificaciones en la caldera

ITEM	EXISTENTES PARA COMBUSTÓLEO	PARA BIODIÉSEL (ACP)
1	Un sistema de descarga de pipas de combustóleo	Se utilizará el existente
2	Un tanque almacen de combustóleo de 600 m3	Se utilizará el existente
3	Un sistema de trasferencia de combustible	Se utilizará el existente
4	Un tanque diario d 90 m³ de alimentación de combustible	Se utilizará el existente
5	Un sistema de precalentadores de combustible	Se utilizará el existente
6	Un sistema de bombeo de alimentación de combustible	Se utilizará el existente
7	Un tren de válvulas de control de alimentación	Se utilizará el existente
8	Un tren válvulas de vapor para atomizado de combustible	Se utilizará el existente
9	Un sistema de retorno de combustible caliente	Se utilizará el existente
10	Un sistema de quemadores de combustóleo	Requiere uno nuevo
11	---	Lote de modificaciones de tuberías
12	---	Lote de cambio de materiales
13	---	Lote de instrumentación
14	---	Barrido de líneas de combustóleo
15	---	Lote de obras de instalación

Tabla 5.3. Estimado de costos para manejo de aceite crudo de palma (ACP)

ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTO U.S.D.
1	Quemador para ACP	50,000
2	Paquete de válvulas y bombas	70,000
3	Modificaciones de tuberías de proceso	30,000
4	Lote de cambio de materiales	40,000
5	Lote de Instrumentos	30,000
6	Ingeniería de detalle	15,000
	SUBTOTAL EQUIPOS Y HERRAMIENTAS	235,000
7	OBRAS DE INSTALACIÓN	50,000
8	PRUEBAS Y ARRANQUES	20,000
9	IMPREVISTOS ( 15 % )	45,000
	GRAN TOTAL	\$ 350,000

