



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN

TESIS

“ESTUDIO ENERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR
NÚMERO 4 DEL INGENIO PRESIDENTE BENITO JUÁREZ
GARCÍA DEL MUNICIPIO DE CÁRDENAS, TABASCO”

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

PRESENTA:

Ing. Asunción Almeida Frías

ASESOR:

Dr. ROBERTO RAMÍREZ MESA.



MINATITLÁN, VER.

ENERO 2012

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

OFICIO No. DEPI020/2012

Minatitlán, Ver., **23ENERO/2012**
DIV. DE EST. DE POSGRADO E INVEST.
OFICIO No. DEPI-TIT-020-2012

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

ING. ASUNCIÓN ALMEIDA FRÍAS
PRESENTE

Después de haber satisfecho los requisitos establecidos en el procedimiento académico para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería en los Institutos Tecnológicos, y de conformidad con el H. Comité Revisor, es grato autorizarle la impresión de su Tesis:

“ESTUDIO ENERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR NUMERO 4 DEL INGENIO PRESIDENTE BENITO JUÁREZ DEL MUNICIPIO DE CÁRDENAS, TABASCO”

ATENTAMENTE.

M.C. FLOR DE AZALIA LÓPEZ ROBLES
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN



Boulevard Institutos Tecnológicos S/N, Col. Buena Vista Norte, C. P. 96848, Minatitlán, Veracruz
Teléfono (01 922) 22 243 45, 22 2 43 39, Fax 22 243 36, e-mail: dirección@itmina.edu.mx
<http://www.itmina.edu.mx>



ISO 9001:2008
1500-590
Fecha de Terminación: 2011.09.22
Proceso Educativo



ISO 14001:2004
RSGA 057
Fecha de Terminación: 2011.02.21
Actividades, productos y servicios que
Realizan el personal y partes
interesadas en el IITM



INDICE

	Pág.
Resumen	1
Abstract	3
CAPITULO I. INTRODUCCION	
1.1 Justificación y viabilidad técnica, económico y social	5
1.1.1 Antecedentes	5
1.1.2 Viabilidad técnica del uso del bagazo como combustible	10
1.2 Objetivo general del proyecto	10
1.3 Objetivos específicos	11
1.4 Problema científico al que obedece	11
1.5 Preguntas de investigación	12
1.6 Hipótesis científica	13
1.7 Tipo de diseño del experimento	13
1.8 Forma de recolección de la información de experimentación	13
1.9 Tipo de modelación matemática a aplicar	13
1.10 Beneficios de la investigación	13
1.11 Método a emplear	14
CAPITULO II DESCRIPCION GENERAL DE LA EMPRESA	
2.1 Antecedentes	16
2.2 Ubicación geográfica	21
2.3 Misión	23
2.4 Visión	23
2.5 Objetivos y metas	24
2.6 Descripción del proceso de obtención del azúcar de caña	24
2.7 Servicios auxiliares con que cuenta la planta	25
2.8 Datos del consumo histórico de combustóleo	26
CAPITULO III ANALISIS TEORICO DE LA INVESTIGACION	
3.1 Tipos de calderas y definición	29
3.2 Análisis teórico del estudio energético en generadores de vapor	32
3.2.1 Metodología	32
3.3 Normatividad referida al estudio energético en calderas	37
3.4 La economía energética de las calderas	41
3.5 Combustibles usados en Calderas para ingenios azucareros	42
3.6 Tipos de pérdidas en generadores de vapor	44
3.7 Gases productos de la combustión	44
3.8 Ecuaciones fundamentales	45

CAPITULO IV DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA DE CALCULOS DE LOS GENERADORES DE VAPOR

4.1	Característica del bagazo	65
4.2	Preparación del bagazo	68
4.3	Composición química del bagazo	68
4.4	Poder calorífico del bagazo	69
4.5	Determinación de la caldera de trabajo	70
4.6	Cálculo de la combustión en la caldera No. 4	71
4.7	Capacidad del ventilador de tiro forzado	71
4.8	Volúmenes de los productos de la combustión	72
4.8.1	Volúmenes teóricos	73
4.8.2	Volúmenes reales	74
4.8.3	Entalpías del aire y de los gases producto de la combustión	74
4.9.	Balance térmico de la caldera No. 4 del Ingenio Presidente Benito Juárez	75
4.9.1	Calor disponible	76
4.9.1.1	Calor físico del combustible	76
4.9.1.2	Calor introducido por el vapor de atomización	76
4.9.1.3	Calor físico del aire en el pre calentador de aire	76
4.9.2	Pérdidas en la caldera	76
4.9.2.1	Gases de escape	77
4.9.2.2	Incombustión química	77
4.9.2.3	Incombustión mecánica	77
4.9.2.4	En paredes de la caldera	77
4.9.2.5	Por cenizas extraídas	78
4.9.2.6	Por enfriamiento de vigas y paneles	78
4.10	Eficiencia bruta	78
4.11	Eficiencia neta	78

CAPITULO V SIMULACION ENERGETICA DE LA CALDERA NUMERO 4 DEL INGENIO AZUCARERO BENITO JUAREZ

5.1	Simulación por el método internacional	80
5.2	Datos tomados para el análisis	88
5.3	Análisis de los resultados	89
	Conclusiones y recomendaciones	92
	Bibliografía	94

RESUMEN

RESUMEN

La presente investigación, se ubica en el área de energética industrial y el área de combustibles y combustión con un gran enfoque en calderas, cuyo propósito es realizar un estudio energético referido al consumo de combustible en la caldera No. 4 del ingenio azucarero Benito Juárez García, la cual consume bagazo. En este trabajo se estudiará todo lo relacionado al proceso de la quema de combustible sólido o bagazo así como su análisis energético.

La investigación se realizará en el Ingenio azucarero Benito Juárez García, perteneciente al grupo GAM, ubicado en el poblado C-27 del municipio de Cárdenas, Tabasco, empresa dedicada a la producción de azúcar de caña para lo cual emplea calderas de vapor como medio de calentamiento del proceso.

La investigación teórica y revisión bibliográfica dio inicio desde el segundo semestre de la maestría en septiembre de 2006, los datos de campo fueron obtenidos desde mayo 2011 hasta agosto 2011, integrando posteriormente el marco teórico sobre las metodologías para realizar un diagnóstico energético a calderas de vapor, continuamos con la determinación de las propiedades físicas y químicas del bagazo, el balance térmico, balance másico, la metodología de cálculo de la caldera No.4, su eficiencia que es el objeto de estudios del presente documento.

Para la información se recurrió al manual de energía para fábricas de azúcar de Baterns, Berlín 1995, el libro de metodologías, el libro eficiencia en calderas, Alberto Plauchú 1995 y entre otros.

Los resultados obtenidos contribuirán con la política de la empresa de cero petróleos por lo tanto, es conveniente que se emita un reporte técnico, el cual debe entregarse a la empresa, quien en función de los resultados obtenidos decidirá la aplicación de los resultados plasmados en las conclusiones y recomendaciones.

Se realizó la simulación energética de dicho cálculo siendo esta última inédita para centrales azucareros

ABSTRACT

ABSTRACT

This research is located in the area of industrial energy and fuels and combustion area with a strong focus on boilers, whose purpose is to conduct an energy study of the consumption of fuel in boiler No. 4 of the sugar mill Garcia Benito Juarez, which uses bagasse. This paper will explore everything related to the process of burning solid fuel or bagasse and energy analysis.

The research was conducted in the Benito Juárez García Sugar Mill, belonging to GAM, located in the town C-27 in the municipality of Cardenas, Tabasco, a company dedicated to the production of sugar cane for which used steam boilers as a means of heating process.

Theoretical research and literature review started from the second half of the Masters in September 2006, the field data were collected from May 2011 to August 2011, subsequently integrating the theoretical framework on methodologies to diagnose energy to steam boilers we continue with the determination of physical and chemical properties of bagasse, the heat balance, mass balance, the methodology for calculating the boiler No.4, efficiency is the object of study of this document.

For information we resorted to manual power for sugar mills Baterns, Berlin 1995, the book of methodologies, the book efficiency boilers, Alberto Plauchú 1995 and others.

The results contribute to the company policy of zero oil therefore it is appropriate to issue a technical report, which must be delivered to the company, who according to the results decide the application of the results embodied in the conclusions and recommendations.

Energy simulation was performed that calculation of the latter being a first for sugar mills

CAPITULO I
INTRODUCCION

CAPITULO I INTRODUCCION

1.1. JUSTIFICACIÓN Y VIABILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICO Y SOCIAL

A continuación se presentan los factores más sobresalientes que justifican éste tema de investigación, así como la posibilidad de realizar algunos ajustes económicos en el ingenio azucarero Presidente Benito Juárez García del grupo GAM.

1.1.1. ANTECEDENTES

La caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*), es la materia prima de la industria azucarera en México y es esta una actividad de alto impacto social en el país por su producción, por el número de empleos que genera en el campo mexicano, porque el azúcar está enraizada profundamente en la economía y en la cultura del país y es un producto básico en la dieta del mexicano, porque genera grandes cantidades de gases contaminantes y por ser un gran consumidor de hidrocarburos para el procesamiento de la caña de azúcar. En éste sentido, se necesitan anualmente alrededor de 4.8 millones de toneladas de azúcar para el consumo nacional (promedio 2001-2007), el valor generado en la producción de azúcar es por más de 3 mil millones de dólares anuales, de los cuales el 57% se distribuye entre los 164 mil productores de caña. La caña de azúcar, aporta el 13.5% del valor de la producción agrícola nacional y representa el 0.4% del PIN, además del 7.3 % del PIB agropecuario, genera más de 450 mil empleos directos y beneficios directos a 2.2 millones de personas. La producción nacional de caña se lleva a cabo en 683,000 hectáreas que generan 48,363,316 toneladas de materia prima que abastecen a 57 ingenios o fábricas azucareras localizadas en 15 estados cañeros con productividad de la gramínea diversa (tabla 1.1) donde vive el 13% de población nacional. Así mismo, los coproductores y subproductos de la agroindustria azucarera (sacarosa, melaza, bagazo, cachazas y vinazas) sirven como insumos para las industrias que fabrican refrescos y bebidas, jugos, néctares, galletas, repostería, licores, papel y cartón, tableros aglomerados, alimentos pecuarios y farmacéuticos, generación de electricidad y como combustibles para la misma industria azucarera como es el caso del bagazo que

se quema en las calderas de los ingenios azucareros, entre otros usos, contribuyendo al desarrollo industrial del país.¹ (zafra net 2008) y (PRONAC, 2007).

Tabla 1.1 Indicadores de los estados productores de caña y azúcar en el país (CNPR 2008)

ESTADO PRODUCTOR	SUPERFICIE INDUSTRIALIZADA (HA.)	PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR (TON)	PRODUCCIÓN DE AZÚCAR (TON)
Campeche	9,582	393,258	44,270
Chiapas	27,436	2,323,059	271,698
Colima	11,066	881,551	98,092
Jalisco	64,756	5,726,307	700,598
Michoacán	13,993	1,164,971	138,125
Morelos	13,914	1,503,078	191,452
Nayarit	29,433	1,913,446	230,072
Oaxaca	45,611	2,856,351	336,181
Puebla	15,411	1,691,658	211,132
Quintana Roo	22,663	1,171,593	115,041
San Luís Potosí	68,035	4,415,191	543,563
Sinaloa	24,910	2,140,473	199,404
Veracruz	278,597	18,651,017	2,076,051
Tamaulipas	28,964	2,169,061	230,312
Tabasco	28,636	1,362,302	134,655
Total	683,007	48,363,316	5,520,646

Como mencionan Juan D'Angelo, Dora paz y Gerónimo J. Cárdenas, en su artículo "posibilidad del secado del bagazo en la industria azucarera en México", al igual que en Argentina, durante la zafra, los ingenios azucareros atraviesan situaciones que los obligan a consumir combustible adicional al bagazo (combustóleo) para mantener su funcionamiento normal. Como una forma de mejorar el rendimiento energético en calderas antiguas como las existentes en los

¹ PRONAC2007 y zafra net 2008

ingenios azucareros de México y reducir el consumo de combustible adicional, la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Columbres de Tucumán Argentina, ha desarrollado con éxito una estrategia, basada en el pre secado del bagazo con los gases productos de la combustión, el cual opera satisfactoriamente en calderas de la industria Argentina. Este fenómeno trae consigo, el aumento en la eficiencia energética de las calderas, una disminución del consumo de combustible fósiles, a la vez de reducir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. El ingenio azucarero Presidente Benito Juárez García, del municipio de Cárdenas, Tabasco, perteneciente al grupo GAM (Grupo Azucarero México), cuenta con una totalidad de cinco calderas, de las cuales la 1, 2 y 3 son totalmente consumidoras de bagazo y las otras dos, la 4 y 5 consumen un 2% de combustóleo y el 98% restante del combustible que necesitan, es el bagazo de caña.

La generación de vapor representa para la industria dedicada a la transformación de la caña de azúcar, como el Ingenio Azucarero “Presidente Benito Juárez García”, la fuente de energía necesaria para realizar los procesos involucrados con la producción de azúcar de caña, como mover los molinos de cuarta maza que le proporcionan el tratamiento inicial a la caña de azúcar en el proceso de extracción del jugo, a la vez de apoyar la generación de energía eléctrica para el consumo en la planta. Las unidades de servicios auxiliares del Ingenio azucarero objeto de estudios, proporcionan la cantidad de agua y los insumos necesarios en todo el proceso de producción.

El agua utilizada en toda la planta se recibe del dren Veladero y del suministro de agua potable del poblado C-27 del municipio de Cárdenas, Tabasco, de dos pozos de agua con los que cuenta la planta.

Durante el desarrollo de éste documento se hará referencia a calderas y generadores de vapor, cabe aclarar que estaremos refiriéndonos al mismo término, aun y cuando sabemos que caldera es aquella parte del generador de vapor que contiene el medio calentado y los combustibles quemados².

² León Avalos y Vez, “Generadores de vapor”, Instituto Politécnico Nacional

El presente trabajo de investigación trata de la realización de un análisis termo-económico de las calderas de la planta, con el fin de detectar y probar la viabilidad del uso del bagazo de caña como combustible en calderas de los ingenios azucareros, a la vez de contribuir al ahorro de energía y al cuidado del medio ambiente al reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera derivado de la quema de combustóleo en las calderas del ingenio.

Para tal efecto, analizaremos la caldera No. 4 la cual consume bagazo y combustóleo. Esta investigación, se va a llevar a cabo durante los meses de enero a mayo que es el tiempo de zafra y de septiembre a noviembre que es época de reparación.

Con base en lo anterior, se evaluará la calidad del vapor, el consumo de combustóleo y bagazo, la relación aire-combustible, la temperatura de los gases de combustión y la eficiencia energética de la caldera No. 4 de la planta, así como la termo economía de la caldera, para dar lugar al cálculo de la eficiencia y la óptima utilización del bagazo de caña como combustible en la caldera No.4 y referenciarlo a las cinco calderas con las que cuenta la planta. Algunas mediciones como las derivadas de las incrustaciones en el hogar de la caldera, por efecto del consumo del bagazo y sobre todo las condiciones mecánicas y térmicas de tratamiento previo al ser quemado en el hogar de la caldera, se deben llevar a cabo durante la reparación o sea, los meses de julio a noviembre de cada año, se llevarían a cabo a la vez, inspecciones que nos ayuden en el proceso de investigación y algunas pruebas específicas donde se requiera que el equipo este fuera de servicio.

Los consumos de combustóleo y sus costos se muestran en la tabla No. 1.2, se toma como base, los consumos de 2007, como resultado de las primeras investigaciones realizadas en la planta.

Tabla 1.2 Consumo de combustóleo y costos

MES	DÍAS TRABAJADOS/MES	CONSUMO DE COMBUSTÓLEO DIARIO (LTS/MES)*	PRECIO UNITARIO DEL COMBUSTÓLEO (\$/LT)	COSTO DEL ENERGÉTICO EN \$/MES
ENERO	24	486,921.84	3.042	1,481,216.24
FEBRERO	28	568,075.48	3.042	1,728,085.61
MARZO	30	608,652.30	3.042	1,851,520.30
ABRIL	28	568,075.48	3.00	1,704,226.44
MAYO	31	628,940.71	3.00	1,886,822.13
JUNIO	30	608,652.30	3.00	1,825,956.90
JULIO	4	81,153.64	3.00	243,460.92
TOTAL	175	3,550,471.75		10,721,288.50

Se consumen 872.62 Lts/hr y un promedio de 23.25 hrs/día, un precio del combustóleo (fuel-oil No.6), \$ 3.00 por litro, el cual bajó el 1.4 % en el mes de junio, respecto de los costos a finales de 2005 e inicios de 2006, según la ENAP, publicado el 31 de octubre en la página economía y negocios online³.

Se espera tener como resultados:

- El cálculo de la eficiencia energética de la caldera No. 4 y proponer posible soluciones que contribuyan al ahorro de energía.
- Realizar el estudio de los beneficios del consumo de bagazo en calderas.
- Un mecanismo para la adecuada utilización del bagazo en calderas del ingenio, con el fin de aprovechar al máximo su poder calorífico a la vez de contribuir con la política del ingenio de cero petróleos.
- Mejorar el rendimiento energético de las calderas o proponer equipos nuevos.
- Contribuir a eficientar los procesos y obtener productos de mejor calidad.

³ www.economía y negocios online.com

- Ahorro de energía debido a la disminución en el consumo de combustible, disminuyendo el costo económico de operación de las calderas y mejorar el cuidado del ambiente con la disminución en la emisión de contaminantes a la atmósfera por consumo de combustóleo en las calderas.

1.1.2. VIABILIDAD TÉCNICA DEL USO DEL BAGAZO COMO COMBUSTIBLE

El presente trabajo se orienta a una investigación relacionada con el campo de la optimización de calderas, los combustibles y su combustión y tiene impacto en el ahorro de energía y el cuidado del medio ambiente.

Desde el punto de vista técnico y debido a la necesidad de ahorro de energía y la protección del medio ambiente, al disminuir la emisión de gases producto de la combustión a la atmósfera, se considera que no existe inconveniente para realizar esta investigación, por lo que es 100% factible, de llevar a cabo.

La disminución en la quema de combustibles fósiles, trae como resultados: Ahorro de energía, disminución del costo económico de la producción, disminución de la emisión de dióxido de carbono y gases contaminantes y de efecto invernadero a la atmósfera, reducción del costo unitario de generación de vapor, mejorar la percepción económica de los productores de caña de azúcar de la zona del ingenio Benito Juárez García. Por otra parte, el consumo de combustibles fósiles en la industria de la transformación, ha generado grandes emisiones de gases contaminantes a la atmósfera como es el caso de CO₂, contribuyendo directamente con la constante variación del clima y un no muy lejano cambio climático. Es por esto que como una forma de ayudar a la protección del medio ambiente, surge la inquietud de realizar este estudio con la meta de contribuir con el ingenio azucarero en busca de alternativas que disminuyan el consumo de combustóleo en sus calderas.

1.2. OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO

Realizar una evaluación energética de la caldera No.4, del Ingenio Benito Juárez García, de H. Cárdenas, Tabasco, con el fin de que se justifique la

utilización del bagazo de caña como único combustible y de ésta manera prescindir del consumo de combustóleo.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar un análisis energético de las condiciones actuales de operación de la caldera No. 4.
2. Evaluar el rendimiento energético del bagazo de caña como combustible, a través de un simulador diseñado para tal efecto.
3. Establecer las ventajas de la adecuada utilización del bagazo de caña como combustible en las calderas.
3. Ahorrar energía y cuidar el medio ambiente al quemar un combustible renovable.
4. Recomendar modificaciones técnicas y económicas a todo el sistema, las cuales permitan incrementar la eficiencia energética de operación de los generadores de vapor.

1.4. PROBLEMA CIENTÍFICO AL QUE OBEDECE

La disminución de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera derivado de la quema de combustibles fósiles han obligado a las industrias a buscar nuevos combustibles los cuales puedan sustituir los tradicionales, tal es el caso del ingenio azucarero Benito Juárez García, que posee 5 calderas y en dos de ellas, la No.4 y No. 5, consume un buen porcentaje de combustóleo. Esta empresa tiene instituida una política de cero petróleos en sus procesos, contribuyendo de ésta manera al cuidado del medio ambiente en busca de una industria limpia y con menos emisiones de contaminantes.

El bagazo de caña, es la materia prima que se produce por el proceso de extracción de azúcar de caña en los ingenios azucareros, por lo que este hecho apoya el gasto de la empresa por efecto del consumo de combustible, lo que redundaría en la mejora de las condiciones económicas de los productores y menos emisión de contaminantes.

Se plantea este problema por la necesidad que tiene la planta de contar con vapor de alta calidad y poseer equipos más eficientes, lo que redundaría en el ahorro

de energía al quemar una menor cantidad de combustóleo, al lograr, eficientar los procesos que se realizan dentro de la planta, disminuir el costo económico por el consumo de combustible, disminuir la emisión de contaminantes a la atmósfera por efecto de la quema de combustóleo, contribuir con el grupo azucarero México con su política de cero petróleo en sus ingenios azucareros y beneficiar a los productores de caña de la región.

1.5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿De qué manera influye en la eficiencia de la caldera número 4, el uso adecuado del bagazo de caña como combustible?
2. ¿Cómo impacta el ahorro de combustible en la caldera No. 4 en la economía de la empresa?

VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Las variables de investigación se muestran en la tabla 1.3

Tabla 1.3. Variables de investigación

VARIABLE	DEFINICION GENERAL	DEFINICION OPERACIONAL	CLASIFICACION	OBSERVACIONES
Costo del combustible usd/año	Define los costos del combustóleo	Costos fijos aparecen en los estados de cuenta del ingenio	Cuantitativa económica	Se toma medida del consumo por zafra y varia anualmente dependiendo del tipo de cambio
Sistema	Define el lazo termodinámico	Está en función de la cantidad de los recursos energéticos usados en la empresa	Termodinámica Independiente	Consumos de combustóleo contra el uso de vapor
Eficiencia de la caldera	Define la efectividad de la misma	Está en función de la operación de la misma	Cuantitativa dependiente	Medida por zafra

1.6. HIPÓTESIS CIENTÍFICA

- Hic: Los costos de producción para la obtención de azúcar de caña disminuyen por la utilización del bagazo de caña como combustible, en vez del combustóleo.

1.7. TIPO DE DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El experimento consiste en identificar y tomar las variables involucradas en la combustión mismas que serán medidas de acuerdo al tipo de combustible utilizado, bagazo y combustóleo en la caldera número 4, con un manejo estricto apegado a la bibliografía base, con el fin de probar la hipótesis. El experimento se considera pasivo, ya que no se pueden manipular las variables. El muestreo, las variables, la muestra y el manejo de datos estadísticos, se llevará a cabo con el apoyo del STAT y el EXCEL.

1.8. FORMA DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN DE EXPERIMENTACIÓN

La recolección de la información se hará tomando en cuenta los datos de zafras anteriores, asentadas en bitácoras, registros de operación de calderas, registros de consumos de combustibles y los datos obtenidos en forma electrónica.

1.9. TIPO DE MODELACIÓN MATEMÁTICAS A APLICAR

Los modelos matemáticos que resulten de esta Investigación, como son la determinación del valor calórico del combustible, los balances térmicos, la determinación de los volúmenes de los gases productos de la combustión, los cálculos energéticos, las presiones, temperatura, densidad, entre otras, se consideran que podrán ser evaluadas con la ayuda de Excel y TPX y STAT.

1.10. BENEFICIOS DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación tiene como fin realizar un análisis de energía de la caldera No. 4 del ingenio azucarero Benito Juárez García con base en la quema de bagazo de caña, los resultados obtenidos deben contribuir con la política de

cero petróleo que actualmente aplica la empresa, permitir el ahorro de energía, disminuir a su mínimo los costos de operación de los generadores de vapor en la planta, e incidir directamente en los costos de producción de azúcar de caña, así como contribuir al cuidado del medio ambiente al buscar un equilibrio con las emisiones de los gases productos de la combustión.

1.11. MÉTODO A EMPLEAR

La investigación buscará disminuir los costos de operación de los generadores de vapor del Ingenio Presidente Benito Juárez García, por el hecho de utilizar bagazo de caña como combustible en calderas, en busca de la óptima eficiencia de combustión, en equilibrio con las emisiones de gases productos de la combustión y cuidado del medio ambiente. Para esto se caracterizarán los puntos y líneas de flujo del sistema, la eficiencia de la planta térmica, la 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.

CAPITULO II
DESCRIPCION GENERAL DE LA
EMPRESA

CAPITULO II DESCRIPCION GENERAL DE LA EMPRESA

2.1. ANTECEDENTES

El municipio de Cárdenas se localiza en la región de la Chontalpa del Estado de Tabasco, teniendo como cabecera municipal a la ciudad de H. Cárdenas, Tabasco, como se muestra en la figura 2.1. Se ubica en el paralelo 17°59' latitud norte y 91° 32' de longitud oeste.



Figura 2.1. Plano de localización del municipio de Cárdenas, Tabasco.

Colinda al norte con el Golfo de México, y los municipios de Paraíso, Tabasco y Comalcalco, Tabasco; al sur con el estado de Chiapas y Huimanguillo, Tabasco; al este con los municipios de Comalcalco, Tabasco, Cunduacán, Tabasco y el estado de Chiapas; al oeste con el municipio de Huimanguillo, Tabasco y el estado de Veracruz⁴. Su clima es cálido-húmedo lluvias abundantes en verano, un régimen normal de calor con cambios térmicos en los meses de noviembre, diciembre y enero; se tiene una temperatura media anual de 26 °C, siendo la máxima media mensual en mayo con 30.3°C, y la mínima media en diciembre y enero de 13°C, a la vez, la máxima y la mínima absoluta alcanzan los 40°C y 10 °C, respectivamente.

⁴ INEGI cuaderno estadístico municipal, 1998

El régimen de precipitaciones se caracteriza por un total de caída de agua de 2,643 milímetros/año, con un promedio máximo mensual de 335 milímetros en el mes de septiembre y un mínimo mensual de 10 milímetros en el mes de abril.

Las mayores velocidades del viento se concentran en los meses de noviembre y diciembre con 30 km/h, presentándose en junio las menores, que son de 20 km/h.

El municipio tiene una superficie de 211,200 hectáreas. De acuerdo al Cuaderno Estadístico Municipal edición 1998 del INEGI, la superficie agrícola era del 25%, la pecuaria 54%; la forestal del 6%; y el 15% para áreas urbanas, cuerpos de agua y áreas improductivas. Se recibe además información a través de estaciones de radio y periódicos de la capital del estado, y señal de televisión con cobertura estatal y nacional, y un sistema de comunicación telefónica fijo y móvil, así como televisión por cable y vía satélite, internet vía satélite.

Se cuenta, con una terminal de autobuses de primera y segunda clase, 11 oficinas postales (2 administraciones y 9 expendios ubicados en pequeños comercios e instituciones públicas), 3 oficinas de la red telegráfica, telefonía particular, telefonía automática rural y radio telefonía y cuatro Instituciones de Educación Superior, dentro las que destacan la Universidad Popular de la Chontalpa y el Colegio de Posgraduados, Campus Tabasco.

A Cárdenas se puede arribar por carretera; hay en el municipio 811.50 kilómetros de carreteras pavimentadas de las cuales 80.30 kilómetros son de carreteras federales pavimentadas, y 259 kilómetros de carreteras estatales, de estas últimas 155.00 kilómetros están pavimentados y 104.20 kilómetros se encuentran revestidos⁵.

Las principales carreteras que comunican al municipio son:

Carretera federal 180 Villahermosa – Cárdenas – Coatzacoalcos.
Carretera federal 187 entronque con Santa Cruz - Paraíso – Comalcalco – Cárdenas.

Carretera federal 187 Malpaso – Huimanguillo – Cárdenas.

La autopista OLMECA Cárdenas- Tonalá, mostrada en la figura 2.2

⁵ INEGI cuaderno estadístico municipal 1998



Figura 2.2 Carretera Cárdenas-Tonalá, a la altura del Km 32 se ubica la planta.

Con el objeto de incorporar a la región de la Chontalpa tabasqueña un proyecto de desarrollo agropecuario, en 1965 el gobierno federal proveyó a la Comisión del río Grijalva, dependencia de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), de instrumentos legales y financieros para la ejecución de obras fundamentales de protección, como presas de control, canales de riego y drenaje, agua potable, alcantarillado, drenación de pantanos, campaña contra plagas y los conexos como, vías de comunicación y trabajo de fomento agrícola entre otros.

El propósito era incorporar 352 mil hectáreas a la producción divididas en secciones de 5 mil hectáreas, cada una para otorgarse en propiedad ejidal a grupos de 500 familias de campesinos.

Los cultivos proyectados fueron arroz, caña de azúcar, cacao, maíz, plátano y cítricos. En su aplicación, el Plan Chontalpa ha pasado por diversas etapas y ha tropezado con dificultades, que han exigido ajuste y modificaciones. Destaca el municipio como principal productor en el estado de cacao, caña de azúcar y el coco.

En 1997 la superficie sembrada fue de 52,517 hectáreas. De ellas, la caña de azúcar ocupa 13,229 hectáreas que representa el 25.19%; entre otros cultivos.



Figura 2.3 Vista lateral del ingenio azucarero Benito Juárez García.

La industria azucarera en Cárdenas, ha venido a fortalecer el sector económico del municipio y el estado por ser generadora de un número considerable de empleos desde el año de 1974 en que se fundó el Ingenio Presidente Benito Juárez García, perteneciente actualmente al grupo GAM, el cual es uno de los principales productores de azúcar con costos más bajos de México, debido al suministro de caña de azúcar de alta calidad, instalaciones de procesamiento eficientes y economías de escala, actualmente posee cuatro Ingenios en la República Mexicana entre los que destaca el Ingenio Presidente Benito Juárez, el cual está certificado bajo la norma de calidad ISO 9001 2008. La planta consta de cinco calderas, del tipo acuotubular fabricadas para manejar presiones muy altas hasta de 1960 kpa. Para el funcionamiento de una caldera es necesario que existan agua, aire y combustible. El agua es la sustancia de trabajo que al cambiar su estado físico se convertirá en vapor. El combustible es la fuente de energía que proporciona el calor necesario para cambiar el estado del agua (estas calderas consumen básicamente bagazo al 48% de humedad, cuyo poder calorífico es de 1928.98 kJ/kg seco con un porcentaje mínimo de combustóleo cuyo poder calorífico es de 41,870.98 kJ/lit). La política actual que rige la

producción energética de la planta es llegar a cero petróleos. Los gases producto de la combustión, son expulsados por la chimenea con una temperatura de 365 C la cual se puede aprovechar para precalentar el agua hasta una temperatura tal que el tiempo que tarde en la caldera sea menor, lo que traerá como resultado un menor consumo de combustible, la figura 2.4 nos muestra una toma aérea donde se pueden observar el área de calderas y las cinco chimeneas que la integran.

El ingenio azucarero presidente Benito Juárez García es una industria de la transformación, ya que la materia prima que procesa es la caña de azúcar, para dar como producto final el azúcar y sus derivados mismos que son exportados a USA y Europa, posee el tipo de producción de tecnologías eficientes y economías de escala en pos de lograr la satisfacción de sus clientes

Los datos conocidos de la planta son⁶:

- Molienda= 6800 TCD
- t_o = temperatura del agua a la entrada del economizador = 95 C
- P= Peso del gas que pasa a través del economizador en Kg/hr =276651.28
Lb/hr
- Vapor generado=76308 Lb/hr
- Combustóleo quemado= 1888.65 Lb/hr
- Bagazo quemado=37319.5 Lb/hr

⁶ Bitácora de caldera No. 4, ingenio presidente Benito Juárez, 20007



Figura 2.4 Vista aérea de la planta y la ubicación del área de calderas

2.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El ingenio presidente “Benito Juárez García”, se encuentra ubicado en el poblado C-27 “ingeniero Eduardo Chávez Ramírez”, del plan Chontalpa, a 27 kilómetros de la Ciudad de Cárdenas, Tabasco.

Se tiene acceso al ingenio por la carretera del golfo a la altura del Km 100, de la carretera Villahermosa-Coatzacoalcos, o recientemente por la carretera Cárdenas-Tonalá, desviándose en el Km 26, para incorporarse a la Villahermosa-Coatzacoalcos, figuras 2.5 y 2.6, 2.7.

Cuenta con una superficie cultivada de alrededor de 13,000 hectáreas, dentro de las cuales se ubican 10 ejidos colectivos del plan Chontalpa, dos grupos solidarios y dos dependencias oficiales.



Figura 2.5 Localización del municipio de Cárdenas, Tabasco.



Figura 2.6 Croquis de localización del Ingenio azucarero Benito Juárez



Figura 2.7 Ubicación de la planta y sus caminos de acceso

2.3. MISIÓN

Producir y transformar caña de azúcar, distribuir productos edulcorantes y sus derivados, así como la producción de energía renovable con ingenio eficiente y responsable, satisfaciendo los requerimientos de los clientes, accionistas y colaboradores, mediante la mejora continua y la calidad de nuestros procesos.

2.4. VISIÓN

Ser una empresa de clase mundial en la industria agrícola alimentaria, con unidades de negocio diversificadas.

2.5. OBJETIVOS Y METAS

Objetivos. Satisfacer las expectativas de nuestros clientes, proporcionándoles productos que cumplan los requisitos establecidos, trabajando mediante una cultura y sistema de mejora continua que nos permita ser los mejores en el mercado.

Metas. Satisfacer amplia y permanentemente las expectativas y necesidades de nuestros clientes, así como apoyar proyectos de ahorro de energía referidos a la utilización de cero combustóleo en los procesos.

2.6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL AZÚCAR DE CAÑA

La caña extraída de los campos de cultivo, entra primeramente a un área de recepción, descargándose en dos mesas alimentadoras construidas de fierro estructural y láminas de fierro con superficie de 9.0 m de longitud por 7.30 m de ancho cada una, equipadas para su preparación con motores eléctricos de 15 HP acoplados directamente a un reductor de velocidad. Posteriormente la caña pasa a un área donde se encuentran tres juegos de cuchillas con 42 hojas cada una accionada con motores eléctricos de variada capacidad, donde se corta la caña en trozos para posteriormente pasar a la zona de desfibrado donde la caña es rasgada en tiras sin extracción de jugo. La caña salida de la desfibradora entra a un proceso de desmenuzado, donde se quiebra y exprime la estructura de la caña y se extrae gran parte del jugo. La materia salida del área de desmenuzado se conduce a los molinos de cuarta masa para ser exprimidos y extraer todo el jugo del producto. El jugo extraído de la desfibradora es desviado de los pachaquiles para poder ser muestreado y posteriormente unirse al jugo extraído de los molinos en el área de pachaquiles. El jugo extraído, es bombeado a los tanques pesadores o receptores, mientras el bagazo recolectado, es transportado a través de un colador de pachaquil inclinado para recircularlo a la desmenuzadora. El bagazo salido del sexto molino, es transportado a través de un conductor inclinado de tablillas de madera para alimentar como combustible a las calderas del ingenio.

El jugo del tanque receptor, se pasa a un área de sulfitación y posteriormente al área de alcalizado, llegando al área de calentadores primarios. El jugo es transportado hacia los clarificadores, de donde se conduce a los filtros de cachaza. El jugo de los filtros y de los clarificadores se concentra en el área de calentadores secundarios, para ser bombeado al área de evaporadores con el fin de reducir la humedad presente en el jugo.

El jugo salido de los evaporadores entran al área de tachos con el objeto de evaporar el agua del mismo con la ayuda del vapor generado en calderas, ésta evaporación se lleva acabo al vacío con el fin de realizar la ebullición a menor temperatura a fin de evitar pérdidas de azúcar cristalizable y disminución del tiempo de ejecución. De los tachos sale como templa y pasa a los porta templa, llegando finalmente a la zona de centrifugado, donde se separa el azúcar de la miel, para posteriormente mandar el azúcar húmeda al área de secado y envase, luego a bodega y finalmente a transportación para exportar.

2.7. SERVICIOS AUXILIARES CON QUE CUENTA LA PLANTA

Para la generación de vapor se cuentan con los siguientes equipos:

Tres bombas de alimentación de agua de la marca WORTHINGTON, del tanque 406, al tanque deareador, con capacidad de flujo de 960 GPM, una velocidad de 1750 rpm y 50 HP.

Una bomba auxiliar de agua de alimentación a caldera, utilizada para el arranque de la caldera, con capacidad de flujo de 500 GPM, 3600 RPM y 200 HP.

Tres bombas principales de agua de alimentación a calderas, trabajan con una temperatura de 110 C, con capacidad de flujo de 1250 GPM, 3600 rpm y 500 HP.

Dos bombas de recepción y almacenamiento de combustible, con capacidad de flujo de 150 GPM, 900 RPM y 38.2 HP.

Dos bombas de alimentación de combustóleo a calderas, trabajan a temperaturas que oscilan entre los 105 y 110 C, con capacidad de flujo de 150 GPM, 1800/520 RPM y 25 HP.

Un sobre calentador de vapor, el cual seca el vapor saturado que sale de la caldera, para ser utilizado en turbinas sin efectos dañinos a los alabes de la misma.

Un pre calentador y recalentador de aire, con el efecto de acondicionar el aire que es utilizado en la cámara de combustión y eficientar la temperatura de flama en la cámara u hogar de la caldera.

Ventiladores de tiro forzado con el fin de darle una adecuada circulación ya sea a los gases producto de la combustión o en su caso al aire de alimentación de la caldera.

Además:

Bomba para el tanque de reactivos químicos con capacidad de 5 HP, Bomba para recirculación de lodos de 5 HP, bomba para el retro lavado de planta de 5 HP, bomba para transferencia a filtros de planta potabilizadora con capacidad de 20 HP, bomba dosificadora a calderas de 1/3 de HP, motor de 32 HP para conductor inclinado de bagazo, motor de 120 HP para conductor horizontal de bagazo, motor de 32 HP, para retorno de bagazo, entre otros equipos auxiliares que se relacionan con la generación de vapor.

2.8. DATOS DEL CONSUMO HISTÓRICO DE COMBUSTÓLEO

En el año 2007, los consumos y costos de combustibles, fueron los que se muestran en la tabla 2.1, donde se puede observar que el mes de mayor gasto en consumo de combustible para el Ingenio, azucarero Benito Juárez García, es el mes de mayo, por ser el de mayor aprovechamiento en la molienda, ya que en promedio se trabajaron 31 días.

Tabla 2.1 Consumos y costos de combustible en el ingenio azucarero Benito Juárez García.

MES	DIAS TRAB./MES	CONSUMO DE COMBUSTOLEO DIARIO (Lts/mes)*	PRECIO UNITARIO DEL COMBUSTOLEO (\$/Lt)	COSTO DEL ENERGETICO \$/MES
ENERO	24	486,921.84	3.042	1,481,216.24
FEBRERO	28	568,075.48	3.042	1,728,085.61
MARZO	30	608,652.30	3.042	1,851,520.30
ABRIL	28	568,075.48	3.00	1,704,226.44
MAYO	31	628,940.71	3.00	1,886,822.13
JUNIO	30	608,652.30	3.00	1,825,956.90
JULIO	4	81,153.64	3.00	243,460.92
TOTAL	175	3,550,471.75		10,721,288.50

CAPITULO III
ANALISIS TEORICO DE LA
INVESTIGACION

CAPITULO III ANALISIS TEORICO DE LA INVESTIGACION

3.1. TIPOS DE CALDERAS Y DEFINICIÓN

El empleo de vapor como fuerza motriz, se remonta a muchos años atrás, los primeros registros datan del siglo I A.C. Sin embargo estos fueron intentos aislados, no siendo hasta principios del siglo XVIII cuando se inicia formalmente la utilización del vapor en forma generalizada. Las primeras calderas que se emplean fueron las del tipo tetera (Shell), un gran recipiente relleno de agua y calentada en su parte inferior, de forma simultánea surgieron las primeras calderas de tubos de humo. Por las características del diseño, estas primeras calderas, estuvieron sujetas a explosiones y accidentes, habiendo puesto en riesgo el desarrollo industrial de la época. La figura 3.1, muestra el diagrama de una caldera de tubos de humo.

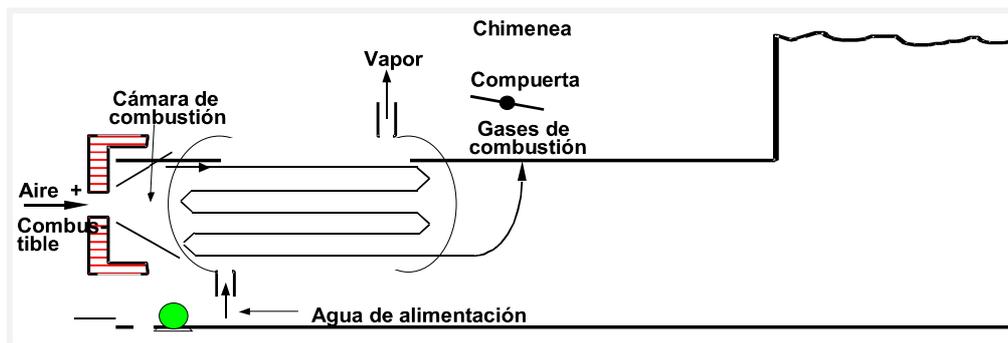


Figura 3.1 Caldera de tubos de humo

A raíz de esa problemática se buscó el diseño que pudiera otorgar seguridad a la operación de las calderas. Se buscaba desarrollar un diseño de caldera que tuviera la mayor parte de la superficie de calentamiento formado por tubos, los cuales transportaran y permitieran el calentamiento de un menor volumen de agua, produciendo con esto menos presiones y evitando consecuentemente las rupturas frecuentes de aquellas partes sometidas a presiones elevadas. Stephen Wilcox introdujo en 1856 una modificación sustancial al diseño tradicional ya descrito, las características básicas de su desarrollo permitían una mejor circulación de agua y una mayor superficie de calentamiento, logrando con ello tener una caldera inherentemente segura.

Desde la modificación realizada por Wilcox, los conocimientos sobre el vapor y el agua han aumentado grandemente, sus propiedades han sido determinadas y tabuladas adecuadamente, se han obtenido nuevos conocimientos de transmisión de calor, flujo de fluidos y circulación de agua-vapor, así como medios para quemar grandes cantidades de combustibles y procesar los subproductos de la combustión con equipo de control de emisiones y además se han adoptado códigos y normas para regular el diseño, fabricación e inspección de todas aquellas partes sujetas a presión.

