

01178
1 lej.

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
SECCION DE INGENIERIA ENERGETICA

APROVECHAMIENTO ENERGETICO DEL BAGAZO DE CAÑA
EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

Créditos Asignados a la Tesis 12

APROBADO POR EL JURADO:

Presidente: Ing. Jacinto Viqueira Landa J. Viqueira
Vocal: M. en C Ana María Martínez Leal A. M. Martínez Leal
Secretario: Dr. Juan José Ambríz García Juan J. Ambríz García
Suplente: Dr. Gautam Dutt G. Dutt
Suplente: Dr. José Luis Aburto Avila J. L. Aburto Avila

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA

**Aprovechamiento energético del bagazo de caña en
la industria azucarera**

Luis Alfredo Hernández Alarcón

T E S I S

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

Como requisito para obtener el grado de:

**Maestro en Ingeniería
(Energética)**

**Ciudad Universitaria
México, D.F.**

1987

RESUMEN

El presente estudio hace un análisis de la producción y consumo de bagazo en México relacionada con aquellos indicadores que orientan y afectan el aprovechamiento energético de la fibra dentro de la estructura y balance global de energéticos del subsector azúcar. Este análisis global se concentra al final sobre la evaluación de los generadores de vapor de un ingenio azucarero, que como Casasano, pasó de quemar solo combustóleo hasta 1984, a usar a la vez bagazo y combustóleo, en un intento por reducir su consumo específico de energía, uno de los más altos del país.

En 1985 se cultivaron 534 mil has de caña, con rendimientos de campo de 68.8 t/ha; de los 36.7 millones de toneladas de caña producidas se molieron 35.7 millones para obtener, en los 69 ingenios del país 3.2 millones de toneladas de azúcar, satisfaciendo nuevamente el consumo nacional. En la respectiva zafra se produjeron 12 millones de toneladas de bagazo húmedo, representando el 34.5% del total de la caña molida; este bagazo se destinó en un 86.5% a la generación de vapor, con un índice medio de 1.87 kg de vapor por kg de bagazo, aportando al balance energético propio el equivalente a 17.6 billones de kilocalorías que

corresponden al 66.2% de la energía total consumida por el sector, siendo el restante 33.8% aportado por el combustóleo.

Para generar vapor en 1985 había instalados 543859 H.P. aprovechados con una eficiencia ponderada del 56.4%, de los cuales el 91.5% utilizaba en forma simultánea bagazo y combustóleo, el 6.38% sólo combustóleo y el 2.1% sólo bagazo.

En el ingenio Casasano se hace un análisis similar, restando con la evaluación del aprovechamiento energético del bagazo en sus calderas y de los factores que influyen en el consumo específico de energía. De esta forma se establece que el bagazo consumido en la última zafra se quemó generando 1.4 kg de vapor por kg de bagazo en calderas trabajando con una eficiencia del 60% y consumiendo 1090 kg de vapor por tonelada de caña molida.

INDICE

	Página
I.- Introducción	1
II.- Materiales y métodos	4
III.- Producción e industrialización de la caña de azúcar	7
1.- Caña de azúcar como cultivo energético	7
2.- Potencial de producción	10
3.- Potencial agroindustrial de la caña	12
4.- Industrialización de la caña	13
5.- Descripción del proceso de elaboración de azúcar	13
5.1.-Preparación de la caña	14
5.2.-Extracción del jugo o guarapo	14
5.3.-Clarificación	17
5.4.-Evaporación	17
5.5.-Cristalización	17
5.6.-Centrifugación	18
5.7.-Secado	19
5.8.-Pérdidas de proceso	19
6.- Subproductos de la industria azucarera	20
6.1.-Utilización de subproductos	21
IV.- Aspectos energéticos de la industria	24

1.- El esquema energético	24
2.- Balance de energía	26
3.- Generación y consumo de vapor	29
3.1.-Presión y temperatura de generación	32
<hr/>	
4.- Combustibles utilizados para generación	33
4.1.-El bagazo	33
4.2.-La leña	34
4.3.-El combustóleo	35
4.4.-El carbón	36
V.- Aprovechamiento energético del bagazo de caña	38
1.- Antecedentes	38
2.- Características del bagazo	39
2.1.-Composición química y física	39
2.2.-Peso específico	44
2.3.-Almacenamiento del bagazo	44
2.4.-Otros usos del bagazo	45
2.4.1.-La pulpa	45
2.4.2.-Aglomerados	46
2.4.3.-Furfural y derivados	46
2.4.4.-Bagacillo	46
2.4.5.-Otros	47
2.5.-Poder calorífico	47
3.-Combustión del bagazo	50
3.1.-Composición del aire	50
3.2.-Cantidad de aire necesario	52
3.3.-Gases de combustión	56

3.4.-Temperatura de combustión	60
3.5.-Pérdidas de calor y eficiencia de combustión	62
3.5.1.-Quemado del bagazo	62
3.5.2.-Quemado del combustóleo	66
3.5.3.-Rendimiento de vapor y eficiencia global	71
3.6.-Dimensionamiento de calderas para quemar bagazo	72
3.6.1.-La cámara de combustión	72
3.6.2.-Hornos	73
3.6.3.-Ventiladores	74
VI.-Producción de caña y bagazo en México	75
1.- Ingenios y producción	75
2.- Rendimientos de campo y fábrica	78
3.- Explotación agrícola e industrial de la caña en México	82
4.- Características y producción	85
5.- Consumo de bagazo	88
VII.-Estructura energética de la industria azucarera en México	92
1.- Consumo de energía	92
2.- Consumo energético del bagazo	102
3.- Factores que afectan al consumo de energía	106
4.- Consumo específico de energía en la Industria	111
5.- Generación y consumo de vapor	117
5.1.-Vocación de los generadores de vapor	119
5.2.-Distribución y aprovechamiento de la potencia instalada	121
5.3.-Estimación de eficiencia y capacidad de generación	125
5.4.-Consumo específico de vapor	126

5.4.1.-Mediante potencia instalada	127
5.4.2.-Mediante consumo de combustóleo y bagazo	128
6.- Eficiencia de generación por combustibles	132
6.1.-Causas de la baja eficiencia de generación de vapor	133
6.1.1.-Por los combustibles	133
6.1.2.-Por la combustión	136
6.1.3.-Por equipos e instrumentos de combustión	137
7.- Potencial de ahorro energético	138
7.1.-En la oferta de energía	138
7.2.-En la demanda de energía	140
7.3.-Bagazo sobrante	141
7.4.-Cogeneración	143
VIII.-Análisis y evaluación del aprovechamiento del bagazo en el Ingenio Casasano.	145
1.- Antecedentes	145
2.- Potencia instalada	146
3.- Operación y consumo de combustóleo	147
4.- Estructura energética del ingenio	153
4.1.-Producción y consumo de bagazo	153
4.2.-Consumo de combustóleo	155
4.3.-Generación y consumo de vapor	155
4.4.-Variación del consumo de energía en las tres últimas zafras.	160
4.5.-Factores que influyen en el consumo de energía	165
5.- Evaluación de los generadores de vapor	167

5.1.-Características de los generadores de vapor	168
5.2.-Balance de masa y energía por generador	171
5.2.1.-Estimación del suministro de combustóleo	172
5.2.2.-Estimación del suministro de bagazo	173
5.2.2.1.-Pérdidas de tiempo en el suministro de bagazo	178
6.- Evaluación de la combustión	180
6.1.-Generador No.1	181
6.1.1.-Flujos y exceso de aire	181
6.1.2.-Velocidad y descarga de gases de escape	183
6.1.3.-Composición de los gases de escape	184
6.1.4.-Pérdidas de la combustión	185
6.1.4.1.Por el combustóleo	185
6.1.4.2.Por la combustión de bagazo	188
6.2.-Generador No.2	189
6.2.1.-Flujo y exceso de aire	189
6.2.2.-Velocidad y descarga de los gases de escape	191
6.2.3.-Composición de gases de escape	192
6.2.4.-Pérdidas y eficiencia de la combustión	194
6.3.-Generador No.4	194
6.3.1.-Flujo y exceso de aire	194
6.3.2.-Velocidad y descarga de los gases de escape	196
6.3.3.-Composición de los gases de escape	197
6.3.4.-Pérdidas y eficiencia de la combustión	197

6.4.-Generador No.3	198
6.4.1.-Flujo y exceso de aire	198
6.4.2.-Velocidad y descarga de gases de escape	200
6.4.3.-Composición de los gases de escape	200
6.4.4.-Pérdidas y eficiencia de la combustión	201
7.- Balance de vapor	202
IX.- Conclusiones	206
X.- Recomendaciones	213
XI.- Bibliografía	217
XII.- Apéndices	222

I INTRODUCCION.

Dentro de los subsectores industriales de México, la industria azucarera ha consumido más del 9% del total de la energía demandada por el sector industrial en forma de hidrocarburos líquidos comprados, siendo uno de los subsectores con mayor uso intensivo de energía en México. Sin embargo, esta industria es la única capaz de generar su propia energía en más de un 60% en todos los tiempos de su actividad utilizando el bagazo de caña, subproducto celulósico combustible componente principal de la biomasa de la caña.

Antes de 1950, la oferta de energía para los ingenios azucareros se basaba en residuos biomásicos y carbón; después de este año y ante los bajos precios de los hidrocarburos, el petróleo fué sustituyendo en la oferta de energía al bagazo, principalmente en aquellos países con un balance positivo en cuanto a recursos petroleros.

Fruto de los incrementos en los precios del petróleo como efecto de las crisis de energéticos en 1973 y 1981, los países productores de azúcar a partir de caña incluyeron dentro de sus planes, políticas de uso eficiente y ahorro de energía acompañadas de programas de mejoramiento tecnológico e investigación de fuentes nuevas y renovables de energía. Esto

tuvo como efecto que países de América Latina hicieran esfuerzos en recuperar la importancia dentro de la estructura de la oferta de energía del bagazo de caña en los ingenios azucareros, como sucede en Brasil y Cuba donde se redujo a 5 y cero litros el consumo de combustóleo por tonelada métrica de caña (TMC) respectivamente, siendo la restante energía suministrada por la fibra del bagazo.

Actualmente, México está entre los diez países más importantes productores de azúcar en el mundo, pero por la situación de su infraestructura de producción acompañada de plantas de generación de vapor poco eficientes, con grandes fallas en cuanto a diseño y operación, ha quedado a la zaga en la reducción del consumo específico de energía, mostrando consumos del orden de 30 litros de combustóleo por TMC, que desajustan el balance global de energía de la industria respecto a su potencial de producción.

El presente estudio, utilizando un método deductivo busca encontrar la situación real de la estructura energética de la industria azucarera en los últimos 25 años mostrando los índices de consumo específico de vapor y energía y uso de la potencia disponible de la planta de fabricación de azúcar en México, dentro del marco del aprovechamiento energético del bagazo de caña. Se remata este análisis global con la evaluación del comportamiento energético de los generadores de vapor de un ingenio en particular (CASASANO), el cual hasta

1984 quemaba solo combustóleo para generar vapor, pasando en 1986 a quemar bagazo y combustóleo en un intento por reducir su alto consumo específico de petróleo (65 l/TMC), uno de los índices más altos del país.

II. MATERIALES Y METODOS.

1. Con base en una minuciosa revisión bibliográfica y estadística, se describen y analizan los aspectos más importantes en cuanto a producción e industrialización de la caña de azúcar durante los últimos 25 años en México, con miras a establecer la producción, destino y consumo energético del bagazo de caña.
2. Se ubica el subsector azúcar dentro del sector industrial y se compara con otros subsectores de uso intensivo de energía en términos del consumo de hidrocarburos; se establece el consumo relativo de combustóleo y se analizan los factores que inciden en su consumo específico.
3. Mediante programas de computadora se analiza la vocación y las características de los generadores de vapor en los últimos 25 años, por combustibles usados, e índices de aprovechamiento de la potencia instalada para llegar a los cálculos ponderados de rendimiento de generación y combustión para cada uno de los ingenios vigentes.
4. Se establecen comparaciones en las estimaciones de rendimientos de generación y combustión en calderas por dos métodos propuestos para el estudio: consumo de combustóleo

y potencia instalada.

5. Se analizan las causas de los bajos rendimientos de la generación de vapor y se establece con la perspectiva de un mejor aprovechamiento energético de los combustibles, un potencial de ahorro de energía tanto de la oferta como de la demanda, en el marco de un aumento de la generación de vapor por kg de bagazo y litro de combustóleo.
6. En cuanto al caso particular del Ingenio de Casasano se hace un análisis comparativo de los factores operacionales que apuntan hacia la producción, consumo de bagazo y rendimientos de generación en los últimos 25 años.
7. Mediante programa de computadora se establece la significancia estadística de aquellos factores que se considera tienen relación con el consumo de energía en el Ingenio Casasano (bagazo y/o combustóleo), en las tres últimas zafras: 84/85, 85/86 y 86/87.
8. Se miden y evalúan las descargas de bagazo y combustóleo para cada una de las calderas del ingenio a las diferentes condiciones de operación.
9. Mediante instrumentación: tubos de Pitot, medidor Orsat, termómetros, pirómetros, termopares y medidores Testoryt, se mide y evalúa el comportamiento y calidad de la combustión en las diferentes condiciones de operación de las calderas del ingenio.

10. Se determinan y comparan los índices de generación de vapor para bagazo y combustóleo como producto de la actividad de cada caldera del ingenio.
-

III. PRODUCCION E INDUSTRIALIZACION DE LA CAÑA DE AZUCAR

1. Caña de azúcar como cultivo energético

De los cultivos a nivel mundial en áreas tropicales y subtropicales, la caña de azúcar ocupa una posición importante por su rápido ciclo vegetativo, altos rendimientos en la producción de azúcar y mieles, así como sus posibilidades de autoabastecimiento energético.

La caña de azúcar es una planta muy eficiente para la conversión de energía solar, la que transforma en energía fotoquímica; en el plano energético es un colector vivo de energía solar a formas químicas aprovechables y almacenadas en azúcares libres o estructurales que pueden alcanzar entre 3.78 y 4 millones de kcal por tonelada métrica (48).

En cuanto a su balance energético, el índice de energía almacenada a energía suministrada, estudios detallados (4) muestran que la caña entrega materia seca con un equivalente energético 3 veces mayor que la energía empleada para su producción.

En la Tabla No.1, para un cultivo de caña en la India, se muestran las ventajas en cuanto al índice de aprovechamiento energético.

TABLA 1

Balace de Energía para el Cultivo
de Caña de Azúcar en sus dos formas de Cultivo.

OBSERVACION	PLANTILLA (1)	SOCA (2)
Energía Suministrada (kcal 10E+6/ha)	40.2	15.8
Energía Producida:		
Producción de Caña (t/ha)	44.2	34.1
Azúcar (a) (t/ha)	5.8	4.1
Azúcar (kcal 10E+6/ha)(b)	21.0	16.3
Subproductos (t/ha)(c)	11.7	9.0
Subproductos (kcal 10E+4/ha)(d)	41.0	31.6
Energía Total Producida(kcal 10E+6/ha)	62.1	47.9
Coeficiente Energético:		
Energía Producida/Energía suministrada	1.54	3.03

Fuente: Malik et al, Energy 1983.(48)

Notas:

a.-Se consideran las formas azucaradas como el 12% de la caña cruda.

b.-Para aspectos de dieta el azúcar produce 3.98 Mcal/kg.

c.-El contenido de materia seca de cogollos se estima en 3%,

el de hojas el 14 y el bagazo 22.5% la porción aérea total en promedio se estima en el 27%.

d.-La energía de combustión es de 3.5 Mcal/kg. Sin embargo, los cogollos de la caña son generalmente utilizados como complemento alimenticio para animales.

(1). Cuando la caña se siembra por primera vez

(2). Cuando la misma planta sembrada se le hacen varios cortes

Aunque el uso tradicional de la caña ha sido la producción de azúcar, tanto la crisis energética como la alimentaria han conducido a analizar las formas de dar respuestas a estas necesidades empleando vías convencionales hasta el momento, para las cuales la propia caña aporta los ingredientes energéticos necesarios.

Sobre este particular, De Araujo (21), señala que en Brasil el potencial de la caña de azúcar en productos, subproductos y energía por tonelada métrica de caña molida en el proceso de fabricación de azúcar equivale a 90kg. de azúcar, 12 litros de alcohol, 170 litros de vinaza, 45 kg de cachaza y 619 kg de vapor producidos al quemarse el bagazo en los ingenios. El mismo autor señala que cuando la vocación de la caña es la producción de alcohol, de una tonelada métrica de caña (1TMC), se producen 65 lts. de alcohol (361,590 kcal), 270 kg de bagazo (609,390 kcal), 780 lts. de vinaza (11.73 metros cúbicos de biogás o 58,500 kcal).

2. Potencial de producción.

Según estudios de FAO (67), Tabla No.2, el potencial de producción de caña de azúcar para fines energéticos y/o alimentarios, se distribuye en las diversas regiones del mundo, exceptuando la URSS así:

TABLA No.2
Distribución de la Producción de Caña de
Azúcar en el Mundo
(10E+3 TMC, 1981)

Asia	330191
E.U.	24514
Europa	390
Sudamérica	197600
Africa	59759
Oceania (Australia)	216
Centro América(1)	169466

TOTAL	782136

(1) incluye a México

Fuente: FAO, 1982, (67)

En cuanto a productividad (ton/ha) y superficie sembrada (has), la misma fuente, presenta los siguientes datos:

TABLA No. 3
Superficie Sembrada y Productividad de los
Principales Productores de

Café.

País	Sup. Sembrada	Product. Media
	10E+3has	TMC/ha
Egipto	118	78.0
Cuba	1246	53.3
Sudáfrica	250	78.0
Rep. Dominicana	174	62.4
México(a)	480	71.9
Estados Unidos	304	80.6
Argentina	346	42.2
Colombia	290	79.7
China	675	69.8
India	3220	56.4
Indonesia	180	83.9
Pakistan	823	36.5
Filipinas	503	41.4
Tailandia	567	33.5
Australia	258	83.3

(a) México, en 1985 en los 3 ciclos de café, tenía una superficie cultivada de 534 034 has, con rendimiento

promedio de 68,9 TMC/ha.

3. Potencial agroindustrial de la caña

La caña de azúcar es la materia prima cuyo potencial industrial ~~permite una explotación factible tecnológica y~~ económica fortalecida por la producción de azúcar, alcohol y fuentes no convencionales de energía mediante el aprovechamiento de subproductos como bagazo, vinaza, cachaza y melazas. Esta factibilidad técnico económica puede incrementarse con la utilización integral de la caña de azúcar y de los recursos humanos y tecnológicos disponibles en una región determinada.

El potencial de la caña de azúcar puede valorarse por la composición y riqueza de la sacarosa y del tejido de la planta, afectados por factores tales como variedad, grado de maduración, sanidad, afloramiento, sistemas de corte, tiempo del corte hasta su procesamiento industrial, precipitación, radiación, temperatura y otros factores climáticos.

La obtención de mejores variedades que rindan una mayor producción de azúcar, alcohol o productos similares por área cultivada, complementada con alta resistencia a patógenos y condiciones ambientales constituyen factores imprescindibles cuando se proyecta y planea un programa industrial ya sea para fines de alimentación o energía.

4. La industrialización de la caña de azúcar.

Para la industrialización de la caña destinada a la obtención de azúcar se debe contar con un proceso eficiente que garantice el aprovechamiento máximo del potencial ~~energético de la materia prima. Es muy común en la producción~~ de azúcar y otros productos a partir de la caña que se presenten rendimientos industriales diferentes (toneladas de producto por TMC), por calidades de caña semejantes (21).

Básicamente, el proceso de elaboración de azúcar se resume en las etapas de extracción o molienda y concentración, ésta última compuesta por los procesos de clarificación, evaporación, cocción, cristalización y turbidaje.

En el diagrama No.1 se observa el proceso general de elaboración de azúcar cruda, mientras que el diagrama No.2 complementa la elaboración de azúcar refinado.

5. Descripción del proceso de elaboración de azúcar.

Las principales etapas del proceso de elaboración de azúcar se pueden sintetizar (32),(35), en: Preparación de la caña, extracción del jugo, clarificación, evaporación, cristalización, centrifugación, secado y envasado.

5.1. Preparación de la caña.

En el batey, zona de entrada de la materia prima al ingenio, se maneja la caña por medio de gruas alzadoras o volteadoras mecánicas que descargan la caña en bandas transportadoras para conducirla a la etapa de preparación; la caña se prepara cortándola y desfibrándola por medio de un juego de cuchillas y desfibradora de martillos, respectivamente.

Desde recientes épocas en algunos ingenios se ha instalado el lavado de la caña, pues la creciente mecanización en las tareas de cosecha mecánica, hace que esta llegue a los molinos con un alto porcentaje de tierra (mayor de 3%), piedras, ramas y hojas que dificultan la molienda y extracción aumentando las necesidades energéticas (44).

5.2.- Extracción del jugo o guarapo.

Esta operación se realiza mediante la compresión de la caña en molinos dispuestos en tandas o serie. En esta fase se aplica agua sobre la caña en molienda para facilitar la extracción de la sacarosa (imbibición). Al terminar el proceso se obtiene como subproducto el bagazo, el que es transportado por medio de conductores hacia la zona de empaque o hacia las calderas donde se utiliza como combustible en la generación de vapor.

DIAGRAMA 1

PROCESO DE ELABORACION DE AZUCAR CRUDO

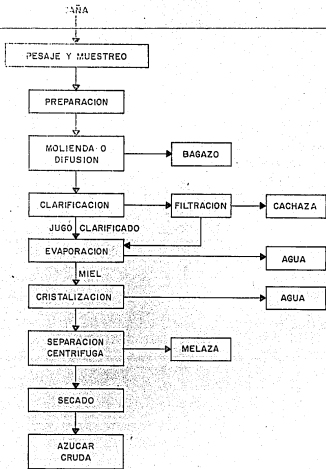
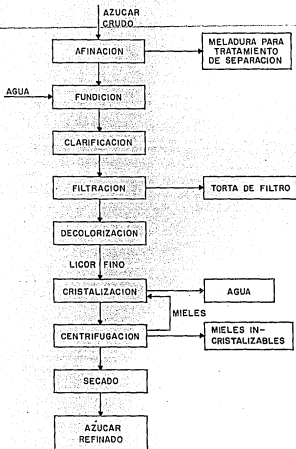


DIAGRAMA 2

PROCESO DE ELABORACION DE AZUCAR REFINADA



FUENTE: SPENCER, 1964 (65)

5.3. Clarificación.

Tiene como objetivo la remoción de la máxima cantidad de los compuestos azucarados que contiene el guarapo extraído de los molinos. Para lograrlo, se alcaliniza el jugo y se somete a calentamiento llevándose a cabo el proceso de floculación y sedimentación del material en suspensión no deseado. Posteriormente mediante filtrado se separa el jugo clarificado del precipitado (cachaza), y pasa luego a la etapa de evaporación.

5.4. Evaporación

En este proceso se reduce el alto contenido de agua en el guarapo (85% en peso), a un 25% a través del múltiple efecto al vacío, obteniéndose el jugo concentrado o meladura.