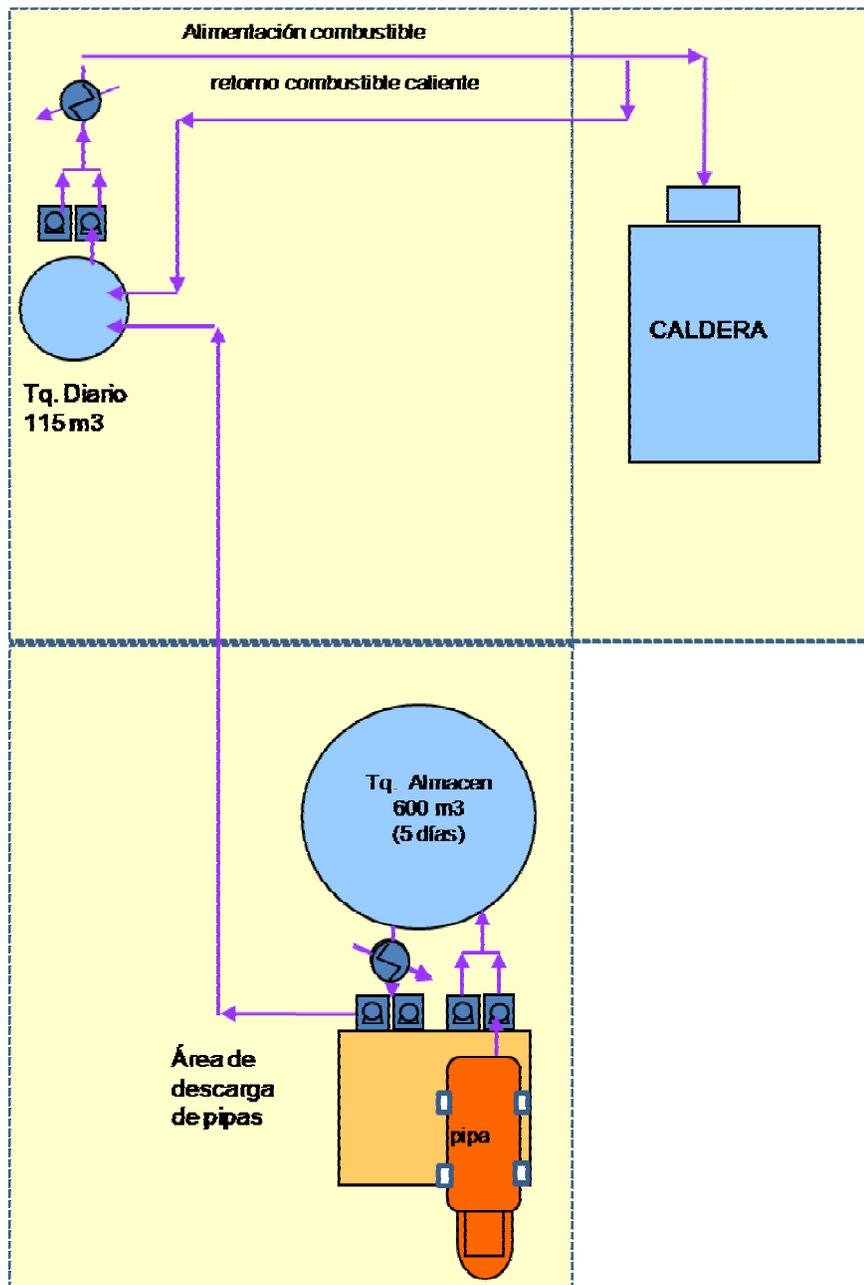


Figura 5.2 Croquis de distribución de las instalaciones de descarga y alimentación de combustible a caldera

Con el dato del estimado de costos de la Tabla 5.3, de 350,000 u.s.d. se recurre a una hoja de cálculo de excel, misma, que se observa en la Figura 5.3 siguiente, con la cual se calculará los indicadores financieros, según:

## Análisis económico de proyecto:

## ESTUDIO PARA COMBUSTIÓN DE ACEITE CRUDO DE PALMA AFRICANA EN CALDERAS DE SISA DE C.V.

NOVIEMBRE DE 2008

CIFRAS EN DOLARES AMERICANOS

Períodos (años)	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Paridad estimada	10.50	12.00	12.10	12.30	12.40	12.50	12.60	12.70	12.80	12.90	13.00
Inversión	350,000	350,000	350,000	350,000	350,000	350,000	350,000	350,000	350,000	350,000	350,000
Vida útil (años)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Depreciación acumulada	0	35,000	70,000	105,000	140,000	175,000	210,000	245,000	280,000	315,000	350,000
<b>Inversión neta</b>	<b>350,000</b>	<b>315,000</b>	<b>280,000</b>	<b>245,000</b>	<b>210,000</b>	<b>175,000</b>	<b>140,000</b>	<b>105,000</b>	<b>70,000</b>	<b>35,000</b>	<b>0</b>
<b>Beneficio :</b>											
CRE CO2 / año		25,190	25,190	25,190	25,190	25,190	25,190	25,190	25,190	25,190	25,190
Precio unitario bono de carbón		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Total de ventas CRE/año		251,899	277,089	302,279	327,469	352,659	377,849	403,039	428,229	453,419	478,608
<b>Beneficio MDL:</b>	<b>0</b>	<b>251,899</b>	<b>277,089</b>	<b>302,279</b>	<b>327,469</b>	<b>352,659</b>	<b>377,849</b>	<b>403,039</b>	<b>428,229</b>	<b>453,419</b>	<b>478,608</b>
Depreciación 10%	0	35,000	35,000	35,000	35,000	35,000	35,000	35,000	35,000	35,000	35,000
<b>Utilidad antes de ISR</b>	<b>0</b>	<b>216,899</b>	<b>242,089</b>	<b>267,279</b>	<b>292,469</b>	<b>317,659</b>	<b>342,849</b>	<b>368,039</b>	<b>393,229</b>	<b>418,419</b>	<b>443,608</b>
I.S.R.	0	65,070	72,627	80,184	87,741	95,298	102,855	110,412	117,969	125,526	133,083
<b>Flujo</b>	<b>0</b>	<b>186,829</b>	<b>204,462</b>	<b>222,095</b>	<b>239,728</b>	<b>257,361</b>	<b>274,994</b>	<b>292,627</b>	<b>310,260</b>	<b>327,893</b>	<b>345,526</b>
Flujo anual :	-350,000	186,829	204,462	222,095	239,728	257,361	274,994	292,627	310,260	327,893	345,526
Flujo acumulado :	-350,000	186,829	391,292	613,387	853,115	1,110,477	1,385,471	1,678,098	1,988,358	2,316,251	2,661,777