Hoy el vapor juega un papel muy importante en la industria como transportador de energía térmica y por sus características termodinámicas y su costo de generación es hoy por hoy el medio más empleado en aquellas instalaciones que requieren en su proceso productivo transferir calor, acondicionar atmósferas, sustancias o materiales, el accionamiento motriz directo, creación de vacío por eyectores, además de otras operaciones más específicas como limpieza, deodorización, agitación, etc.

Las calderas las hay de tubos de humo y de tubos de agua, la caldera No. 4, del ingenio efecto de esta investigación es acuatubular del tipo horizontal, como se muestra en la figura 3.2 y figura 3.3, de la marca B&W, CL32N054+2, una capacidad de 45,360 Kg de vapor por hora, operando a 25 Kg/cm² Manométrica, de 250 a 300 °C, con un consumo de vapor aproximado de 620 Kg de vapor por tonelada de caña, para una molienda de 7000 ton/día, las mediciones realizadas arrojan los siguientes datos:

- Generación de vapor 55 Ton/hr
- Presión de trabajo 20 Kg/cm²
- Flujo de bagazo de 13.484 Ton /hr
- El flujo de combustible es de 0.6824 Ton/hr
- Temperatura en el hogar de la caldera 800 C
- Temperatura a la salida de la chimenea 212 C

- Temperatura del aire en el calentador 43 C a la entrada y 265 C a la salida
- Presión del agua de alimentación 25 Kg/cm²
- Temperatura del agua en el domo 110 C
- Temperatura del aire de entrada a quemadores 265 C
- Humedad del bagazo del 42 al 48%
- Temperatura del agua de alimentación 30 C
- Temperatura de vapor saturado 315 C
- Exceso de oxígeno del 5.2%
-



Figura 3.2 Caldera acuotubular típica (parte frontal)



Figura 3.3. Vista lateral del sistema de calderas del ingenio Benito Juárez.

3.2. ANÁLISIS TEÓRICO DEL ESTUDIO ENERGÉTICO EN GENERADORES DE VAPOR

El propósito de un diagnóstico energético, es dar a conocer la problemática, bajo condiciones actuales, del equipo con base a los resultados del levantamiento en campo y al análisis energético realizado, los cuales permiten conocer los flujos de combustibles, vapor gases de combustión, energía y con ello la eficiencia energética del equipo.

3.2.1. METODOLOGÍA

Las metodologías efecto de estudio en éste apartado, tienen el propósito de mostrar posibles caminos a seguir en la investigación a la vez de:

- Evaluar las condiciones actuales de operación del equipo.
- Establecer su potencial de ahorro energético en función de sus características de diseño.

- Recomendar modificaciones técnicas y económicamente viables que permitan incrementar su eficiencia energética de operación.

METODOLOGÍA CONAE⁷.

Es importante señalar que la metodología puede ser aplicada por una empresa externa o por personal especializado de la empresa, cubre los siguientes aspectos:

- Mediciones e instrumentos de medición, indica la forma como se deben llevar a cabo las mediciones, los instrumentos a utilizar y como resolver el problema cuando el instrumento de evaluación no existe.
- Las herramientas de cálculo. La CONAE, propone una serie de formatos que dan sustento al análisis posterior.
- Las medidas de ahorro. Es importante realizar un estudio a toda la instalación en cuanto a su aislamiento en tuberías y tanques, así como fugas y purgas en líneas de vapor. Evaluación de los posibles escenarios para el ahorro en el consumo de combustible.
- La evaluación económica. Las medidas susceptibles de ser evaluadas como resultado del análisis previo, se evaluarán económicamente y se debe realizar un reporte, mismo que contará con recomendaciones y sugerencias técnicas y económicas viables, para mejorar la eficiencia energética del equipo.

METODOLOGÍA ALBERTO PLAUCHÚ⁸

El libro de Eficiencia en Calderas de Alberto Planchú, propone una metodología para el diagnóstico típico en calderas de vapor, la cual contiene lo siguiente:

- Obtención de la información necesaria de la instalación
- Clasificación y análisis de la información técnica y de consumos energéticos
- Análisis de los costos energéticos en relación a los de producción

⁷ Metodología para el diagnóstico energético de calentadores a fuego directo. CONAE 2003

⁸ Alberto Plauchú, "Eficiencia en calderas", impreso en México, 1995, pag. 75

- Visita e inspección de recorridos a las instalaciones
- Planeación de estrategias de estudios, diagnósticos y mediciones
- Verificación e instalación de instrumentación y accesorios de medición y pruebas
- Campaña de mediciones y pruebas
- Análisis de los datos obtenidos, cálculos y elaboración de conclusiones y propuestas
- Presentación y discusión de propuestas
- Evaluación económica y elaboración de informes
- Desarrollo a detalle de las propuestas aprobadas
- Presentación de informe final y resultados

Para el diagnóstico económico, propone la siguiente metodología de evaluación del diagnóstico:

- Mediciones preliminares
- Mediciones detalladas de resultados (para grandes inversiones). En el cual se propone un análisis de beneficio/costo, el periodo de recuperación de la inversión y la tasa de recuperación mínima atractiva
- Energía y costos energéticos
- Un análisis marginal, debido a que muchas inversiones típicas como las de uso racional de la energía, se caracterizan porque la tasa de retorno decrece conforme aumenta el nivel de inversión

Libro metodologías, realizado por profesores cubanos. Dichos profesores proponen esta guía para realizar pruebas a los generadores de vapor y asegurar que trabajen en los niveles óptimos y de ésta forma contribuir a la campaña de ahorro de energía que hoy día es tarea de todos. Esta guía contempla lo siguiente:

- Cálculo del valor calórico de combustibles (bagazo y combustóleo a través de la siguiente ecuación

$$Q_{bc} = 339.147 C^t + 1256.1 H^t + 108.86 (S^t - O^t) - 25.12 (9H^t + W^t) \quad (\text{Kj/kg}) \quad (3.1)$$

- Cálculo de los volúmenes productos de la combustión. Se debe calcular los volúmenes productos de la combustión a través de sus ecuaciones

respectivas de: volumen teórico de aire seco, volumen teórico de los productos de la combustión, volumen de los gases triatómicos, volumen teórico del nitrógeno y volumen teórico del vapor de agua, volumen real de gases seco, volumen real del vapor de agua, volumen de gases, las fracciones volumétricas de los gases triatómicos, las fracciones volumétricas del vapor de agua y las fracciones volumétricas del total de los gases, volumen de cenizas, volumen de gases cuando existe recirculación.

- Determinación de las entalpías del aire y los productos de la combustión. Se realizan los cálculos de la siguiente manera: entalpía de la parte gaseosa de los productos de la combustión, entalpía teórica de los gases y entalpía teórica del aire, entalpía de las cenizas y las entalpías de los productos de la combustión.
- Determinación del balance térmico del generador de vapor. Se realiza el cálculo de la siguiente manera:

DETERMINACIÓN DE LOS CALORES.

CALOR DISPONIBLE CON LA ECUACIÓN SIGUIENTE

$$Q_d = Q_{bc} + Q_{pca} + Q_{at} + Q_{fc} \quad (\text{Kj/kg}) \text{ o } (\text{Kj/m}^3) \quad (3.2)$$

CÁLCULO DEL CALOR FÍSICO DEL COMBUSTIBLE

$$Q_{fc} = C_c (T_c - 273) \quad (\text{Kj/kg}) \text{ o } (\text{Kj/m}^3) \quad (3.3)$$

CÁLCULO DEL CALOR ESPECÍFICO DEL COMBUSTIBLE

PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

$$C_c = 1.783 + 0.0025 (T_c - 273) \quad (\text{Kj/kg } ^\circ\text{K}) \quad (3.4)$$

PARA COMBUSTIBLES SÓLIDOS

$$C_c = 0.042 W^t + C_{cs} (1 - 0.01W^t) \quad (\text{Kj/kg } ^\circ\text{k}) \quad (3.5)$$

CÁLCULO DEL CALOR INTRODUCIDO POR EL VAPOR DE ATOMIZACIÓN

$$Q_{at} = C_{at} (I_{at} - I_{vge}^*) \quad (\text{Kj/kg}) \quad (3.6)$$

CÁLCULO DEL CALOR FÍSICO DEL AIRE EN EL PRE CALENTADOR DE AIRE

$$Q_{pca} = (\beta_{ca} + \Delta\alpha_{ca}) V_a (I_{spc} - I_{af}) \quad (\text{Kj/kg}) \text{ o } (\text{Kj/m}^3) \quad (3.7)$$

DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR.

Las pérdidas de calor, las ecuaciones de cálculo de dichas pérdidas, aparecen plasmadas en el apartado de mediciones y cálculos: Pérdidas de calor con los gases de escape, pérdidas de calor por incombustión química, pérdidas de calor por incombustión mecánica, pérdidas de calor al exterior a través de las paredes del generador de vapor, pérdidas de calor con la ceniza extraída del horno, pérdidas de calor por el enfriamiento de vigas y paneles no incluidos en el sistema de recirculación.

CÁLCULO DE LA EFICIENCIA BRUTA DEL GENERADOR.

Para calcular el valor de la eficiencia bruta del generador, se resta del 100%, todas las pérdidas mencionadas anteriormente expresadas en porcentajes.

$$\eta_b = 100 - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7) \quad (\%) \quad (3.8)$$

CÁLCULO DEL CALOR ÚTIL DEL GENERADOR.

El calor útil del generador está en función la eficiencia bruta y el calor disponible.

$$Q_u = \eta_b * Q_d / 100 \quad (\text{Kj/kg}) \text{ o } (\text{Kj/m}^3) \quad (3.9)$$

Se debe de determinar el consumo de combustible quemado o en su caso efectuar las mediciones correspondientes para obtener dicho valor.

CÁLCULO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE QUEMADO.

$$\beta_c = \beta (100 - q_4) / 100 \quad (\text{Kg/s}) \text{ o } (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3.10)$$

Determinación de los calores del horno y cálculo del mismo en el caso de rediseño. Previo al cálculo térmico del horno debe realizarse el cálculo geométrico del mismo y posteriormente calcular: el calor liberado en el horno, la temperatura adiabática del horno, las entalpías de los productos de la combustión a la salida del horno, el calor específico de los productos de la combustión a la salida del horno, la efectividad térmica del horno, el plano máximo de temperaturas, la emisividad de la flama, la emisividad térmica del horno, el coeficiente de

conservación de calor, la temperatura a la salida del horno, la absorción de calor en el horno y la carga térmica superficial en el horno.

- Determinación del festón, tubos evacuadores y haces de calderas, es aquí donde se calculan los efectos de transferencia de calor que se lleva a cabo en el generador de vapor.
- Cálculos económicos.
- Se deben realizar en caso de ser necesario el cálculo del sobre calentador radiante y semiradiante, sobre calentador convectivo, economizador, calentador y efectuar el cálculo hidrodinámico.

3.3. NORMATIVIDAD REFERIDA AL ESTUDIO ENERGÉTICO EN CALDERAS

La normalización del estudio energético en calderas NOM-002 ener 1995⁹, aun y cuando a partir del 21 de agosto de 2003¹⁰, quedó cancelada, se toma como referencia debido a la importancia de los parámetros que se analizan en el proceso de ahorro de energía. Los problemas por los que queda cancelada se deben a que al 21 de agosto de 2003, no se había logrado desarrollar la infraestructura para la evaluación de la conformidad con esta norma por falta de interés en los sectores fabricante y consumidor.

Esta Norma Oficial Mexicana establece los niveles mínimos de eficiencia térmica que deberán cumplir las calderas paquete nuevas de tubos de humo y de tubos de agua sin equipo de recuperación de calor.

También especifica el método de prueba que debe aplicarse para verificar dicho cumplimiento.

Campo de aplicación. Esta Norma cubre a las calderas paquete nuevas de tubos de humo y tubos de agua sin equipo de recuperación de calor, comercializadas en la República Mexicana por los proveedores, que utilizan combustibles líquidos y/o gaseosos derivados del petróleo con las siguientes características:

⁹ Diario oficial de la federación 26 de diciembre de 1995

¹⁰ Diario oficial de la federación 21 de agosto de 2003

Tabla 3.1 Campo de aplicación de la norma por capacidad de la caldera.

Capacidad	De 100 a 8 000 kW
Presión	Hasta 1 MPa
Temperatura	Saturación

Esta Norma presenta el método de prueba para determinar la eficiencia térmica de en calderas.

Casos Especiales. La gran mayoría de las calderas paquete entre 100 y 8 000 kW operan a presiones menores a 1 MPa, sin embargo existen casos especiales para los cuales se requiere que esta presión sea mayor a 1 MPa a la temperatura de saturación. Esta Norma cubre estos casos especiales en el siguiente intervalo de presiones:

Calderas de tubos de agua: De 1 a 3 MPa

Calderas de tubos de humo: De 1 a 1,7 MPa

Referencias

NOM-008-SCFI Sistema general de unidades de medida.

NOM-005-STPS Relativa a las condiciones de seguridad en los centros de trabajo para almacenamiento, transporte y manejo de sustancias inflamables y combustibles.

NOM-009-STPS Relativa a las condiciones de seguridad e higiene para el almacenamiento, transporte y manejo de sustancias corrosivas, irritantes y tóxicas en los centros de trabajo.

NMX-AA-35 Determinación de bióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno en los gases de combustión.

Reglamento de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social para la inspección de generadores de vapor y recipientes sujetos a presión.

NOM-012 ENER 1996¹¹

La presente Norma, responde a la necesidad de incrementar el ahorro de energía y la preservación de recursos energéticos; además de proteger al

¹¹ Diario oficial de la federación 26 de diciembre de 1996

consumidor de productos de menor calidad y consumo excesivo de combustible, que pudieran llegar al mercado Nacional.

Esta Norma Oficial establece los niveles mínimos de eficiencia térmica que deberán cumplir las calderas paquete de baja capacidad nuevas de tubos de humo y de tubos de agua sin equipo de recuperación de calor.

También especifica el método de prueba que debe aplicarse para verificar dicho cumplimiento.

Campo de aplicación

Esta norma cubre a las calderas paquete de baja capacidad nuevas de tubos de humo y tubos de agua sin equipo de recuperación de calor comercializado en los Estados Unidos Mexicanos, que utilizan combustibles líquidos y/o gaseosos derivados del petróleo, con las siguientes características:

Tabla 3.2 Campo de aplicación por capacidades

Capacidad	De 7,5 a 100 kW
Presión	Hasta 1MPa
Temperatura	Saturación

Esta norma presenta el método de prueba para determinar la eficiencia térmica de estas calderas.

Referencias

NOM-008-SCFI-1993. Sistema General de Unidades de Medida.

NOM-009 ENER 1995

La presente Norma fue preparada por el Instituto Mexicano del Petróleo bajo la coordinación de la Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía y con la colaboración de los siguientes organismos y empresas:

- PETROLEOS MEXICANOS
- ASOCIACION NACIONAL DE FABRICANTES DE AISLAMIENTOS TERMICOS Y ACUSTICOS DE FIBRAS MINERALES, A.C.
- ASOCIACION NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS
- COLEGIO NACIONAL DE INGENIEROS QUIMICOS Y QUIMICOS

La elaboración de la presente Norma, responde a la necesidad de incrementar el ahorro de energía y la preservación de recursos energéticos.

Esta Norma tiene como propósito regular las pérdidas de energía, tanto por disipación al ambiente en sistemas que operen a alta temperatura, como la ganancia de calor en sistemas a baja temperatura mediante el uso adecuado de aislamiento térmico, en instalaciones industriales.

De forma complementaria, se establecen los lineamientos generales para la selección, diseño, especificación, instalación e inspección de un sistema termoaislante.

Campo de aplicación.

Esta Norma cubre los requisitos mínimos generales para la aplicación de aislamientos térmicos de alta y baja temperatura con rango de 198 K (-75°C) a 1088 K (815°C) considerándose como:

- a) Servicio de alta temperatura: Todos aquellos servicios que tengan una temperatura de operación igual o mayor a 310 K (37°C).
- b) Servicio de baja temperatura: Todos aquellos servicios que tengan una temperatura de operación menor a 310 K (37°C).

Todas las temperaturas a que se haga referencia en esta Norma, corresponden a temperaturas máximas de operación del fluido, excepto cuando se mencionen otras.

Esta Norma proporciona instrucciones generales relacionadas con materiales termo aislantes y las condiciones óptimas para el desarrollo e instalación del aislamiento térmico para equipo y tubería en sistemas de alta y baja temperatura.

Limitaciones.

Los criterios aquí marcados se aplicarán dentro del marco de las leyes federales, regulaciones estatales, etc.

La aplicación de termo aislante para temperaturas mayores a 1088 K (815 ° C) o menores que 198 K-75 ° C quedan fuera del alcance de esta Norma.

Esta Norma no contempla los sistemas termo aislantes a base de materiales reflectivos.

Los siguientes sistemas: protección contra fuego, aislamiento térmico para edificios, refrigeradores, aire acondicionado y equipos de ventilación, no se contemplan en el contenido de esta Norma.

A menos que se especifique lo contrario, los equipos con revestimiento refractario no se aislarán.

Cuando en un servicio de alta temperatura se desee pérdida de calor (como en condensadores, enfriadores, etc.) no debe utilizarse termoaislante. Sin embargo, cuando la temperatura superficial sea igual o mayor a 333 K (60°C) será necesario instalar aislamiento térmico para servicio de protección al personal.

Referencias

- Normas oficiales mexicanas:
- NMX-C-230 Fibras minerales en forma de bloque, placa, colchoneta y rollo; rígida, semirrígida y flexible. Especificaciones.
- NMX-C-260 Perlita suelta como relleno. Especificaciones.
- NMX-C-261 Perlita expandida en bloque y tubo. Especificaciones.
- NMX-C-262 Silicato de calcio en bloque y tubo. Especificaciones.
- NMX-C-137 Poliuretano celular. Especificaciones.
- NMX-C-220 Poliuretano celular. Especificaciones.
- NOM-008-SCFI-1993 Sistema general de unidades de medida.

3.4. LA ECONOMÍA ENERGÉTICA DE LAS CALDERAS

La importancia de realizar un análisis termo económico en generadores de vapor radica en el hecho de: identificar los puntos potenciales de pérdidas de energía, evaluar costos de producción y mantenimiento, buscar proyectos que nos ayuden a disminuir el consumo de combustibles fósiles, apoyar la toma de decisiones en la planta referidas a consumos de energía en todos los niveles que la misma empresa maneje y buscar el ahorro económico, en el caso del ingenio, en apoyo a los productores de caña, ya que al disminuir los costos de producción se ven beneficiados indirectamente los productores de caña.

Para el caso de invertir en nuevos proyectos deben tomarse en cuenta lo siguiente:

Análisis de costo-beneficio.

Es necesario realizar el estudio comparativo entre el costo de la inversión y el valor presente neto de los beneficios como se llevó a cabo en la materia de economía energética.

Periodo de recuperación de la inversión, relaciona los costos de la inversión y los beneficios de la misma, mediante la ecuación que se muestra.

$$\text{Periodo simple } (n_s) = \frac{\text{Costo de inversión}}{\text{Beneficios}} \quad (3:11)$$

Tasa de recuperación de la inversión, manejaremos la tasa de recuperación mínima atractiva (TREMA), la cual nos permite conocer la tasa de descuento que reduce el flujo de utilidades netas asociadas con la inversión a un valor presente cero.

3.5. COMBUSTIBLES USADOS EN GENERADORES DE VAPOR PARA INGENIOS AZUCAREROS

Las calderas del ingenio Benito Juárez, consumen combustóleo y bagazo, la figura 3.4, muestra los tanques de combustóleo, hoy día en tres de ellas el combustible utilizado es el bagazo al 100%, el cual contiene entre 42 y 48 % de humedad y las otras dos restantes, dentro de las que se encuentra la No.4, efecto de estudio, consumen bagazo en un 98% y combustóleo en un 2%.

Los porcentajes que se muestran en la tabla 3.3, están en concentraciones de masa del bagazo considerado seco.

Tabla 3.3 Componentes de los combustibles usados en calderas del ingenio

TIPO DE COMBUSTIBLE	CARBONO	HIDRÓGENO	OXÍGENO	AGUA	AZUFRE	NITRÓGENO	CENIZAS
BAGAZO	30.25 %	4.525 %	28.60 %	35 %	0 %	0 %	1.625 %
COMBUSTÓLEO	84.8 %	10.9 %	0.8 %	1.8 %	1.7 %	0 %	0 %



Figura 3.4 Tanque de almacenamiento de combustóleo con capacidad de 2, 480,000 litros y tanque de consumo diario de 48,000 litros de combustóleo

El bagazo de caña, es el principal combustible que queman las calderas del ingenio Presidente Benito Juárez García, el cual presenta un porcentaje de humedad que varía entre el 42 % y 48 %. El bagazo obtenido de la caña de azúcar en la planta, varía entre el 24 % y 29 % del total de caña molida. El bagazo de caña posee un poder calorífico entre 34000 Y 36,000 KJ/KG dependiendo de la humedad y de su composición real y el combustóleo un poder calorífico de 41,870.98 Kj/Kg.

El ingenio tiene una molienda de 6800 toneladas de caña al día, lo que significa que en promedio se generan 1768 toneladas de bagazo diario, los cuales se queman en las calderas.