5.5. Cristalización.

La meladura obtenida se somete a un proceso de concentración y saturación para la conformación de los cristales de azúcar. Esto se obtiene, mezclando la meladura y los cristales de siembra en recipientes al vacío de simple efecto.

5.6. Centrifugación.

Consiste en separar el azúcar cristalizado de la miel incristalizable por medio de cilindros provistos de mallas metálicas perforadas que giran a alta velocidad.

Para elaborar el azúcar estándar, se profundiza la depuración sulfitando el guarapo para lograr una mayor decoloración. Posteriormente, en la etapa de centrifugación se complementa el proceso mediante lavado de agua de condensados separando la miel que recubre el azúcar cristalizado; por último se procede a secar el azúcar.

La refinación es un proceso que acentúa la calidad del producto en cuanto a pureza, textura, color y contenido de humedad. Utiliza como materia prima el azúcar crudo, el cual se somete a un nuevo proceso de clarificación. Este proceso tiene varias etapas destacándose el fundido, la disolución del azúcar cruda en agua de condensados y el tratamiento químico.

En esta última fase, el licor es sulfitado y alcalizado para ser aireado, calentado y clarificado. El licor luego es filtrado y decolorado nuevamente con absorbentes industriales (carbón activado). Por último la meladura se somete a cristalización y centrifugación.

5.7. Secado

El azúcar sólido se somete a secado hasta determinado contenido de humedad para cumplir con las normas comerciales y de envasado.

5.8. Pérdidas de proceso.

Las pérdidas industriales que acompañan al proceso, afectan en una forma más significativa la etapa de extracción ya que las melazas constituyen la materia prima para la fabricación de alcohol, como sucede en Brasil, México y Cuba (43).

En Brasil, las pérdidas industriales llegan al 12% de la sacarosa de caña, en Cuba al 11% y en México pueden alcanzar hasta el 20% (32).

Las pérdidas reducen la eficiencia de fábrica (TMA/TMC)* y aumentan considerablemente el consumo específico energético (kcal/kg de azúcar).

En la concentración, las pérdidas se establecen en la torta de filtro o cachaza y tienen relación con la composición del guarapo en términos del fósforo o calcio los cuales

*TMA= Tonelada métrica de azúcar.

gobiernan la clarificación (65).

6. Subproductos de la industria azucarera.

La producción de azúcar o alcohol a partir de la caña de azúcar está acompañada de la disposición de subproductos aprovechables económicamente.

En Brasil, (54),(43), de 1 TMC orientada a la producción de azúcar se obtienen 90 kg de azúcar, 275kg de bagazo, 40kg de melaza y 45kg de cachaza. El aprovechamiento de la melaza a su vez podría producir 12 lts. de alcohol y aproximadamente unos 170 litros de vinaza.

En México, (42),(9), de 1 TMC en 1985 se podían obtener 91kg de azúcar, 10 lts.de alcohol, 130 lts de vinaza, 48kg de cachaza y 345 toneladas de bagazo.

Visto desde el punto de vista regional, América Latina cuenta con unos 700 centros azucareros, de los cuales el 50% tienen una capacidad de molienda inferior a los 2500t/día, el 40% está entre 2500 a 6000 t/día y el 10% con más de 6000t/día. Con esta capacidad instalada (55),(54), se podría alcanzar una producción anual de 30 millones de toneladas de azúcar, las que podrían generar una cantidad de subproductos, según tabla 4.

TABLA 4

Subproductos que pueden obtenerse con una producción de 30 millones toneladas de azúcar al año

Subproductos	Millones de Toneladas
Cogollos	44
Hojas y pajas	102
Miel final (88% Brix)	9
Cachaza (77% de humedad)	8
Bagazo (50% de humedad)	66

Fuente: Araguez, 1983.(4)

Se puede observar que la región cuenta con gran potencial de subproductos de la caña los que constituyen materias primas para la industria y agricultura, capaces de diversificar y ampliar la economía azucarera.

6.1. Utilización de subproductos.

Si se tiene en cuenta que más del 60% de la caña de azúcar se cosecha en países en vías de desarrollo, el aprovechamiento de subproductos, por su estructura tecnológica e industrial no ha alcanzado el mejor grado de aprovechamiento (39).

A pesar que en el siglo XIX la industria de la azúcar contaba con una tecnología definida, es hasta mediados del presente siglo cuando comienza a tenerse en cuenta el aprovechamiento de subproductos y derivados en virtud del incremento en los costos de producción, aspectos energéticos y ambientales.

Los primeros usos de los subproductos fueron los del bagazo de caña como combustible en la generación de vapor en los ingenios y las mieles en la producción de alcohol y en la alimentación de animales (42). El inicio de la expansión de los derivados con la creación de plantas industriales comienza a partir de la década del 40. (5). A estas alturas se comienzan a realizar esfuerzos tecnológicos significativos para hacer de los residuos de la fabricación de azúcar una fuente de materia prima competitiva para la industria de pulpa y papel, fermentaciones y aglomerados. A partir de la década de los 50 y a principio de los 60, se activa a mayor escala la utilización industrial de los subproductos, agregándose además la producción de furfural, lisina y otros (59).

En la actualidad, complementando al aprovechamiento energético, se industrializa el 10% del bagazo producido, habiendo alcanzado un mayor desarrollo la producción de alcohol y luego la de tableros (55). En América Latina, el país que presenta un mayor porcentaje de industrialización del bagazo es Perú, con el 78% de la producción total para la

fabricación de papel (54).

Las mieles se dedican principalmente a la producción de alcohol, aunque Cuba utiliza grandes cantidades para la producción de levadura forrajera. Brasil, es el único país del mundo que emplea más del 40% de la caña producida (46), para la producción de alcohol.

IV. ASPECTOS ENERGETICOS DE LA INDUSTRIA

1. Esquema energético.

El esquema energético de la mayoría de los ingenios azucareros, al menos en América Latina(19), muestra enfoques técnicos de comienzos de siglo. La máquina de Corliss se había afianzado como la fuerza motriz más adecuada para los molinos de caña, principal consumidor de energía mecánica en los ingenios (2). Otros tipos de máquinas de vapor se usaron con otros propósitos en bombas, centrifugas, cristalizadores e incluso para la generación de electricidad, aunque para este fin, la utilización de la turbina de vapor se introdujo desde hace muchos años (34).

Las presiones y temperaturas de la máquina de Corliss y otras alternativas estaban en el rango de 8 a 10 kg/cm² sin sistemas de recuperación de calor, consumiendo vapor en el proceso entre el 50 a 70% del peso de la caña (44). Con tales condiciones termodinámicas de vapor se diseñaron la mayoría de las fábricas de azúcar existentes, lo que permitió un buen balance entre la demanda de vapor a alta presión y el calentamiento, no siendo necesario ningún otro combustible, fuera del bagazo obtenido en la molienda de la caña.

Durante el último cuarto de siglo, muchos ingenios que utilizaban bagazo como principal combustible para la generación de vapor han cambiado esta vocación, sustituyéndolo por combustóleo.

~~Las crisis energéticas de 1973 y 1983 que condujeron a~~ aumentos considerables de los costos del petróleo y sus derivados, produjeron desajustes económicos principalmente en aquellos países importadores de petróleo, estableciendo una conversión nuevamente hacia el aprovechamiento integral del bagazo. Esta situación fué muy diferente en algunos países productores como México, donde en el mercado interno se adoptó una política de subsidio del combustóleo a la industria azucarera (32), (38), lo que condujo a elevar su consumo en los últimos 15 años.

Durante los últimos 30 años, el desarrollo tecnológico de la ingeniería de la fabricación de azúcar ha ampliado el horizonte de soluciones hasta la reducción del consumo de energía mejorando eficiencias e impulsando el desarrollo de generadores de vapor de altas presiones y temperaturas. Ejemplo de esto, lo constituye el uso de turbinas de vapor, generadores de extracción condensación y la innovación de calderas de alta presión para quemar bagazo (55)

El producir vapor de alta presión y temperatura quemando bagazo y utilizar en forma eficiente el vapor en el proceso, hacen posible que los ingenios, después de autoabastecer sus requerimientos energéticos estén en condiciones de entregar bagazo sobrante o electricidad (39).

2. Balance de energía.

Con el objeto de ilustrar la forma como se genera y consume la energía, Hornburg (35), muestra (cuadro No.1), el balance de energía para un ingenio típico de Louisiana (E.U.), bajo las siguientes condiciones:

Capacidad de molienda	:	100 TMC/hora
Rendimiento de fábrica	:	8.5% (Azúcar cruda)
Oferta de energía	:	
de bagazo	:	45%
de Petróleo	:	55%

Las calderas no disponen de calentadores y/o economizadores

de fibra de caña (base seca)	:	12%
de bagazo de caña (húmedo)	:	24%
Eficiencia de la caldera	:	57.5%

Cuadro No. 1

Balance energético para un ingenio que muele 100
t/hora de caña.*

Descripción	Energía Prod.	Energía Cons.	%
	10+E6 kcal/Hora	10+E6 kcal/Hora valor teórico	
Vapor de proceso	29.7		
Generac. de potencia		1.43	4.82
Turbomolinos		1.37	4.61
Calentamiento de jugo		2.63	8.85
Evaporadores		12.66	42.63
Cristalizadores		7.63	25.69
Varios y pérdidas		3.98	13.40
Total	29.7	29.7	100

* Se transformaron las unidades de energía al sistema métrico y se adicionan los porcentajes de participación.

El mismo autor presenta en el cuadro 2, el balance de energía para un ingenio que produce azúcar refinada, bajo las siguientes condiciones:

Producción: 100 Ton/día de Azúcar refinado.

El Azúcar refinado corresponde al 94% del azúcar crudo suministrado.

El agua para el proceso es alimentada a 92°C.

El rango de calor específico de la solución azucarada varía entre 0.65 y 0.85.

Eficiencia de la caldera: 70%

CUADRO 2

Balance Energético para un Ingenio que Produce
1000 Ton/día de Azúcar Refinada.

Descripción	Energía Producida	Energía Cons.	%
	por hora	por hora	
	10E+6 kcal	10E+6 kcal	
	teórico	teórico	
Vapor de Proceso	36.48		
Gener. de Potencia		2.20	6.03
Mezclado		1.0	2.74
Calentamiento de agua		2.78	7.60
Fundición		0.60	1.64
Centrifugación		1.79	4.90
Calentamiento del licor		0.54	1.45
Cristalización		12.80	35.08
Secado		5.36	14.7
Evaporación de múltiple efecto		6.93	19.0
Varios y pérdidas		2.49	6.82
Total	36.48	36.48	100

Nota: Valores transformados a unidades métricas y adicionado

la columna de porcentajes.

Los dos cuadros anteriores muestran que en la producción de azúcar crudo los evaporadores consumen el 42.63% de la energía, ~~mientras que en la fabricación de azúcar refinada los cristalizadores (tachos), consumen el 35.08%.~~

Además, de los datos de balance de energía y producción de azúcar se deduce que en la fabricación de azúcar crudo se emplean en promedio 6100 kcal/kg, mientras que en azúcar refinada 6158 kcal/kg, con un incremento de 0.85% para la energía utilizada en el refinado (téngase en cuenta la eficiencia de la caldera)

3. Generación y consumo de vapor

El vapor producido en la calderas de los ingenios constituye la oferta de energía en la industria azucarera y es consumido en operaciones mecánicas de molienda, generación eléctrica y calor de proceso. El vapor es generado en calderas que operan entre 10 y 20 bares con temperaturas correspondientes entre 180 y 500°C, utilizando como combustibles bagazo y combustóleo (31).

Se considera (19) que los ingenios azucareros con el diseño, equipo y operación adecuados, consumen entre 400 y 600 kg de vapor por cada TMC procesada; pero existen viejos ingenios en donde este consumo puede subir a unos 1000 kg de

vapor por TMC.

En América Latina y en Asia, los ingenios viejos y aun los nuevos muestran eficiencias muy bajas, utilizando entre 550 a 650 kg. de vapor por TMC (3).

Durante muchos años, las fábricas de azúcar de remolacha, con parámetros de proceso próximos a las de azúcar de caña han probado prácticas a través de esquemas más sofisticados en el sistema de calefacción- evaporación- cocción, bajando el vapor de proceso hasta 320 kg por TMC (39). La utilización de extracciones del evaporador para calefacción y cocción, el uso de un número alto de efectos (5 ó más), son elementos que han permitido el incremento de la eficiencia. Dichos dispositivos mejorados se han probado en la fabricación de azúcar a partir de caña, obteniéndose valores del orden de 370 kg de vapor por TMC. Esta reducción en el consumo de bagazo y petróleo puede bajar los consumos energéticos del orden del 25% (28). Hugot (36), señala que el consumo de vapor por TMC varía en proporciones amplias de acuerdo con que la fábrica esté o no electrificada, según el uso de vapores y de la termocompresión. El mismo autor señala que el vapor necesario en condiciones óptimas de operación es de 450 kg por TMC y que en los ingenios con evaporadores triples con uso múltiple de vapor para las bombas, el consumo puede ascender hasta 600 o 700 kg. Cuando se emplea el quintuple efecto, el vapor se genera sobrecalentando a alta presión y el consumo puede estar entre

400 a 500 kg de vapor/TMC(58).

En Hawai, el consumo está en el orden de 520 kg, mientras que en Cuba para plantas tradicionales el consumo está por los 540 kg de vapor por TMC (21).

Ultimamente, con presiones y temperaturas altas y secado de bagazo por debajo del 45%, se han obtenido consumos de 370 kg/TMC (60).

En Brasil (46), se consumen en promedio 450 kg de vapor/TMC, siendo este índice muy alentador dentro de la política local de ahorro de energía.

En México la mayoría de los ingenios están equipados con calderas de baja presión y turbogeneradores de contrapresión que operan entre 150 y 200 P.S.I. (36). La razón histórica detrás de este tipo de equipos es el hecho de que la gran mayoría de éstos fueron diseñados para una época de combustibles fósiles baratos y abundantes, no existiendo la necesidad de combustibles alternos.

En consecuencia, las plantas de generación de vapor y electricidad no fueron diseñadas para maximizar la recuperación de la energía contenida en el bagazo (16), sino solamente para proporcionar vapor y electricidad suficiente para satisfacer las necesidades de los ingenios. Otro aspecto que incide en la baja generación de vapor, es que en la mayoría de los ingenios viejos en América Latina y el mundo, a las calderas no se les

suministra los elementos para la recuperación de calor sensible de gases de chimenea, como son el economizador y el precalentador de aire, encontrándose temperaturas del orden de 300°C en gases de escape, con las consecuentes pérdidas de calor que implica tales diseños.

Otro elemento asociado a la eficiencia de las calderas es el tipo de horno; los hornos que queman bagazo en forma de pila como el holandés, Ward, Martin, requieren de un gran exceso de aire (22) sobre el teórico, hasta un 100% ó más. Los hornos con lanzadores de bagazo introducidos hace 30 años, requieren solo de un 30% de exceso de aire (16). La utilización de estas tecnologías hace que la eficiencia de las calderas aumente hasta un 85%, significando de esta forma una reducción del consumo de bagazo del orden del 30% (66).

3.1 Presión y temperatura de generación.

La generación de una tonelada métrica de vapor a alta presión y temperatura (85kg/cm², 400°C), requiere de la misma cantidad de combustible (bagazo y/o combustóleo), que la generación de una tonelada de vapor a 9.5kg/cm² y 300°C (36) (24).

El calor necesario para obtener un kilogramo de vapor aumenta ligeramente con la temperatura hasta cercanías de la presión de 30 kg/cm² y luego comienza a bajar. Así se tiene (71) que para una presión manométrica de 0 kg/cm² se

necesitan 637 kcal para producir 1 kg. de vapor; para 6 kg/cm², 660; para 30 kg/cm², 667 kcal y para 60 kg/cm², 665 kcal/kg.

De esta manera, las posibilidades de transformación y utilización de la energía contenida en un kg de vapor, aumentan rápidamente con la presión hasta un límite económico.

4. Combustibles utilizados en la generación.

4.1 El Bagazo

El bagazo constituye la principal fuente de energía para la generación de vapor en la industria de la caña de azúcar y alcohol. En términos globales en el mundo, este residuo fibroso aporta el 70% de la energía total consumida, mientras que en América Latina y otros países en desarrollo llega casi al 90% (16). Antes de 1950, como consecuencia de una baja oferta de fibra de caña, exceso de humedad en el bagazo y baja eficiencia en calderas, la leña y el carbón se utilizaron para cubrir las demandas adicionales de vapor en los ingenios (63). A partir de 1950, ante una oferta adicional de petróleo y una perspectiva más funcional de su aprovechamiento, se estimuló el uso del petróleo como complemento energético del bagazo. Sin embargo, en países no productores de petróleo y ante el elevado índice de consumo de energía presentado en los sectores productivos de los países cañeros, se impulsaron tecnologías hacia un mayor y mejor aprovechamiento energético del bagazo,

hasta desalojar al petróleo en la estructura de la oferta de energía en algunos países como Cuba (39).

4.2 La leña

La leña es uno de los componentes estructurales importantes dentro de la oferta de energía en países en desarrollo; su participación en los balances de energía varía entre 10 y 70% (54) del consumo global de energía. Sin embargo, en el sector agroindustrial su contribución no alcanza el 10% aun en países con recursos naturales y posibilidad de desarrollar fuentes no convencionales de energía.

La leña es un combustible de baja concentración energética por unidad de volumen, está constituida por complejos orgánicos de celulosa, hemilcelulosa y lignina. Su poder calorífico en base seca está cercano a 4250 kcal/kg a pesar de que el agua contenida en las diferentes maderas (material celulósico típico), varía de acuerdo a la especie, variedad y edad de la planta (54), con poder calorífico medio de 2500 kcal/kg (base húmeda).

En la industria azucarera la leña se empleó hasta 1960 cuando se usaba como combustible complementario en calderas que no alcanzaban los 500 H.P. de potencia nominal.

4.3 El combustóleo.

Constituye el segundo más importante combustible dentro de la oferta energética de la industria azucarera, habiéndose incrementado su uso desde 1960 cuando por su simplicidad de manejo y bajos costos desalojó a otros combustibles como la leña, el carbón y al mismo bagazo de su participación en el balance de energía en la fabricación de azúcar.

Actualmente, el petróleo cumple con una función complementaria en la generación de vapor tanto de alta como de baja presión en los ingenios, sistema que tiende a desaparecer ante la alternativa técnico-económico del mejor aprovechamiento energético del bagazo. Para citar ejemplos concretos, se tiene el caso cubano donde el consumo de petróleo pasó de 5.89 l/TMC en 1970 a 0.0 l/TMC en 1985 produciendo excedentes de bagazo del 30% (39).

El combustóleo en los ingenios se transporta de los depósitos de almacenamiento a las calderas mediante bombas que lo hacen pasar a través de intercambiadores de calor, elevando su temperatura hasta 100 - 130°C con el objeto de reducir su viscosidad y así poder atomizarlo en los quemadores para su adecuada combustión.

El control del suministro de combustóleo al quemador obedece a las demandas de vapor del ingenio no satisfechas generalmente por el bagazo y se hace accionando la válvula de

control de flujo.

El combustóleo que en México se utiliza para la generación de vapor en calderas, tiene las siguientes características medias (26):

Peso específico	: 0.92 a 0.98 kg/l
Gravedad SPI	: 12-13
Temperatura de inflamación	: 98-100°C
Viscosidad (SSF 50°C)	: 350-370
Análisis elemental (% peso)	:
	C : 84-86
	H : 10-11
	S : 3.3-3.7
	N : 0.3-0.6
Poder Calorífico	: 9.800 kcal/kg (petróleo)
	: 10650 kcal/kg (combustóleo)

4.4 El carbón.

El carbón ha sido el energético que no ha tenido una gran importancia significancia dentro de la oferta de energía de la industria azucarera a nivel mundial.

Las principales desventajas industriales de este combustible derivan de la dificultad para extraerlo de la mina por métodos tradicionales, de su manejo, transporte y posterior distribución, comparado con la facilidad de manejo y conducción de los combustibles líquidos o gaseosos y de la disponibilidad inmediata del bagazo.

Los principales constituyentes del carbón mineral son el carbono e hidrógeno, conteniendo impurezas de oxígeno, azufre, nitrógeno y una pequeña proporción de una variedad de minerales, llamadas cenizas.

El poder calorífico del carbón depende del tipo, proporción de material volátil con relación al contenido de carbono y del tamaño de partícula. Carbones con más de 7770 kcal/kg. son ricos en carbono y contienen poco material volátil (62), mientras que existen otros de partículas pequeñas y gran cantidad de volátiles cuyo poder calorífico neto es menor de 5550 kcal/kg.

V. APROVECHAMIENTO ENERGETICO DEL BAGAZO DE CAÑA

1. Antecedentes.

Desde la crisis petrolera en 1973, la mayoría de las naciones del mundo han buscado fuentes alternas de energía para substituir los combustibles fósiles costosos y agotables. El bagazo de caña por su cantidad y disponibilidad, se presenta como candidato prioritario en el campo alternativo de la biomasa y ofrece un enorme potencial energético, especialmente para países en desarrollo, productores o no de hidrocarburos, donde se cultiva la caña en gran escala. La producción mundial de bagazo asciende a 120 millones de toneladas métricas, de las cuales aproximadamente el 10% constituye excedente no aprovechable (16).

La conversión de este sobrante en calor o electricidad, complementada con mejoras en el balance térmico de los ingenios y en los equipos de generación de vapor y fuerza eléctrica podría participar en la búsqueda del mejor equilibrio del balance global de energía y así reducir la importación y/o dedicación de combustibles a esta industria.

2. Características del Bagazo.

El bagazo es un residuo fibroso de la molienda del tallo de la caña de azúcar producido en la extracción del jugo o guarapo, el que posteriormente se concentra y convierte en azúcar (44).

El bagazo así producido es usado como combustible primario en las calderas de los ingenios suministrando vapor para las formas de potencia mecánicas y térmicas en los ingenios.

2.1 Composición química y física.

La composición física del bagazo varía de acuerdo con la variedad de la caña, métodos de cosecha y eficiencia de molienda (40). Para el Reino Unido, según Patarau (59), en promedio está compuesto por:

Humedad	: 46-52%
Fibra	: 43-52%
Sólidos solubles	: 2- 6%

De Araujo (21), señala que la composición media del bagazo brasileño es:

Humedad	: 48-50%
Fibra verdadera	: 28.8 a 30%
Bagacillo o Médula	: 12.5 a 17.5%
Sólidos solubles	: 2 a 4%

En esta composición la fibra total corresponde a la suma de la fibra verdadera más el bagacillo o médula. Este último corresponde en Brasil entre el 30 y 36% de la fibra total, mientras que en Cuba es el 28% (65).