<b>TREMA</b>	<b>15%</b>
<b>TIR</b>	<b>61%</b>
<b>VPN</b>	<b>771,349</b>
<b>PAY BACK</b>	<b>1.8</b>

Tasa de rendimiento mínimo atractiva.  
Tasa de rendimiento (tasa que se gana sobre el **saldo no recuperado** de la inversión), debe ser > a la TREMA.  
Diferencia entre el valor de mercado de la inversión y su costo (valor que se crea en una inversión), debe ser +.  
años Período de recuperación o tiempo en el que se paga la inversión

Figura 5.3 Indicadores financieros y económicos

Los indicadores económicos que resultan del análisis financiero sobre la inversión, son los siguientes:

Valor Presente Neto (VPN) = 771,349 u.s.d. / año

Tasa Interna de Retorno (TIR) = 61 %

Pay Back (PB) = 1.8 años

De acuerdo con los indicadores resultantes, la inversión requerida en las modificaciones es recuperable, no así el costo operativo por consumo del aceite crudo de palma Africana (ACP).

El costo operativo anual por consumo de ACP, considera la demanda calculada con la ec. 5.1 de 43,757.3 ton/año, multiplicado por el precio del ACP de 890 u.s.d/ton de la tabla 5.1, se tiene:

$$\text{Costo operativo ACP} = 43,757.3 * 890$$

$$\text{Costo operativo ACP} = 38'943,997 \text{ u.s.d./año}$$

**Costo operativo con combustóleo:**

$$\text{Costo operativo combustóleo} = 43,757.3 * 519$$

$$\text{Costo operativo combustóleo} = 22'710,039 \text{ u.s.d./año}$$

$$\text{Costo operativo diferencial entre ACP y combustóleo: } 16'233,958 \text{ u.s.d./año}$$

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones a que se llegan del presente estudio se pormenorizan en los siguientes aspectos:

- **Grado de cumplimiento de objetivos planteados**

En cuanto al objetivo general, se cumplió cabalmente el estudio propuesto de evaluación técnico y económicamente para usar aceite crudo de palma Africana, como sustituto de un combustible fósil como es el combustóleo en calderas, encontrando que permite una mejora en la eficiencia de combustión de un 88 % a un 92.46 %.

En cuanto a los objetivos específicos, se detallaron al 100% los balances de materia y energía basados particularmente en la utilización del aceite crudo de palma Africana (ACP), calculándose la combustión propiamente dicha.

Se evaluaron al 100% los rendimientos de ACP y se determinaron la cantidad de terrenos de cultivo necesarios para aportar la demanda de combustible anual, en base a la caldera de trabajo seleccionada.

Se evaluó la aportación potencial de los créditos de reducción de emisiones (CRE), afín de evaluar los beneficios de un proyecto de mecanismo de desarrollo limpio (MDL) acorde al protocolo de Kyoto.

- **En cuanto a la disponibilidad del aceite crudo de palma (ACP)**

Se concluye que no existe disponibilidad de ACP en México.

México tiene un consumo anual de aceite de palma de 280,000 toneladas según reporte del período 2004/2005. La máxima producción nacional es de 42,000 ton/año, el restante de 238,000 toneladas se importa.

El abastecimiento de aceite crudo de palma Africana, para mantener un suministro confiable que asegure una operación continua de una caldera con las características como las indicadas, definitivamente tendría que ser de importación, o incentivar inversiones en este campo y apoyar los planes de crecimiento de los palmicultores de la región Sureste de México, el ejemplo puede ser escalado para cualquier otra aplicación.

- **En cuanto al costo de oportunidad del ACP en el mercado**

El costo actual del ACP, comparado con los precios actuales de los energéticos fósiles, desalienta la inversión para hacer uso de este en la modalidad costo beneficio, ya que aún cuando se paga la inversión mediante los bonos de carbón, el gran diferencial de costos operativos entre ACP y combustóleo del orden de 16'233,958 u.s.d./año no dan cabida a su utilización, al menos bajo las condiciones y tiempos actuales.