3.6. TIPOS DE PÉRDIDAS EN GENERADORES DE VAPOR

Las pérdidas a considerar en los generadores de vapor son las siguientes: Pérdidas de calor con los gases de escape, pérdidas de calor por incombustión química, pérdidas de calor por incombustión mecánica, pérdidas de calor al exterior a través de las paredes del generador de vapor, pérdidas de calor con la ceniza extraída del horno, pérdidas de calor por el enfriamiento de vigas y paneles no incluidos en el sistema de recirculación, pérdidas de calor por humedad en el combustible, pérdidas de calor por radiación y pérdidas de calor por residuos combustibles.

3.7. GASES PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

La combustión es el proceso de oxidación rápida de una sustancia, acompañado de un aumento de calor y frecuentemente de luz. En el caso de los combustibles comunes, el proceso consiste en una combinación química con el oxígeno de la atmósfera que lleva a la formación de dióxido de carbono CO_2 , monóxido de carbono CO y agua H_2O , junto con otros productos como dióxido de azufre SO_2 , que proceden de los componentes menores del combustible. El término combustión, también engloba el concepto de oxidación en sentido amplio. El agente oxidante puede ser ácido nítrico, ciertos percloratos e incluso cloro o flúor. En el proceso de combustión de las calderas del ingenio Benito Juárez García, como el combustible que se quema es bagazo en tres de las calderas y bagazo-combustóleo en dos de ellas, los productos de la combustión emanados de estos fenómenos son el CO_2 , el CO , el N_2 y el O_2 , a la vez de algunas cantidades mínimas de SOX Y NOX y cenizas producto de la quema de bagazo de caña, los cuales salen a una temperatura de 780 C. Para la determinación de los volúmenes de los productos de la combustión se debe tener en cuenta el volumen teórico del aire seco, los volúmenes teóricos de los productos de la combustión, los volúmenes reales, la fracción volumétrica de los gases producto de la combustión, la concentraciones de partículas de cenizas, el volumen de los gases cuando existe recirculación y la humedad que se desprende.

3.8. ECUACIONES FUNDAMENTALES

Las ecuaciones que son posibles de utilizar son las siguientes:

- Lazo energético.

$$E1 + E10 = E3 + E2$$

$$E3 = E5 + E4$$

$$E5 = E6 + E7 + E8$$

$$E8 = E9 + E10$$

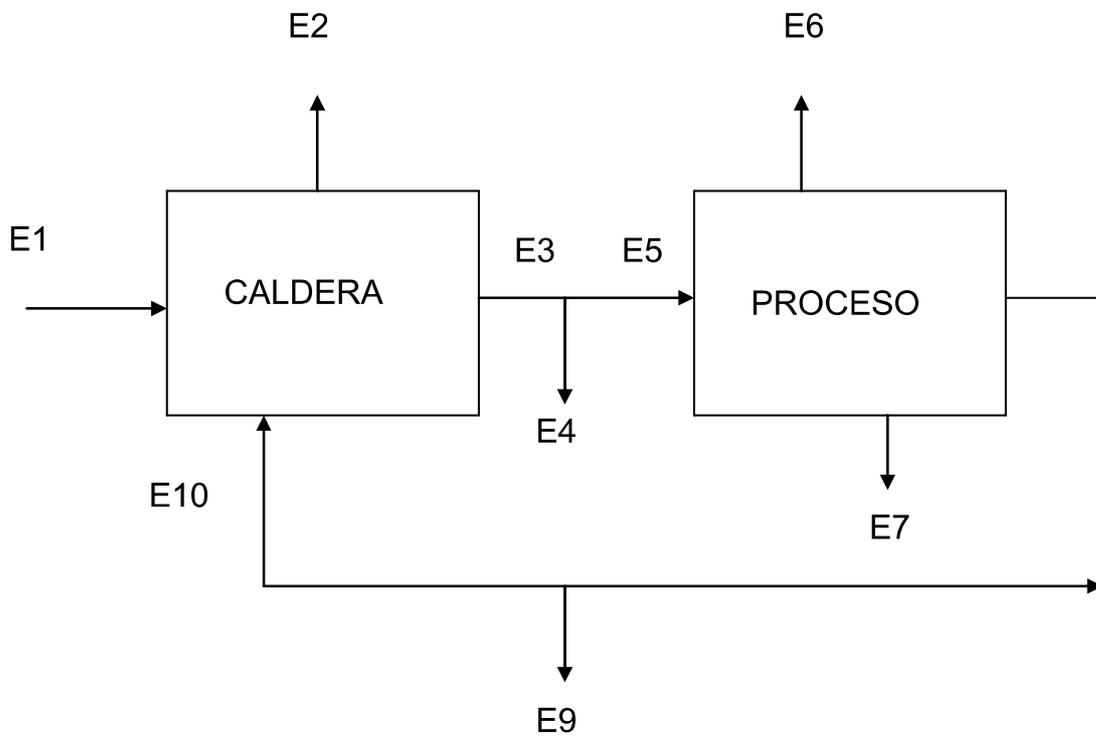


Figura 3.3 Diagrama del proceso

PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.

$$\eta = \frac{Qp}{Qc}$$

(3.12)

$$\eta = \frac{Qc - Q1}{Qc} \quad (3.13)$$

Donde:

η = eficiencia térmica del calentador

Qp = Calor total absorbido por la corriente de proceso

$Q1$ = Calor total perdido en gases de combustión y por paredes

Qc = Calor total cedido por el combustible

- El potencial de ahorro de combustible anual lo podemos calcular como.

$$Aac = Wc \times Cc \times Ha \times [(Ea - Ei) / Ea]$$

(3.14)

Donde:

Aac = Potencial de ahorros de combustible anual (\$ / año)

Wc = Régimen en consumo de combustible en millones de Cal / Hr.

Cc = Costo de combustible por millón de Calorías

Ha = Horas anuales de operación

Ea = Eficiencia actual o eficiencia existente

Ei = Eficiencia ideal

PERDIDAS DE CALOR POR GASES EN CHIMENEA.

$$P1 \times 0.24 \times (Tg - Ta) = Cal/Kg(Btu/lb) \quad (3.15)$$

$P1$ = (Kg(lb) gas seco) / Kg (lb) combustible al quemarse

Tg = Temperatura de gases saliendo de la unidad °C

Ta = Temperatura del aire de combustión entrando a la unidad °C

- La eficiencia media pesada, que está en función del tiempo de funcionamiento del equipo.

EFICIENCIA MEDIA PESADA

$$Efic = \frac{EfATA + EfBTB + \dots + EfZTZ}{100}$$

Efic.= Eficiencia media pesada

EfA = Eficiencia a carga (%)

TA = Tiempo de operación a la carga

- Para los poderes caloríficos.

$$Q_{bc} = 339.147 C^t + 1256.1 H^t + 108.86 (S^t - O^t) - 25.12 (9H^t + W^t) \quad (\text{Kj/kg})$$

(3.17)

ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE CALDERAS CONCEPTOS TEÓRICOS DE LA COMBUSTIÓN

Por definición de Bejan Adrián “ la combustión es una reacción química que resulta de la combinación de un combustible y un oxidante, la cual origina un desprendimiento de calor, de tal forma se convierte en energía calorífica útil. “⁵

Los productos de la combustión originan calor, luz y gases, el objetivo fundamental de una buena combustión es liberar la mayor cantidad de energía en forma de calor contenido en los combustibles, minimizando las pérdidas por mala combustión.

Un proceso de combustión es un claro ejemplo de irreversibilidad, en la combustión el combustible usualmente un hidrocarburo se oxida utilizando un oxidante como el aire.

Durante un proceso de combustión, los componentes que existen antes de la reacción reciben el nombre de reactivos, y los componentes que existen después de la reacción se le llama productos.

Se dice que se realiza una combustión completa, cuando todo el combustible se oxida al máximo, si todo el carbono en el combustible se convierte en CO₂, todo el hidrógeno en H₂O y todo el azufre en SO₂.

Si la combustión es incompleta (imperfecta), los productos combustibles poseen sustancias capaces de ser oxidadas, tales como el CO que puede pasar como CO₂, la combustión incompleta se efectúa por aire insuficiente o por cámaras de combustión en la cuales existen zonas en la cual no llega aire.

Cuando se presenta una combustión incompleta se presentan pérdidas de energía y procesos de contaminación ya que el combustible no ha reaccionado y los componentes de los gases de la combustión contienen energía química que no es aprovechada y por consiguiente se generan inquemados CH, y elementos contaminantes tales como CO, NO_x, etc.

Un combustible fósil está compuesto de:

- Carbono.
- Hidrógeno.
- Azufre.

Para analizar los gases de la combustión se utiliza un dispositivo conocido como analizador de gases Orsat.

La combustión térmica del combustible está asociada con una gran pérdida de exergía, esta pérdida de exergía depende de los componentes del combustible y se puede reducir con precalentamiento del aire primario.

VALOR CALORÍFICO DEL COMBUSTIBLE

El valor calorífico del combustible, lo define Cengel Boles⁷ como, la cantidad de energía liberada cuando un combustible, se quema por completo en un proceso de flujo permanente y los productos vuelven al estado de los reactivos. En otras palabras, el valor calorífico de un combustible es igual al valor absoluto de la entalpía de combustión del combustible es decir Valor calorífico= h_c .

El valor calorífico depende de la fase del H₂O en los productos. El valor calorífico recibe el nombre de valor calorífico superior (VCS) cuando el H₂O en los

productos está en forma líquida y se llama el valor calorífico inferior (VCI) cuando el H₂O en los productos está en forma de vapor. Los dos valores caloríficos se relacionan por medio de:

Relación del VCS y VCI:

$$VCS = VCI + (Nh_{fg})H_2O, kJ/kg$$

Donde:

N es el número de moles de H₂O en los productos.

h_{fg} es la entalpía de vaporización del H₂O a 25 °C.

ENTALPÍA DE COMBUSTIÓN

En los procesos de combustión la entalpía de reacción suele conocerse como la entalpía de combustión (h_c), la cual representa la cantidad de calor liberado durante un proceso de combustión de flujo permanente de 1 kg (o 1 kmol) de combustible se quema por completo a una temperatura y presión especificada.

Se define como la diferencia entre la entalpía de los productos de un estado especificado y la entalpía de los reactivos en el mismo estado para una reacción completa.

$$Q = H_{\text{Producto}} - H_{\text{Reactivos}} = h_c$$

Donde:

H_{Producto} es la entalpía de los productos; (kJ/kmol).

$H_{\text{Reactivos}}$ es la entalpía de los reactivos; (kJ/kmol).

COMPOSICIÓN DEL AIRE

El aire es la fuente de oxígeno para la combustión en hornos, es una mezcla de oxígeno, nitrógeno, pequeñas cantidades de vapor de agua, dióxido de carbono, argón y otros elementos.

En la Tabla 3.1 se indica la composición volumétrica del aire atmosférico seco.

Tabla 3.1

Composición volumétrica del aire atmosférico seco

ELEMENTO	VOLUMEN %	PESO MOLECULAR
Nitrógeno	78.09	28.016
Oxígeno	20.95	32
Argón	0.93	39.944
Dióxido de Carbono	0.03	44.010

EXCESO DEL AIRE

En la investigación de Brizuela E. Romano⁶, El exceso de aire es uno de los factores para realizar una Combustión de calidad (completa) y por lo tanto evitar la producción de productos de combustión incompleta.

Para el análisis del comportamiento de la combustión, usualmente se mide la concentración de oxígeno en gases de combustión, indicando el porcentaje en exceso o sea el que no participó en la reacción.

Este porcentaje está relacionado con el exceso de aire de combustión y se representa por O_2 .

La relación entre la concentración de O_2 en gases de combustión y el exceso de aire depende de la composición del combustible.

En la práctica es importante saber con que exceso de aire se realiza la combustión en un horno, para lo cual se determina el % de CO_2 en los humos secos (humos que quedan después de condensar el vapor de agua al salir del horno); a partir de este dato se puede calcular el coeficiente de exceso de aire.

En la realidad, es prácticamente imposible obtener una mezcla homogénea y total del combustible con el comburente, sobre todo teniendo en

cuenta el corto espacio de tiempo en que esta mezcla debe realizarse. Esto obliga a emplear una cantidad real de aire carburante mayor de la estrictamente necesaria o aire mínimo de combustión; de lo anterior se deduce que mientras mejor se aprovecha la energía disponible de la combustión, menor será la cantidad de combustible necesario para obtenerla.

COMBUSTIÓN ESTEQUIOMÉTRICA

El aire teórico o estequiométrico es la cantidad mínima de aire para realizar la combustión completa de un combustible.

De manera que cuando se quema un combustible por completo con aire teórico, no estará presente oxígeno no combinado con los productos de los gases.

El aire teórico también se conoce como aire químicamente correcto.

El proceso de combustión ideal durante el cual el combustible se quema por completo con aire teórico se conoce como combustión estequiométrica o teórica de ese combustible.

RELACIÓN AIRE – COMBUSTIBLE (RAC)

En la práctica los procesos de combustión requieren de más aire que el indicado por la ecuación de la reacción química balanceada. Este incremento de aire es la relación entre el número de moles de aire y el número de moles de combustible.

El coeficiente de exceso de aire es la relación entre el aire real y el aire mínimo que se requiere para la combustión, en un proceso real se determina el % de CO₂ en los gases secos de combustión de un hogar o cámara para determinar el coeficiente de exceso de aire, a continuación en la Tabla 3.2 se indican los coeficientes (α) para diversos combustibles:

Tabla 3.2

Coeficiente de exceso de aire recomendado para combustibles

Combustible	Coeficiente de exceso de aire	
	Sólidos	1.5
Líquidos	1.1	1.2
Gaseosos	1.0	1.1

Un buen control del exceso de aire en la combustión, de tal forma que se reduzca el porcentaje de oxígeno en los gases, ayuda a resolver los problemas de contaminación química más importantes de la combustión:

- La formación de SO_3 y en consecuencia la formación de ácido sulfúrico.
- La formación de óxidos de nitrógeno, NO_x .

Ecuación para el cálculo del coeficiente de exceso de aire, según el Dr. Roberto Ramírez Mesa²¹, para gas natural:

$$\alpha = 1.52678(O_2) - 0.71497(O_2)^2 + 0.15054(O_2)^3 - 0.01424(O_2)^4 + 0.000499(O_2)^5$$

En la Figura 3.1, de la North American Combustion Handbook, se observa una gráfica que muestra el efecto del exceso de aire en la energía disponible para gas natural.

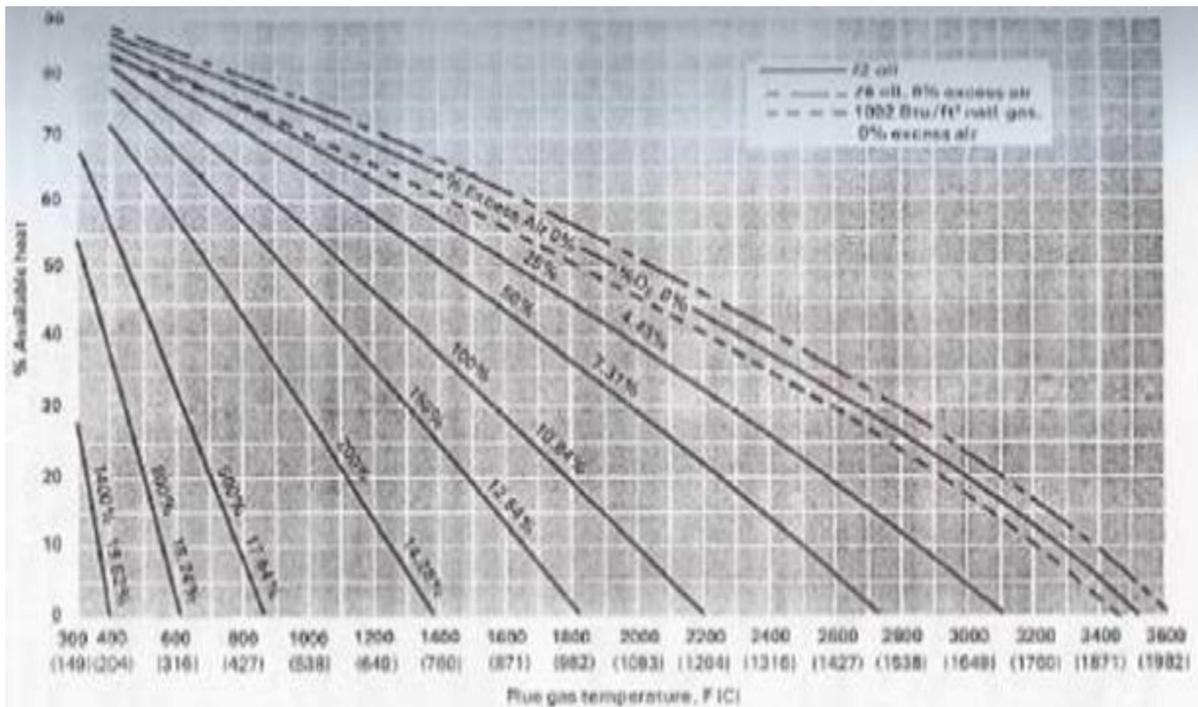


Figura 3.1 Efecto del exceso de aire en la temperatura de los gases de combustión y la energía disponible.

EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN

En todo proceso de combustión, el proceso de quemado de combustible se puede realizar con diferente grado de eficiencia, considerando el proceso desde el punto de vista de una reacción química del tipo:



La máxima eficiencia de combustión se presenta cuando se efectúa la combustión estequiométrica.

En la práctica, sobre todo en combustibles líquidos no volátiles, esta condición por lo general nunca se cumple; de acuerdo con lo antes mencionado puede deducirse que, para una combustión que utilice como combustible determinado, la combustión más eficiente será aquella que se efectúe con un exceso de aire tal que, sea lo suficientemente grande para minimizar la formación de productos de combustión incompleta (CO y partículas) y a la vez lo mínimo

para no incrementar la producción de SO_3 , así como para no disminuir la eficiencia térmica; existe un potencial de ahorro en la reducción de la temperatura de salida de chimenea o del exceso de aire, el incremento de la eficiencia por cada 1 % de cambio en exceso de aire, varía la temperatura de chimenea.

VOLUMEN DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

Para combustibles sólidos y líquidos, para determinar la capacidad del combustible de generar energía térmica, Ramírez Mesa Roberto²¹, sugiere determinar la concentración gravimétrica del compuesto del combustible, mientras que para el combustible gaseoso se necesita la concentración volumétrica de dicho compuesto para que el proceso de combustión se realice, debe tener en cuenta la valoración del volumen necesario o teórico de aire, para determinar los volúmenes teóricos de los productos de la combustión se considera lo siguiente:

- Volumen teórico del aire seco.
- Volúmenes teóricos de los productos de la combustión.
- Volúmenes reales.
- Fracción volumétrica de los gases de la combustión.
- Concentración de las partículas de ceniza.
- Volumen y fracción de los gases.

TEMPERATURA DE LA FLAMA ADIABÁTICA

En todo proceso de combustión, una medida de un combustible en particular es su entalpía de combustión, sin embargo en el diseño de equipos de proceso tales como las cámaras de combustión, se requiere una temperatura máxima de operación. La combustión adiabática o temperatura de flama adiabática será aquella que exista cuando no haya pérdidas de calor ($Q=0$), hacia los alrededores, esto produce que la

$$H_{\text{Productos}} = H_{\text{Reactivos}}$$

En las cámaras de combustión la temperatura más alta a la cual un material puede exponerse está limitada por consideraciones metalúrgicas, por consiguiente la temperatura de la flama adiabática es una consideración importante en el diseño de las cámaras de combustión.

La temperatura máxima en una cámara de combustión se puede controlar ajustando la cantidad de exceso de aire, el cual sirve como refrigerante, la temperatura de la flama adiabática alcanza su valor máximo cuando sucede la combustión completa con la cantidad de aire teórica.

TEMPERATURA DE FLAMA

Por experiencias de Ramírez Mesa Roberto²², el efecto que produce el incremento del exceso de aire, es la tendencia de la temperatura de flama en disminuir su temperatura, si se quema gas natural con valores de un 25% de exceso de aire la temperatura de flama es de 1595 ° C, y para un 75 % de exceso de aire la temperatura es 1160 ° C.

La ecuación básica para la transferencia de calor radiante en la sección expuesta directamente a la flama es:

$$Q = A_s F_{1-2} \sigma (T_g^4 - T_w^4)$$

Donde:

Q Calor entregado por la flama, W/m.

A_s Superficie efectiva de la flama o superficie receptora, m².

F_s Factor de intercambio efectivo, adimensional.

T_g Temperatura de la flama, ° K.

T_w Temperatura de superficies frías, ° K.

σ Constante de Stefan - Boltzman es 5.67 x10⁻⁸ W/m²°K.

Se aprecia en la ecuación que la variación de temperatura influye en la transferencia de calor en la zona de radiación, y la forma en que la reducción de la

temperatura de flama incide en el incremento de la temperatura de los gases en la salida y por consiguiente un decremento de eficiencia.

EFEECTO DE DISOCIACIÓN

Según el North American Combustion Handbook¹⁸, la temperatura máxima que puede obtenerse por la combustión de cualquier combustible queda limitada por la disociación de los productos que se forman.

La disociación es lo inverso de la combustión, este proceso absorbe el calor liberado por la combustión.

“La disociación y los equilibrios que intervienen en la combustión a alta temperatura son muy complejas, y en ellos participan especies químicas tales como CO₂, CO, H₂O, H, OH, NO, N, O, y N₂”¹⁸.