En México (25), la composición típica del bagazo al salir del último molino es la siguiente:

Humedad	: 49-53%
Fibra total	: 48.7%
Sólidos solubles	: 2 a 3%

Dentro de la fibra total el 65% corresponde a fibra verdadera, mientras que el 35% lo es para bagacillo. Como se puede observar la composición del bagazo en el mundo es muy similar, anotándose que a medida que aumenta el contenido de fibra y baja la humedad, aumenta la capacidad de generación. En cuanto al análisis elemental, Lamb (40), para siete variedades en Queensland, presenta los siguientes valores:

Hidrógeno	: 6.20%
Carbono	: 49.48%
Oxígeno	: 44.32%

Hugot (36), en una amplia revisión de variedades para las diversas partes del mundo, encuentra los siguientes valores:

Hidrógeno	:	6.5%
Carbono	:	47.3%
Oxígeno	:	44.0%
Cenizas	:	2.5%

Enríquez (25), cita la siguiente composición media para bagazos mexicanos:

Hidrógeno	:	6.5%
Carbono	:	46.4%
Oxígeno	:	43.5%
Cenizas	:	3.6%

Resalta la gran similitud en cuanto a los elementos C, H₂ y O₂, mientras que el contenido de cenizas está variando según el sistema de irrigación, composición químico-física del suelo, variedad de la caña, edad, calidad y cantidad de fertilizantes (59) y del grado de mecanización del cultivo, representado en tierra y material inorgánico en las actividades de carga y descarga de la caña antes del batey.

De Almeida (22), presenta para bagazos brasileños la siguiente composición típica de cenizas:

TABLA 5
Composición de cenizas de bagazo brasileño

Elemento	Composición % en peso
SiO_2	70.5-72.6
P_2O_5	2.2- 2.6
Al_2O_3	0.9- 1.9
Fe_2O_3	1.4- 1.6
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	10.2-10.6
CaO	4- 0
MgO	4.3- 2.3

El contenido de cenizas varía según la altura de corte de la caña y puede llegar a un 5% (observación propia) cuando el suelo está seco y el corte se hace a nivel del suelo (27). El contenido "Brix" del bagazo, se refiere al contenido de material soluble en agua constituido por sacarosa ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$), dextrosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)_n y Levulosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), el cual puede ocasionar retardo en la combustión y pérdidas de vapor por baja transferencia de calor en la tubería de la caldera cuando se tiene una combustión incompleta (40). La celulosa principal constituyente de la fibra, tiene la fórmula general (C_6

$H_{12}O_6$)n y en su forma pura tiene la misma consistencia de un gran polímero compuesto de cadenas de glucosa; por esto las variaciones en las propiedades de la celulosa (64), son debidas principalmente a sus diferentes grados de polimerización. El bagazo de caña tiene cadenas de celulosa entre 2000 y 7000 unidades (22), designando con el nombre de holocelulosa al conjunto de celulosa y hemicelulosa presentes en su composición.

Estructuralmente, el tallo de la caña está compuesto de varios tejidos fibrosos:

- i) El grueso de pared dura, con células cilíndricas y tejido vascular, se le denomina fibra verdadera y constituye más del 65% de la fibra total del tallo de la caña (57).
- ii) El blando de pared delgada, de forma irregular, llamado médula o bagacillo, representa la proporción restante del tallo de la caña.

La fibra verdadera y la médula tienen similar composición química (40), pero su estructura difiere ampliamente. Las fibras verdaderas tienen un valor alto de relación longitud/diámetro (aprox.70), y un coeficiente de contracción o expansión según se encuentren húmedos o secos. Este es un factor importante en la industrialización y aprovechamiento energético del bagazo (2).

Las células de bagacillo son de tamaño y forma irregular y se caracterizan por sus propiedades higroscópicas absorbiendo varias veces una masa de agua superior a su peso (4).

2.2 Peso específico

El peso específico del bagazo suelto es de 160 kg/m³, tendiendo a quemarse espontáneamente cuando se almacena a granel. Sin embargo, cuando se empaqueta, puede alcanzar densidades entre 550 y 850 kg/m³, reduciéndose así los riesgos de quemado (46).

2.3 Almacenamiento del bagazo.

El bajo peso específico hace a este material muy voluminoso, representando serios problemas almacenar bagazo sobrante en un ingenio (4). Salvo en localidades muy secas, el bagazo no puede dejarse a la intemperie porque se fermenta y descompone, perdiendo gran parte de su poder calorífico, debido a la presencia de agua, azúcar y levaduras (29), con grandes desprendimientos de CO₂.

Los nuevos sistemas de secado y densificación del bagazo, permiten su transporte y almacenamiento por largos períodos sin peligro de que se presenten reacciones químicas o biológicas que afecten su calidad (36).

2.4 Otros usos del bagazo.

Fuera de su carácter combustible, el bagazo de caña constituye materia prima en la industria. Los derivados que más desarrollo han alcanzado en el mundo son la pulpa, los tableros y el furfural; otros productos como la pulpa para disolver, el carbón activado y las mieles hidrolíticas, son objeto actual de investigación. (59,4).

2.4.1 La pulpa.

En el mundo existen más de 27 países que utilizan el bagazo en la producción de pulpas y papeles localizándose la mayor parte de ellos en América y Asia (4). En América se destaca la producción de México, Perú, Argentina, Cuba, Brasil y Colombia. Las capacidades de producción son variables, aunque en su mayoría están en rangos inferiores a 6000 t/año. En los últimos años se observa una marcada influencia hacia la producción de papel periódico.

Uno de los mayores problemas para la producción de pulpa a partir del bagazo lo constituye su médula, la cual, cuando alcanza alto contenido se tiene un papel de baja resistencia y denasiado opaco, por eso en la fabricación de pulpa, siempre se empieza el proceso con una etapa de desmedulado (46).

2.4.2 Aglomerados.

Consisten en pánceles de gran superficie que se hacen por presión íntima de partículas de materiales lignocelulósicos. En el mundo existen unas 40 fábricas de tableros de bagazo, de las cuales 15 son de tableros de fibras y 25 de tableros de partículas. Las capacidades están en rangos que van de 5000 a 4000 t/año.

En América Latina y el Caribe un buen número de plantas se encuentran en Cuba (65), con ocho instalaciones para producir tableros a partir de bagazo.

2.4.3 Furfural y derivados.

Es un producto que puede obtenerse a partir de la hidrólisis de residuos agrícolas y forestales (64). Para producir furfural de bagazo no es necesario desmedular el residuo lignocelulósico obtenido, el que es utilizado como combustible en el propio proceso de producción.

2.4.4 Bagacillo.

El bagacillo se ha utilizado tradicionalmente para la alimentación animal en diversas formas; entre las más importantes están los mezclados de miel, urea y bagacillo.

En algunos lugares (México, Taiwan, Hawaii), lo separan de la fibra y lo queman eficientemente en calderas diseñadas para tal fin (39), inyectándole entre un 10 a un 15% de petróleo para mantener la estabilidad de la combustión.

2.4.5 Otros usos

El bagazo, se ha utilizado como fertilizante, mejorador del suelo y fabricación de cartón, aislantes, levaduras, combustibles, Nylon y mampostería.

2.5 Poder calorífico

El poder calorífico (P.C.) es la cantidad de calor que puede producirse por la combustión de una unidad de combustible. El poder calorífico alto (P.C.A.), incluye el calor latente de vaporización del agua formada en la reacción de combustión, a pesar de que en la práctica se pierde en los gases de escape por la chimenea. El poder calorífico bajo (P.C.B.), es igual al P.C.A. menos el calor latente de vaporización a la temperatura a lo cual fue determinado el P.C.A. (70).

El P.C.A. indica pues, el calor que puede obtenerse de la unidad de combustible; sin embargo, en la práctica industrial no es posible reducir la temperatura de los productos de combustión hasta el punto de rocío, utilizando por tanto para cálculos de ingeniería el P.C.B.

El P.C.B. del bagazo, está en función del contenido de humedad (W), del contenido de azúcares (B) y del contenido de cenizas (A), expresados en por ciento en base húmeda.

Según Lamb (40), el poder calorífico está dado por la siguiente expresión:

$$P.C.A. = 19410 - 34.12B - 194.1W \text{ (kJ/kg)} \quad (1)$$

$$P.C.B. = 18104 - 34.12B - 205.3W \text{ (kJ/kg)} \quad (2)$$

Estas fórmulas se conocen como el modelo de Pritzelwitz y su desarrollo se basa en un contenido máximo de cenizas (A menor o igual a 2.7%), y en una pureza residual del jugo del 66%.

El mismo autor (40), sugiere que cuando el bagazo contiene un porcentaje de cenizas mayor de 2.7%, el modelo anterior se puede formular de la siguiente forma:

$$P.C.A. = 199.5(100 - 0.17B - W - A + 0.01AW) \text{ kJ/kg} \quad (3)$$

$$P.C.B. = 186.1(100 - 0.18B - 1.13W - A + 0.01AW) \text{ kJ/kg} \quad (4)$$

Hugot (36), señala que si se quema un bagazo húmedo, es necesario tener en cuenta que el calor se pierde no solamente por el vapor de agua producido por la combustión del hidrógeno que constituye el bagazo, sino también, en el vapor de agua que se produce por la humedad del bagazo, estableciendo el siguiente

modelo:

$$\text{P.C.B.} = 4250 - 4850W \text{ kcal/kg} \quad (5)$$

sin considerar porcentos de cenizas y azúcar, y

$$\text{P.C.B.} = 4324 - 12.33B - 46.36W \quad (6)$$

cuando se considera el contenido de sacarosa o "Brix". En Brasil (46), basados en el modelo de Hugot, establecieron la siguiente fórmula para el poder calórico:

$$\text{P.C.A.} = [4600(1-A) - 12.5 - 46W] \text{ kcal/kg} \quad (7)$$

$$\text{P.C.B.} = [4250(1-A) - 12.5 - 46W] \text{ kcal/kg} \quad (8)$$

Mientras que en Cuba y Hawaii se calcula el poder calorífico con base en el contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno, para otros países como México, se recomienda utilizar el modelo ajustado de Pritzelwitz en función de las variaciones en el contenido de azúcar y los altos porcentajes de cenizas encontrados actualmente (8). Como comparación, es importante señalar el P.C.B. para algunos combustibles

TABLA 6

Poder Calorífico de Algunos Combustibles
Alternos al Bagazo

Tipo de Combustible	Poder Calorífico kcal/kg
Combustóleo	10600
Petróleo	9800
Carbón bituminoso	7000
Gas natural	11300
Madera verde (30% de humedad)	2500
Madera seca (15% de humedad)	3600
Bagazo (50% de humedad=W)	1920

Fuente: Recopilación propia.

3. Combustión del bagazo.

Habiendo hecho referencia a las características más importantes del bagazo desde el punto de vista energético, es necesario señalar algunos aspectos que deben tenerse en cuenta para su combustión.

3.1 Composición del aire

Entendiendo el proceso de combustión como la reacción exotérmica entre un combustible y el oxígeno del aire, se debe tener en cuenta que realmente la combustión se lleva a cabo con aire y no con oxígeno puro, siendo el aire ambiente o

precalentado. El aire ambiente está formado por varios elementos según su composición volumétrica (61):

Oxígeno : 20.99% en volumen

Nitrógeno : 78.03% en volumen

Poco menos del 1% de Argón, Carbóno, Helio, Hidrógeno y Neón. Para cálculos de ingeniería es suficiente incluir al Argón y gases inertes en la contribución del nitrógeno del 79% (70,71), y 21% de oxígeno; así, en 100 moles de aire existirán 21 moles de Oxígeno y 79 de Nitrógeno, o sea que, en una reacción entran 3.76 moles de Nitrógeno por cada mol de oxígeno considerada.

En la combustión de un material carbonado, como el bagazo se presenta la siguiente reacción:



Balanceando la formulación 9 con sus respectivos pesos moleculares tenemos que para quemar 1kg de carbono se necesitan 2.67 kg de Oxígeno; para 1 kg de Hidrógeno 8 kilogramos de O_2 y para 1 kg de Azufre, 1 kg de Oxígeno.

3.2 Cantidad de aire necesario.

El aire estequiométrico o aire ideal es la cantidad exacta de aire que suministre el oxígeno preciso para la combustión completa (71).

Ya que en la práctica esto resulta imposible y más aún por las características del bagazo, se necesitará más oxígeno del teóricamente necesario (71), por lo que se requiere entonces un exceso de aire, expresado como un porcentaje del aire teórico.

Si el exceso de aire no es suficiente para permitir una combustión completa, entonces no todo el carbono se oxidará a dióxido de carbono, sino que una parte aparecerá como carbono parcialmente oxidado en forma de monóxido de carbono (CO) y como partículas de carbón. Estas últimas se manifiestan en forma de hollín o humo negro a la salida de la chimenea de la caldera. Se debe tener en cuenta que cuando el carbono se oxida a CO_2 se liberan 8140 kcal, mientras que cuando se oxida parcialmente a CO solo se generan 2473 kcal por cada kg de Carbono, perdiéndose de esta forma el 70% de la energía del combustible (62).

Para que se produzca una combustión completa se necesitará que se cumplan 3 factores básicos: i) La mezcla de combustible y aire debe hallarse a la temperatura de ignición; ii) La existencia de oxígeno suficiente para asegurar una combustión completa y iii) se debe hacer una interacción íntima entre el

aire y el combustible.

Luego, para quemar 1 kg de bagazo se necesitará una cantidad de aire que está en función de la humedad del bagazo, de la composición y exceso de aire, así:

$$A_D = M ((2.67/0.21)C + 8/0.21 (H_2 - O_2/8)) \quad (10)$$

donde

A_D = Aire teórico para la combustión de 1kg bagazo.

M = Masa de combustible (1kg de bagazo húmedo).

Similarmente, cuando una caldera quema a la vez combustóleo más bagazo, como es el caso de países como México y Brasil, el aire para la combustión del petróleo se puede establecer, según la siguiente fórmula:

$$A_C = M((2.67/0.21)C + 8/0.21(H_2 - O_2/8) + 1/0.21(S)) \quad (11)$$

En las formulaciones anteriores C, H_2, O_2, S representan los % elementales dentro de la composición química del combustible respectivo.

Si la combustión se realiza con 2 combustibles en forma simultánea, el peso del aire seco teórico utilizado, expresado en flujo másico (W_{as}), será:

$$W_{as} = A_D + A_C \quad (12)$$

y el flujo másico de aire (V_{as}) seco por volúmen será:

$$V_{as} = W_{as} \gamma \quad (13)$$

donde γ es el peso específico del aire a condiciones normales de presión y temperatura y que puede ser obtenido por los pesos específicos de sus elementos constituyentes así:

$$\gamma_{N_2} 0.79 + \gamma_{O_2} 0.21 = \gamma_{s.n.}$$

siendo $\gamma_{N_2} = 1,252 \text{ kg/m}^3$ a condiciones estándar, y $\gamma_{O_2} = 1,428 \text{ kg/m}^3$ a condiciones standard.

Reemplazando se tiene que:

$$\gamma_{s.n.} = 1.08 \text{ kg/m}^3$$

Así, la ecuación 13, queda convertida en

$$V_{as} = 1.08 \text{ kg/m}^3 (W_{as}) \quad (14)$$

El aire teórico necesario, se refiere al aire seco a condiciones reales de humedad relativa, presión y temperatura. Luego, para calcular el aire teórico húmedo necesario se debe calcular el factor F(70).

$$F = 1 + (H.R.) (P_s) / (P_B - (H.R.) P_s) \quad (15)$$

donde: F = Factor de corrección mayor de 1.

H.R. = Humedad relativa del lugar

P_s = Presión de saturación del vapor de agua del lugar.

P_B = Presión barométrica del lugar.

Por tanto, el flujo másico en peso o volumen de aire teórico requerido para la combustión será:

$$\begin{aligned}W_{ah} &= F W_{as} \\V_{ah} &= F V_{as}\end{aligned}\quad (16)$$

donde W_{ah} y V_{ah} representan los flujos másicos de aire teórico húmedo en peso y volumen respectivamente.

Si tenemos en cuenta la relación entre el aire realmente utilizado y el aire teórico necesario, se podrá establecerse el índice de exceso de aire (m), el cual Babcock (14) señala del orden de 1.14 y 1.50 para combustóleo y bagazo respectivamente, en calderas tradicionales.

Así

m = Aire realmente utilizado / aire teórico necesario

$$m = \frac{W_{ahr}}{W_{ah}} = \frac{V_{ahr}}{V_{ah}} \quad (17)$$

Donde W_{ahr} y V_{ahr} corresponde a los flujos másicos de aire húmedo realmente utilizado y se pueden determinar conociendo m o en su defecto, a través de un tubo de pitot colocado a la salida de los ventiladores respectivos que indiquen la presión de velocidad (P_v), necesaria para el cálculo del flujo másico de aire.

3.3 Gases de combustión.

Los gases de combustión están compuestos por los óxidos de los elementos constituyentes del combustible: monóxido y dióxido de carbono provenientes de la combustión, vapor de agua, óxidos de azufre y partículas arrastradas por exceso de tiro en los hornos por alto exceso de aire. Su determinación se puede hacer por medio de sistemas químicos como el aparato Orsat y testoryt de lectura directa.

Hugot (36), señala en un modelo sencillo las determinaciones volumétricas de CO_2 en gases de chimenea.

$$\theta = 0.196/m \quad (18)$$

Donde θ , indica el porcentaje en volumen de CO_2 . En la tabla 7, se presenta la relación entre el contenido de CO_2 de los gases de chimenea y el exceso de aire.

TABLA 7

Relación entre el Contenido de CO_2 y el Exceso de Aire.

θ (% Vol. CO_2)	m (Indice de exceso de aire)
0.06	3.27
0.07	2.80

0.08	2.45
0.09	2.18
0.10	1.96
0.11	1.78
0.12	1.63
0.13	1.51
0.14	1.40
0.15	1.30
0.16	1.22
0.17	1.15

Fuente: Hugot, 1984.(36)

Según Briggon (17), en la industria azucarera el porcentaje en volúmen del CO_2 debe estar entre 12 a 13%, en calderas que queman combustóleo.

Enríquez (25), señala que existe una relación entre la coloración de los gases de chimenea y el % de CO_2 en la siguiente forma:

Color	% de CO_2 (Vol)
Gris claro	12-14 %
Gris oscuro	10-12 %
Negro	menos de 10

El flujo másico de los gases de combustión está en función de la composición de los combustibles, de la presión de velocidad de los ventiladores (Pv) ó del tiro natural (d) y del exceso de aire utilizado (n) (23).

Por conservación de la masa, el peso de los productos de combustión, estará formado por el peso del aire utilizado más el peso del combustible quemado. En la industria azucarera se considera que de cada kg. de bagazo que entra al horno, el 90% es quemado (60); de esta forma el peso de los gases húmedos (W_{gh}) producidos en la combustión de 1 kg. de bagazo será:

$$W_{gb} = W_{ahr} (1-W) + 0.90,$$

reemplazando W_{ahr} por sus valores, se tiene que:

$$W_{gb} = F A_b m (1-W) + 0.90 \quad (19)$$

En forma similar, el peso de los productos de combustión de un kg de combustóleo con 0% de contenido de humedad y suponiendo que se quema a 100%, será:

$$W_{gc} = F A_c m \quad (20)$$

El flujo másico total de los productos de combustión (W_{gt}), será la suma de los gases de combustión del bagazo más los gases del combustóleo:

$$W_{gt} = M_b W_{gb} + M_c W_{gc} \quad (21)$$

donde M_b = flujo másico del bagazo húmedo.

M_c = flujo másico del combustóleo.

Para determinar el flujo másico real en volumen de los productos de combustión, se calculará el peso específico de los gases de combustión de la siguiente forma, propuesta por Babcock (14).

$$\gamma_g = 1.325 (P/T) \quad (22)$$

donde:

γ_g = peso específico de los gases de escape en
lbs/pie³

P = presión barométrica en pulgadas de mercurio
del lugar y

T = temperatura absoluta en grados
Rankine (°F+460)

Con el valor γ , el flujo másico se obtiene ya sea mediante W_{gt} o haciendo mediciones de presión de velocidad (Pv) de gases a la salida de la chimenea mediante tubo de Pitot.

3.4 Temperatura de combustión.

La temperatura (T) de combustión que prevalece en un horno que quemase bagazo se obtiene teniendo en cuenta que el calor desarrollado en la combustión, en los gases que pasan del horno a la chimenea. El calor específico de todos los gases se expresa con frecuencia a la temperatura básica de 0°C (20). Hugot (36), cita el siguiente modelo para el cálculo de la temperatura de combustión en hornos bagaceros.

$$T = t + \alpha \beta_0 N / [\sum \text{EP}_c]_c \quad (23)$$

donde:

α = Coeficiente que incluye sólidos no quemados (0.98-0.99)

β_0 = Coeficiente que incluye pérdidas por conducción en el horno (0.98-0.99).

N = P.C.B. del bagazo empleado

$\sum \text{EP}_c$ = Suma de los calores específicos de los diferentes gases

t = temperatura ambiente

Ante la dificultad que se presenta muchas veces en la determinación de los componentes de los gases de combustión, se utiliza un pirómetro o cono de Sager, colocando el frente óptico del aparato con la visual por encima de la pila de bagazo que está ardiendo. Hugot (36) señala la adopción de un

criterio visual según la coloración observada por la ventanilla o mira del horno, según la siguiente tabla:

TABLA No.8

Determinación de la Temperatura del Horno según la Coloración Observada

COLOR	TEMPERATURA DEL HORNO
Blanco	1300°C
Amarillo claro	1150
Amarillo oro	1100
Anaranjado	1050
Rojo ceniza	900
Rojo oscuro	650

En la práctica se logran temperaturas entre 800 a 1100 grados centígrados (70) para hornos industriales. Cundy (20), Hugot (36), señalan que para una humedad constante, la temperatura del horno disminuye 100°C por cada 25% de exceso de aire arriba del 50%. Así, para el 50% de humedad la temperatura del horno es de 1090, 1000 y 925 para 50%, 75% y 100% de exceso de aire.

3.5 Pérdidas de calor y eficiencia de la combustión

Las pérdidas en los gases de escape se presentan en forma de calor sensible de los gases secos y del calor latente del agua evaporada presente en el bagazo y la formada por la oxidación del hidrógeno del bagazo y combustóleo.

En instalaciones muy viejas se pueden presentar temperaturas de los gases de combustión de más de 300°C, mientras que en otras recientes dispuestas con equipos de recuperación de calor, se pueden lograr temperaturas menores de 180°C, siendo no recomendable descender por debajo de 130°C, considerada como límite económico inferior (60).

3.5.1 Quemado de bagazo.

Para una composición típica de gases de escape, Hugot (36), encuentra que el calor perdido al quemar bagazo se puede presentar de la siguiente forma:

$$q = t(1-W) (1.4m + 0.50/l-W) \quad (24)$$

donde

q = pérdidas del calor sensible en kcal/kg

t = temperatura final de los gases de escape
en Grados Centígrados

Varios autores (36,14,53) señalan que para calcular la cantidad de vapor que puede ganarse al quemar un kilogramo de bagazo, se deben considerar las siguientes pérdidas.

- i = Pérdida por radiación del horno y la caldera.
- ii = Pérdidas de combustión incompleta.
- iii = Pérdidas por gases de combustión
(tanto secos como vapor de agua formado).