En las circunstancias presentes, no se recomienda la utilización del aceite crudo de palma Africana como combustible alternativo en calderas, en tanto los combustibles de origen fósil sean económicamente más baratos. A menos que se reduzca la brecha entre ambos, o que en el futuro, cambien las circunstancias en cuanto a la oportunidad y costo.

El interés en poder hacer uso del aceite crudo de palma Africana, en lugar de otros aceites de origen vegetal, se sustentó en base a lo planteado en capítulos anteriores, respecto a los escenarios de producción del aceite de palma Africana, las estadísticas reveladoras en cuanto a los volúmenes de producción mundiales y regionales del mismo y su estatus de comercialización y competencia de costos comparado contra aceites vegetales derivados de otras fuentes como soya, girasol, colza/canola entre otros, lo cual dió la pauta para enfocar la atención en el aceite obtenido de la palma africana, ya que al compararlos, éste brinda las mejores bondades en cuanto a costo beneficio se refiere y que sin duda es uno de los cultivos más adecuados para ser aprovechados en el campo Mexicano, ya que se cuenta con las características apropiadas de tipo de suelo y climatología en el sureste de la República Mexicana y con ello impulsar la economía de la región.

Con lo anterior se pensó en fortalecer la producción de un energético alternativo como una opción con menos polémica, comparado contra aquellos cuyo fin es la producción de energía, pero a base de granos alimenticios de primera necesidad para la población como son el maíz, trigo, soya, girasol y de la caña de azúcar, remolacha, yuca entre otros, los cuales están mayoritariamente enfocados a la producción de carburantes vehiculares como el Bioetanol.

En el caso del presente estudio y dejando por un lado los aspectos de costos y precios de los aceites, otra razón por lo cual no se consideró como viable la ocupación del aceite de soya, ni el de girasol, entre otros, es porque no se cuenta con el tipo de suelo, tampoco de la topografía apropiada y ni la climatología para su óptimo rendimiento. En este tipo de cultivos es demandante contar con amplios valles y praderas con temperaturas promedio de entre los 18 a 22 °C.

En el continente Americano, en el caso del aceite de soya, quién tiene el dominio de la tecnología de este tipo de cultivo y su producción a nivel mundial es Argentina, en el caso del aceite de girasol lo comparte tanto Argentina como los Estados Unidos de Norteamérica y el caso del aceite de colza/ canola es Canadá, (El nombre del aceite llamado canola es derivado de su acrónimo en inglés, que significa “**can**adian **oil** **low** **acid**”), aceite canadiense bajo en ácido, luego este nombre se ha aplicado indistintamente a variedades cultivadas de colza, sin importar sus niveles de ácido. A continuación se presentan las Figuras de la 5.4 a la 5.12 que permiten visualizar las diferencias de las oleaginosas y sus cultivos antes comentados.



Figura 5.4 Planta de colza o raps (*brassica napus*)