Sin considerar el fenómeno de disociación, la temperatura de combustión alcanzada al final se puede calcular mediante un balance de energía, siendo esta la diferencia del calor por combustión menos la pérdida de calor por conducción y radiación; ya sea que la combustión esté a presión o a volumen constante, esta diferencia es la entalpía de la mezcla de los productos.

ESTABILIDAD DE LA COMBUSTIÓN

El suministro de aire a la cámara de combustión suele ser no suficiente para lograr estabilidad en el proceso de combustión en una corriente de aire que se mueve con una velocidad superior a la velocidad de la flama.

La configuración gasodinámica del flujo se determina por la forma y colocación de los dispositivos de admisión de aire primario y secundario en el tubo distribuidor de la llama de la cámara de combustión.

En la cámara con torbellinador el combustible se inyecta en la misma dirección que la corriente de aire, mientras que el aire primario se introduce a través de unos alabes radiales torsionados, creándose en el tubo de la llama una corriente de aire que gira con relación al eje de la cámara. De esta forma se crea cerca del eje de la cámara una zona de bajas presiones y a consecuencia de esto se originan contracorrientes de aire que aseguran la estabilidad de la llama,

creando en la zona de combustión superficies con pequeñas velocidades de aire de 15 a 25 m/seg; estas contracorrientes garantizan una buena mezcla del combustible con el aire, mejorando la vaporización del combustible y la inflamación de la mezcla fresca, teniendo en cuenta que el empleo de torbellinador ocasiona mayores pérdidas hidráulicas.

En publicaciones de La Nasa²⁵, los detectores de flama de fibra óptica, se han desarrollado para el estabilizado de la flama en la cámara de combustión, obteniendo excelentes resultados en el control de la combustión.

CARACTERÍSTICAS DE LOS QUEMADORES

Uno de los componentes de un proceso de combustión es el quemador, el cual consiste de un dispositivo mecánico que alimenta el combustible y el aire (oxidante) a la cámara de combustión, mezcla íntimamente el aire y combustible, enciende y quema la mezcla, desplaza los productos de la combustión, sus características son de obtener una combustión limpia y completa, una alta producción de calor y máxima eficiencia energética, así como una baja emisión de NO_x, y con las condiciones básicas siguientes:

- Se adapta a la geometría de la cámara de combustión.
- Tiene un margen de regulación al proceso.
- Estabilidad del funcionamiento de acuerdo al proceso.
- Control de la forma y dimensión de la flama.
- Tiene un sistema de protección y control del proceso.

MARGEN DE REGULACIÓN DE UN QUEMADOR

El margen de regulación indica la relación entre el caudal máximo y mínimo del combustible que consume un quemador.

Dependiendo del tipo de atomización se puede variar la regulación utilizando diferentes grados de turbulencia para mezcla aire-combustible, normalmente se miden las presiones de aire para el máximo y mínimo ya que

efectuar mediciones de caudal de combustibles implica ser una tarea muy laboriosa y con altos costos.

Los quemadores de alta velocidad³⁴, son diseñados para incrementar la transferencia de calor por convección, son ideales para procesos donde se necesite altas temperaturas uniformes dentro de la cámara de combustión con flamas cortas, para evitar el contacto directo hacia el refractario y producto del proceso.

La elevada velocidad de salida de los gases de combustión provoca una importante circulación de los mismos dentro del horno, creando una buena uniformidad de la temperatura, incrementándose la transmisión de calor por convección. Asimismo, el choque de estos gases contra las paredes del refractario, y con la carga, calentando ambas, originan una importante transmisión de calor por radiación.

Otras de las características de estos quemadores son:

- Amplio margen de regulación.
- Posibilidad de funcionar con exceso de aire prácticamente nulo, es decir, con una combustión estequiométrica.
- La estabilidad de la flama se mantiene dentro de amplios límites, desde un exceso de combustible hasta mezclas aire-gas bastante superior a la estequiométrica.

Las características de construcción son en acero con cono de cámara de combustión en acero 310 calidad refractario, para aplicaciones en procesos que superan los 1000 ° C. Están provistos con conos refractarios en alta alúmina o carburo de Silicio; el encendido se realiza mediante una bujía, que garantiza el perfecto encendido del sistema aún trabajando con excesos de aire del 900%.

Actualmente se desarrolla la tecnología relacionada con la introducción de aire a diferentes niveles a lo largo del horno.

Según el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)²⁷, generalmente, las modificaciones al proceso de combustión que se usan actualmente consisten en

introducir el aire y el combustible en diferentes niveles del horno. Esta acción de repartir el aire y combustible puede ser implantada en la base de la flama usando quemadores de bajo óxido de nitrógeno.

Otros de los factores que afectan el control de los quemadores es la suciedad y desgaste en la boquilla del quemador por productos abrasivos del combustible y anomalías en el registro de aire contribuyen a reducir la eficacia de la combustión. Por ello se recomienda una inspección y limpieza frecuente.

El control de la combustión es fundamental para lograr un ahorro energético, para controlar la combustión y obtener el mejor desempeño de los equipos de combustión, aprovechando al máximo la energía disponible, debemos ajustar los parámetros de control de aire-combustible.

Posteriormente se debe de medir continuamente el consumo de combustible para alertar sobre cualquier desvío que pueda presentarse por descalibración.

En conclusión, para obtener el máximo beneficio de energía del combustible, debemos controlar la mezcla aire-combustible; solo así podemos saber si estamos utilizando el combustible eficientemente.

INTRODUCCIÓN A LA TRANSFERENCIA DE CALOR

La referencia que se presenta a continuación fué recopilada de ^{8,10,11,12,14}

La energía térmica se puede conceptuar como una energía en transición que es parte de la energía interna de la materia, característica por la cual no se puede almacenar y por esta razón las disposiciones geométricas de los equipos de transferencia de calor tienen como finalidad de obtener los mejores coeficientes posibles para aprovechar al máximo la energía térmica disponible y, por otro lado, los sistemas de aislamiento térmico tienen la característica de ofrecer gran resistencia al paso del calor hacia el exterior y por consiguiente sea absorbido hacia la parte del proceso que interesa, evitando que sea transferido al medio ambiente.

La energía térmica se transferirá siempre que exista una diferencia de nivel energético, es decir, cualquier diferencia de temperatura será suficiente para generar un flujo de calor del medio mayor de temperatura al medio de temperatura menor, siendo el flujo variable dependiendo del medio por el que se transfiere.

Este planteamiento se resume en la Segunda Ley de la termodinámica que expresa que el calor fluirá espontáneamente de puntos de mayor temperatura a puntos de temperatura menor y nunca en sentido inverso.

El flujo de calor transferido se relaciona con la diferencia global de temperaturas entre la pared y el fluido.

La transferencia de calor dependerá de la viscosidad del fluido además de depender de las propiedades de dicho fluido (calor específico, densidad, conductividad térmica). Esto es así, porque la viscosidad influye en el perfil y, por tanto, en el flujo de energía en la región próxima a la pared.

En contraposición a los mecanismos de transferencia de calor (conducción y convección), donde la transferencia de energía involucra un medio material, el calor también puede transferirse a través de zonas en la que exista el vacío, en este caso el mecanismo es la radiación electromagnética.

TRANSFERENCIA DE CALOR EN CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

En un horno, es preciso un nivel de temperatura para generar los volátiles, esta temperatura se alcanza mediante el aporte de energía en forma de calor.

En la combustión, el calor se transmite desde el foco emisor hacia la carga o combustible por convección y por radiación, la tasa de transmisión de calor por convección aumenta en la medida que lo hace la velocidad de circulación de los gases. La transferencia de calor por radiación es muy superior a la convección, en particular a alta temperatura motivo por el cuál es conveniente potenciar la zona radiante.

La ley de Fourier de conducción de calor¹, se aplica en las paredes del refractario (Figura 3.2) donde, la conductividad térmica indica lo rápido que el calor fluirá a través de las paredes del refractario y placa de acero de la cámara de

combustión, de esta manera se satisface el segundo principio de la termodinámica, esto es, el calor fluye hacia la temperatura decreciente.

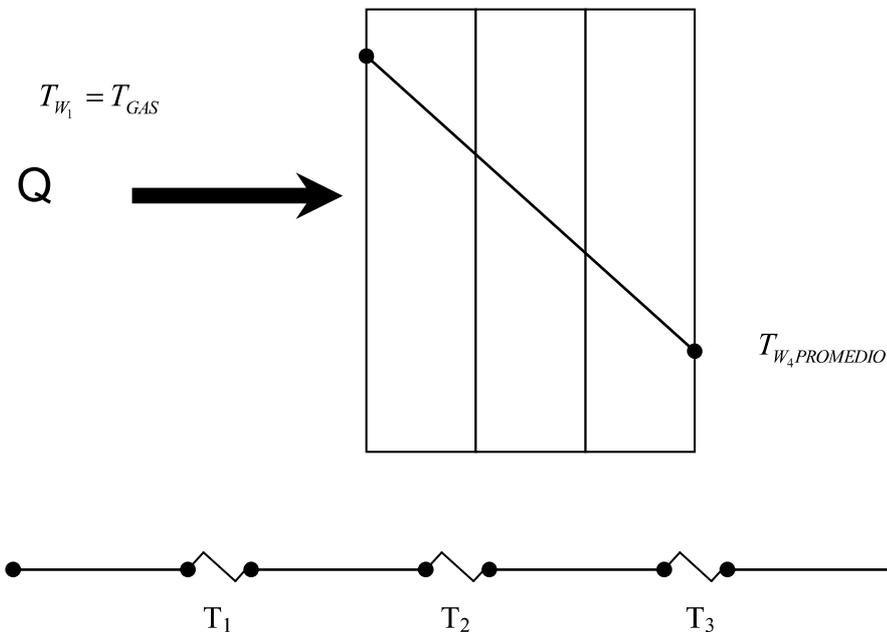


Figura 3.2 Temperaturas de Interfase

Avallone y Baumeister¹ hacen referencia de la transferencia de calor en cámaras de combustión y analizan la sección radiante de una cámara de combustión, la cual presenta un problema en la transferencia de calor donde se combina la acción de la radiación directa de la flama hacia la carga o sumidero de calor y la radiación de la flama hacia las superficies refractarias y viceversa a través de la flama (con absorción parcial) hacia el sumidero; así mismo el mecanismo de conducción de calor a través de las paredes del refractario hacia la placa de la cámara de combustión y medio ambiente.

En un caso como este, en el que el calor se transporta en forma combinada por los mecanismos de convección y radiación¹⁰ como ocurre en el transporte de calor de los gases de combustión; cuando la convección es preponderante, suele utilizarse la ley de Newton del enfriamiento para el cálculo del transporte de calor y una ecuación de coeficiente de transferencia de calor que englobe ambos mecanismos.

Según Donald Q. Kern¹⁴; las únicas fuentes primarias de radiaciones son los productos de combustión y esto se supone que tienen temperatura uniforme, los gases diatómicos tales como el O₂, N₂, y H₂, tienen emisividades muy bajas, tanto que pueden ser consideradas cero en el trabajo de diseño de hornos. Por otra parte, el H₂O, CO, SO, tienen buenas emisividades (aunque menores que muchos materiales sólidos), y el CO, tiene una emisividad del tipo medio.

Las fuentes de radiación pueden referirse específicamente como constituyentes radiantes en los productos de combustión ordinariamente el H₂O y el CO₂, son los únicos constituyentes que necesitan considerarse, puesto que las pequeñas cantidades de azufre de muchos combustibles es despreciable y los hornos generalmente operan con suficiente exceso de aire para eliminar el CO.

REFRACTARIOS Y AISLAMIENTO TÉRMICO.

Los procesos industriales requieren de temperaturas diferentes a las del ambiente obtenidas en forma artificial. El lograr dichas condiciones de temperatura presupone un costo.

Los equipos calentados simultáneamente pierden parte del calor que se les está suministrando, cediéndolo al ambiente que los rodea y que se encuentra a una temperatura menor.

Por medio de materiales aislantes, las pérdidas de calor por unidad de tiempo disminuyen significativamente.

La cantidad de calor que fluye de una cara a otra de un material, será menor mientras mayor sea el espesor del aislamiento; pero debe de observarse que el ahorro de la energía no es directamente proporcional al espesor.

En cámaras de combustión se utilizan ladrillos refractarios con baja conductividad térmica, para que la transmisión de calor hacia el exterior sea mínima, los ladrillos refractarios aislantes (IFB), se encuentran en contacto directo con el flujo calorífico (una de las caras calientes) o sea sufren gradiente de temperatura y se clasifican según la norma ASTM.

A medida que los aislantes trabajan a mayores temperaturas, aumenta la densidad media global; igual ocurre con su conductividad térmica, otra propiedad importante es la capacidad de retención del calor, la cual es aproximadamente proporcional a la densidad media global, por tanto, para hornos de funcionamiento intermitente, el uso de ladrillos ligeros constituye una indiscutible ventaja.

Se ha encontrado que hay muchos ladrillos refractarios aislantes (IFB) que se desintegran cuando se exponen al hidrógeno seco. La Babcock and Wilcox Co.⁴ ha producido ladrillo que resiste esta acción utilizando una composición del 95% de Al_2O_3 y 5% de CaO, eliminando por consiguiente la sílice y los óxidos de hierro y de titanio, que son reducibles en estas condiciones.

CONTROL DE EMISIONES.

Como resultado no deseado de la combustión de hidrocarburos, se tienen emisiones de gases y partículas que afectan el medio ambiente, las emisiones contaminantes que emanan de los sistemas de combustión son principalmente CO, NO_x , SO, y PST (total de partículas suspendidas en la corriente de gases).

De estas, solo las emisiones de CO no están reguladas por la norma ecológica NOM085; sin embargo, dado que inciden directamente en la economía del proceso, se tiene especial cuidado de mantener su valor tan bajo como sea posible, en condiciones normales de operación, las emisiones de CO son del orden de 100 a 200 ppm.

Así mismo, después de que la agencia de protección ambiental (EPA) de los EUA estableciera un límite ambiental para tamaño menor a 2.5 micras (PM2.5) en 1997 y que decretara que estas partículas son las responsables de la turbidez atmosférica, se están llevando a cabo estudios por el DOE, dentro del Clean Coal Technology Program.

La tendencia mundial es la reducción paulatina de estas emisiones hasta llegar en el año 2015 a cero o a un valor cercano a cero.

CAPITULO IV
DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA
DE CÁLCULO DE LOS GENERADORES
DE VAPOR

CAPITULO IV DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA DE CÁLCULO DE LOS GENERADORES DE VAPOR

4.1. CARACTERÍSTICA DEL BAGAZO

El bagazo de caña se ha convertido para algunos países como Cuba, en una prioridad debido a la disminución de la disponibilidad energética mundial. En la mayoría de los ingenios azucareros del mundo el bagazo de caña se quema como combustible en sustitución del petróleo, no obstante su rendimiento es bajo ya que las tecnologías empleadas para su tratamiento no aportan los rendimientos que se necesitan desde el punto de vista energético.

El bagazo es un material fibroso en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones que se obtiene del proceso de molienda de la caña. El contenido de cenizas del bagazo natural se considera moderadamente entre el 2% y 5%. Sin embargo, como consecuencia directa de la mecanización de la cosecha y sobre todo en épocas de lluvia, este parámetro puede elevarse hasta de un 12% al 15%.

Las calderas del ingenio Benito Juárez, consumen combustóleo y bagazo, hoy día en tres de ellas el combustible utilizado es el bagazo al 100%, el cual contiene entre 42 y 48 % de humedad y las otras dos restantes consumen bagazo y combustóleo.

Los porcentajes que muestra la tabla 4.1, están en concentraciones de masa del bagazo considerado seco.

Tabla 4.1 Componentes de los combustibles usados en calderas del ingenio-

TIPO DE COMBUSTIBLE	CARBONO	HIDRÓGENO	OXÍGENO	AGUA	AZUFRE	NITRÓGENO	CENIZAS
BAGAZO	30.25 %	4.525 %	28.60 %	35 %	0 %	0 %	1.625 %
COMBUSTÓLEO	84.8 %	10.9 %	0.8 %	1.8 %	1.7 %	0 %	0 %

El bagazo de caña, es el principal combustible que queman las calderas del ingenio Presidente Benito Juárez García, el cual presenta un porcentaje de humedad que varía entre el 42 % y 48 %. El bagazo obtenido de la caña de azúcar en la planta, varía entre el 24 % y 29 % del total de caña molida. El bagazo de caña posee un poder calorífico de 1928.98 Kj/Kg y el combustóleo un poder calorífico de 41,870.98 Kj/Kg.

El ingenio tiene una molienda de 6800 toneladas de caña al día, lo que significa que en promedio se generan 1768 toneladas de bagazo diario, los cuales se depositan en los pachaquiles mostrados en la figura 4.1 y 4.2, para ser trasladados e introducidos al hogar de la caldera y ser quemados, de ahí se toma el necesario para la caldera No. 4, figura 4.3.



Figura 4.1 Área de pachaquiles, vista superior



Figura 4.2 Área de pachaquiles, vista lateral

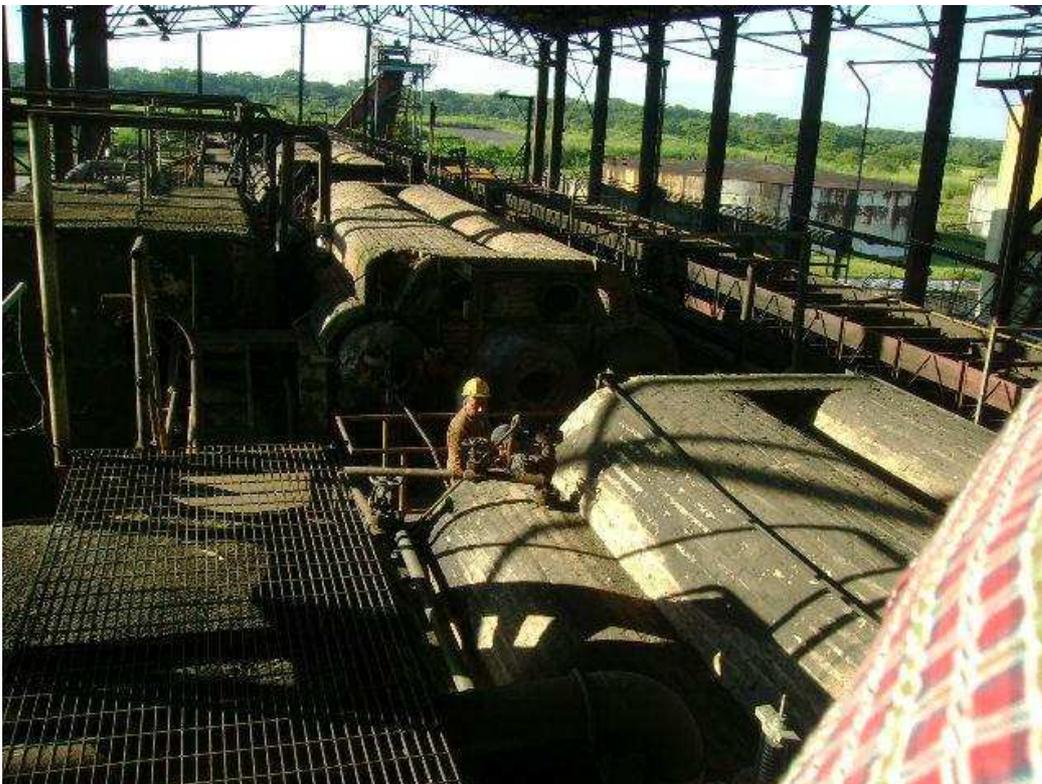


Figura 4.3 Caldera No.4 y pachaquiles

4.2. PREPARACIÓN DEL BAGAZO

La caña es sometida a un proceso de preparación que consiste en romper o desfibrar las celdas de los tallos por medio de picadoras. Luego unas bandas transportadoras lo conducen a los molinos, donde se realiza el proceso de extracción de la sacarosa, consistente en exprimir y lavar el bagazo en una serie de molinos. El lavado del bagazo, se hace con jugo extraído en el molino siguiente (maceración) y el lavado del último molino se hace con agua condensada caliente, la cual facilita el agotamiento de la sacarosa en el bagazo. El bagazo sale del último molino hacia las calderas para usarlo como combustible. El bagazo extraído de los molinos debe tener una humedad que oscila entre 44 y 50%, siendo 48% considerado como un buen funcionamiento de los molinos y si supera el 50%, se infiere que existe un mal ajuste en la presión del último de los molinos. El bagazo efecto de estudio, tiene una humedad del 52%, por lo que existen problemas de ajuste en el último molino y esto trae como consecuencias exceso de incrustaciones en las paredes del horno.

4.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BAGAZO

La composición del bagazo de caña, se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Composición del bagazo de caña

TIPO DE COMBUSTIBLE	CARBONO	HIDRÓGENO	OXÍGENO	AGUA	AZUFRE	NITRÓGENO	CENIZAS
Bagazo	30.25 %	4.525 %	28.60 %	35 %	0 %	0 %	1.625 %

Aunado a ello, la tabla 4.3, muestra la composición de la ceniza del bagazo.

Tabla 4.3 Composición de las cenizas del bagazo de caña

Tipo	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O+Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO
Ceniza	82.7%	1.1%	3.4 %	3%	3.5 %	4.6 %	1.7 %	0%

Es importante resaltar en la tabla 4.2, que el componente mayor del bagazo de caña es agua, por lo que es importante un buen tratamiento previo al quemarse en el horno de la caldera.