Hugot (36) señala que el calor transmitido al vapor de agua por kilogramo de bagazo quemado Q será:

$$Q = (P.C.B.) - q) \beta \alpha \psi \text{ kcal/kg} \quad (25)$$

donde:

- α = Factor de corrección por sólidos no quemados ,
(aprox.0.99). Poco descende de este valor al menos que se emplee un tiro muy fuerte, que arrastre por la chimenea pedazos de hojas.
- β = Factor por pérdidas por radiación que varían entre 0.8 a 0.95 de acuerdo con el aislamiento del horno y caldera. Si está bien aislada se puede tomar 0.95.
- ψ = Factor de pérdidas por combustión incompleta, varía de 0.8 a 0.99 disminuye a medida que baja la humedad del bagazo, el exceso de aire y aumenta la temperatura del horno.

La relación entre el calor transferido al vapor y el poder calorífico alto del combustible, nos da la eficiencia de combustión o eficiencia de la caldera quemando bagazo (η_b), (66):

$$\eta_b = (Q/P.C.A.) \cdot 100 \quad (26)$$

Neto (53) resume para Brasil los valores de generación y eficiencia para 320 calderas analizadas, según la tabla 9.

TABLA No.9

Eficiencia y Generación de Vapor al Quemar Bagazo
en Calderas Brasileñas.

Caldera tipo	Eficiencia	kgv/kgb
A	0.66	2.01
B	0.70	2.15
C	0.78	2.25

A = Calderas emparedadas, horno de herradura, flujo natural, vapor saturado (10a18 kg/cm²), 60% de exceso de aire, sin precalentadores

B = Calderas con paredes de agua, horno de herradura, flujo forzado, vapor saturado a 21 kg/cm² 50% de

exceso de aire, con precalentador.

C = Calderas con paredes de agua, rejilla basculante, tiro forzado, vapor saturado a 21 kg/cm² y 280°C, 30% de exceso de aire, con precalentador.

Hugot (36), en pruebas realizadas en Queen Island (Reino Unido) (1933), muestra los siguientes valores:

* kgv = kilos de vapor; kgb = kilos de bagazo húmedo

TABLA No.10

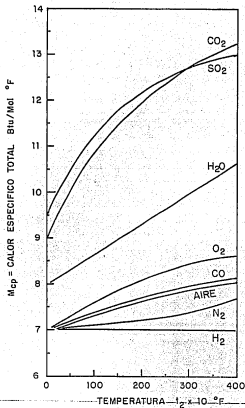
Eficiencia y Generación de Vapor en Calderas
 Bagaceras en Queen Island. (Reino Unido)

Caldera Tipo	Eficiencia %	kgV/kgb
Thompson	53.1	2.3
Babcock and Wilcox	56.2	2.4
Semitubular	42.2	1.8

Aunque los rendimientos en la generación de vapor son diferentes en las dos tablas anteriores, se demuestra que mientras el bagazo contenga un menor porcentaje de humedad y menos cenizas, con una eficiencia menor de la caldera se pueden lograr mejores rendimientos en la producción de vapor por kg de bagazo.

Actualmente en Brasil (46), se han obtenido rendimientos de más de 3 kg de vapor por kg de bagazo, con humedad de bagazo menor del 40% y presiones de vapor mayores a 21 kg/cm².

3.5.2 Quemado de combustóleo.



GRAFICA No. 1

CALOR ESPECIFICO MOLAL DE LOS GASES ENTRE LA TEMPERATURA FINAL (t_2) Y 80 °F A PRESION ATMOSFERICA ESTANDAR.

Para determinar las pérdidas en los gases de combustión que salen por la chimenea (húmedos y calientes), se determinan las moles de los componentes producidos al quemar 100 moles de combustible y luego el calor específico molal respectivo (C_p en BTU/Mol°F) (ver gráfica No.1); se calculan las pérdidas para cada uno de los componentes así:

$$\begin{aligned}
 q_{CO_2} &= \text{No moles} \cdot C_{pCO_2} (T - T_o) \\
 q_{O_2} &= \text{No moles} \cdot C_{pO_2} (T - T_o) \quad (27) \\
 q_{N_2} &= \text{No moles} \cdot C_{pN_2} (T - T_o) \\
 q_{SO_2} &= \text{No moles} \cdot C_{pSO_2} (T - T_o)
 \end{aligned}$$

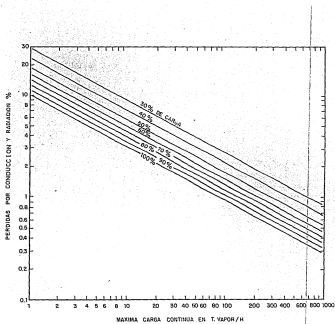
donde:

T = temperatura de salida de los gases en la chimenea.

T_o = Temperatura ambiente

En forma similar a lo expresado en el conjunto de ecuaciones (27) se calculan, las pérdidas por agua en el aire, por calor sensible y calor latente del agua.

Para las pérdidas de radiación y conducción, de la gráfica No.2, se obtiene el % respectivo al variar el % de carga y la máxima carga continua de la caldera en toneladas de vapor por hora (70), expresados como porcentaje del P.C.A. del combustible (51).



GRAFICA No. 2

PERDIDAS POR RADIACION Y CONDUCCION PARA UNA CALDERA EN FUNCION DE LA MAXIMA CARGA CONTINUA Y % DE CARGA.

En la determinación del porcentaje de carga global para el ingenio se debe tener en cuenta la capacidad real de molienda en 24 horas, comparándola con la capacidad teórica de molienda en 24 horas, lo que en promedio varía entre 0.7 a 0.9 (42).

Luego:

$$q_{rc} = \text{P.C.A. (\%, de gráfica No.2)} \quad (28)$$

donde q_{rc} = pérdidas por radiación y conducción en kcal/kg.

Para el cálculo de las pérdidas no considerables, (q_{nc}), varios autores (61,60,70) consideran que éstas pueden variar entre el 3 al 7%. Por el estado y operación de las calderas propias del desarrollo de este trabajo el autor, considera que estas pérdidas llegan al 10% del PCA:

$$q_{nc} = 0.10 (\text{P.C.A.}) \text{ kcal/kg} \quad (29)$$

Así para los ingenios azucareros con equipos tradicionales se consideran las pérdidas totales al quemar combustóleo (q_{tc}) como la suma de las pérdidas por gases húmedos, más las pérdidas por radiación, más las pérdidas no consideradas (q_{nc}).

$$q_{tc} = (q_{CO_2} + q_{O_2} + q_{N_2} + q_{SO_2}) + q_{rc} + q_{nc} \quad (30)$$

Babcock (14), señala que la eficiencia de una caldera estimada con base a pérdidas será:

$$\eta = (100 - q_{tc} / P.C.A.) 100 \quad (31)$$

donde: η = eficiencia de la caldera

Esta eficiencia se designará por η_c o η_b , según la caldera quemé combustóleo o bagazo respectivamente.

3.5.3 Rendimiento de vapor y eficiencia global.

El rendimiento de vapor por kg. de combustible ya sea para bagazo (g_b) o para combustóleo (g_c), expresa los kilogramos de vapor producidos al quemar 1 kg. de combustible, en función de la entalpía del vapor generado a la presión y temperatura dadas.

será:

$$g_b = Q/hv \quad (32)$$

$$g_c = (P.C.A. - q_{tc})/hv$$

donde hv = entalpía del vapor generado.

Conociendo g_b y g_c , se puede establecer la eficiencia global (η_g) para cada generador de un ingenio así:

$$\eta_g = ((M_b(g_b) + M_c(g_c)) / (M_b((P.C.A.)_b/hv) + M_c((P.C.A.)_c/hv))) 100 \quad (33)$$

donde

η_g = Eficiencia global de la caldera

M_b = Flujo másico del bagazo (kg/hora)

M_c = Flujo másico del combustóleo (kg/hora)

3.6 Dimensionamiento de calderas para quemar bagazo.

Como aspectos importantes que complementan una buena combustión del bagazo se debe tomar en cuenta: las dimensiones y forma de la cámara de combustión, el tamaño y tipo de horno y la capacidad de los ventiladores (36).

3.6.1. La cámara de combustión.

La cámara de combustión comprende el horno más el espacio libre que recorren los gases entre la salida de éste y los tubos corta fuego. El volúmen (V), de la cámara de combustión debe ser proporcional al volumen de los gases de la combustión (47), y se relaciona con el calor del combustible utilizado (V.C.B.) Hugot (36) sugiere la siguiente expresión para el cálculo del volúmen de la cámara de combustión:

$$V = M_b (V.C.B.) / 250000 \quad (34)$$

donde:

M_b = flujo másico del bagazo quemado y

250000 = Óptima generación de vapor en kcal-m³/hora

En Cuba (39) se reporta 240 pies cúbicos por 100 H.P. nominales de la caldera, mientras que Hugot (36) reporta 100 litros por cada metro cuadrado de superficie de calefacción.

3.6.2 Hornos.

Es el lugar en donde se realiza la combustión y comprende el espacio entre la parrilla, las paredes laterales, el arco, la pared frontal y el puente.

Existen cuatro tipos de hornos utilizados en la combustión del bagazo:

- Horno de gradilla
- Horno de herradura
- Horno de Ward
- Horno distribuidor

Como medida de la capacidad del horno existe la relación de combustión definida como el peso del bagazo que se puede admitir por metro cuadrado de horno por hora $\text{kg/m}^2\text{-hora}$.

El horno de herradura puede recibir en promedio por hora 1500 kg/m^2 , mientras que el Ward admite 1200 kg/m^2 (36). En Cuba y Brasil (60,39) las calderas que queman bagazo funcionan eficientemente con hornos de capacidad entre 1000 a 1200 $\text{kg/m}^2\text{hora}$.

3.6.3 Ventiladores.

En la industria azucarera, se emplean generalmente ventiladores centrífugos de alta velocidad (mayor de 700 RPM) (42).

Los ventiladores producen el tiro necesario para que avance la combustión en forma eficiente ; pueden existir de dos tipos principales: De tiro forzado, cuando el aire sopla por debajo de la parrilla cerrando el depósito de cenizas y permitiendo la entrada de aire a presión atmosférica a la cámara de combustión; y de tiro inducido, cuando el ventilador está colocado en la extremidad de los ductos y en la base de la chimenea (36,18). Bufete Internacional (66), presenta la siguiente fórmula en el cálculo de ventiladores para calderas

$$B(H.P.) = 0.0001573 Z P_s / \eta_s \quad (35)$$

donde:

B(H.P.) = Es la potencia al freno del ventilador

Z = Flujo en pies/min.

P_s = Presión estática a la salida del ventilador

η_s = Eficiencia estática media ($\eta_s = 0.4$)

VI. PRODUCCION DE CAÑA Y BAGAZO EN MEXICO

Antecedentes de la Industria Azucarera en México.

En este capítulo se presenta un panorama del desarrollo de la industria azucarera en México, como punto de partida para analizar los aspectos de producción, consumo, y aprovechamiento energético del bagazo en los últimos 25 años de producción de azúcar.

1. Ingenios y producción.

En 1960 existían 75 ingenios distribuidos en 12 estados de los cuales el 80% se encontraba en Veracruz, Jalisco, Morelos, Tabasco y Sinaloa, siendo el estado de Veracruz el mayor productor de azúcar con el 40% del total para el país (ver cuadro No.3). En 1970, en el balance general desaparecen 10 ingenios o sea el 15% del número instalado en 1960. En 1980 aparecen 66 ingenios de los cuales 39 han sido adquiridos y administrados por la Comisión Nacional de la Industria Azucarera, hoy Azúcar, S.A., 2 por cooperativas de ejidatarios y el número restante por particulares. Por último en 1985, en el balance global se tienen instalados 69 ingenios de los cuales 52 son administrados por Azúcar S.A., distribuida esta labor en 9 delegaciones regionales, permaneciendo 2 administrados por cooperativas de ejidatarios y 15 por particulares. Se debe

notar que para esta última fecha se mantienen 12 estados productores de azúcar, siendo el mayor contribuyente el estado de Veracruz con el 33.48% de la producción global de dulce.

Cuadro No.3
VARIACION DEL NUMERO DE INGENIOS Y
LA PRODUCCION EN LOS ULTIMOS 25 AÑOS.

Estado	AÑO							
	1959	%	1969	%	1979	%	1985	%
Veracruz	23	45.5*	21	43.3*	23	35.3*	23	33.5*
Jalisco	9	8.6	10	9.9	10	12.7	9	14.0
Tabasco	8	1.1	4	2.3	5	3.0	5	3.2
Michoacán	5	9.5	5	1.5	5	4.5	5	4.4
Morelos	7	4.3	3	3.3	3	5.8	3	5.6
Sinaloa	5	8.7	5	11.1	4	8.5	4	7.3
Oaxaca	3	0.9	4	3.9	4	5.2	5	8.8
S L.Potosí	1	0.6	2	3.6	3	7.4	4	7.3
Nayarit	-	11.1	1	8.1	2	3.4	2	3.8
Tamaulipas	2	0.3	2	3.4	2	6.0	2	3.9
Yucatán	2	5.0	-	0.7	-	-	-	-
Puebla	3		2		2		2	3.0
Chiapas	2		1		1		2	3.25
Otros	4	4.9	-		7	3.3	5	1.6
Total	74	100	64	100	67	100	69	100
Producción de azúcar								
10E+3 Ton.	1264		2394		2880		3227	

* Porcentaje de participación en la producción total de azúcar.

Fuente: Elaboración propia de:

Azúcar, S.A., 1959 a 1986.(6)

Del análisis del cuadro 3 se observa que entre 1960 y 1970 la producción de azúcar subió en 98.4%. Esta situación es causada por la desaparición de ingenios ineficientes y poco productivos con capacidad de molienda menor a 400 TMC/día. Entre 1970 y 1980 la producción nacional reduce su crecimiento al 20.3%, con índices negativos en los estados de Veracruz y Sinaloa, los que juntos para 1980 representaron el 40% del total de ingenios instalados.

El efecto de una deficiente infraestructura operativa y de medidas o políticas profundas en cuanto a inversiones de operación y mejoras tecnológicas, se hace más patente hasta la mitad de la presente década (1985), cuando el incremento de la producción baja a un 12.7%. Esta situación de agotamiento de la maquinaria dentro de un esquema administrativo de Azúcar, S.A. se patentiza por los bajos índices de crecimiento en la producción de todos los ingenios del país.

Se muestran fuertes incrementos en el período 60-70 en aquellos estados donde aparecen instalaciones nuevas o reparadas, como sucede en el estado de Oaxaca.

Sin embargo, otros estados con una alta infraestructura instalada de ingenios tienen bajos crecimientos en función de los pocos cambios operativos registrados en los últimos 25 años.

2. Rendimientos de campo y fábrica.

Actualmente de la superficie sembrada, el 60% corresponde a terrenos ejidales los que constituyen el 80% de la población cañera activa; el 47% de los ejidatarios con derecho a tenencia de la tierra poseen menos de dos has., el 44% tiene de dos a diez y solo el 9% posee más de 10 has.

De la superficie total, el 75% es manejado por Azúcar, S.A., el 20% por el sector privado y el 5% por ejidatarios amparados por dos cooperativas.

El panorama histórico del desarrollo de la Industria Azucarera se sintetiza en el cuadro No.4.

Cuadro No.4

Panorama Histórica del Desarrollo de la
Industria Azucarera.

		AÑO			
		1959	1969	1979	1985
Superficie 10E+3 has.	Cultivada	313.9	413.6	488.7	534.0
	Cortada	288.5	402.8	478.6	518.1
Caña Molida 10E+3 Ton.		16518	24524	31343	35689
	Producido	1497.6	2208	2603	3227
Azúcar 10E+3 Ton					
	Consumo	1031	1841	2921	3095
Rendimiento de Campo(t/ha)		57.3	60.9	65.5	68.8
Rendimiento de fábrica(%)		9.1	8.9	8.3	9.1
	Azúcar/ha.	5.2	5.4	5.4	6.23

Fuente: Elaboración propia de:

Estadísticas azucareras (1980-1985). (9,10)

Del cuadro anterior se puede observar que de la superficie cultivada en 1960 se cortó 92% de la caña, mientras que entre 1970 a 1985 la capacidad de corte aumentó al 97% mostrando una mejor planificación entre el campo y la fábrica.

Para el período analizado se nota una reducción en el crecimiento de la superficie cultivada pasando del 31% para el período 1960-1970 a solo el 9.26% en el período 1980-85, lo que significa la saturación de la oferta de caña para la industria del azúcar; bajo las circunstancias actuales cuando se recupera la capacidad exportadora del azúcar condicionada a bajos precios internacionales, se puede decir que el ritmo de crecimiento en cuanto a la superficie cultivada estará muy cercano del presentado para el período 70-80.

La caña molida Única proveedora del bagazo, muestra una tendencia similar a la de la superficie sembrada; entre 1960 1970 la molienda de la caña creció en un 48%, esto significó duplicar la capacidad de molienda mediante mejoras tecnológicas y creación de nuevos ingenios; en la presente década su crecimiento solo alcanzó el 27%, mientras que a 1985 se observa el 13.8%, lo que conduce a proyectar el mismo crecimiento de la década anterior cuando se llegue a 1990.

La reducción de la superficie cultivada, acompañada del deslizamiento similar en cuanto a caña molida refleja la reducción de la cantidad de azúcar producido, lo que hasta mediados de la década del 70 era suficiente para suplir la demanda interior y generar excedentes para exportación. Este fenómeno que mantiene su inercia hasta 1983 origina que el país en ese período tenga déficit en la oferta de azúcar y se vea obligado a recurrir a importaciones.

Sin embargo, el lento crecimiento en el consumo (6% hasta lo que va de transcurrida la presente década), manteniendo los niveles bajos de crecimiento de la caña molida y ante la perspectiva de un mejoramiento en la eficiencia de fábrica, permite suponer que a partir de 1983 el país recuperará su poder exportador, no como fruto de un programa, sino a los desajustes en el balance global de azúcar.

En cuanto al consumo se refiere, el sector industrial ha aumentado su participación del 20.6% en 1960 al 54% en 1985, mientras que el consumo doméstico pasó del 48% en 1960 al 46% en 1985. Luego, si se ha mantenido la participación en el consumo por parte del consumo doméstico, el sector industrial ha amortiguado la producción y ha causado que México sea exportador o importador de azúcar.

El crecimiento en el rendimiento de campo reflejado en el aumento de la caña molida y en el incremento en las toneladas de azúcar por ha, es una consecuencia de las mejoras agronómicas en el cultivo, tales como mejores variedades, suministro de agua y fertilizantes y un eficiente control sanitario.

Por último, los rendimientos de fábrica, asociados con bajas en la eficiencia de molienda y alto consumo de energía han mostrado un estancamiento por falta de inversiones en el sector, situación que tiende a mejorar significativamente, después de 1983, con el anuncio de políticas sobre mejoramiento en la industria por parte de Azúcar, S.A.

3. La explotación agrícola e industrial de la caña en México.

En el desglose general del costo de producción de azúcar en sus dos formas de explotación: la caña (agricultura-campo), y la industria (producción de azúcar), se encuentra que la primera contribuye con 60% a 80% del costo total. En 1980 (4), los costos totales de la producción de campo de una tonelada de caña (TMC), alcanzaban los 161 dólares, mientras que los costos de fabricación de una tonelada métrica (TMA) estaban cerca de los 112 dólares. Esta comparación complementada con la baja eficiencia agrícola existente tanto en el rendimiento de caña por ha como por su contenido de sacarosa, permite considerar que el mayor esfuerzo investigativo debe orientarse hacia la producción de caña. Sin embargo, el hecho es que para un crecimiento determinado en la producción de azúcar, la

agricultura necesita elevar su rendimiento en tonelaje más de 10 veces que en la misma industria, con un consumo de productos químicos, agua y medio técnicos que eleva su costo, máxime si para 1985 se tienen productividades del orden de 69 TMC/ha.

En ambas situaciones, la elevación de la eficiencia industrial tiene una importancia decisiva sobre los costos totales de producción. La sacarosa y la fibra, los dos constituyentes más importantes del cultivo se forman de la caña por la acción dirigida de la naturaleza y el hombre; junto con estos existen otros factores propios de la cosecha que guardan estrecha relación con la capacidad de extracción de la sacarosa en los ingenios.

En primer lugar, la cantidad de materia extraña que acompaña al tallo es un fuerte adversario para el trabajo de fábrica tanto en molienda como extracción. En términos medios por cada 2% de material extraño disminuye el rendimiento de azúcar en 0.2%, aumentando la producción de cachaza y reduciendo la cantidad y calidad del bagazo como combustible, cuando se utiliza para tal fin.

En el cuadro No.5 se muestra como han evolucionado los contenidos de sacarosa y fibra para las cañas mexicanas en el período analizado.

Cuadro No.5

Variación de los Contenidos de Sacarosa y Fibra
para las Cañas Cultivadas en México

Año	Contenido de Sacarosa	Contenido Medio de Fibra
	(B) (% caña)	(% caña)
1959	11.63	14.77
1965	11.52	15.50
1969	11.40	15.47
1975	11.43	14.6
1979	11.58	14.32
Promedio	11.46	15.06

Fuente: Elaboración propia de:

Manual de Azucarero Mexicano, años correspondientes.(42)

Del cuadro anterior, se observa que en el balance general el contenido de sacarosa se ha reducido ligeramente, mientras que el contenido de fibra ha aumentado; esta situación ligada con los comentarios anteriores, permite asegurar que de una alta productividad de caña (mayor a las 69 t/ha), se obtienen iguales o menores rendimientos de fábrica (TMA/ha) y se aumenta la producción de bagazo en los ingenios en función de los incrementos en el contenido de fibra.

Esta situación parece indicar que el cultivo de caña en México tiene la vocación de productor de fibra, ya sea para combustible en la propia industria o para derivados, en lugar de ser fuente de producción de azúcar.

Para dar una idea comparativa se tiene que las cañas en Estados Unidos cosechadas entre los 12 a 18 meses tiene un contenido medio de sacarosa del 12.5% y de fibra del 13% (35); en la India el % de fibra medio es de 14%, mientras que el de sacarosa es del 11.0% (48); en Brasil, la fibra y la sacarosa están del orden de 13.7% y 12.4% respectivamente (43).

Por último el alto contenido de fibra para las variedades mexicanas conllevará aumento de pérdidas por la sacarosa que arrastra el bagazo en el momento de la extracción (del orden del 4% del bagazo producido).

4. Características y producción.

El bagazo en México, es un subproducto que se caracteriza por su altos contenidos de sacarosa (3.5%), de fibra (mayor de 15%), de humedad (51.7%) y elevado porcentaje de impurezas (mayor de 4%) (42). Estos atributos conducen a una baja eficiencia de aprovechamiento energético, cuando es utilizado en la generación de vapor en los ingenios.

En cuanto a su producción y tonelaje, van a ser variables dependientes de la caña molida y de la cantidad de humedad y fibra. Con un contenido de fibra del 15%, se puede esperar más de 300 kg de bagazo por cada tonelada métrica molida, mientras que en otros países similares como Brasil se obtienen unos 270 kg/TMC molida (43).