Figura 5.5 Campo de cultivo de canola en Alberta Canadá



Figura 5.6 Campo de cultivo de girasol

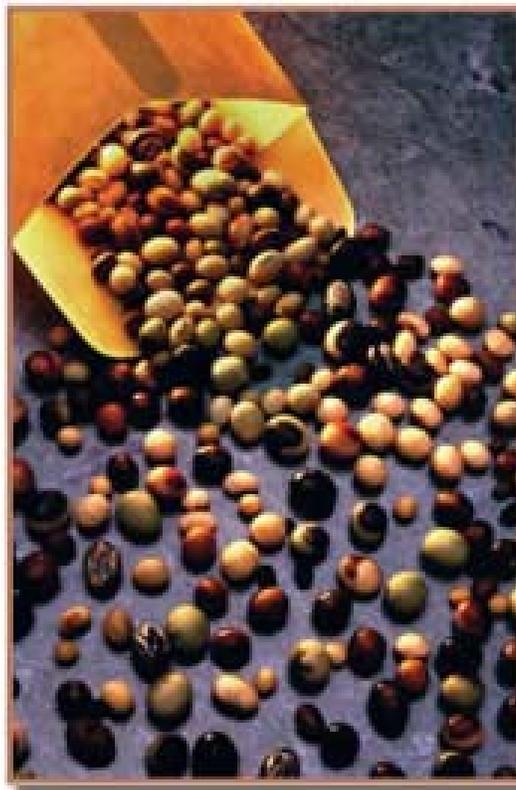


Figura 5.7 planta de soya y semillas postcosecha



Figura 5.8 Campo de cultivo de soya



Figura 5.9 Palma de aceite Africana



Figura 5.10 Racimo con frutos de la palma de aceite Africana



Figura 5.11 Frutos de la palma Africana y aceite extraído

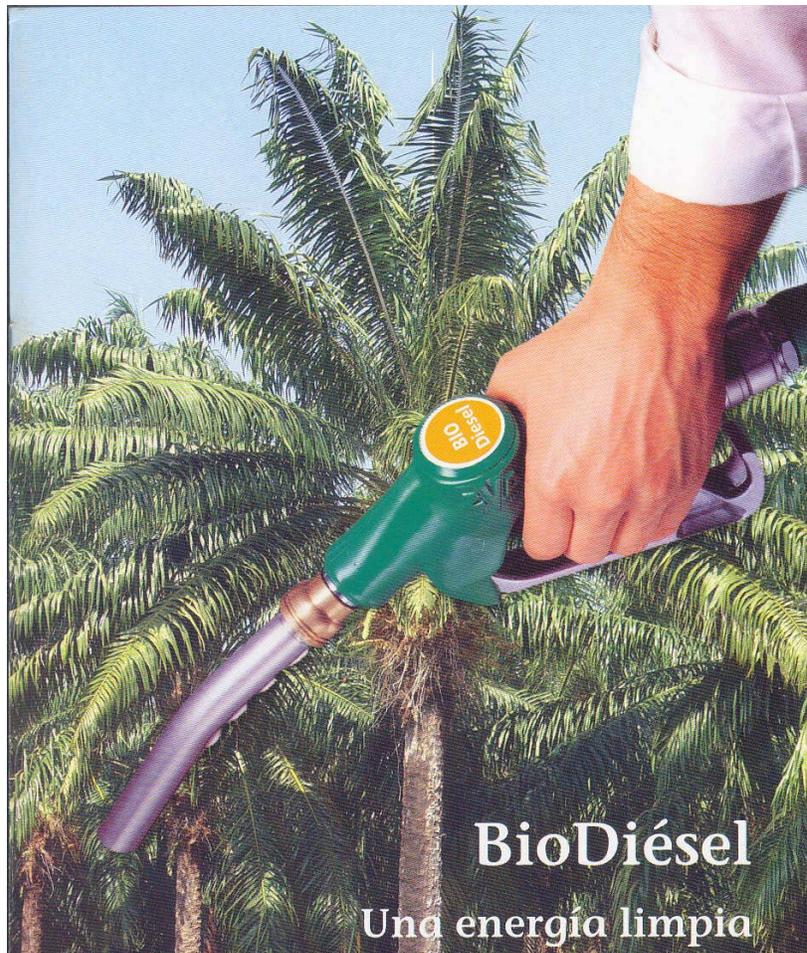


Figura 5.12 Campo de cultivo de palma Africana productor de Biodiesel

## **BIBLIOGRAFÍA**

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Aguilar González Jorge Luis, "Biodiésel, ejemplo notable de combustible alternativo.", México [Energíaadebate.com.mx](http://Energíaadebate.com.mx), año 2002.
- 2.- Arjona Diego, "Combustibles y Biocombustibles"; Seminario Internacional de Biocombustibles, Organización Latinoamericana de Energía; Brasilia, Brasil, [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx), Abril de 2006.
- 3.- Benjumea, H., Pedro, Agudelo S., John, "Estudio experimental de las variables que afectan la transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiésel" Scientia et técnica, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, [www.tdelacdepalma.utp.edu.co](http://www.tdelacdepalma.utp.edu.co), Mayo de 2004.
- 4.- "Biodiésel, barreras, potenciales e impactos", Universidad Strathclyde Glasgow, Escocia, [www.esru.strath.ac.uk](http://www.esru.strath.ac.uk), año 2007.
- 5.- Cavaseno Vincent and the Staff of Chemical Engineering, Process Heat Exchange, Ed. McGraw-Hill, año 1995.
- 6.- "Crisis energética, inicia la carrera por los biocombustibles en México", Mexico, [www.crisisenergetica.org](http://www.crisisenergetica.org), Marzo 2007.
- 7.- Demirbas, A., "Progress and recent trends in biofuels", Progress in Energy and Combustion Science 33, Ed. Elsevier Ltd. , año 2007,
- 8.- Demirbas, Ayhan, "Fuel properties and calculation of higher heating values of vegetable oils", Turquía, [www.sciencedirect.com/science](http://www.sciencedirect.com/science), Agosto de 1998.
- 9.- Díaz M., Veras M.A., Cáceres A.I, "Experiencia y Perspectivas en América Latina sobre Alcohol Carburante", GEPLACEA - Grupo de Países Latinoamericanos y del Caribe Exportadores de Azúcar, OLADE - Organización Latinoamericana de Energía, IICA - Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Editores Campodónico, año 1984.