4.4. PODER CALORÍFICO DEL BAGAZO

El poder calorífico es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química en presencia del oxígeno

Para el caso de estudios, existe el poder calorífico superior, el cual es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de un kilogramo de combustible, cuando el vapor de agua originado en la combustión esta condensado y puede contabilizarse, el calor desprendido de calor en este cambio de fase y el poder calorífico inferior es la cantidad de calor desprendido en la combustión completa de un kilogramo de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua de la combustión, ya no se produce cambio de fase y se expulsa como vapor.

La ecuación básica que nos da el poder calorífico del combustible es la siguiente:

$$Q_{bc} = 339.147 C^t + 1256.1 H^t + 108.86 (S^t - O^t) - 25.12 (9H^t + W^t) \quad (\text{Kj/kg}) \quad (4.1)$$

- Q_{bc} Poder calorífico del combustible
- C^t Concentración de carbón
- H^t Concentración de hidrógeno
- S^t Concentración de azufre
- O^t Concentración de oxígeno
- W^t Concentración de cenizas
- $Q_{bc} = 40,473.1966 \text{ Kj/Kg}$ para el combustóleo
- $Q_{bc} = 27,194.811 \text{ Kj/Kg}$ para el bagazo

4.5. DETERMINACIÓN DE LA CALDERA DE TRABAJO

La planta Ingenio Azucarero Benito Juárez García, cuenta con cinco calderas bagaceras, todas están habilitadas para quemar bagazo y combustóleo, pero siguiendo la política institucional de cero petróleo, se han llevado a cabo proyectos con apoyos del gobierno federal con el fin de eliminar el consumo de combustibles fósiles y disminuir la contaminación ambiental, derivado de esto, dos de ellas todavía consumen combustóleo, aunque en un porcentaje mínimo, pero significativo por la gran cantidad de combustibles que necesitan las calderas para entregar la energía suficiente al agua y obtener un vapor de gran calidad.

Tabla 4.4 Consumo de combustible y características principales de las caldera No. 4, del Ingenio Presidente Benito Juárez García

NUM. CALDERA	COMBUSTIBLE	GENERACION DE VAPOR. TON/HR	PRESION DE TRABAJO KG/CM ²	TEMPERATURA EN EL HORNO °C
4	Bagazo (98%)- combustóleo (2%)	55	20	800

De la caldera 1 a la 3, consumen bagazo al 100%, por el contrario las calderas 4 y 5 (tabla 4.4), consumen combustóleo en un 2% y bagazo en un 98%. Desafortunadamente son equipos demasiados viejos, por lo que presentan eficiencias relativamente bajas comparadas con la eficiencia ideal de estos tipos de generadores, lo que ocasiona pérdida de energía en el hogar de la caldera requiriendo una mayor cantidad de combustóleo para alcanzar los niveles necesarios para evaporar el agua de las calderas, trayendo como consecuencia a la vez, una mayor cantidad de contaminantes generados a la atmósfera. La propuesta de realizar este estudio, es con el fin de determinar la situación actual de las calderas con el fin de eliminar el consumo de combustible fósil y consumir solo bagazo, lo cual no representaría ningún obstáculo, ya que las calderas están equipadas para la quema de solo bagazo.

Las operaciones de las calderas se llevan a cabo por periodo de seis meses al año, durante el tiempo que dura la zafra, tiempo en el cual estos equipos trabajan ininterrumpidamente, con paros solo por emergencias, ya que el mantenimiento se lleva a cabo en los tiempos de reparación o sea fuera del periodo de zafra.

Las restricciones ambientales están de acuerdo con la normatividad actual en materia de emisiones de fuentes fijas, para lo cual se cumple en aquellas calderas donde se quema bagazo de caña, pero no al 100% en aquellas calderas donde todavía se quema combustóleo, en cuanto a los parámetros referidos partículas suspendidas de azufre en el ambiente.

4.6. CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN EN LA CALDERA NO.4

Para el caso de la combustión en la caldera efecto de análisis, es importante señalar que su cálculo estará en función de un análisis de la combustión teórica y un análisis para la combustión real.

Para el caso de la combustión teórica que es aquella en la cual el combustible se quema completamente con aire teórico, es decir sin exceso de aire (α) u oxígeno, $\alpha = 1$. Cuando se considera en el análisis un exceso de aire, o sea $\alpha > 1$, estamos hablando de una combustión real. El exceso de aire o α , se calcula de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{21}{(21 - O_2)} \quad (4.2)$$

O₂, es la cantidad en %, de oxígeno medido en la salida de los gases de la caldera con un Orsat.

Se realizó la medida y la lectura registrada fue de 5.2 %

$$\alpha = 21 / (21 - 5.2) = 1.329.$$

lo que indica un 32.9% de exceso de aire en la combustión.

Con base en la composición del bagazo.

4.7. CAPACIDAD DEL VENTILADOR DE TIRO FORZADO

El ventilador de tiro forzado es el dispositivo mecánico encargado de suministrar el aire necesario para la combustión con base a la capacidad de manejo de la caldera. En el ingenio Benito Juárez, se utiliza un ventilador centrífugo de la marca IMEHSa de 4032 RPM.



Figura 4.1. Vista lateral del ventilador centrífugo de extracción.

4.8. VOLÚMENES DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

Para la determinación de los volúmenes de los productos de la combustión, se debe tener en cuenta el volumen teórico del aire seco, los volúmenes teóricos de los productos de la combustión, los volúmenes reales, la fracción volumétrica de los GPC, las cenizas, el volumen de aire cuando existe recirculación y las fracciones volumétricas de estos gases cuando hay recirculación. El diagrama térmico y las líneas de flujo de la caldera No. 4, se muestra en la figura 4.1

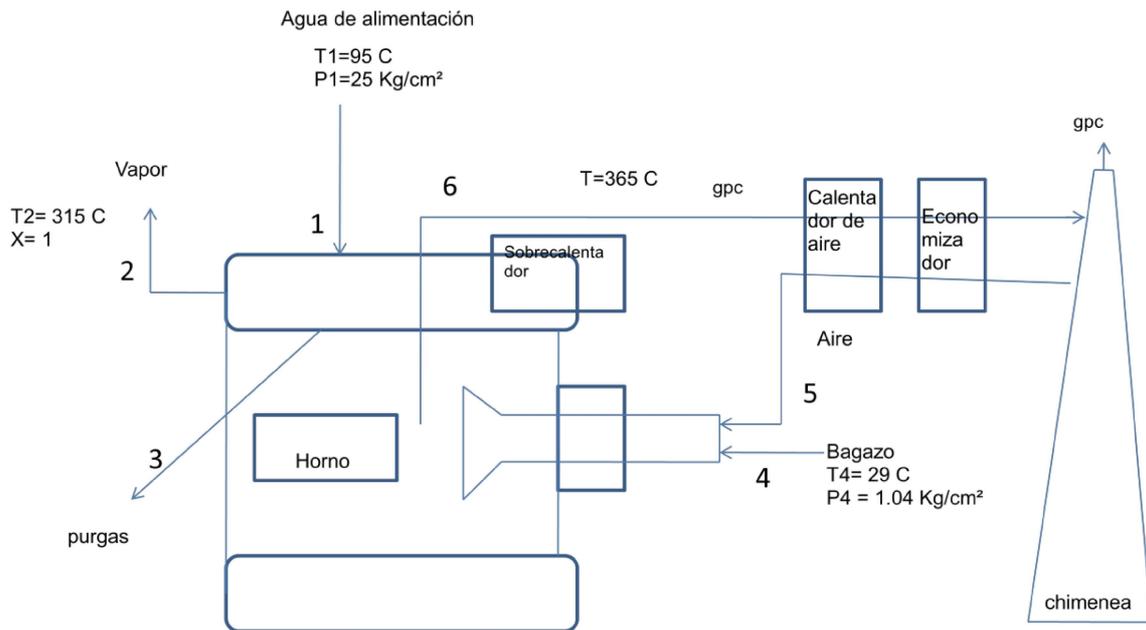


Figura 4.2 Diagrama térmico de la caldera No. 4

4.8.1. VOLÚMENES TEÓRICOS

Para la determinación del volumen teórico del aire seco, se utiliza la ecuación 4.3, de acuerdo con el tipo de combustible usado. Para el caso en particular, la caldera No. 4 consume combustóleo y bagazo.

VOLÚMENES TEÓRICOS PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS.

$$V_a = 0.0889 (C + 0.375 St) + 0.265 H^t - 0.0333 Ot \quad (\text{m}^3/\text{Kg}) \quad (4.3)$$

Para el caso de los volúmenes teóricos de los GPC, la ecuación 4.4, nos permite realizar su cálculo.

$$V_g = V_{co2} + V_{so2} + V_{N2} + V_{H2O} \quad (\text{m}^3/\text{Kg}) \quad (4.4)$$

El volumen teórico de los GPC, debe incluir los volúmenes siguientes:

VOLUMEN DE GASES TRIATÓMICOS.

$$V_{RO2} = V_{co2} + V_{so2} \quad (\text{m}^3/\text{Kg}) \quad \text{o} \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (4.5)$$

PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS USAMOS LA ECUACIÓN.

$$V_{RO2} = 0.01 (1.866Ct + 0.7St) \quad (\text{m}^3/\text{Kg}) \quad (4.6)$$

**VOLUMEN TEÓRICO DEL NITRÓGENO
PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS**

$$VN_2 = 0.79 Va + 0.01 N_2 \quad (\text{m}^3/\text{m}^3)$$

(4.7)

**VOLUMEN TEÓRICO DEL VAPOR DE AGUA.
PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS**

$$VH_2O = 0.0111Ht + 0.0124Wt + 0.0327Va + 1.24G_{at} \quad (\text{m}^3/\text{Kg})$$

(4.8)

G_{at} toma los valores de 0.1 – 1 ($\text{Kg}_v / \text{Kg}_c$)

4.8.2. Volúmenes reales

Los volúmenes reales se hayan a partir de la determinación del volumen real de gases secos, el volumen real del vapor de agua y el volumen de gases.

Volumen real de gases secos

$$V_{gs} = VR_{O_2} + VN_2 + (\alpha - 1) Va \quad (\text{m}^3/\text{Kg}) \quad (4.9)$$

$$\alpha = \frac{\alpha' + \alpha''}{2} \quad (4.10)$$

Primeramente debemos calcular el coeficiente de exceso de aire a la salida

$$\alpha'' = \alpha' + \Delta \alpha \quad (4.11)$$

VOLUMEN REAL DEL VAPOR DE AGUA

$$V^{\circ}H_2O = VH_2O + 0.0327 (\alpha - 1) Va \quad (\text{m}^3/\text{Kg})$$

(4.12)

$$V_g = V_{gs} + V^{\circ}H_2O \quad (\text{m}^3/\text{Kg})$$

(4.13)

4.8.3. ENTALPÍAS DEL AIRE Y LOS GASES PRODUCTO DE LA COMBUSTIÓN

Es necesario primeramente determinar la entalpía teórica de la parte gaseosa y del aire contenido en los productos de la combustión, así como la entalpía de las cenizas arrastradas por los gases, posteriormente calculamos las

entalpías reales de los productos de la combustión en cada una de las superficies de transferencia de calor

ENTALPÍA DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

$$I = I_g + I_c \quad (\text{Kj/Kg})$$

$$I_g = I^o + (\alpha'' - 1) I^o_a \quad (\text{Kj/Kg})$$

ENTALPÍA TEÓRICA DE LOS GASES

$$I^o_g = V_{RO_2} + I_{RO_2} + V_{N_2} + i_{N_2} + V_{H_2O} + i_{H_2O} \quad (\text{Kj/Kg})$$

I_{RO_2} , i_{N_2} , i_{H_2O} se determinan de la Tabla del Simulador (Ver Anexos)

Las propiedades del RO_2 se toman como las del CO_2

ENTALPÍA TEÓRICA DEL AIRE

$$I^o_a = V_a + i_{air} \quad (\text{Kj/Kg})$$

La i_{air} , se determina con la temperatura de los gases T_g , en la Tabla del Simulador (Ver Anexos)

ENTALPÍA DE LAS CENIZAS

$$I_c = 0.01 \cdot At \cdot aarr \cdot icen \quad (\text{Kj/Kg})$$

Entonces, $icen$, se determina con T_g en la Tabla del Simulador (Ver Anexos)

4.9. BALANCE TÉRMICO DE LA CALDERA NO. 4 DEL INGENIO PRESIDENTE BENITO JUÁREZ.

El primer aspecto a considerar es la energía disponible que está apta para ser usada en la generación de vapor de la caldera No. 4, dicha energía se puede descomponer en: valor calórico del combustible, calor introducido por el vapor de atomización, calor debido al calentamiento del combustible y el calor debido al calentamiento necesario, seguidamente calculamos las pérdidas de calor, así como la eficiencia. Conociendo el calor útil y los flujos de la sustancia de trabajo, así como su energía conocemos el consumo de combustible de la caldera, de lo cual al conocer las pérdidas por incombustión mecánica, la cantidad de combustible que quema realmente la caldera, para dar paso a los cálculos termo

económicos¹². Con los datos de las pérdidas se puede calcular la eficiencia bruta (η_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 (η_{GV} neta), cuando se involucra el gasto de combustible y del calor potencial.

4.9.1. CALOR DISPONIBLE

$$Q_d = Q_{bc} + Q_{pca} + Q_{at} + Q_{fc} \quad (\text{Kj/Kg})$$

4.9.1.1. CALOR FÍSICO DEL COMBUSTIBLE

$$Q_{fc} = C_c \cdot (T_c - 273) \quad (\text{Kj/Kg})$$

PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

$$C_c = 1.783 + 0.0025 (T_c - 273) \quad (\text{Kj/Kg})$$

PARA COMBUSTIBLES SÓLIDOS

$$C_c = 0.042 W_t + C_{cs} (1 - 0.01 W_t) \quad (\text{Kj/Kg})$$

C_{cs} , se puede obtener en la Tabla del Simulador (Ver Anexos)

4.9.1.2. CALOR INTRODUCIDO POR EL VAPOR DE ATOMIZACIÓN

$$Q_{at} = C_{at} (I_{at} - I_{vge} *) \quad (\text{Kj/Kg})$$

$I_{vge} *$ se obtiene con la presión atmosférica y la temperatura de los gases de escape de la caldera.

4.9.1.3. CALOR FÍSICO DEL AIRE EN EL PRE CALENTADOR DE AIRE

$$Q_{pca} = (\beta_{ca} + \Delta \alpha_{ca}) V^{oa} (I^{°spc} - I^{°af}) \quad (\text{Kj/Kg})$$

$I^{°spc}$ se determina con la temperatura del aire a la salida del pre calentador de aire

$I^{°af}$, se determina con la temperatura del aire del medio ambiente

$$\beta_{ca} = \alpha h - \Delta \alpha h - \Delta \alpha s$$

4.9.2 PÉRDIDAS EN LA CALDERA

$$q_{total} = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 \quad (\%)$$

¹² Guía metodológica

4.9.2.1. GASES DE ESCAPE

Debe tenerse en cuenta el coeficiente de exceso de aire a la salida de la caldera y la entalpía teórica del aire frío.

$$q_2 = \frac{(I_{ge} - \alpha_{ge} I^{°af})(100 - q_4)}{q_d} \quad (\%)$$

I_{ge} , se determina con la temperatura a la salida de los gases en la caldera

No.4.

$$\alpha_{ge} = \alpha_h + \sum \Delta\alpha$$

$$I^{°af} = V^{°a} \cdot I_{af} \quad (\text{Kj/Kg})$$

4.9.2.2. INCOMBUSTIÓN QUÍMICA

Para el caso de la incombustión química usar la tabla 4.1

$$q_3 = 0.5 \%$$

Tabla 4.1. Pérdidas de calor por incombustión química y mecánica

TIPO DE HORNO	COMBUSTIBLE	q3 (%)	q4 (%)
CÁMARA	Líquido	0.5	0
	Gaseoso	0.5	0
	Gas alto		
	Horno	1.5	0
	Sólido	0	0.5 - 6
CAPA	Sólido	0	2 - 15*

*para el bagazo generalmente $q_4 = 4\%$ y $q_3 = 0.5\%$

4.9.2.3. INCOMBUSTIÓN MECÁNICA

Para el caso de la incombustión mecánica usar la tabla 4.1

$$q_4 = 4 \%$$

4.9.2.4. EN PAREDES DE LA CALDERA

$$q_5 = q_{5n} \cdot D_n/D \quad (\%)$$

4.9.2.5. POR CENIZAS EXTRAÍDAS

$$q_6 = \frac{a_{esc} \cdot i_{cen} \cdot a^t}{Q_d} \quad (\%)$$

i_{cen} se obtiene con la temperatura de las cenizas al ser extraídas del horno
 $a_{esc} = 1 - a_{ar}$

4.9.2.6. POR ENFRIAMIENTO DE VIGAS Y PANELES

$$q_7 = (11\,600 \, H_{vp}) / (B \cdot Q_1) \quad (\%)$$

$B \cdot Q_1$ se halla a través de la siguiente ecuación

$$B \cdot Q_1 = D(i_{sc} - i_{aa}) + D_{vs}(i'' - i_{aa}) + D_{ri}(i_{sri} - i_{eri}) + D_p(i' - i_{aa}) \quad (\text{KW})$$

$$D_p = 0.01 P \cdot d \quad (\text{Kg/seg})$$

P se recomienda del 2 - 7 %

$$P_{aa} = (1.05 - 1.08) P_d \quad (\text{MPa}), p = 1.08$$

4.10. EFICIENCIA BRUTA

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7) \quad (\%)$$

4.11. EFICIENCIA NETA

$$\eta_{neta} = \frac{Q_{util}}{B : Q_d}$$

CAPITULO V.
SIMULACIÓN ENERGETICA DE LA
CALDERA NUMERO 4 DEL INGENIO
AZUCARERO BENITO JUAREZ.

CAPITULO V. SIMULACIÓN ENERGETICA DE LA CALDERA NUMERO 4 DEL INGENIO AZUCARERO BENITO JUAREZ.

5.1 SIMULACION POR EL METODO INTERNACIONAL²²

A continuación se muestra la secuencia de de cálculo que se realizó en la simulación del Programa CALDER, realizado específicamente para la caldera objeto de estudio en la presente Tesis, los datos de campo se muestran en dicho simulador:

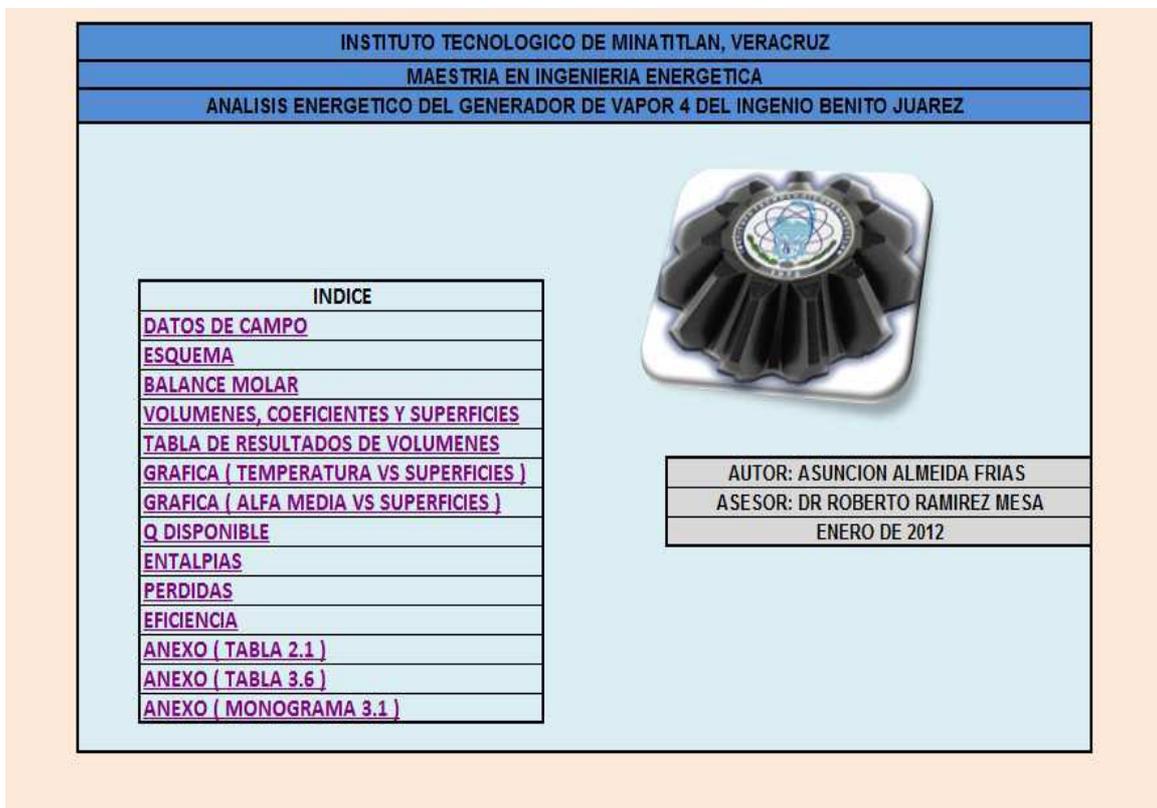


Figura 5.1 Pantalla principal del simulador CALDER

DATOS DE CAMPO		
PRESION DE VAPOR DE LA CALDERA	21.00	Bar man
PRESION DE AGUA DE ALIMENTACION	25.00	Bar man
TEMPERATURA DE AGUA DE ALIMENTACION	97.00	°C
No. DE SUPERFICIES DE LA CALDERA	4.00	
	1	CONDUCTO DE GASES
	1	FESTON
	1	SOBRECALENTADOR
	1	HORNO
% DE O2 EN EL HORNO	4.000	%
COMPOSICION QUIMICA DEL COMBUSTIBLE % EN VOLUMEN	C	52.000 %
	H	19.000 %
	O	29.000 %
COMPOSICION TOTAL EN VOLUMEN	N	0.000 %
100.00%	S	0.000 %
TEMPERATURA DEL COMBUSTIBLE	40.000	°C
PRESION DEL COMBUSTIBLE	1.000	Bar man
PRESION DEL AIRE	101.325	Kpa
TEMPERATURA DEL AIRE	28.000	°C
PRESION DE LOS GASES DE SALIDA	1.500	Bar man
TEMPERATURA DE LOS GASES DE SALIDA	230.000	°C
TEMPERATURA DE ENTRADA DEL COMBUSTIBLE	40.000	°C
TEMPERATURA DEL VAPOR SOBRECALENTADO	310.000	°C