En el cuadro No.6, se puede apreciar un amplio panorama de las cifras en cuanto a las características y producción del bagazo en México.

Cuadro No.6

Producción y Características del Bagazo en México.

Año	Caña Molida 10E3t	Bagazo Producido 10E3t	kg.de Bagazo por TMC molida	% Humedad (W)	% Fibra caña
1959	14408	4437	308		
1960	16519	5220	316	51.12	14.5
1961	15307	4897	320		
1962	15765	5000	317		
1963	17720	5301	299		
1964	19799	6078	307		
1965	22431	6896	307		

1966	23132	7337	317		
1968	24383	8001	328		
1969	27047	8640	319		
1970	24524	8155	332	51.0	10.47
1971	25985	8426	324		
1972	26254	8243	314		
1973	29849	9797	336		
1974	30495	9963	335		
1975	29949	9381	331		
1976	27237	8984	330	51.5	14.08
1977	27947	9194	341		
1978	32348	10629	328		
1979	33865	11507	339		
1980	31343	11037	352	52.7	15.23
1981	28677	10098	352		
1982	31709	10772	347		
1983	32889	11467	352		
1984	34463	12027	349		
1985	33689	11893	345	51.1	14.82

Fuente: Elaboración propia de.- Economía mexicana en cifras 1981(52)

- Estadísticas Azucareras 1982-1985(9)

- Manual azucarero mexicano (42)

Las variaciones en la producción y oferta de bagazo se explican bajo el mismo análisis hecho en el panorama histórico de la Industria Azucarera ; las reducciones señaladas en el ritmo de producción en 1981 y 1985, se deben a los desajustes de consumo de azúcar principalmente presentados en el sector industrial. Sin embargo, los promedios del crecimiento de caña molida y producción de bagazo se comportan en forma similar.

En cuanto a la producción de bagazo por tonelada de caña molida, se notaron los efectos de la vocación de la caña como productora de fibra estimulada en el cultivo de variedades indias e híbridas mexicanas. Es así como hasta 1979 no se alcanzaban a superar los 340 kgb por TMC molida, mientras que de este año hacia adelante comienza a subir este índice hasta llegar en los últimos 6 años casi a los 350 kg de bagazo por TMC, molida en promedio.

5. Consumo de bagazo.

Del total del bagazo producido, en promedio más del 90% se ha consumido como combustible y el resto se ha destinado a la industria del papel, aglomerados, alimento para ganado y usos misceláneos, más pérdidas. En el cuadro No.7, se puede apreciar cual ha sido la vocación del bagazo de caña para el período analizado.

CUADRO No.7

Vocación del bagazo en México en 10E+3 toneladas

Año	Bagazo húmedo destinado para generar vapor 10E+3 t	Usos no Energético	
		(ventas) 10E+3 t	usado como energético (%)
1959	4237	199	95.5
1960	4959	261	95.0
1963	5030	270	94.9
1967	8022	448	94.7
1969	8169	475	94.5
1970	7704	451	94.5
1971	7916	510	93.9
1972	7653	590	92.8
1973	8607	690	92.6
1974	9250	713	92.8
1975	8732	649	93.0
1976	8221	763	91.5
1977	8280	914	90.0
1978	9544	1085	89.7
1979	10332	1187	89.7
1980	9892	1141	89.6
1981	8937	1161	88.5
1982	9181	1591	85.2
1983	9545	1926	83.2
1984	10579	1448	87.9
1985	10288	1605	86.5

Fuente: Elaboración propia de:

- Economía mexicana en cifras (1981) (52)
- Cóseres, M. (1985) (19)
- Balances de energía (1985) (67)

NOTA: s.d.: sin datos.

Del cuadro anterior se desprende que hasta 1983 el bagazo ha ido perdiendo lentamente su importancia energética en la industria azucarera causada por la sustitución por combustóleo en las plantas de generación de vapor, complementada con el crecimiento de la participación como materia prima en la elaboración de papel y aglomerados.

Para dar una idea más amplia, se puede señalar que para los últimos cuatro años (únicos con información) el bagazo producido en México, se ha distribuido de la siguiente forma (Cuadro No. 8).

Cuadro No.8

Distribución del Bagazo Producido en México (1982-1985)

	1982	1983	1984	1985
Combustible real.				
utilizado(%)	84.5	83.2	87.96	86.5
Papel (%)	13.52	14.6	11.2	10.04
Agglomerados (%)	0.26	0.26	0.30	0.85

Alimento ganado(%)	0.016	0.03	1.5	0.15
Otros %	1.39	1.91	1.2	2.47

Fuente: Balances de Energía 1984-1985(67)

Estadísticas Azucareras 1983-1984-1985(6,11)

Las cantidades no consideradas, corresponden a cifras no registradas por los ingenios, bagazo entregado gratis a agricultores o quemado a cielo abierto sin ningún aprovechamiento.

VII. ESTRUCTURA ENERGETICA DE LA INDUSTRIA AZUCARERA.

1. Consumo de energía.

Para analizar el consumo de energía por la industria azucarera que comprende la fabricación de alcohol como derivado, es necesario ubicar la participación de su consumo dentro de otros sectores de la Economía Mexicana. En el Cuadro No.9, se muestra esta participación, recalcando que la estructura energética del bagazo de caña, sólo comienza a hacerse oficial a partir de 1981 en los balances de energía del país.

Cuadro No.9.

Consumo de Energía del Subsector Azúcar comparado
con el Consumo final de Otros Sectores en E+12 kcal.

Año	Total Sectores *	Sector Industrial	Subsector Azúcar
1965	183.7	72.96	
1966	222.5	81.34	
1967	222.13	94.36	
1968	226.8	91.24	
1969	254.3	105.9	
1970	266.87	102.0	17.2
1971	282.16	104.5	31.9
1972	305.3	124	

1973	335.1	132.8	
1974	364.9	149	
1975	382.4	143	
1976	413	153	
1977	418.7	165.9	27.2
1978	451.3	186.4	
1979	495.2	195.4	
1980	539.7	194.2	27.2
1981	585.2	205.0	27.5
1982	734.6	275.4	23.9
1983	722.5	293.9	25.5
1984	727.9	279.9	31.1
1985	748.3	291.5	26.6

*Industrial, transporte, residencial y agrícola

Fuente: Evaluación propia a partir de los balances nacionales de energía. (67)

I.M.P., Energéticos 1975(38)

Guzmán, 1985, (32)

El Cuadro 9 muestra la participación estructural del subsector azúcar enmarcado dentro del consumo de energía del sector industrial y éste a su vez dentro del consumo de energía de los sectores productivos, exceptuando el consumo del sector energético, pérdidas por transformación y el consumo final no energético y usos propios. Se observa que en los últimos 15 años, la participación del sector industrial dentro del consumo

por sectores se mantiene en un promedio del 39%, con tendencia al crecimiento, mientras que el subsector Azúcar en los últimos 6 años, (para los cuáles se encontró información), mantiene su participación en el consumo del sector industrial en promedio con 26.5 billones de kilocalorías por año, con leve tendencia hacia la baja hasta 1983, cuando comienza a incrementarse, (ver gráfica No.3

Del consumo energético del sector industrial, el combustóleo ha ido incrementado su participación desde 1965, de 25.0 10E+12 kcal en las formas de energía utilizadas en el sector a 62.81 10E+12 kcal en 1985.

De este combustóleo se han utilizado en los últimos 10 años 10.85 10E+12 kcal en promedio anual, en el Subsector azúcar, según el cuadro No.10

Cuadro 10
Consumo global de energía y combustóleo
En Subsector Azúcar en E+12 kcal.

Año	Sector Indus trial	Energía subsect azúcar	Consumo de combustól. azúcar	Estructura del combust óleo %
1960	20.19	12.5	2.33	17.84
1970	28.73	17.2	3.88	16.7
1971	30.36	23.0	3.97	17.3

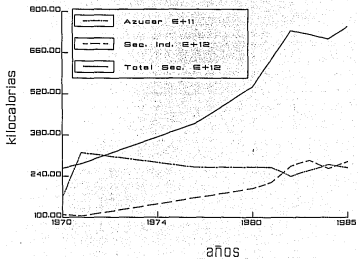
1972	33.01	28.4	6.16	21.7
1973	31.60	31.9	8.3	26.0
1974	43.21	12.5	-	-
1975	49.35	17.2	-	-
1976	59.44	23.0	-	-
1977	54.03	26.2	7.3	27.8
1978	58.30	26.8	8.5	32.0
1979	53.78	27.1	8.53	31.5
1980	46.8	27.5	9.8	35.6
1981	60.01	27.9	10.0	35.8
1982	49.20	23.9	8.88	37.15
1983	50.46	25.5	9.47	37.13
1984	52.37	28.3	9.94	35.5
1985	62.81	26.7	9.10	34.1

Fuente: Elaboración propia de: Balances de Energía (67)
Energéticos, 1978, año 2 No.3
Uso eficiente y conservación de energía (32).

El cuadro anterior, muestra que el combustible creció a un ritmo del 55%, entre 1960 y 1973 para el sector industrial, mientras que lo hizo en el 256% para el subsector azúcar en el mismo período.

Después de 1978 el consumo de combustible ha crecido a un ritmo de 1% para el Sector Industrial, mientras que para el subsector azúcar lo ha hecho en un 0.9% con aumentos

Consumo relativo del Subsec.



GRAFICA No.3

considerables en 1982 y 1984 , sustituyendo de paso en un proceso lento pero efectivo al bagazo de caña, combustible que respondía a más del 80% de la oferta de energía para el subsector antes de 1970.

El pico anotado para 1973 se debe al incremento de la capacidad de molienda de los ingenios del país en más de 3.5 millones de toneladas de azúcar respecto al año inmediatamente anterior, respondiendo a esta demanda un aumento de la productividad de campo en 4.4 toneladas/ha.

A partir de 1973, a raíz de la crisis petrolera y sus efectos en la economía mexicana, comienzan a implementarse medidas de conservación y uso racional de energía que van teniendo un efecto lento sobre la recuperación del bagazo como energético en la fabricación de azúcar y alcohol.

El volumen del combustóleo consumido en el subsector azúcar, tanto el destinado a la fabricación de azúcar como alcohol, se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro No.11
Consumo de Combustóleo en Fabricación
de Azúcar y Alcohol.

Año	Consumo Global	Producción de	Producción de
	de Combustóleo	Azúcar en	Alcohol en
	10E+3 l	10E+3ton	10E+3 l
1959	289456	1264	41600
1960	342813	1497	39067
1969	360984	2393	51255
1970	298603	2207	51824
1971	324876	2393	58960
1972	406404	2359	55004
1973	504337	2592	54946
1974	532265	2649	57895
1975	561591	2548	69847
1976	586479	2546	57816
1977	642859	2541	73577
1978	801995	2849	80588
1979	887468	2880	88350
1980	948156	2603	87724
1981	960184	2367	106887
1982	1014625	2677	83390
1983	1024240	2894	110918
1984	1073661	3045	113680

1985

1024704

3221

112854

Continuación

Año	Consumo Global de Combustóleo en Fabricación de Azúcar 10E+3 l	Estructura del Combustóleo en la Fabricación de Azúcar %	Consumo Glob. de Combustól en Fabricac. de Alcohol 10E+6 l
1959	250386	86.5	39.07
1960	300013	87.5	42.8
1969	319484	88.4	41.5
1970	270593	90.3	28.01
1971	293070	90.2	31.8
1972	374904	92.3	31.5
1973	454285	90.1	57.6
1974	490265	92.10	42.0
1975	514591	91.6	47.0
1976	546229	93.1	40.25
1977	594259	92.4	48.5
1978	749149	93.4	52.85
1979	828968	93.4	58.50
1980	893556	94.2	54.6
1981	909534	94.7	58.65
1982	956925	94.3	57.7
1983	967120	94.4	57.12
1984	1014861	94.5	58.8
1985	964204	94.1	62.5

Fuente: Elaboración propia de:

Manual azucarero mexicano(42)

Estadísticas Azucareras (6,11)

Del cuadro anterior se observa que mientras la producción de azúcar aumentó a un ritmo anual del 5.7%, el consumo de combustóleo lo hizo a un ritmo del 10.96%. De igual forma, la producción de alcohol aumentó en un 6.58% y el consumo de combustóleo para tal fin lo hizo en el 2.3%. Sin embargo en cuanto a la estructura del combustible utilizado por los dos productos de la industria azucarera, la fabricación de azúcar demandó el 94% del combustóleo total, situación que persiste en los últimos 10 años del período analizado. Se observa que entre 1959 a 1970 el consumo de combustóleo en la fabricación de alcohol alcanzó del 10 y 15% del consumo global del subsector, mostrando una alta actividad este ramo de la industria.

Se explican los elevados consumos de combustóleo por los reducidos costos del hidrocarburo, el cual para estos años comprende entre el 1 y el 2% del costo total del dulce, resultando estimulante para su despilfarro y poco aprovechamiento. De 1983 en adelante el consumo del petróleo tiende a reducirse a causa del creciente aumento del costo energético por unidad de producto terminado.*

En 1985, como consecuencias políticas estatales para el sector, el consumo de combustóleo se reduce en el 5.25% con respecto al año anterior, ritmo que se proyecta mantener hasta 1990 cuando dé resultados más significativos los planes de uso racional y eficiente de energía trazados y en pleno ejercicio para la industria azucarera.

En resumen, el destino del combustóleo cumple con los siguientes objetivos:

- i) Ayuda y activa la combustión del bagazo.
 - ii) Sustitución del bagazo en interrupciones de la molienda, aunque el consumo para este fin se haya reducido en virtud de la implantación de los sistemas de retroalimentación del bagazo.
 - iii) Atender el desequilibrio en el balance de vapor cuando las operaciones de molienda y fábrica así lo exijan. Esta se constituye en única opción ya que por condiciones de diseño y operación de conductores de bagazo o por los tamaños de las celdas de combustión, no se permite aumentar el flujo másico de bagazo para evitar bajas en la presión de generación de vapor.
 - iv) Inicio y fin de zafra. Para garantizar inercia térmica en el primer caso y para tratar de cumplir o superar records de molienda de años anteriores.
- Es importante señalar que después de terminar la molienda se requiere mantener al menos una caldera en

operación trabajando solo con combustóleo que suministra vapor a la fábrica de alcohol, cuando ésta exista.

2. Consumo energético del bagazo

Para analizar la participación energética del bagazo en la industria azucarera, se supone que el 100% de éste, utilizado para la generación de vapor, suple las demandas de la fabricación de azúcar. Las cantidades que se presentan en el cuadro No.12 hacen referencia a los litros equivalentes de petróleo; este indicador se extrae de la siguiente forma: Según fórmula (4), el poder calorífico bajo del bagazo a condiciones medias de la industria azucarera mexicana es de 1744 kcal por kg húmedo y como el poder calorífico del combustóleo usado es de 10063 kcal/l, entonces, un litro de combustóleo será equivalente a 5.66 kg de bagazo. De esta forma utilizando los registros de producción de bagazo del cuadro No.6 y consumo de petróleo para fabricación de azúcar del cuadro 11, se tiene:

Cuadro No.12

Estructura Energética del Bagazo de Caña
en la fabricación de azúcar

Año	Cons. Equival. de Bagazo en 10E+3 1	Total Combust. más bagazo 10E+3 1	Estructura Energ. del Bagazo (%)
1970	1363608	1634201	83.4
1971	1401132	1694202	82.7
1972	1354581	1729485	78.3
1973	1523439	2027724	75.13
1974	1637250	2127515	76.95
1975	1545564	2060155	75.02
1976	1455117	2001346	72.7
1977	1465560	2059919	71.14
1978	1689288	2438237	69.28
1979	1826994	2655962	68.79
1980	1750884	2644440	66.21
1981	1581849	2491383	63.49
1982	1625037	2581962	62.94
1983	1689465	2656585	63.59
1984	1872483	2887344	64.85
1985	1820976	2785180	65.38

Fuente: Elaboración propia de: - Informes propios de corrida.

- Córeres M. (19)

El bagazo, es el combustible derivado del mismo proceso de fabricación de azúcar, y por tanto su costo se considera nulo, con excepción de las ventas hechas a terceros, recicladas en forma de combustóleo a los mismos ingenios a través del sistema de trueque.

Debe tenerse en cuenta que en la práctica, algunas ventas de bagazo a las papeleras se hace mediante trueque por combustóleo, situación que se ha mantenido más o menos constante desde 1970, donde el combustible recibido en esta forma mantiene una participación del 24% dentro del petróleo señalado para la industria azucarera.

La variación a lo largo del período analizado es una consecuencia de la infraestructura de generación de vapor y de los fenómenos económicos y técnicos asociados a la producción y refinación de los hidrocarburos.

Como se señala en el cuadro 12, el consumo de bagazo en general se ha incrementado en razón del 2.2% anual exceptuando períodos del 75-76, 79-81 y 84-85, con reducciones del 4.1% en el segundo período causado por el congelamiento de la planta física, la que no dispone de la capacidad de observar mayor oferta de bagazo a partir de 1984.

En cuanto a su participación estructural hasta 1972 el bagazo aportó el 82.1% de la energía necesaria en la elaboración de azúcar. Después de 1972 comienza a reducirse esta participación a un ritmo del 2.83% anual hasta 1982, a partir del cual sube su ritmo de recuperación al 1.2% anual.

Los fenómenos asociados con el alto índice de consumo de energía y elevada elasticidad en el consumo presentados para el país entre 1977 y 1982 afectaron el consumo de energía al reducir la estructura del bagazo como energético base en un 28%, frente al ritmo constante que mantenía antes de este periodo. De otra parte los efectos de la sustitución de generadores de vapor que quemaban solo bagazo, a combustóleo más bagazo, ha causado reducciones en el uso energético del bagazo además de conducir a bajar la eficiencia de las calderas.

3. Factores que afectan al consumo de energía.

Fuera de los factores técnicos que se relacionan con el régimen operativo de cada ingenio y que serán analizados para el ingenio Cassano en particular; los costos de energía constituyen el factor básico que más ha incidido sobre el consumo de combustible, en virtud de que el bagazo es el energético que no ha tenido ningún valor en el producto terminado.

En el cuadro No.13 se muestran los índices de consumo energético y los costos en precio por unidad de producto final de azúcar.

Cuadro No.13
Variación de los Precios de Energía
para la Fabricación de Azúcar

Año	Litros de Combustól por TMA	Litros de Combustól por L.de Alcohol	Pesos/litro de Combust.	Precio Pesos/TMA	Costo de Energía/ Costo TMA %
1971	122	0.54	0.19	-	-
1972	159	0.57	0.19	-	-
1973	194	0.93	0.22	3030	1.4
1976	214	0.70	0.24	3920	1.3
1980	343	0.62	0.37	12000	1.0
1981	384	0.55	0.65	26000	1.0
1982	357	0.69	0.80	28000	1.02

1983	334	0.57	3.2	43000	2.5
1984	333	0.52	10	67000	4.9
1985	298	0.55	20	95000	6.2

(1) Fuente: Cuadro 11.

(2) Fuente: Cuadro 12.

(3) Fuente: Informe de Ventas de bagazo a papeleras en Ingenios de la Zona centro -registros delegación regional.

(4) Fuente: La Economía Mexicana en cifras (52).

Estadísticas Azucareras (6,10).

(5) Elaboración propia.

Se notan los incrementos presentados en el uso de combustóleo puro y equivalente en la producción de azúcar, pasando de 122 l/TMA en 1971 a 384 l/TMA en 1981 con un crecimiento del 214% en 10 años.

Este aumento exagerado tiene su explicación en los reducidos costos del combustóleo que a 1965 no alcanzaban los 70 centavos por litro.

Si se comparan los costos de producción de azúcar (promedio

MA=Tonelada Métrica de Azúcar.

para varios tipos), con los costos de energía para el bien final, se tiene que antes de 1981 no representaban prácticamente ningún valor, por lo tanto se conducía despilfarro e ineficiencia en la utilización del combustóleo y bagazo.

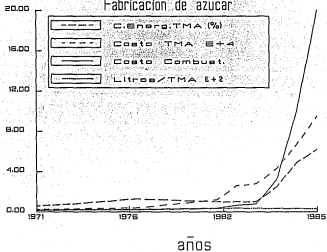
Con la elevación los costos de energía en el producto final se puede estructurar un mejor balance energético de los ingenios en la industria del azúcar como se comienza a observar a partir de 1983 (ver gráfica No.4), cuando estos costos demandan la implantación y control de medidas para reducir el consumo de combustóleo.

En el cuadro 14, se anotan los factores que inciden dentro del elevado consumo de energía:

Cuadro 14
Otros Factores Inciden en el Consumo de
Energía (1959-1985).

Observación	Año			
	1959	1969	1979	1985
Tiempo perdido (%)	37.98	31.75	35.90	31.15
Días de Zafra	167	165	195	165
Consumo de Combustóleo (l/TMC)	19.15	11.03	24.48	28.6
Capacidad teórica global de Molienda (t/24 horas)	114420	241780	281500	314650
Capacidad Real Global de				

Costos de Energía en Fabricación de azúcar



GRAFICA No. 4

molienda (t/24 horas)	85888	162280	172488	215538
Eficiencia de Molienda (%)	75	67.1	61.3	68.5
Eficiencia de Fábrica (%)	8.4	8.8	8.5	9.1

Fuente: elaboración propia de:

1,2,3: Manual del Azucarero Mexicano (42)

4: Estadísticas Azucareñas (6,10)

Se desprende que el constante aumento hasta 1979 de los días de zafra, que implica en la mayoría de los casos trabajar en condiciones climatológicas y de operación adversas, ha causado elevado porcentaje de tiempo perdido (más del 30%), conduciendo a una baja eficiencia de molienda y altos consumos de combustóleo. Por los análisis de cuadro anteriores, esta situación que se hace crítica para 1979, se extiende hasta 1981, donde aparecen los más altos índices de consumo de petróleo, bagazo y energía en general, como puede observarse en los cuadros 15 y 16.

Se señala el tiempo perdido como la variable que más incide en el consumo de combustóleo en razón de que generalmente implica paros en la molienda exigiendo la generación de vapor en calderas para mantener demandas de fábrica y la inercia térmica de los generadores. Durante este tiempo perdido, se debe quemar bagazo o la mínima cantidad de combustóleo, cuando en la realidad la caldera quema sólo este último combustible en la mayoría de casos.

4. Consumo específico de energía en la industria.

Para ampliar las ideas en cuanto al comportamiento energético de la industria azucarera y completar los puntos de vista señalados en cuanto al consumo de bagazo, combustóleo o ambos, es necesario hacer referencia al consumo específico de energía (consumo de las formas de energía por unidad de producto terminado), que envuelva en su cómputo el coeficiente global de eficiencia de fábrica, permitiendo establecer comparaciones a través de los años del período estudiado. Esta consideración se hace en virtud de que algunas referencias hacen alusión al consumo de energía por TMC en lugar del consumo de energía por kilogramo o tonelada métrica de azúcar, concepto mucho más amplio que envuelve la eficiencia del proceso de molienda y concentración.