- 10.- Fedepalma, Economía y mercados"Estadísticas de aceites vegetales, palma de aceite", Colombia, [www.fedepalma.org](http://www.fedepalma.org) , año 2006.
- 11.- Guillén Solís Omar, "El uso de cultivos energéticos en México", México, [www.tuobra.unam.mx](http://www.tuobra.unam.mx), Junio de 2007.
- 12.- Guillen Solís Omar, Energías Renovables, Ed. Trillas, año 2004.

- 13.- Herrera Omar, Blanco Alejandro Equipos de transferencia de calor Edit Andree Voissin 1985, La Habana, Cuba.
- 14.- Horta Nogueira Luis Augusto, Perspectivas de un programa de Biocombustibles en América Central, CEPAL en México, [www.eclac.org](http://www.eclac.org), Marzo de 2004.
- 15.- INE, Instituto Nacional de Ecología, “Mercado de bonos de Carbón”, México, [www.cambioclimatico.ine.gob.mx](http://www.cambioclimatico.ine.gob.mx), Julio 2008.
- 16.- Kern, Donal, Q., Process Heat Transfer, Ed. McGraw-Hill, año 2000.
- 17.- Mata Aguilar Juan, “Avances generales, estudio de biocombustibles en México” Comité consultivo SENER, México, [www.energia.gob.mx](http://www.energia.gob.mx).
- 18.- Melgar Ceballos Marvin, “Ficha técnica de producción de biodiésel, alternativa de un combustible natural”, Costa Rica, [ilustrados.com.htm](http://ilustrados.com.htm), año 2002.
- 19.- Plata Juan Carlos, “Caña de azúcar; Alternativa para problemas energéticos, ecológicos y económicos”, Universidad Veracruzana, México, Universo: El periódico de los universitarios-No\_ 221.mht, Junio 2006.
- 20.- Perry Robert H. & Don Green, Perry’s Chemical Engineer’s Handboock, Ed. McGraw-Hill, año 2002.
- 21.- Plan Rector Sistema Nacional Palma de Aceite, Gobierno del Estado de Veracruz Año 2005.
- 22.- Plan Rector del Sistema Producto Palma de Aceite 2004 - 2014, Gobierno del Estado de Chiapas, Año 2004.
- 23.- Poncian Rolando, “Programa de Oxigenación de Combustibles con Alcohol Carburante, Asociación de Combustibles Renovables de Centroamérica”, Guatemala, año 2003.
- 24.- “Producción y uso de Biocombustibles en México”, México, [www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx), Agosto de 2006.
- 25.- Ramírez Mesa Roberto, “Thermoeconomics” master’s course of engineering thermodynamics, Mexico Año 2006
- 26.- Trindade, S., “The basis for a Sustainable World Fuel Ethanol Market, Seminario Internacional de Alcohol carburante”, ASOCAÑA/CORPODIB/TECNICAÑA, Santiago de Cali, Colombia, junio de 2003.