Figura 5.2 Pantalla de acceso de datos del simulador CALDER

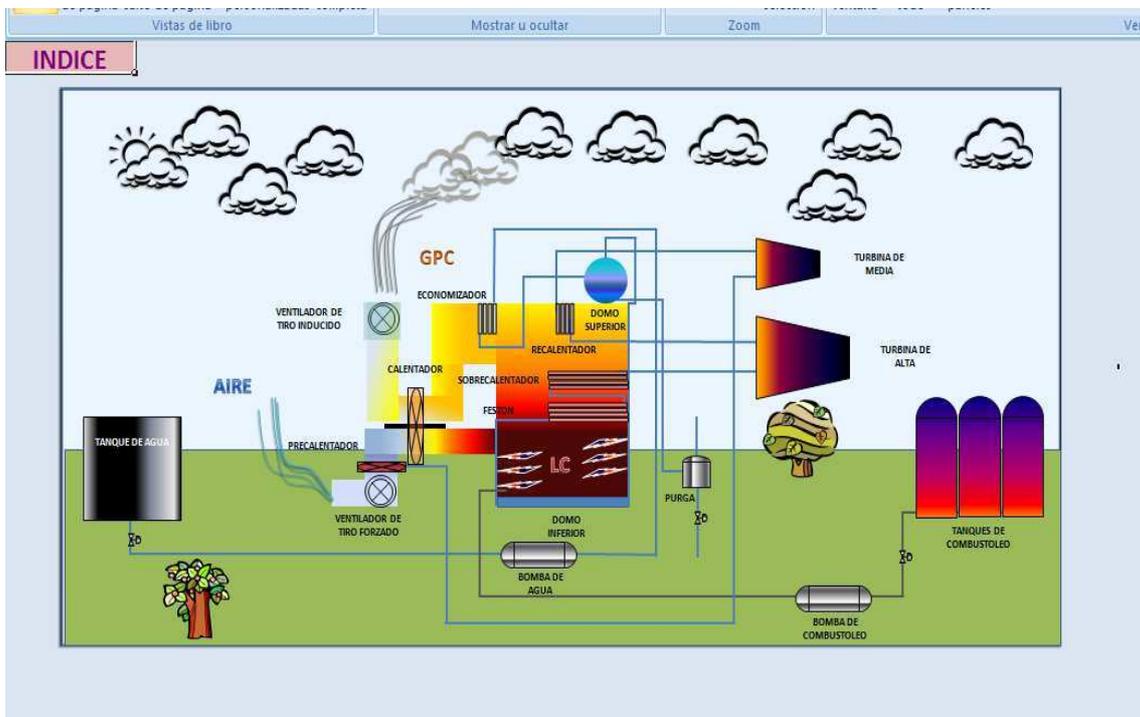


Figura 5.3 Pantalla del esquema simple de la caldera del simulador CALDER

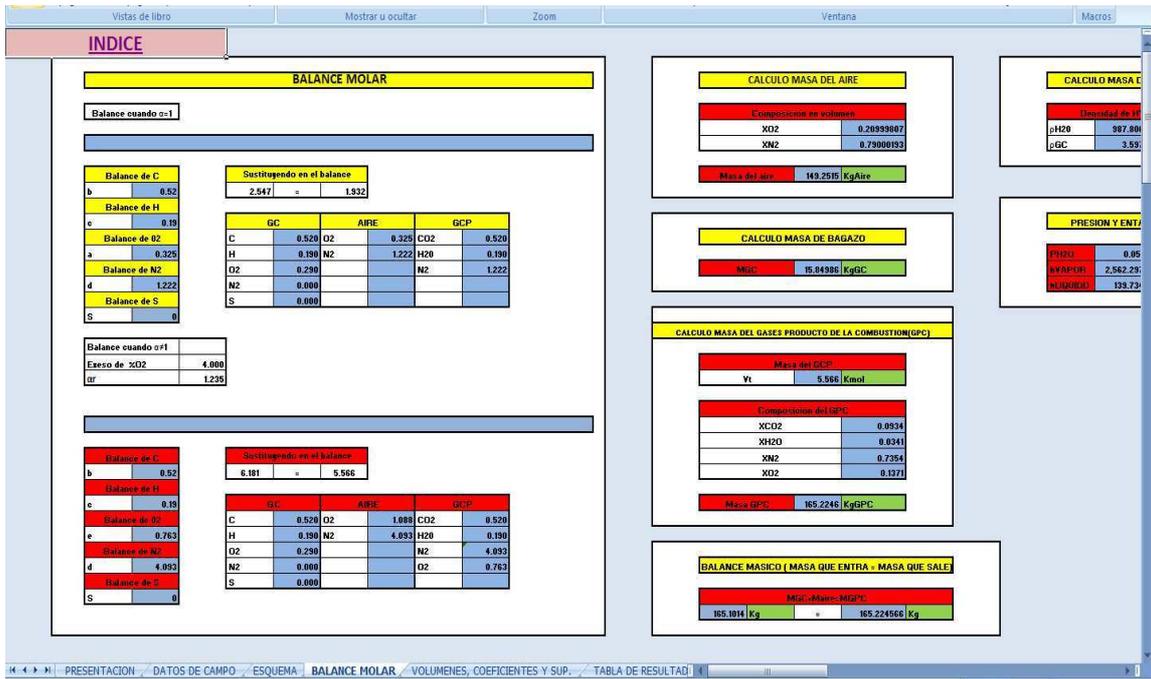


Figura 5.4 Pantalla 1 del balance molar y másico de la combustión del simulador CALDER

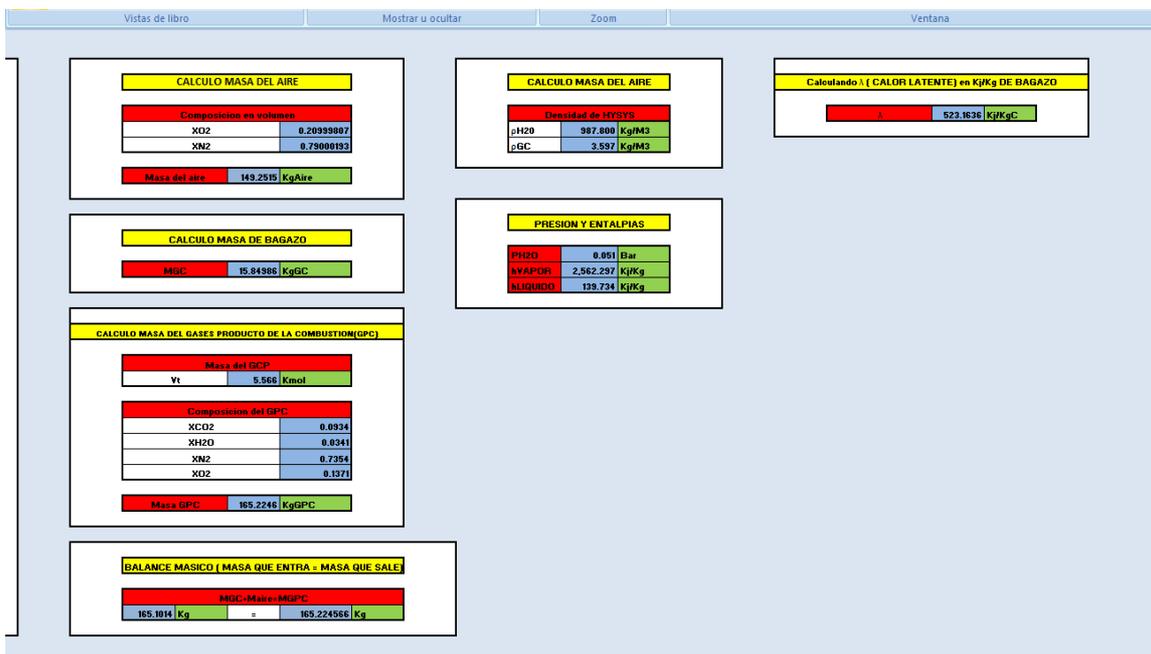


Figura 5.5 Pantalla 2 del balance molar y másico de la combustión del simulador CALDER

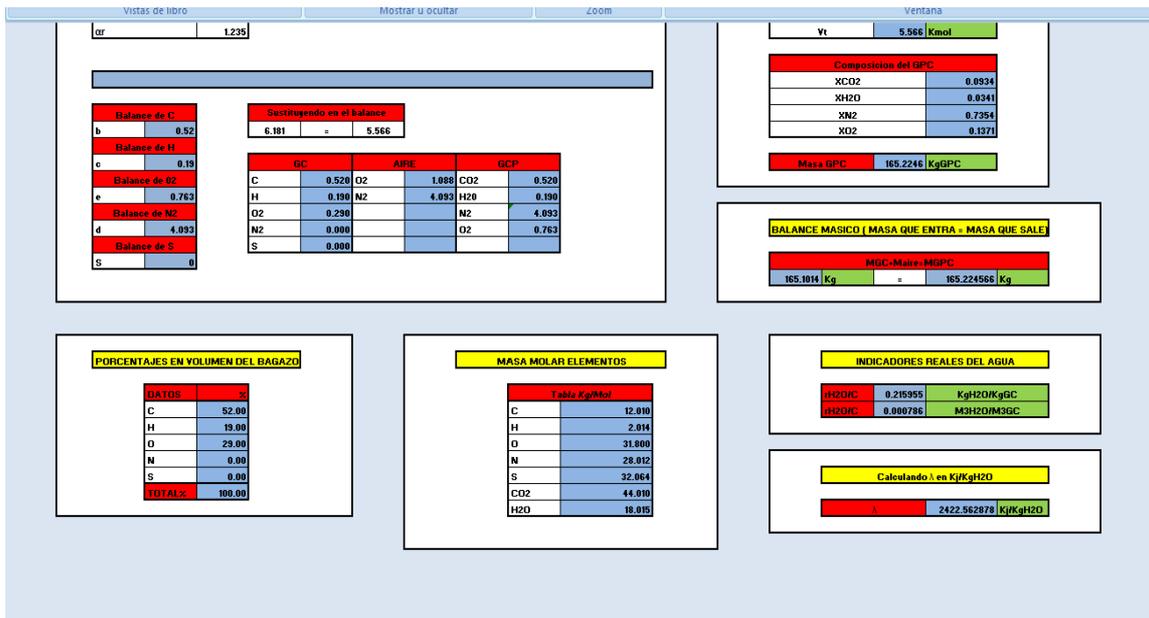


Figura 5.6 Pantalla 3 del balance molar y másico de la combustión del simulador CALDER

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS SUPERFICIES			
		HORNO	FESTON	SOBRECALENTADOR	CONDUCTO DE GAS
		Q_{VC1}	$\text{kJ/m}^3\text{gc}$	37,206.024	37,206.024
λ	$\text{kJ/m}^3\text{gc}$	2,422.563	2,422.563	2,422.563	2,422.563
Q_{VC5}	$\text{kJ/m}^3\text{gc}$	39,628.587	39,628.587	39,628.587	39,628.587
\dot{V}_a	$\text{m}^3\text{aire seco/m}^3\text{gc}$	8.692	8.692	8.692	8.692
\dot{V}_{N_2}	$\text{m}^3\text{nitrogeno/m}^3\text{gc}$	6.867	6.867	6.867	6.867
\dot{V}_{O_2}	$\text{m}^3\text{gas triatómico/m}^3\text{gc}$	0.981	0.981	0.981	0.981
V_{H_2O}	$\text{m}^3\text{agua/m}^3\text{gc}$	3.101	3.101	3.101	3.101
V_g	$\text{m}^3\text{gas seco/m}^3\text{gc}$	10.949	10.949	10.949	10.949
d	ADIMENSIONAL	1.000	1.080	1.110	1.140
α	ADIMENSIONAL	1.040	1.095	1.125	1.190
d''	ADIMENSIONAL	1.080	1.110	1.140	1.240
$\Delta\alpha$	ADIMENSIONAL	0.080	0.030	0.030	0.100
$\dot{V}_{g'}'$	$\text{m}^3\text{gas seco/m}^3\text{gc}$	8.195	8.673	8.934	9.499
$\dot{V}_{g,O}$	$\text{m}^3\text{agua/m}^3\text{gc}$	3.113	3.128	3.137	3.155
\dot{V}_g	$\text{m}^3\text{gas real/m}^3\text{gc}$	11.308	11.802	12.071	12.654
r_{rO_2}	ADIMENSIONAL	0.087	0.083	0.081	0.078
r_{rH_2O}	ADIMENSIONAL	0.275	0.265	0.260	0.249
r_g	ADIMENSIONAL	0.362	0.348	0.341	0.327

Figura 5.7 Pantalla del cálculo de volúmenes de gases combustión del simulador CALDER

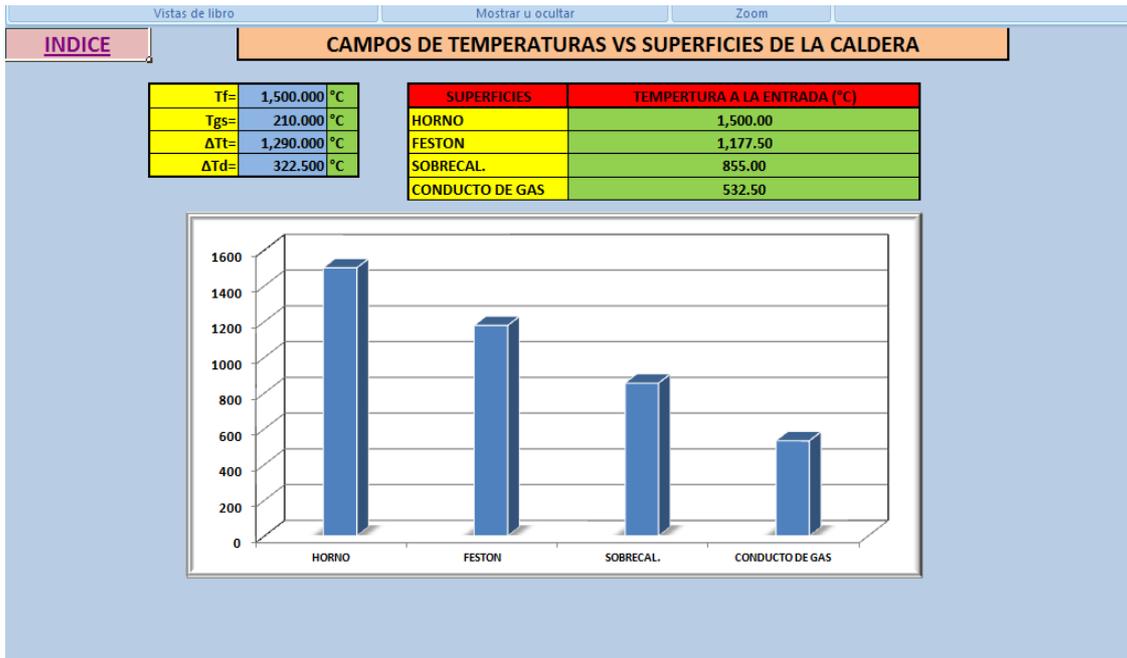


Figura 5.8 Pantalla del cálculo de los campos de temperatura del simulador CALDER

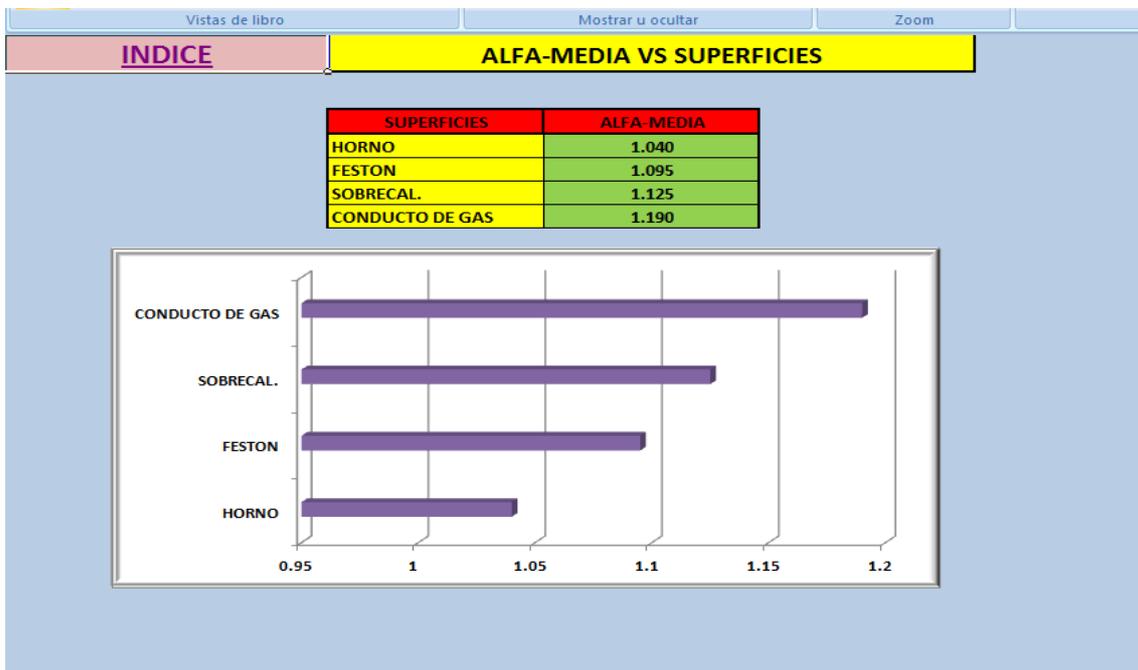


Figura 5.9 Pantalla del cálculo del coeficiente de exceso de aire en la caldera del simulador CALDER

INDICE			
CALCULOS PARA OBTENER EL CALOR DISPONIBLE			
TIPO DE VOLUMEN	FORMULA	RESULTADO	UNIDADES
VALOR CALORICO INFERIOR	Q_{bc}	37.206.0240	KJ/KgC
CALOR FISICO DEL COMBUSTIBLE	$Q_{fc} = C_c \cdot (T_c - 273) \quad (kJ / kg) \quad \text{ó} \quad (kJ / m^3)$	75.3200	KJ/KgK
CALOR ESPECIFICO DEL COMBUSTIBLE (PARA COMBUSTIBLES LIQUIDOS)	$C_c = 1.783 + 0.0025(T_c - 273) \quad [kJ / (kg \cdot K)]$	1.8830	KJ/KgC
ENTALPIA DE VAPOR EN LOS GASES DE ESCAPE	lv_{gc}	3.094.1852	KJ/KgC
CALOR FISICO DEL AIRE EN EL PRECALENTADOR DE AIRE	$Q_{psa} = (\beta_{sa} + \Delta\alpha_{sa}) V_a C_{psa} (T_{psa} - 273) - C_{af} (T_{af} - 273) \quad (kJ / kg) \quad \text{ó} \quad (kJ / m^3)$	3.795.7392	KJ/Kg
COEFICIENTE DE AIRE MEDIO DEL PRECALENTADOR	$\bar{\alpha}$ (PRECALENTADOR)	1.2503	ADIM
CALOR ESPECIFICO DEL AIRE FRIO (HYSIS)	C_{af}	2.2070	KJ/KgK
TEMPERATURA DEL AIRE A LA SALIDAD DEL PRECALENTADOR	T_{spc} (TABLAS 3.4)	330.0000	°C
CALOR ESPECIFICO A LA SALIDAD DEL PRECALENTADOR (HYSIS)	C_{spc}	1.0750	KJ/KgK
TEMPERATURA DEL AIRE AL MEDIO AMBIENTE	T_{af}	27.0000	°C
CALOR DISPONIBLE	$Q_d = Q_{bc} + Q_{psa} + Q_{at} + Q_{ic} \quad (kJ / kg) \quad \text{ó} \quad (kJ / m^3)$	41.083.6998	KJ/KgC