En el cuadro 15, se muestran las variaciones entre 1970 a 1985 del consumo de combustóleo y bagazo por TMC o TMA, mientras que en el cuadro 16, presenta la variación del consumo global de energía por kg. de azúcar.

Cuadro No.15

Consumo Especifico de Combustóleo y Bagazo
en la Industria Azucarera

Año	Combustóleo Por TMC Litros	Bagazo por TMC (kg)	Combustóleo por TMA (L)	Bagazo por TMA (kg)	Rend. de fca %
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1970	11.03	314	124	3528	8.9
1971	14.27	304	124	3340	9.1
1972	14.27	291	160	3269	8.9
1973	16.90	288	194	3349	8.6
1974	16.07	303	185	3523	8.6
1975	17.18	292	201	3356	8.7
1976	20.05	302	214	3247	9.3
1977	21.27	296	233	3253	9.1
1978	23.16	295	263	3352	8.8
1979	24.48	305	288	3588	8.5
1980	28.51	316	343	3807	8.3
1981	31.71	312	384	3805	8.2
1982	30.12	289	357	3440	8.4
1983	29.40	290	334	3258	8.9
1984	29.40	307	333	3411	9.0
1985	28.6	305	298	3210	9.5

Fuente: Elaboración propia de:

- (1) Cuadros 7 y 11
- (2) Cuadros 6 y 7
- (3) Cuadros 11
- (4) Cuadro 7 y 11
- (5) Corridas finales de Manual Azucarero Mexicano (42).

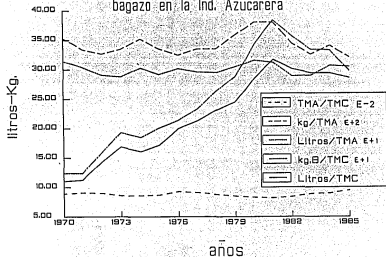
El cuadro 15 muestra que por cada TMC molida, el consumo de combustóleo subió en 187% entre 1970 y 1981, a un promedio anual del 17%, mientras que el consumo de bagazo aproximadamente se mantuvo constante, no incidiendo este aumento del consumo de energía en la eficiencia de fábrica, la que se mantuvo en 8.8% en promedio, mostrando una leve reducción para el año de 1981. Para el período 81-85 el consumo de combustóleo mantiene un promedio de 29.4 l/TMC, con ligera tendencia a la baja para 1985, ritmo que se espera mantener para los años restantes de la presente década (ver gráfica No.5). El consumo de bagazo mantiene un promedio de 295.3 kg/TMC con tendencia al aumento en virtud de la implantación de ajuste en los ingenios para su máximo aprovechamiento. Se destacan los efectos de estas últimas medidas al irse recuperando la eficiencia de fábrica que para 1985 alcanza las 9.5 toneladas de azúcar por cada 100 toneladas de caña molida.

En el cuadro No.16, se observa el comportamiento del consumo específico total de energía por kg de azúcar, sea standard o refinada.

Cuadro No.16
Consumo Especifico de Energía por kg.
de Azúcar Empacada (1970-1985).

Año	Cons. equival. global de Combustóleo (1/TMA)	Consumo total de Energía (kcal/kg de Azúcar)
	(1)	(2)
1970	740	7448
1971	708	7124
1972	733	7377
1973	782	7877
1974	803	8082
1975	809	8136
1976	786	7910
1977	811	8158
1978	856	8613
1979	922	9280
1980	1016	10223
1981	1053	10592
1982	964	9706
1983	992	9986

Consumo específico de combust. y bagazo en la Ind. Azucarera



GRAFICA No. 5

1984	948	9542
1985	891	8966

Nota: El consumo equivalente de petróleo incluye el combustible puro utilizado más el combustible equivalente por bagazo a razón de 177lts de combustible por TMB (tonelada métrica de bagazo).

Fuente: Elaboración propia de

(1): Cuadro 11

(2): (1) por 10063 kcal/l y dividir en 1000

El análisis del cuadro 16 presenta los mismos fenómenos asociados a las variaciones del consumo del combustible y bagazo para el cuadro 15. Solo vale complementar que las referencias citadas a nivel regional señalan un consumo de 6000 kcal/kg de azúcar empacada, mostrando excesos críticos en el consumo de energía para el caso mexicano, como sucede en 1981 con el consumo de más de 5000 kcal/kg en exceso respecto al promedio regional.

Por las referencias debe recordarse que Brasil está logrando consumos de menos del 5 l/TMC, mientras que Cuba bajó a cero el consumo de combustible, siendo la energía restante suministrada por el bagazo húmedo (50% de humedad), sin ningún sistema de densificación o secado en la mayoría de los ingenios.

Debe destacarse también, que en los ingenios no existe diferenciación clara entre el consumo de energía del ingenio estandarista al ingenio que produce azúcar refinada, existiendo gran dispersión en el muestreo global, confundiéndose el consumo energético entre uno y otro ingenio. Es de suponer que el azúcar refinada consume mayor cantidad de energía por los procesos complementarios que demanda el mejoramiento de la calidad del dulce en cuanto a pureza, color y contenido de humedad.

5. Generación y consumo de vapor.

La forma de generación y conducción de vapor establecen en los ingenios la oferta de energía para la molienda y fábrica. Para generar vapor se utilizan calderas cuyo diseño y/o construcción en muchos casos data de más de 30 años y cuyo combustible tradicional ha sido bagazo complementado por combustóleo. Debe destacarse que la tendencia actual es generar vapor mediante el quemado simultáneo de bagazo más combustóleo en calderas que estaban diseñadas para generar mediante uno solo de los dos combustibles, conduciendo a pérdidas en la eficiencia de las calderas.

La industria azucarera pues, está dotada de una infraestructura de generación integral con un buen número de unidades viejas y otras de reciente operación como producto de ~~la creación de nuevos ingenios o aumento de la planta física y~~ reparación de ingenios ya existentes.

En el cuadro No.17 se muestra, para 1982, la distribución de plantas de generación de vapor en 62 ingenios analizados.

Cuadro No.17
Antigüedad de las Calderas en la
Industria Azucarera en 1982.

Antigüedad en Años	No.de Calderas	%
Mayor de 40 años	41	12
entre 30 y 40	62	18
entre 20 y 30	55	16
entre 10 y 20	76	22
Menor de 10 años	111	32

Fuente: Cóseres, 1984 (19).

Puesto que la mayor frecuencia se encuentra en el intervalo de menos de 10 años se puede considerar que los generadores de vapor son relativamente nuevos.

En los últimos 10 años, la mayoría de los ingenios en su necesidad de aumentar su producción y cumplir las cuotas tradicionalmente fijadas, han adquirido una o dos nuevas calderas, las cuales llevan el peso de la generación. Estas unidades de reciente adquisición trabajan a presiones y temperaturas de 17 kg/cm² y más de 300°C, en lugar de las antiguas de 10 kg/cm² y 200°C, respectivamente.

Estas modificaciones en la capacidad instalada no siempre se realizan con el necesario balance entre las distintas áreas de proceso. Fuera de los generadores, existen otras máquinas consumidoras de vapor como bombas y turbinas de distintas edades y obsoletas frente a otras en buen estado o nuevas situación que desequilibra la conducción y uso de vapor y baja la eficiencia global del ingenio.

5.1 Vocación de los generadores de vapor

La vocación de los generadores de vapor, entendida en función de la potencia destinada para quemar un determinado tipo o mezclas de combustibles, se puede analizar en el cuadro 18, para los 4 periodos de los últimos 25 años

Cuadro No.18
Potencia Destinada a Cada Combustible en
las Calderas de la Industria Azucarera

	A Ñ O			
	1959	1969	1979	1985
No. de Ingenios	75	65	65	69
Potencia instalada para quemar bagazo (H.P.)	16684	37490	33460	11532
% de Participación	8.31	10.60	6.02	2.12

Potencia instalada para

combustóleo (H.P.)	53336	43078	43342	34696
% de Participación	26.56	12.18	11.60	6.38
Potencia instalada para quemar bagazo y combustóleo (H.P.)	126131	272883	307810	497611
% de Participación	62.87	77.16	82.38	91.50
Potencia instalada para quemar bagazo y/o leña.	4610	200	-	--
% de Participación	2.3	0.06	-	-
Total pot. Instalada.	200761	353651	373612	543859*
% total	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los datos señalados en el cuadro 18 se obtienen directamente de los informes de plantas de vapor de los ingenios de y de la potencia por superficie de calentamiento (1H.P./10pies) de superficie de calefacción o de los promedios observados en la capacidad de generación del cuadro 20.

El cuadro anterior demuestra que no existe ninguna correspondencia entre el número de ingenios y la potencia instalada debido a que los ingenios nuevos tienen una potencia

de generación de 10 o más veces en comparación con las unidades que desaparecen. De otro lado, se observa que hasta 1969 existían generadores que utilizaban bagazo y leña como únicos combustibles para generar; se nota también la progresiva eliminación de plantas de generación que quemaban un solo combustible en beneficio de plantas que aprovechan en forma simultánea bagazo y combustóleo en el proceso de generación, pasando estas últimas del 62.87% en 1959 al 91.5% en 1985.

5.2 Distribución y aprovechamiento de la potencia instalada.

En el cuadro No.19 muestra como ha variado el número de ingenios en función de la potencia instalada; sus registros confirman mediante análisis de computador (ver apéndice 1) la desaparición de ingenios pequeños, el santenimiento de ingenios entre 3000 a 5000 H.P. y el rápido crecimiento de ingenios de más de 5000H.P.

Cuadro No.19
Variación del No. de Ingenios en Función
de la Potencia Instalada (H.P.)

Intervalo de potencia Instalada en H.P.	AÑO			
	1959	1969	1979	1985
0 - 1000	16	2	1	0
1001 a 2000	25	10	10	4

2001 a 3000	13	12	8	5
3001 a 4000	7	8	9	8
4001 a 5000	7	9	9	8
5001 a 10000	6	15	20	32
10001 a 40000	1	9	8	12
T o t a l	75	65	65	69

Fuente: Elaboración propia.

En el apéndice 1, de donde se extrajo el cuadro 19, se observa que los ingenios pequeños que desaparecen tienen una baja capacidad de molienda (ton/hora)*, lo que acarrea una alta energía demandada (H.P.-hora) por cada tonelada de caña molida. Se aclara que en el cálculo de la capacidad efectiva de molienda, se considera el tiempo continuo durante el cual se realizó esta labor.

Para este último parámetro se observan en los diferentes rangos de potencia que a medida que se incrementa la capacidad instalada, se va reduciendo el consumo energético real (HP-Hora)/TMC de caña molida, con algunas excepciones de ingenios que aprovechan eficientemente la energía y trabajan con factor de capacidad de más del 85%. De este apéndice también extrae que algunos ingenios como es el caso de Casasano que en 1985 tuvo uno de los consumos más altos combustóleo, tiene un buen aprovechamiento de su potencia instalada al utilizar 48.10 y 27.13 HP-Hora nominales y reales respectivamente, por cada TMC

siendo el más eficiente en este aspecto dentro de los ingenios con potencia nominal instalada entre 3000 y 4000 H.P..

En el balance general, se observa un alto consumo energético por TMC, si se tiene en cuenta que en países como Cuba, Brasil, Australia su valor está entre 20 y 30 HP-Hora/TMC (28,36,39).

En el cuadro 20 muestra del apéndice 1, como ha variado el consumo energético real en los últimos 25 años.

Caña molida por zafra (tons)/(horas de zafra.*tiempo aprovechado)

Cuadro No.20
Consumo energético medio en HP-hora/TMC
para los ingenios de México

A Ñ O

Variación de HP instalada	1959	1969	1979	1985
0 - 1000	224	71.4	38.2	0
1001 - 2000	74.2	81.03	42.18	41.25
2001 - 3000	43.3	33.1	31.0	32.3
3001 - 4000	38.2	34.5	32.8	39.0
4001 - 5000	37.8	37.2	28.6	30.4
5001 -10000	31.0	34.25	35.14	40.9
10001 -40000	19.40	42.78	34.6	36.7

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro nos muestra como se han mantenido en su mejor rendimiento los generadores de vapor de ingenios de 2001 a 3000 H.P. instalados desde 19699; igual se puede decir de los ingenios entre 4000 a 5000 H.P. instalados entre 1979 a 1985. Se nota sin embargo, que los ingenios con más de 10000 H.P. instalados no son los más eficientes para México. En el análisis global, el aprovechamiento real de la capacidad

instalada se comporta en forma paralela a la eficiencia de los generadores para el respectivo año, como se puede ver en el cuadro No.21

5.3 Estimación de eficiencia y capacidad de generación.

Siguiendo las recomendaciones de Enríquez (25), quién para las plantas de generación mexicanas señala eficiencias medias del 55% para las que queman solo bagazo, 67% para las que queman bagazo y combustóleo, y 75% para las que queman solo combustóleo y poniendo estos porcentajes dentro de la estructura de participación de cada combustible por capacidad instalada según cuadro 18, se obtienen los siguientes datos, como una aproximación de la eficiencia y capacidad de generación.

Cuadro No.21

Estimación de la Eficiencia y Capacidad de Generación de las Plantas de Vapor en México.

	A Ñ O			
	1959	1969	1979	1985
Eficiencia media (1) ponderada (%)	58.7	61.13	63.5	56.4
Potencia real (2) Disponible (H.P.)	177864	216080	237243	306627
Generación de vapor (kgv/HP-hora)	(3) 18.5	20	23.5	24
Presión de	(4) 9	11	14	16

generación en

kg/cm²

Fuente elaboración propia de:

- (1) Cuadro 18.
- (2) Potencia Instalada. eficiencia media
- (3) Promedio para 55 Ingenios, Manual Azucarero (42).
- (4) Manual Azucareo(42)

En el cuadro 21, se observa que ante el incremento de calderas que queman combustibles simultáneamente (cuadro 18), la eficiencia media va decreciendo en la misma proporción. La baja eficiencia señalada para 1959 es causada por la participación que tenía el bagazo o leña dentro de la oferta de energía del sector azucarero.

De otro lado se nota un mejoramiento en la capacidad de generación de vapor con un incremento del 27% respecto al valor promedio registrado en 1959. Situación similar se observa en la presión de generación frente a la adquisición de plantas nuevas de gran capacidad que trabajan con presiones arriba de los 15 kg/cm².

5.4. Consumo específico de vapor

Como un medio para hacer más real el consumo específico de vapor, se propone establecer su cálculo mediante dos formas. La primera, se basa en el cálculo del consumo de vapor por medio de

la potencia real instalada y la capacidad de generación de las calderas en México; mientras que la segunda, se hace a través de las cifras de consumo de combustóleo y bagazo, teniendo en cuenta que la generación quemando combustóleo se realiza con un 75% de eficiencia, mientras que cuando se quema bagazo se hace con un 55% y recordando que 177 litros de petróleo son equivalentes a una tonelada métrica de bagazo a condiciones medias de la industria azucarera.

5.4.1 Mediante potencia instalada.

En el cuadro 22 se extraen para mayor comprensión, los parámetros básicos de cuadros anteriores en relación con el consumo específico de vapor en la industria azucarera mexicana.

Cuadro No.22
Cálculo del Consumo Específico de Vapor
Según Potencia Instalada.

Año	Azúcar producido 10E3Ton	Caña Molida 10E3ton	Rend.de Fca (3) (%)	Días de zafra	Vapor Generado 10E10kg	kgs.de vapor por TMC	kgs.de vapor por TMA
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1959	1264	14408	8.7	165	0.87	604	6883
1969	2394	27047	8.8	165	1.71	632	7143
1979	2880	33865	8.5	195	2.65	783	9201
1985	3227	33689	9.5	165	2.91	864	9018

Fuente elaboración propia de:

(1): Cuadro 11

(2): Cuadro 6

(3): Cuadro 15

(4): Cuadro 14

(5): Cuadro 20

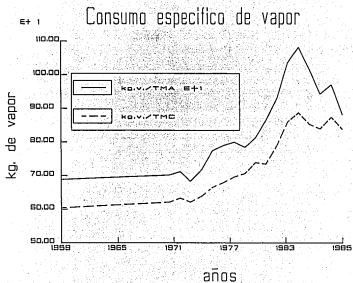
(6): (5)/(2)

(7): (5)/(1)

Bajo el enfoque basado en la capacidad instalada se muestra que el consumo de vapor por TMC entre 1959 a 1969 fué constante, y simultáneamente como sucede con el consumo de energía, aumenta rápidamente por razones expuestas anteriormente hasta cerca de 1979 por sobrecarga de equipos, fugas, purgas, hasta llegar a valores casi de 900 kg/TMC después de 1979. Vale la pena reiterar que el consumo de vapor en países como Cuba y Brasil está entre 500 a 600 kg/TMC y con rendimientos de fábrica del 9% llegando a emplear unas 6200 kcal por tonelada de azúcar producido.

5.4.2 Mediante consumo de combustóleo y bagazo.

Un panorama más amplio en cuanto al consumo específico, como complemento del análisis de los índices obtenidos en el numeral anterior, se puede deducir mediante el consumo por año de bagazo y combustóleo. La gráfica No.6 muestra la tendencia de los índices de consumo de vapor por TMC y TMA. En ella se nota



GRAFICA No. 6

un comportamiento más o menos normal hasta hasta 1970 a partir del cual se incrementan a un ritmo del 2.6% anual hasta 1984 cuando comienzan a descender en virtud del mejoramiento de la eficiencia de fábrica de los ingenios; en el cuadro 23, se registran estos cálculos.

Cuadro No.23

Consumo Específico de Vapor Según
Combustóleo y Bagazo Aprovechados.

Año	Vapor Gener. del combustól 10E6 ton (1)	Vapor Gener. del bagazo 10E6 ton (2)	Vapor Total generado 10E6ton (3)	kg Vapor por TMC (4)	kg de Vapor por TMA (5)
1959	1.9	6.80	8.70	604	6883
1969	3.7	13.12	16.81	621	7012
1970	3.3	12.37	15.72	633	7119
1971	3.6	12.71	16.34	621	6828
1972	4.6	12.29	16.93	639	7177
1973	6.2	13.82	20.06	665	7739
1974	6.0	14.85	20.91	679	7893
1975	6.4	14.02	20.38	696	7998
1976	6.7	13.20	19.96	706	7840
1977	7.3	13.29	20.64	739	8123
1978	9.3	15.32	24.6	734	8630
1979	10.2	16.57	26.8	791	9312

1980	11.0	15.88	26.9	859	10345
1981	11.2	14.35	25.8	887	10815
1982	11.8	14.74	24.7	852	10145
1983	11.9	15.32	27.2	839	9416
1984	12.5	16.98	29.5	873	9698
1985	11.9	16.52	28.4	838	8816

Fuente: Elaboración propia

(1): calculado con base al combustóleo/zafra

(2): calculado con base al bagazo consumido por zafra y con la equivalencia de 177 lbs de combustóleo por TMB

Haciendo una relación del grado de aproximación de las dos formas desarrolladas para el cálculo del consumo específico de vapor, se presentan en el siguiente cuadro las diferencias de una y otra estimación.

Cuadro No.24
Grado de Aproximación de dos Métodos
para la Estimación del Consumo
Específico de Vapor.

Año	kgv/TMC(1)	kgv/TMC(2)	Diferencia
1959	604	604	2
1969	632	621	11
1979	783	791	8

Fuente: elaboración propia.

(1): Cálculo a partir de la potencia instalada

(2): Cálculo a partir del consumo de combustóleo y bagazo.

5. Eficiencia de generación por combustible.

Conociendo el vapor total generado por zafra, numeral (3) cuadro 21, los consumos de bagazo y combustóleo y la participación estructural en el consumo de energía del cuadro 12, se podrá determinar la eficiencia real de generación de vapor del bagazo y combustóleo (cuadro 25).

Cuadro No.25.

Capacidad Global de Generación de Combustóleo y Bagazo en Condiciones Reales de Operación en la Industria Azucarera.

Año	Total kg de Vapor	Combustól. Utilizado	Bagazo Utilizado	kg de Vapor por 1 de combustol.	kg de vapor por de bagazo
	Zafra 10+E10	10+E6L	10+E6ton		
1959	0.87	153.6	4.23	9.66	1.71
1969	1.71	298.4	8.17	9.80	1.73
1979	2.65	828.9	10.32	9.97	1.76
1985	2.91	964.2	10.29	10.45	1.85

Fuente: elaboración propia.

Si para generar un kg de vapor en condiciones medias se necesitan 600 kcal (36), de los poderes caloríficos del combustóleo y bagazo, se debieran generar 16.7 kgv/kg de combustóleo y 2.96 kg. de vapor por kg. de bagazo. Esto significa que para la industria azucarera el rendimiento global medio de los generadores será del 59% para combustóleo y bagazo, resultando muy baja la eficiencia de generación en comparación con plantas similares de otros países (75%).

6.1 Causas de la baja eficiencia de generación de vapor.

Las causas de la baja eficiencia de generación en las plantas de vapor de la industria azucarera, se debe fundamentalmente a tres factores:

- Los combustibles utilizados.
- La combustión.
- Los equipos e instrumentos de la combustión.

6.1.1 Los Combustibles

La humedad del bagazo como principal combustible para la generación tiene gran influencia sobre el poder calorífico del mismo. ~~Mientras que otros países productores de azúcar obtienen~~ su bagazo entre el 45% y 50% de humedad, en México el contenido

medio de humedad es del 51.7%, lo que implica una pérdida del poder calorífico del 15% y por tanto una compensación adicional de combustóleo para garantizar las demandas de vapor en los ingenios.

Como se vió y analizó anteriormente, al tenerse una baja capacidad de generación por parte del bagazo se conduce a una baja capacidad de generación por parte del combustóleo, el cual debe compartir su calor generado para activar la combustión del bagazo, fuera de las fallas operacionales y de diseño de equipos que sobresalen en esta industria.

La presencia de materias sólidas ajenas a la fibra del bagazo conduce también a la reducción del poder calorífico; la contaminación del bagazo comienza en las labores mecánicas de cosecha, alza y acarreo, donde la caña es transportada con gran cantidad de tierra, piedras y hojas inquemadas. Además de estas impurezas propias de la cosecha, durante la molienda queda un alto porcentaje de sacarosa que llega a valores medios del 4%.

De esta forma las cenizas no propias del bagazo actúan como materiales inhibidores, mientras que la sacarosa absorbe calor para su degradación térmica reduciendo la capacidad de generación de vapor.

El contenido alto de cenizas tiene tres factores perjudiciales sobre la generación de vapor:

- i) No son combustibles, demandando trabajo y tiempo para eliminarlas produciendo enfriamiento de los hornos.
- ii) Absorben agua, incrementando la humedad y el contenido de sacarosa del bagazo.
- iii) A mayor contenido de cenizas y sacarosa existe la posibilidad de formar costras de inquemados y azúcar alrededor de la fluxería impidiendo la transferencia de calor. De otro lado, en la pila de la combustión se forman bloques compactos, los que en su parte interior contienen inquemados, reduciendo la superficie de quemado del horno y el volumen de la cámara de combustión. Esta situación incrementa los tiempos perdidos por sopleteado y limpieza de los ceniceros.

El sistema de alimentación o dosificación del bagazo a los hornos es deficiente e intermitente y su control queda a criterio del fogonero. Esta situación permite que haya entrada de exceso de aire frío por las compuertas de alimentación reduciendo la temperatura del horno y la eficiencia de generación. Esta condición desfavorable se ve agravada en algunos ingenios donde el bagazo no tiene la suficiente altura de caída ni un sistema de suspensión que garantice el suficiente quemado, sobre todo de fibras grandes.

En cuanto al combustible, se hace necesario garantizar la temperatura adecuada (120°C), para que sea homogenizado y atomizado eficientemente en el aire. Una baja temperatura (menor de 100°C), conduce a la formación de gotas grandes que no quemar completamente y son fácilmente evacuadas a través de gases de escape de la chimenea.

6.1.2 Por la combustión.

Existen cuatro factores básicos que inciden en una baja capacidad de generación produciendo aumento en el consumo de combustible y bagazo y que afectan el rendimiento del generador de vapor:

- i) Relación inadecuada aire combustible.
- ii) Desbalance en el exceso de aire.
- iii) Baja temperatura y calidad del agua de alimentación.
- iv) Deficiente estado de hornos, quemadores, fluxería y control de purgas.

La relación combustible-aire para la combustión debe asegurar el quemado completo por medio del contacto íntimo entre las partículas de combustibles y el oxígeno del aire durante el tiempo que preferiblemente el combustible se encuentre en suspensión o en caída. El aire teórico necesario para la combustión no asegura la conversión de todo el carbón a CO_2 , por lo que es necesario proporcionar un exceso de aire que

asegure una reacción completa .

La temperatura del agua de alimentación es otro factor de importancia para el mejor aprovechamiento energético. En condiciones óptimas de operación el ingenio azucarero debe recuperar el 100% del condensado y utilizarlo en la generación de vapor con cantidades pequeñas de agua de repuesto. Las pérdidas entálpicas del condensado se deben a fugas de vapor, purgas y usos que no tienen que ver en el proceso de fabricación; por tanto, es necesario revisar el sistema de recuperación del condensado y evitar el uso de agua fresca con costos adicionales en químicos y calentamiento.

Las costras de inquemados que se forman en las paredes de los hornos disminuye el volumen de las cámaras de combustión. Además éstos inquemados forman cenizas de alto punto de fusión en quemadores y fluxería dificultando la transferencia de calor al agua.

5.1.3 Por equipos e instrumentos de combustión.

La baja eficiencia de las calderas causadas por fallas en la combustión y pérdidas de calor, afectan la calidad y cantidad de vapor. Uno de los aspectos que más incide en la reducida eficiencia de generación es la adaptación de unidades que quemaban sólo bagazo o sólo combustóleo a plantas que utilizan dos-o-más-combustibles simultáneamente.

Por un lado el combustóleo es quemado ineficientemente por baja temperatura, presiones de alimentación muy heterogéneas para una misma caldera y deficiente estado de atomizadores a los cuales se les inyecta vapor para este fin. En el quemado de bagazo, fuera de las condiciones inapropiadas de este combustible, no existen los sistemas favorables para la combustión desde el punto de vista de manejo, alimentación y dosificación de bagazo, aire y gases de escape.

Esta situación se complementa por la falta de instrumentos de control que permita evaluar constantemente la operación integral de los generadores de vapor.

7. Potencial de ahorro energético

El potencial de ahorro se puede plantear a nivel de la oferta y demanda de energía en la industria azucarera. Es de anotar que la puesta en marcha de un programa de uso racional de energía con inversiones considerables dentro del marco de un proceso riguroso de planeación y control puede en el corto plazo abatir los altos índices de consumo específico de energía en la fabricación de azúcar.

7.1 En la oferta de energía.

De los combustibles empleados para la generación de vapor, se utiliza 86.5% del bagazo total producido en el país, participando éste con el 65.38% de la oferta global de energía. En 1985 se consumieron 964.2 millones de litros de combustóleo y

10.29 millones de toneladas de bagazo húmedo (51.7% de humedad). Para la generación de vapor en ese año había instalados 543 859 H.P. de los cuales el 91.5% utilizaban simultáneamente bagazo más combustóleo, el 6.38% solo combustóleo y el 2.12% sólo bagazo. Estas plantas produjeron vapor con una eficiencia media ponderada del 56.38% a presiones medias de 16 kg/cm² obteniendo rendimientos promedio de 24 kg de vapor por cada HP-hora con capacidad de generar 1.76 y 9.97 kgs de vapor por kg de bagazo y litro de combustóleo respectivamente.

Eliminando o reduciendo aquellas causas que conducen a la baja eficiencia de generación del combustóleo se podría producir como lo demuestran algunos ingenios 13.1 kg de vapor por litro de combustóleo, lo que implica aumentar la eficiencia del 61% al 79%. De esta forma se ahorrarán 3.13 Kg de vapor por litro, lo que al consumo específico de combustóleo en 1985, implica la reducción de 6.35 litros de combustóleo por TMC. Por tanto a nivel global existe un potencial de ahorro de 214 millones de litros de petróleo o sea el 20.9% del total del hidrocarburo destinado a la fabricación de azúcar.

En cuanto al bagazo, implementando medidas que conduzcan al mejoramiento de la calidad energética de la fibra, adecuada dosificación y alimentación, buena suspensión y control de aire, el potencial de ahorro sería considerable. Se plantea que si a ~~condiciones medias de operación se pudiera obtener un bagazo con~~ el 49% de humedad y 3% de sacarosa, su poder calorífico bajo

aumentaría de 1744 kcal/kg a 1868 kcal/kg pasando de esta forma a producir 1.982 kg de vapor por kg de bagazo con un incremento de 0.222 kg de vapor, lo que a término de los 305 Kgs de Bagazo consumidos por TMC en 1985, se producirían 67.7 kg adicionales de vapor por cada TMC conduciendo en forma global y reducir el consumo de bagazo en 2280 millones de kg de vapor al año que corresponde a un ahorro de 162.8 millones de litros de combustóleo representando el 15.9% del combustóleo requerido en la fabricación de azúcar. De esta forma, sin grandes inversiones solo implementando mejoras en el régimen operacional y mantenimiento adecuado, se podrá ahorrar en conjunto el 36.8% del combustóleo destinado a la industria azucarera, con un beneficio en pesos corrientes de 8870 millones .

7.2 En la demanda de energía.

El consumo de energía térmica para el período analizado muestra en términos del consumo específico por kg. de azúcar, un crecimiento del 12.61% medio anual con un valor mínimo de 6782 kcal/kg en 1963 y un máximo de 10592 para 1981, mientras que a partir de 1983 como consecuencia de medidas de ahorro y uso eficiente de energía el ritmo de crecimiento es negativo del orden del 5% anual. De seguir así, se espera que el consumo de energía baje a 8518 kcal/kg en 1986 y 8100 en 1987.

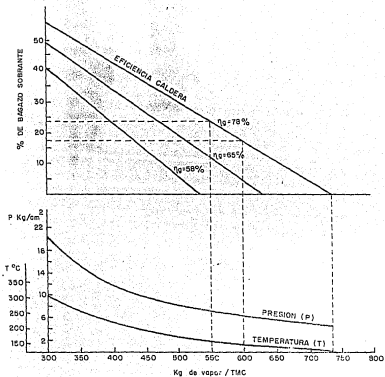
Bajo esta perspectiva se pueden ahorrar por año, unos 2458 kcal/kg que para una producción de azúcar de $3.3 \cdot 10^9$ kg de en 1985 representarían $8.11 \cdot 10^{11}$ Kcal, que con la estructura de participación (66% bagazo y 34% combustóleo), se estarían ahorrando $274 \cdot 10^8$ litros de petróleo y sobrarían $3.0 \cdot 10^6$ ton de bagazo.

7.3 Bagazo sobrante

Por las consideraciones anteriores se puede decir que el bagazo en México y la energía en general, esta siendo subutilizada, a tal punto que en algunos ingenios se quema a cielo abierto, o se entrega gratuitamente a cultivadores o negociantes de la fibra, por la baja capacidad de absorberlo como energético o por los bajos precios que tiene en el mercado de la pulpa o derivados.

Como efecto de la puesta en marcha de tecnologías y políticas que estimulan su mejor aprovechamiento energético se pueden obtener importantes sobrantes de bagazo, máxime que su transporte, almacenamiento y combustión en fardos, pellets o briquetas se ha probado técnica y económicamente en otros países como Cuba, Brasil y E.U.

La gráfica 7, muestra el bagazo sobrante que se puede obtener como una función del consumo de vapor en los ingenios para diferentes eficiencias de calderas.



GRAFICA No. 7

SOBRANTES DE BAGAZO PRODUCIDOS BAJO DIFERENTES CONSUMOS DE VAPOR (Kg v/TMC) Y DIFERENTES EFICIENCIAS DE CALDERAS. LINEAS PUNTEADAS SON PROPIAS. FUENTE: OLADE (1983).

Se puede apreciar, que para un consumo de 540 Kg de vapor por TMC no se produce ningún excedente cuando la caldera genera con una eficiencia del 58%; se producirá un 13% de bagazo sobrante cuando la eficiencia sube al 65%, y un sobrante del 24% si la eficiencia alcanza el 78%. Con 600 Kg de vapor por TMC no se presenta sobrante con eficiencia del 58%, el 5% cuando llega al 65% y el 18% cuando se tiene el 78% de eficiencia; con más de 735 kg de vapor no se produce ningún excedente, así la eficiencia de la caldera sea del 78%.

Por tanto para México en 1985 y 1986, con consumos medios de 850 kgv/TMC, no se plantea ninguna posibilidad de ahorro de bagazo, máxime si las calderas siguen funcionando en forma global con eficiencias menores al 60%.

En la parte inferior de la gráfica 7, muestra la relación entre la temperatura y presión de generación a diferentes demandas de vapor por TMC. En esta parte se observa que para un consumo de vapor de 530 kg/TMC, común en fábricas cubanas y brasileñas tradicionales, la presión de vapor es de 8.5 kg/cm² y temperaturas cercanas a la saturación.

7.4 Cogeneración.

Dentro del esquema energético eficiente a que hace referencia el análisis anterior, ante la posibilidad de obtener bagazo sobrante, ~~existe la alternativa de co-generación pura, es decir, generación eléctrica a valores máximos mediante el~~

aprovechamiento del vapor de proceso para producir vapor adicional sin quemar más bagazo al establecido.

La cogeneración luego, es una forma eficiente de producir energía eléctrica utilizando turbogeneradores de extracción-condensación que admitan vapor de altas presiones y temperaturas (50 kg/cm², 600°C), entregando importantes cantidades de bagazo sobrante como materia prima a otras industrias, habiendo suministrado previamente la energía necesaria que demanda un ingenio.

VIII. ANALISIS Y EVALUACION DEL APROVECHAMIENTO DEL BAGAZO EN EL INGENIO DE CASASANO

1.-Antecedentes

El ingenio Casasano es uno de las más antiguos del país; su creación data de 1945, siendo adquirido por Azúcar S.A. a mediados de 1980.

Está situado en el Municipio que lleva su nombre, en el estado de Morelos a una altura de 700 m.s.n.m. con temperatura ambiente promedio de 28°C y humedad relativa del 78% durante el período de zafra. Actualmente el ingenio tiene una capacidad *teórica de molienda de 2500 TMC* al día para un rendimiento teórico de 250 TMA, además de aprovechar mieles incristalizables con una capacidad instalada de producción de 6500 litros de alcohol en 24 horas.

En cuanto a consumo de combustóleo, este ingenio se caracteriza por ser en 1985 el segundo mayor consumidor de combustóleos por tonelada métrica en el país.

2. Potencia instalada.

Actualmente, el ingenio está dotado de cinco calderas con las siguientes especificaciones en cuanto a su potencia y capacidad de generación.

Cuadro No.26

Potencia y Generación de Vapor de las Calderas del Ingenio de Casasano.

Caldera No.	Vapor Gener. t/hora	Potencia instalada H.P.	Presión del vapor vivo kg/cm ²	Temp. de vapor °C
1	17.5	706	9.4	177
2	12.4	538	9.4	177
3	15.0	776	9.4	177
4	12.31	536	9.4	177
5	17.91	760	12.35	177
total 5	75.12	3316		

De las 5 calderas, 4 queman bagazo y combustóleo a partir de 1985, mientras que la quinta quema sólo combustóleo, con la perspectiva de ser también quemadora de bagazo. Se debe anotar que en 1959 la potencia instalada de generación era de 2300 H.P.

comprendidos en cuatro calderas que quemaban petróleo produciendo vapor saturado a 8.5 kg/cm² y 140°C. A finales de 1969 se disponía de seis calderas con un total de 3533 H.P. instalados. Para 1975 por reposición sale del servicio una caldera de 217 H.P. con una capacidad de generación de 5.4 t/Hora.

Entre 1959 a 1969, la potencia instalada pasó de 2300 H.P. a 3533 H.P. con un crecimiento del 53.6%. De 1969 a 1979 la potencia se mantiene constante, reduciéndose en el 6% a partir de este último año. Esta disposición de generación prevalece actualmente en términos de 20.80 kg/Hora de vapor por cada H.P. instalado.

3. Operación y consumo de combustible.

La producción y consumo de energía, relacionada con la capacidad de molienda y producción de azúcar se puede analizar en el siguiente cuadro:

Cuadro No.27

Cuadro operativo del Ingenio Casasano

Año	Días Zafra	Caña Molida 10E+3t	Tiempo Perdido %	Rendimiento de Fabrica. %	Litros de Petróleo por TMC
1959	154	187	24.6	9.3	44
1960	147	209	18.25	9.2	46

1961	138	200	16.34	9.3	49
1962	132	200	17.3	9.0	55.7
1963	136	194	23.1	9.8	58.1
1964	146	224	24.4	9.8	61.7
1965	137	215	27.83	9.3	72
1966	143	246	21.7	9.2	68.5
1967	137	242	23.1	9.1	66.2
1968	125	228	18.3	8.8	62.3
1969	144	278	18.0	8.8	64.5
1970	122	221	19.2	8.9	65.0
1971	130	247	20.4	8.9	64.8
1972	146	291	17.7	8.5	65.0
1973	156	307	20.5	8.6	62.7
1974	163	316	26.6	8.4	62.2
1975	139	285	22.3	8.3	58
1976	124	240	24.4	8.1	69
1977	133	241	31.6	8.5	61.4
1978	146	291	26.8	8.3	62.6
1979	159	265	37.0	8.2	63.8
1980	151	248	32.6	8.3	61.0
1981	162	264	27.0	8.1	62.6
1982	143	240	26.2	7.9	65.1
1983	151	269	19.8	8.6	68.1
1984	166	295	20.4	8.6	68.6
1985	182	306	24.5	8.3	68.7
1986	195	304	31.7	7.8	64.5

Fuente: Elaboración Propia de Informes Finales
de Corrida del Ingenio Casasano.

Los registros indican que la capacidad teórica de molienda se mantuvo en 1500 ton/día hasta 1962. En esta fecha se adquieren dos calderas con 1687 H.P. lo que conduce a pasar de un consumo medio de 49 l/TMC a 61.7 l/TMC y subir la capacidad teórica de molienda a 2000 TMC/día. El consumo de combustóleo no presenta grandes variaciones a pesar de que la potencia instalada se redujo en 215 H.P. en 1975.

Se destaca que en los registros no existe ninguna compensación o justificación del aumento de la capacidad de molienda con respecto a la potencia instalada. Como elemento complementario que incide sobre el consumo energético y la cantidad de bagazo, se tiene que hasta 1966 el rendimiento de fábrica se mantenía con un valor medio de 9.36%, mientras que de esta fecha en adelante el promedio de fábrica alcanza 8.42%. El porcentaje de fibra de caña se mantiene en un valor relativamente bajo respecto al promedio nacional con 12.9% para el período de 27 años años analizados.

El consumo de combustóleo, después de 1965 mantiene un valor constante, lo que se puede tomar en cuenta como elemento para analizar el comportamiento energético en cuanto a la capacidad instalada y en los planes de futuras expansiones. las

variaciones presentadas en los rendimientos de fábrica, caña molida y días de zafra, no han incidido en el consumo de combustóleo en los últimos 20 años (ver gráfica 8).

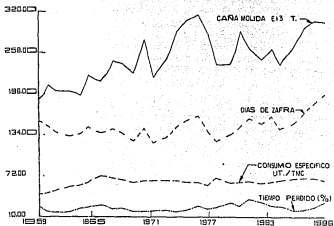
De la información anterior, se pueden presentar algunos indicadores operacionales que pueden afectar el consumo de energía en el ingenio Casasano.

Cuadro No. 28

Parámetros que indican la Operación del Ingenio.

Año	Caña Molida t/hora	Eficiencia de Molienda	H.P. Reales instalados	Potencia Aprov. HP-hora/ TMC
	(1)	(2)	(3)	(4)
1959	68.14	0.81	1495	21.94
1960	72.13	0.94	1495	20.55
1961	72.3	0.96	1495	20.66
1962	77.0	1.00	2760	35.82
1963	77.8	0.71	2760	35.45
1964	84.9	0.76	2760	32.50
1965	91.2	0.78	2760	30.26
1966	91.5	0.69	2760	30.16
1967	96	0.70	2760	28.8
1968	93.2	0.73	2760	29.6

Factores de operacion Casasano



años

GRAFICA No.8

1 969	98.7	0.72	2760	28.0
1 970	94.3	0.76	2760	29.3
1 971	100	0.80	2760	27.6
1 972	102	0.79	2760	27.0
1 973	107	0.77	2760	25.8
1 974	110	0.82	2760	25.1
1 975	110	0.77	2760	25.1
1 976	108	0.73	2600	24.1
1 977	112	0.79	2600	23.1
1 978	113	0.66	2600	23.0
1 979	111	0.65	2600	23.4
1 980	102	0.65	2600	24.5
1 981	93	0.67	2600	27.9
1 982	95	0.71	2600	27.3
1 983	93	0.71	2600	27.9
1 984	93	0.67	2600	27.90
1 985	97	0.64	2600	27.13

Fuente: Elaboración propia de

(1) : (Café molido / (horas de zafra) / (% de tiempo aprovechado)

(2) : Molienda real / molienda teórica asignada al ingenio

(3) : (Potencia instalada) (eficiencia)

(4) : (3) / (1)

De los cuadros anterior se nota que a pesar de que la caña molida por zafra aumentó a partir de 1982, la capacidad de molienda por hora, ha permanecido constante con tendencia a la baja. Esta situación se deriva de que el aumento en la cantidad de caña molida es causado por el incremento de los días de zafra con los consecuentes aumentos de los tiempos perdidos.

En cuanto a la potencia aprovechada, el ingenio presenta valores moderados comparados con los datos de las referencias, justificados por un alto valor de la capacidad de carga de los generadores de vapor a un costo alto en cuanto al consumo de energía. Se establece la perspectiva de que una eficiencia baja en la generación sea compensada por un alto índice en el consumo específico de combustóleo.

4. Estructura Energética del Ingenio.

4.1 Producción y consumo de bagazo.

Los informes de corrida, sólo presentan la producción del bagazo a partir de 1972, cuando se registra el bagazo por el porcentaje de fibra en caña y el destino que a ésta se le da.

Por revisión de informes de corrida, se tiene que antes de 1984 se quemó solo combustóleo para la generación de vapor, siendo el bagazo empacado y vendido en forma de trueque a los papeleros. En 1985 se quemó parcialmente el bagazo hacia mediados de la zafra y en 1986 entró a máxima capacidad el sistema de conducción, alimentación y quemado del bagazo con la

intención de substituir total o parcialmente el petróleo.

El cuadro 29, muestra la producción y destino final del bagazo en el ingenio Casasano.

Cuadro No.29

Producción y Uso Final del Bagazo en el Ingenio Casasano.

Año	Bagazo % Caña	Bagazo Producido 10E+3t	Bagazo Espacado 10E+3t	Bagazo quemado en Caldera 10E+3t	Bagazo quemado kgb/TMC
1972	28.5	82.9	82.9	--	
1973	29.05	89.2	89.2	--	
1974	29.75	93.8	93.8	--	
1975	29.30	83.5	83.5	--	
1976	29.6	71.0	71.0	--	
1977	30.7	74.0	74.0	--	
1978	29.4	85.5	85.5	--	
1979	30.0	79.5	79.5	--	
1980	32.5	80.6	80.6	--	
1981	31.2	82.4	82.4	--	
1982	29.6	71.0	71.0	--	
1983	30.0	80.7	80.7	--	
1984	29.8	87.9	87.9	--	
1985	29.3	89.6	57.0	32.6	106
1986	30.4	93.0	46.30	46.7	153

Fuente: Informes finales de corrida.

El cálculo de bagazo producido se hace sobre la base del porcentaje de fibra en la caña, en el bagazo y del registro del peso cargado en los camiones transportadores.

Estos informes de corrida indican que en 1985 se quemó el 36.4% del bagazo total producido, en hornos para este fin que funcionaron a manera de prueba; mientras que en 1986, cuando el sistema entró en completa operación se quemó el 50.2%, cuando supuestamente se debiera haber quemado el 100% del bagazo producido.

Antes de 1985 el bagazo era cambiado a razón de 190 litros de combustóleo por cada tonelada en trueque con los papeleros.

4.2 Consumo de combustóleo

El combustóleo consumido que se registra en el cuadro No.27, es del tipo pesado No.2 con poder calorífico de 10063 kcal/l y ha sido el combustible que compone la mayor estructura energética dentro de la oferta de energía para el ingenio.

4.3 Generación y consumo de vapor.

El bagazo, combustible alterno en la generación de vapor, sale del último cuerpo de molinos con las siguientes características: humedad (W=50.5%), cenizas (A=3.5%) y azúcar (B=4.19), promedios presentados para los 3 últimos años.

Mediante el modelo de Pritzelwitz, ecuación 4, tenemos que el P.C.B. será de 1813.4 kcal/kg, y de 2245 kcal/kg para el P.C.A.; de esta forma una tonelada métrica de bagazo (1TMB) a condiciones del ingenio será equivalente a 180 litros de petróleo, resultando un poco superior al promedio nacional de 177 litros por TMB, fruto al menor contenido de humedad. De la relación anterior se puede decir que 5,55 kg de bagazo son equivalentes a 1 litro de combustóleo.

Si consideramos que la entalpía necesaria para producir un kilogramo de vapor ($h_g - h_f = 663 - 69.9 = 593.1$ kcal/kg), a condiciones del vapor saturado seco producido ($P=9.4$ kg/cm²; $T=177^\circ\text{C}$), sea de 593.1 kcal/kgv; de 1 litro de combustóleo se generará 16.97 kilogramos de vapor (kgv), mientras que si una TMB equivale a 180 litros de combustóleo, de un kg de bagazo se podrá generar 3.05 kg de vapor suponiendo que para ambos casos la eficiencia de la planta de vapor sea del 100%.

En el ingenio se trabaja, para aspectos de cálculo de consumo, con una producción de 13.1 kg de vapor por litro de combustóleo, mientras que para el bagazo no se contabiliza su contribución en la generación de vapor. Suponiendo que para este fin la caldera trabaja con una eficiencia del 55% generando 1.68 kgv/kgb.