Figura 5.10 Pantalla del cálculo energético de la caldera del simulador CALDER

INDICE			
CALCULO DE ENTALPIAS			
ENTALPIAS	FORMULA	RESULTADO	UNIDADES
ENTALPIA DE LOS PRODUCTOS	$H = H_g + H_c \quad (KJ / Kg) \quad \text{ó} \quad (KJ / m^3)$	5,122.5520	KJ/KgK
ENTALPIA DE LA PARTE GASEOSA DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTION	$H_g = \dot{H}_g + (\alpha - 1) \dot{H}_c \quad (KJ / Kg) \quad \text{ó} \quad (KJ / m^3)$	5,545.3347	KJ/Kg
ENTALPIA TEORICA DE LOS GASES	$\dot{H}_g = \dot{V}_{CO_2} \cdot \dot{H}_{CO_2} + \dot{V}_{H_2O} \cdot \dot{H}_{H_2O} + \dot{V}_{N_2} \cdot \dot{H}_{N_2} + \dot{V}_{O_2} \cdot \dot{H}_{O_2} \quad (KJ / Kg) \quad \text{ó} \quad (KJ / m^3)$	4,634.0182	KJ/Kg
ENTALPIA TEORICA DEL AIRE	$\dot{H}_c = \dot{V}_c \cdot H_{oc} \quad (KJ / Kg) \quad \text{ó} \quad (KJ / m^3)$	3,435.1179	KJ/Kg

TEMPERATURA DE LOS GASES DE SALIDA 200°C		
°K = °C + 273	573	°K
DE 573 SE OBTIENEN LAS ENTALPIAS DE :		HCO2
		HN2
		HH2O
		HAIR

Figura 5.11 Pantalla del cálculo de entalpias de la caldera del simulador CALDER

INDICE			
CALCULO ENERGETICO			
PERDIDAS DE CALOR DE GASES DE ESCAPE Q2	$q_2 = \frac{(I_{se} - \alpha_{se} \cdot I_{se}')(100 - q_{se})}{Q_d}$ (%)	11.902	%
CALCULANDO Iaf	$i_{se} - \dot{V}_{se} \cdot C_{se} \cdot (T_{se} - T_{33})$ (kJ/kg) ó (kJ/m ³)	517.954	KJ/Kg
PERDIDAS DE CALOR Q3	TABLA 3.6 LIQUIDO CAMARA	0.500	%
PERDIDAS DE CALOR Q4	TABLA 3.6 LIQUIDO CAMARA	0.000	%
PERDIDAS DE CALOR Q5	$q_5 = q_{5a} \cdot D_n / D$ (%)	0.670	%
FLUJO NOMINAL	55 T/h	15.278	Kg/s
FLUJO REAL	55 T/h	15.278	Kg/s
% POR NOMOGRAMA	MONOGRAMA (FIGURA 3.1)	0.670	%
PERDIDAS DE CALOR Q6	NO SE CONSIDERA	0.000	%
PERDIDA DE CALOR Q7	$q_7 = \frac{11600}{B \cdot Q_1} \frac{H_{vp}}{1}$ (%)	1.008	%
AREA DE VIGAS Hvp		3.500	M2
B.Q1	$B \cdot Q_1 = D(i_{33} - i_{3a}) + D_{13}(i'' - i_{3a}) + D_n(i_{3n} - i_{3a}) + D_p(i' - i_{3a})$ (KW)	40,283.112	KW
Dvsob	55 T/h	15.278	Kg/s
Dvsat	0 T/h	0.000	Kg/s
Dri	0 T/h	0.000	Kg/s
Dp (2% del total)	0.11 T/h	0.031	Kg/s
ENTALPIA VAPOR SOBRECALENTADO Hsc	CON PRESION Y TEMPERATURA DEL VAPOR SOBRECALENTADO	3,043.891	KJ/Kg
ENTALPIA DEL AGUA DE ALIMENTAR Haa	CON PRESION Y TEMPERATURA DEL AGUA	408.203	KJ/Kg
Heri	NO APLICA		
ENTALPIA LIQUIDO SATURADO H'	CON PRESION Y CALIDAD CERO	920.346	KJ/Kg
ENTALPIA VAPOR SATURADO H''	CON PRESION Y CALIDAD UNO	2,800.620	KJ/Kg

Figura 5.12 Pantalla del cálculo de pérdidas de calor de la caldera del simulador CALDER

INDICE			
EFICIENCIA			
ENTALPIAS	FORMULA	RESULTADO	UNIDADES
EFICIENCIA BRUTA GV	$\eta_b = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7)$ (%)	86.59	%
CALOR UTIL	$Q_1 = \eta_b \cdot Q_d / 100$ (KJ/kg) ó (kJ/m ³)	35,574.24	KJ/Kg
CONSUMO DE COMBUSTIBLE	$B = B \cdot Q_1 / Q_1$ (kg/s) o (M3/S)	4,076.52	Kg/h
EFICIENCIA METODO INDIRECTO	$\eta_{gv} = Q_1 / Q_d \cdot 100$	86.59	%

Figura 5.13 Pantalla del cálculo de eficiencias de la caldera del simulador CALDER

INDICE					
TABLA 2.1 ENTALPIA DE LOS GASES ,LAS CENIZAS Y EL AIRE					
T(K)	H_{CO_2} (KJ/m ³)	H_{H_2O} (KJ/m ³)	H_{H_2O} (KJ/m ³)	H_{air} (KJ/m ³)	H_{cen} (KJ/m ³)
343.0000	170,0	129,6	150,5	130,0	80,8
473.0000	357,5	259,9	304,5	261,4	169,1
573.0000	558.8000	392.0000	462.7000	395.2000	263,8
673.0000	771,8	526,5	626,2	531,6	360,1
773.0000	994,4	663,8	794,9	671,4	458,1
873.0000	1224,7	804,1	968,9	813,9	560,2
973.0000	1461,8	947,5	1148,8	959,6	662,3
1,073.0000	1704,9	1093,6	1334,4	1107,4	767,0
1,173.0000	1952,3	1241,6	1526,1	1257,8	875,1
1,273.0000	2203,5	1391,7	1722,9	1409,7	985,9
1,373.0000	2458,4	1543,7	1925,1	1563,5	1096,9
1,473.0000	2716,6	1697,2	2132,3	1719,2	1205,8
1,573.0000	2976,7	1852,8	2343,6	1876,2	1360,7
1,673.0000	3239,0	2008,7	2559,2	2033,9	1582,6
1,773.0000	3503,1	2166,0	2779,1	2193,0	1758,5
1,873.0000	3768,8	2324,5	3001,8	2353,3	1875,7
1,973.0000	4036,3	2484,0	3229,3	2514,0	2064,1
2,073.0000	4304,7	2643,7	3458,3	2676,1	2185,6
2,173.0000	4574,1	2804,1	3690,4	2838,4	2386,4
2,273.0000	4844,2	2965,0	3025,6	3002,0	2512,0

Figura 5.14 Anexo de las Tablas de entalpías del simulador CALDER

INDICE			
TABLA 3.6. PERDIDAS DE CALOR POR INCOMBUSTION QUIMICA Y MECANICA			
TIPO DE HORNO		(q ₃)	(q ₄)
	LIQUIDO	0.50	0.00
	GASEOSO	0.50	0.00
CAMARA	GAS DE ALTO HORNO		
	HORNO	1.50	0.00
	SALIDO	0.00	0.5-6
CAPA	SOLIDO	0.00	2-15*

Figura 5.15 Anexo del cálculo de pérdidas de calor de la caldera del simulador CALDER

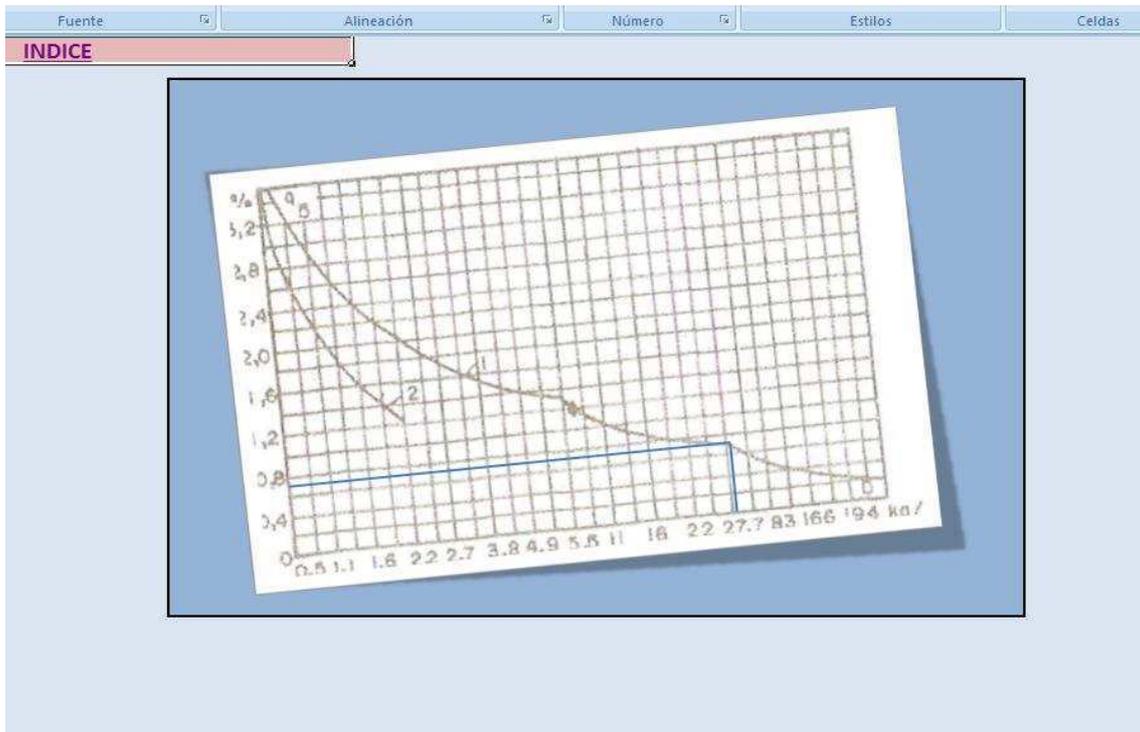


Figura 5.16 Anexo del cálculo de pérdidas de calor de la caldera del simulador CALDER

5.2 DATOS TOMADOS PARA EL ANÁLISIS.

Para el desarrollo del trabajo de investigación se tomaron diferentes datos de campo durante un periodo de tiempo en el 2011 los cuales se resumen en esta Tabla 5.1 con un total de 24 muestras:

Tabla 5.1 Datos de campo para la simulación

MUESTRA	PVSC (bar)	TVSC (0C)	PALIM (bar)	TALIM (0C)	TGSC (0C)	DVSC (T/ hr)
1	21	320	24	120	220	55
2	22	310	25	100	200	55
3	21.3	321	25.4	110	190	55
4	22	340	23	97	230	55
5	23	300	24	90	210	55
6	22	313	27	114	236	55

7	22.1	321	24	115	200	40
8	23	324	23.4	115	234	40
9	24	335	23	120	190	40
10	23	300	25	116	234	40
11	23.5	310	26	110	200	40
12	24	300	22	96	234	40
13	22	290	24	94	200	30
14	21	289	25	99	225	30
15	22	280	26.4	90	228	30
16	23.3	280	26	90	230	30
17	21	300	25	95	230	30
18	20	280	24	110	220	30
19	22	300	23	120	198	25
20	23.6	340	28	100	220	25
21	22	323	27	96	222	25
22	21	319	26	93	220	25
23	22	300	25	90	225	25
24	23	325	24	90	229	25

5.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se realizaron varias corridas con el simulador CALDER a diferentes cargas del generador de vapor, obteniéndose para cada una de ellas resultados dados en las Figuras 5.12 y 5.13 a continuación se muestra la gráfica obtenida para varias cargas de la caldera así como el modelo matemático obtenido:

Tabla 5.2 Resultados obtenidos con el simulador CALDER a diferentes cargas de la Caldera 4

CORRIDA / PARAMETRO	CARGA DE LA CALDERA	EFICIENCIA OBTENIDA EN EL SIMULADOR CALDER
1	55 TON/HR	87 %
2	40 TON/HR	82 %
3	30 TON/HR	79 %
4	25 TON/HR	71 %

Estos resultados se muestran en la siguiente Figura 5.17:

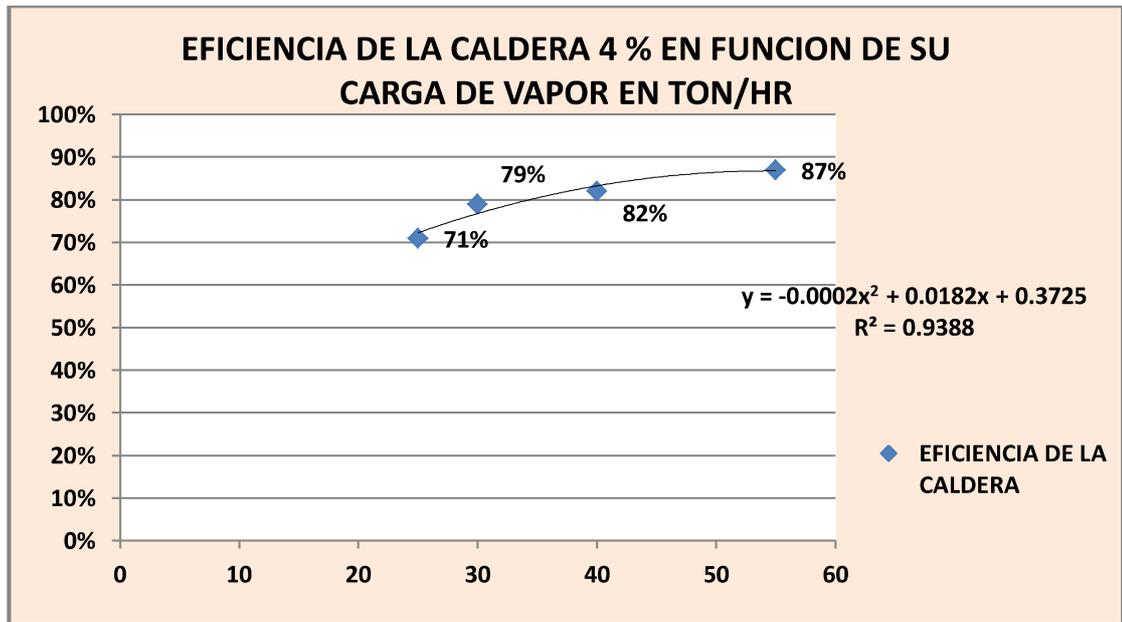


Figura 5.17 Dependencia de la eficiencia de la caldera 4 obtenida en CALDER en función de la carga de vapor de la misma, así como el modelo matemático que la describe.

**CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES**

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de haber realizado la presente investigación se puede arribar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Se presenta un simulador único en su tipo que permite realizar el cálculo en tiempo real de todas las pérdidas energéticas en una caldera de bagazo, el mismo puede ser aplicado a cualquier tipo de caldera de bagazo en México.
2. Se obtuvo la curva de dependencia de la eficiencia en la caldera de bagazo número 4 en función de la carga de la misma, esto permite predecir el comportamiento de la eficiencia y así poder cuantificarla para cualquier momento ya sea antes o después de cualquier mantenimiento que se le realiza a dicha caldera.
3. Los objetivos del proyecto fueron cumplidos a cabalidad se recomienda aumentar la base de datos para obtener mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.
4. Desde el punto de vista económico se concluye que la eficiencia de la caldera se incrementa a carga nominal con el uso del bagazo de caña esto permite realizar ahorros significativos de combustible y contribuir además al cuidado del medio ambiente ya que el bagazo es un combustible constantemente renovable.
5. El modelo polinómico obtenido para dicha caldera es posible extrapolarlo a un mas menos 10% de la carga mínima y de la carga máxima de la misma sin incurrir en grandes errores , ya que se observa a mayores cargas una tendencia completamente asintótica.
6. Se recomienda cuidar la temperatura de salida de los gases de escape de la Caldera, ya que esta acción puede aumentar en 0.5 % la eficiencia de la misma a diferentes cargas.
7. El uso de la Caldera 4 quemando solo bagazo en toda la zafra considerando una zafra normal de 100 días de duración ahorraría 2,094,288 litros de combustóleo por zafra que se dejan de quemar lo que significa un ahorro de \$ 6,282,864 millones de pesos por cada zafra, además de dejar de contaminar el medio ambiente como lo hace el combustóleo.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFÍA

1. Avallone, Eugene A.; Baumeiter III, Theodore. Marks manual del ingeniero Mecánico, 9ª edición, Mc Graw Hill, México.
2. Atreya, Arvind. Development of a highly preheat combustion air system without oxigen enrichment, U.S. Department of energy.
3. Aziz, A. Conduction heat transfer, heat transfer handbook. Gonzaga University, Sponake Washington.
4. Babcox & Wilcox. Steam, its generation and use. 40th, Mc Dermont Company.
5. Bejan, Adrian. Advanced Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons, inc. 1988, Canada.
6. Brizuela, E., Romano, S.D. Combustión, Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval". Facultad de Ingeniería, UBA año 2003.
7. Cengel – Boles. Termodinámica. Mc Graw Hill, 4ª edición, 2003, USA.
8. DOE Fundamental Handbook. Thermodynamics, heat transfer, and fluid flow. U.S. Department of energy, Washington, D.C.
9. Harbison-Walker. Refractories, Fabricantes de refractarios, Monterrey México
10. Holman J. P. Transferencia de calor CECSA.
11. Isachenko, V.; Osipova, Sukomel. Transmisión de calor. Marcombo, Moscú, URSS.
12. Karlekar, R.M. Desmond. Transferencia de Calor". 1985, Editorial Interamericana.
13. Krasnoschiokov, A.S. Sukomiel. Problemas de termotransferencia, 1987, Editorial Mir Moscú.
14. Kern, Donald Q. Procesos de Transferencia de Calor, CECSA, 1999.
15. Lienhard IV, John. A Heat transfer textbook. Third edition, Cambridge Massachusets.
16. Norma Oficial Mexicana, NOM-002-Enero 1995.
17. Norma Oficial Mexicana, NOM-009, Enero 1995.
18. North American Combustion Handbook. 1978, USA.

19. Pankrátov G. Problemas de termotecnia, Editorial Mir Moscú, 1986
20. Pavlov, Romankov, Noskov. Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química, 1976, Editorial Mir Moscú.
21. Ramírez Mesa, Roberto. Monografías de combustibles y combustión, Impreso en México, Agosto del 2003.
22. Ramírez Mesa, Roberto. Monografías de pruebas termotécnicas en Calderas y hornos, Impreso en México, Septiembre del 2003.
23. Stephen Borg, E. and Harper. Samuel E. A fiber optic probe design for combustion chamber flame detection applications. NASA/TM-2001-211233.
24. Tanquero, Nelson; Aballe, Luís M.; Reyes, Nelson. Guía Metodologica para proyectos de generadores de vapor, La Habana, Cuba.
25. Thomas Velásquez, Fernando. Prospectiva de la investigación y el desarrollo tecnológico del sector petrolero del año 2025, IMP.
26. Welty James R. Engineering Heat transfer. 1988, John Wiley & Sons. Inc.
27. Woudstra, Nico. Efficiency of combustion Delf University of technology thermal power engineering.
28. Sin autor. Combustion Research and development office of energy.
29. Sin autor. Efficiency and renewable energy. U.S. Department of energy.
30. Sin autor. Combustion, industry of the future. U.S. Department of energy.
31. Sin autor. Fiscal year 2004 annual report. U.S. Department of energy.
32. Sin autor. Combustibles y su combustión. Manuales técnicos y de instrucción, Centro de estudios de la energía, Comisión Nacional de la energía, Madrid.
33. Alberto Plauchú, "Eficiencia en calderas", impreso en México, 1995.
34. Kreith Frank, "Principios de transferencia de calor". Editorial Herrero Hermanos, sucesores S.A. de C. V, 2000
35. W.F. Stoecker "Design of thermal systems" .Editorial Hemisphere Publishing Corporation, New York 1989

36. Pedro Fernández Díez, "Ingeniería Térmica y de Fluidos", Universidad de Cantabria, <http://www.termica.webhop.info/>
37. H. E. Degler, J.C. Miles y W. H. Serverns, "Energía mediante vapor, aire y gas". Editorial Reverté S. A, 2000
38. Vázquez Ortiz Alfonso, "Generadores de vapor", editorial LIMUSA 1995.
39. Bartens, "Manual de energía para fábricas de azúcar", segunda edición, Berlín 1995.
40. León Avalos y Vez, "Generadores de vapor", Instituto Politécnico Nacional.
41. Yunus A. Cengel y Michael A. Boles, "Termodinámica, segunda edición". Editorial Mc Graw-Hill 2002.
42. Bejan, "Convection heat transfer", John Wyles y Sons, New York 1984.
43. Adrian Bejan, "Advanced engineering thermodynamics", John Wyles y Sons, New York .
44. Ing. Omar Herrera, Ing. Alejandro Blanco, Equipos de transferencia de calor, Facultad de energética, departamento de energética, Ministerio de Educación Superior, La habana, Cuba 1985, ediciones.
45. Virgil Moring Faires y Clifford Max Simmang, "termodinamica", Editorial Limusa 2003
46. Yunus A. Cengel, Transferencia de calos. Editorial Mc. Graw-Hill 2004
47. Arjona Diego, "Combustibles y Biocombustibles"; Seminario Internacional de Biocombustibles, Organización Latinoamericana de Energía; Brasilia, Brasil, www.conae.gob.mx, Abril de 2006.
48. José Ángel Manrique Valadez, "Transferencia de calor", Editorial Oxford University Pres, México S.A. de C.V, Segunda edición 2002
49. Cámara Nacional de la Industria Azucarera y Alcohólica, "Operación de calderas". Centro impulsor de la industria azucarera.