Con estos índices de generación de vapor tanto a partir de combustóleo como bagazo, se puede conformar el cuadro No.30, que registra el consumo de vapor y energía por tonelada métrica de caña (TMC) y tonelada métrica de azúcar, estableciendo así la estructura energética en cuanto al balance global de energía para el ingenio.

Cuadro No.30

Consumo Especifico y Estructura Energética
en la generación de vapor para el
Ingenio de Casasano

Año	Consumo de Vapor kg/TMC	Consumo de Energía kcal/kgA	Estructura Energética del Bagazo en generac. de vapor	Estruc. Energét. del Combust. en gener. de vapor
			%	%
	(1)	(2)	(3)	(4)
1972	848	7696	0	100
1973	815	7336	0	100
1974	809	7456	0	100
1975	754	7033	0	100
1976	898	8574	0	100
1977	798	7270	0	100
1978	814	7591	0	100
1979	829	7831	0	100

1980	793	7397	0	100
1981	814	7779	0	100
1982	846	8290	0	100
1983	885	7966	0	100
1984	892	8013	0	100
1985	(900 + 178)*	10644	16.5	83.5
1986	(845 + 257)*	11894	23.3	76.7

Fuente: Elaboración propia de:

(1): $(1/TMC) (13.1 \text{ kgv/l}) + (\text{kgb}/TMC) (1.68 \text{ kgv/kgb})$

(2): $[(1/TMC) (16.97 \text{ kgv}) / (1000. \text{ Rend de Fca})] 593.1 \text{ kcal/kgv}$

* : Se tiene en cuenta el vapor generado por bagazo.

El consumo de vapor en los años que se quemó sólo combustóleo fué en promedio de 830 kgv/TMC pasando a 1090 kg/TMC para las dos últimas años en se quemó bagazo y combustóleo, incrementándose en el 31.3% para éste último período.

La variación del consumo de energía por kg de azúcar fué mucho más fuerte pasando de 7772 a 11531 kcal con un incremento del 50% respecto a los promedios entre uno y otro período, a pesar de que el bagazo en la generación de participó con el 16.5% y 23.5% en 1985 y 1986 respectivamente frente, a los años anteriores con ninguna participación.

Desde el punto de vista de la potencia instalada o capacidad de generación entre 1976 y 1986, el ingenio disponía de 3316 H.P. los que con un rendimiento de 23.5 kgv/H.P.-hora generan 77926 kgs de vapor por hora. Si estas plantas producen vapor saturado seco con una eficiencia media del 76%, (según ingenio) se estarían generando en forma global para todo el ingenio 59223 kgs de vapor por hora, los que comparados con la molienda real de caña por hora darán los índices de consumo de vapor, mediante la potencia instalada (ver cuadro 31)

Cuadro No. 31

Consumo Específico de Vapor Utilizando
la Potencia Instalada.

Año	Caña Molida TMC/hora	Vapor Generado kg/hora	Cons.de Vapor kg/TMC
1976	80.64	59223	734.4
1977	76.65	59223	772.6
1978	83.04	59223	713.2
1979	69.44	59223	853.3
1980	68.43	59223	865.8
1981	67.90	59223	872.2
1982	69.90	59223	847.2
1983	74.20	59223	798.1
1984	74.04	59223	799.8

1985	70.05	59223	845.5
1986	66.70	59223	888

Fuente: Elaboración propia.

(1): Caña molida/ horas totales de zafra.

De esta forma se confirma que el consumo calculado por los dos métodos propuestos, para el caso particular del ingenio, son válidas obteniéndose un valor medio de 870 kgv/TMC por el método del consumo de combustóleo y de 817 kg/TMC para la estimación a través de la potencia realmente instalada.

Se plantea un potencial de ahorro energético para el ingenio si se tiene en cuenta que fábricas similares en otros países, tienen consumo de vapor del orden de 670 kg por TMC. Estos índices altos de consumo de vapor se explican por los bajos rendimientos de molienda acentuados en la medida que aumenta los días de zafra.

4.4. Variaciones del consumo de energía durante las tres últimas zafras

Como parámetros que amplíen el comportamiento del consumo energético del ingenio, se relacionan para las tres últimas zafras los efectos en el consumo de energía la transición de en el uso de sólo combustóleo a una mezcla de combustibles como el bagazo y petróleo. Se debe tener en cuenta que en la Zafra 84/85 se quemó solo combustóleo, en 85/86 se quemó parcialmente el bagazo producido, mientras que durante toda la última zafra

se quemó combustóleo y bagazo.

En el cuadro 32, se muestra el consumo de combustóleo puro (A) y el consumo de bagazo (B) en forma de combustóleo equivalente, para los 3 últimas zafras.

Cuadro No.32

Consumo Global de Combustóleo en las 3 Últimas Zafras.

Semana	Zafra	Zafra	Zafra Particip.	Zafra	Zafra	Particip.	
No.	84/85	85/86	85/86 de B %	86/87	86/87	de bag%	
	1/TMC	1/TMC	1/TMC	1/TMC	1/TMC		
	(A)*	(A)	(B)	(A)	(B)		
1	59.3	75	-	41	21	34	
2	67.0	75	-	75	22	22	
3	57.0	80	-	71	22	23	
4	57.5	69	-	50	34	40	
5	66.0	45	-	55	28	34	
6	60.3	41	-	53	28	35	
7	73.0	47	19	29	55	29	35
8	72.0	24	19	44	56	29	34
9	65.2	30	20	40	62	28	31
10	69.0	48	19	28	54	26	32
11	58.6	48	21	30	46	27	37
12	70.8	44	17	28	57	24	30
13	75.0	50	5	9	61	27	30
14	55.6	56	20	26	52	25	30

15	69.0	57	20	26	52	27	34
16	79.6	80	20	25	55	24	30
17	71.7	90	23	20	48	27	36
18	74.0	79	22	22	60	28	32
19	78.0	82	20	20	55	25	31
20	76.7	81	21	20	54	25	31
21	80.6	63	18	22	62	25	29
22	82.3	60	21	26	63	27	30
23	83.6	70	11	14	57	25	30
24	-	67	24	26	67	27	29
25	-	70	20	22	64	28	30
26	-	119	15	11	70	27	28
27	-	72	18	18	73	25	26

Fuente: Elaboración propia de

Informes finales de corrida, años correspondientes
de los registros propios del ingenio.

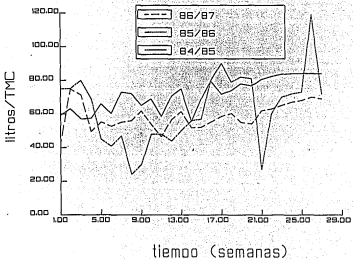
* Se quemó sólo combustóleo.

En el cuadro anterior se nota que en la zafra 85/86 el bagazo participó a partir de la séptima semana con un 24% del consumo global de energía en términos de combustóleo puro más equivalente, mientras que para toda la zafra 86/87 su participación real durante el periodo de molienda alcanza el 30.2% cuando las inversiones y diseño del sistema de aprovechamiento energético del bagazo estaban proyectadas para quemar el 100% de la fibra producida y aportar más del 60% de la

energía demandada. Para el año 1984 el consumo de combustóleo puro fué de 68.6 l/TMC y subió al equivalente de 90 l/TMC en 1985 y a 98 l/TMC en 1986, mostrando un aumento 31% y 8.8% respectivamente para las dos últimas zafras gracias al incremento de 18 y 25 litros equivalente de petróleo en forma de bagazo.

En la gráfica No.9 se muestra la variación del consumo de combustóleo puro durante cada una de las tres últimas zafras a los cuales se ha hecho referencia. Para 1984 el consumo muestra altibajos, con una tendencia al aumento a partir de la decimocuarta semana de zafra como fruto de los incrementos de presión y flujo de combustóleo para garantizar el cumplimiento o superación de una cuota de azúcar. El comportamiento es similar para la zafra 86/87 con un índice menor en función del bagazo aprovechado, exceptuando el comienzo de la molienda en sus dos primeras semanas. En la zafra 85/86 se muestra un comportamiento similar al presentado en ingenios del exterior con altos consumos al comienzo y final y con valores más bajos en cuanto al consumo de combustóleo puro a los presentados para los días de zafra anteriores, demostrando la capacidad para operar a menos de 30 l/TMC de consumo específico. Se destacan dos mínimas entre las 7 y 11 semana y entre la 20 a 22 semana por debajo de las curvas de las zafras anteriores, apareciendo también 3 máximos al comienzo, final y entre la 12 y 19 semanas lo que no permite proyectar un modelo gráfico real en cuanto al consumo de combustóleo.

COMBUSTOLEO CONSUMIDO POR ZAFRA



GRAFICA No. 9

4.5 Factores que influyen en el consumo de energía.

Como el ritmo del consumo de combustóleo arrastra al bagazo en cuanto participación energética, se pueden asimilar las variaciones del consumo específico de combustóleo a las presentadas en el consumo global de energía. De esta forma y con base en los aspectos operativos que se señalan en el comportamiento de las tres zafra, anotadas en el apéndice 2, y mediante la ayuda de la computadora, se relacionan los factores de operación que pueden influir dentro del consumo de combustóleo, como son: % de imbibición, caña molida (que encubre la eficiencia de molienda) y % tiempo perdido. Otros factores no se consideran por permanecer prácticamente constantes durante la zafra como eficiencia de fábrica, % de extracción de jugo, % de fibra y % de azúcar en caña. Los resultados de la aplicación de un programa maestro, para encontrar la correlación entre aquellos factores y el consumo de combustóleo se destacan así:

Cuadro No.33

Resultados de Significancia Estadística de Factores que
Influyen en el Consumo de Energía

Consumo de Combustibles Vs. % Inhibic.

Zafra

	84/85	85/86	86/87
Modelo de Regres. $y=0.28x + 0.39$		$14.4x+0.07$	$.1x+10.39$
Desviación estándar	4.5	3.9	3.93
Error estándar	18.51	0.24	0.30
Determinante	0.16	0.39	0.39

Consumo de Combustibles Vs. Caña sólida

Zafra

	84/85	85/86	86/87
Modelo de Regres. $y=-0.13x+24.25$		$-0.12x+17.8$	$-0.092x+16.2$
Desviación estand.	13.23	2.94	1.82
Error estand.	0.28	0.27	0.17
Determinante	0.16	0.29	0.18

Consumo de Combustible Vs. % Tiempo Perd.

	Zafra		
	84/85	85/86	86/87
Modelo de Regres. $y=0.23x+5.58$		$0.19x+15.86$	$0.42x+8$
Desviación estand.	4.9	13.43	6.3
Error estand.	0.24	0.38	3.8
Determinante	0.16	0.11	0.15

Fuente:Elaboración propia

5. Evaluación de los generadores de vapor.

Los generadores de vapor constituyen la fuerza motriz en la oferta de vapor para molinos, fábrica y turbogeneradores. Teniendo en cuenta que actualmente la generación de vapor se hace utilizando el 47% del bagazo producido, con una estructura energética del 34% cuando se había diseñado el sistema para quemar todo el bagazo, se hace necesario implementar la evaluación del comportamiento de las calderas en busca de alternativas para el mejor aprovechamiento energético del bagazo.

5.1 Características de los generadores de vapor.

5.1.1 Generador No.1.

Marca	: Combustion Engineering, de tubos curvos y muros de agua.
Capacidad Máxima	: 27216 kg de vapor satur. seco por hora.
Capacidad Real	: 17500 kg de vapor por hora.
Superficie de calefacción	: 706 metros cuadrados
Presión máxima de vapor	: 17 kg/cm ²
Temp. media del vapor	: 180°C
Presión de oper.	: 9.5 kg/cm ²
Presión del agua de aliment.	: 12 kg/cm ²
Temper. del agua de aliment.	: 85°C

Dispone de cuatro quemadores de petróleo y 3 hornos tipo Ward para quemar bagazo con 2.67m cuadrados por horno de 1.7m de altura, para un volúmen de 13.7m³ para los 3 hornos. La potencia real instalada es de 759 H.P., teniendo en cuenta que cada 10 pies cuadrados de superficie de calefacción equivalen a 1 H.P.

5.1.2. Generador No.2.

Marca Babcock and Wilcox, de tubos rectos

Capac. real de gener. : 12400 kg de vapor sat.
por hora.

Presión máxima de generación : 12.3 kg/cm²
Presión de operación : 9.2 kg/cm²
Superficie de calefacción : 500 m²
Temperatura de vapor saturado : 80°C
Potencia de generación : 538 H.P.

Dispone de 3 quemadores para combustóleo y dos hornos cilíndricos para quemar bagazo, con una superficie de 3m² por horno.

5.1.3 Generador No.3

Marca Babcock and Wilcox de tubos rectos.

Capacidad real de generación : 15 ton. de vapor seco
por hora.
Presión máxima : 9.6 kg/cm²
Presión de trabajo : 8.9 kg/cm²
Temperatura de generación : 175°C
Superficie de calefacción : 722m²
Potencia de generación : 776 H.P.

Dispone de 3 quemadores de combustión y 3 hornos para bagazo-tipo herradura de 1.8m² cada uno.

Esta caldera funciona con tiro natural y no tiene sistemas de recuperación del calor de gases de escape.

La presión y temperatura del agua de alimentación es de 12 kg/cm² y 85°C respectivamente.

5.1.4. Generador No.4.

Marca: Combustión Engineer. de tubos curvos y muros de agua.

Capacidad máxima de generación : 13.6 t/hora de vapor saturado.

Capacidad real de generación : 12.3 t/hora

Superficie de calefacción : 498 m²

Potencia : 536 H.P.

Presión máxima de generación : 17.6 kg/cm²

Presión de operación manual : 9.5 kg/cm²

Dispone de 3 quemadores para combustóleo y dos hornos tipo Ward de 2.90m cuadrados cada uno, con 1.8m de altura para un volumen total de 10.44m³.

La presión y temperatura del agua de alimentación es de 11.5 Kg/cm² y 81°C.

Dispone de precalentador de aire para recuperar calor de desperdicio por la chimenea.

5.1.5. Generador No.5.

Marca Babcock and Wilcox de tubos rectos y pared de agua.	
Capacidad máxima de generación	: 31750 kg/hora
Capacidad real de operación	: 17,900 kg/hora
Presión máxima de operación	: 17.9 kg/cm ²
Presión real de operación	: 12.9 kg/cm ²
Superficie de calefacción	: 707.1 m ²
Potencia de generación	: 760 H.P.

La presión y temperatura del agua es de 11.5 kg/cm² y 72°C, dispone de cuatro quemadores para combustóleo y no tiene hornos para la combustión del bagazo.

5.2. Balance de masa y energía por generador.

Para establecer el balance de masa, se aforó cada uno de los quemadores de acuerdo con las diferentes presiones de alimentación; en cuanto al bagazo se abrieron compuertas en los ductos de alimentación recogiendo el bagazo descargado a diferentes aperturas de las compuertas bagaceras (ver apéndice No.3). En el caso del aire de combustión que entra y el flujo de gases de escape, se determinaron haciendo perforaciones después de los ventiladores en uno y otro caso y midiendo la presión de velocidad de gases (Pv), con la ayuda de un tubo de Pitot. Las condiciones de flujo de bagazo, de combustóleo, de aire, composición y flujo de gases de escape, se puede consultar en los apéndices 3,4,5 respectivamente.

5.2.1 Estimación del suministro de combustóleo.

Los datos finales de suministro de combustóleo por caldera a las presiones máximas de operación y paro del sistema, se condensan del apéndice 3 en el siguiente cuadro:

Cuadro No.34

Descarga de Combustóleo (1/hora) a las Diferentes
Presiones de Alimentación en kg/cm²

		CALDERA No.				
Presiones	1	2	3	4	5	
de gener.						
4.7	975.36					
4.0	907					

6.0		780.6				
4.5		577				

6			982.0			
4			773.0			

5				723		
4				585		

6					1163	

Fuente: Elaboración propia de Anexo 3.

De esta forma para el ingenio se inyectan 4625 y 3647 litros de combustóleo por hora para los periodos de plena marcha y tiempos de paro respectivamente.

Se debe notar que este combustóleo esta siendo alimentado a una temperatura entre 70 y 90°C, no alcanzando la viscosidad necesaria para una adecuada atomización durante la combustión.

5.2.2 Estimación del suministro de bagazo.

El bagazo húmedo que sale del último molino es conducido por medio de un transportador de canjilones a cada una de las compuertas bagaceras. La banda de transporte tiene un ancho de 1.0 m y cada canjilón alcanza 50 a 60 cms de ancho para una superficie de transporte de 0.5 metros cuadrados, moviéndose a una velocidad de 10 m/min.

Cada caldera dispone de un número de compuertas horizontales sobre su cabeza en razón del número de hornos disponibles para el quemado de bagazo. El grado de apertura de los compuertas es controlado desde el piso por los respectivos fogoneros en la medida que avance la combustión, abriéndose en posición normal al sentido de movimiento de la banda transportadora.

Para efectos de la medición de la descarga de bagazo en cada horno se estableció el siguiente criterio:

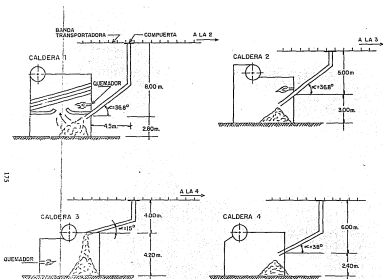
Compuerta completamente abierta :	4/4
Compuerta abierta los 3/4 partes:	3/4
Compuerta abierta a la mitad :	1/2
Compuerta abierta a 1/4 :	1/4

Controlando la apertura por el cordón o cadena desde el piso, la cantidad de bagazo interceptada era recogida en sacos para su posterior pesaje.

Es importante resaltar que al abrir la compuerta, se admite aire frío adicional al horno, aumentando de esta forma el exceso de aire y produciendo un enfriamiento rápido del horno.

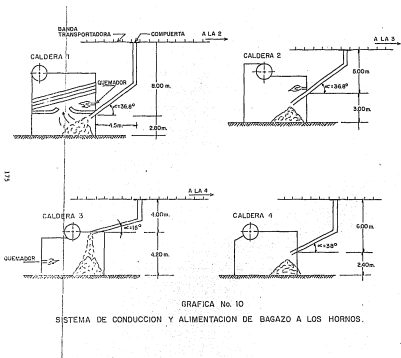
La distribución y forma de caída del bagazo a cada horno, se puede apreciar en la gráfica No.10.

Después de establecida la medición del bagazo alimentado a hornos según los diferentes grados de apertura (ver apéndice 4), se tomó el punto óptimo de alimentación del bagazo húmedo, usando como criterio la coloración de los gases de escape y el "ahogamiento" o sobrecarga en cada horno, según cuadro 35.



GRAFICA No. 10

SISTEMA DE CONDUCCION Y ALIMENTACION DE BAGAZO A LOS HORNOS.



Cuadro No.35

Alimentación Óptima de Bagazo, por Caldera (kg/hora)
y Coeficiente de Quemado
en kg/hora-m²

	Bagazo kg/hora	Área de Horno (m ²)	Coeficiente de Quemado kg/hora-m ²
Caldera 1			
Q1	823.6	2.67	308
Q2	360.0	2.67	124.6
Q3	791.0	2.67	296.2
Subtotal	1974.6	8.01	
Caldera 2			
Q1	1953.3	3.0	651
Q2	1756.0	3.0	585
Subtotal	3709.3	6.0	
Caldera 3			
Q1	700	1.8	389
Q2	990	1.8	550
Q3	937	1.8	520
Subtotal	2627	5.4	
Caldera 4			
Q1	364.8	2.90	126
Q2	628.3	2.90	216

Subtotal 993.1 5.80

T o t a l 9504 25.21

Fuente:Elaboración propia

Q:Horno quemador de bagazo

Se nota la baja capacidad en cuanto al coeficiente de quemado, si se tiene en cuenta que la literatura señala rangos entre 1000 a 1200 kg/hora-m² para ingenios tradicionales como los mexicanos. Se demuestra con estos índices que los problemas de la baja capacidad del horno se deben a la calidad del combustible, a fallas en el suministro y evacuación de gases y a la temperatura del horno. De esta forma para la zafra 86/87 en 195 días de duración (4680 horas), se debieron haber consumido 44500 toneladas de bagazo húmedo, demostrando la capacidad del sistema de conducción, alimentación y área de hornos para absorber energéticamente todo el bagazo producido (93,000 toneladas); las cifra que reportó el ingenio para esta zafra fué de 46700 TMB quemado, registrándose un exceso del 2.14% por bagazo no contabilizado o por omisiones en el sistema de determinación en los registros de corrida.

Finalmente los datos de calibración y descarga de quemadores de combustóleo y alimentadores de bagazo indican que se quemaron 46700 toneladas de bagazo húmedo y 20'203,045 litros de petróleo durante la zafra.

Analizando los parámetros obtenidos con los señalados por el ingenio indican que se quemaron 175 kgb/ TMC, un valor superior al deducido de los informes de corrida de 153 kgb/TMC.

En cuanto al consumo detallado de combustóleo se consumieron 14849 millones de litros en tiempo de plena operación y 5354 millones de litros en tiempo de paro, para un promedio global de 59.34 l/TMC cifra superior a los registros promedio de los informes de corrida de 56.9 l/TMC. Esta diferencia se puede justificar por las cambios de presión y flujo del combustóleo frente a las fuertes variaciones de carga en el ingenio.

5.2.2.1 Pérdidas de tiempo en el suministro de bagazo

Para la zafra 86-87 el tiempo perdido fué del 31.6% de los 195 días totales de la zafra , aumentándose en el 54.5%, con respecto al estimado para 1984 y en 29% con respecto a la zafra inmediatamente anterior. Dentro de las causas del aumento considerable de los días perdidos, los cuadros 36 y 37 hacen una comparación y designación de pérdidas de tiempo entre las zafras 84/85 donde se quemó solo combustóleo y la 86/87, donde entró a operar todo el sistema de aprovechamiento del bagazo.

Cuadro No.36

Causas del tiempo perdido en las zafras de 1984 y 1986.

Razón	A Ñ O	
	1984	1986
Duración de la Zafra (días)	166	195
Caña molida (10E+3t)	295	304
Tiempo perdido (%)	20.4	31.6
Días perdidos	34	62
% de tiempo perdido en:		
Batey	2.20	1.37
Molinos	3.97	2.96
Calderas	1.51	8.31
Elaboración	9.10	13.40
Rep. Gral.	3.90	2.30
Otros	-	3.36

Fuente: Elaboración propia de Informes de corrida del ingenio Casasano.

Se destaca el aumento considerable del porcentaje de tiempo perdido en calderas al pasar de 1.51% (2.5 días), a 8.31% (16.2 días). Esta pérdida de tiempo es causada en gran parte por fallas en el sistema de transporte, alimentación y mantenimiento de los conductores y hornos de bagazo, el que se resume en el siguiente cuadro 37:

Cuadro No.37

Fallas en el sistema de suministro y alimentación
del bagazo (zafra 86/87)

Causas	Tiempo perdido en días
Repar. de duelas de banda transport.	2.90
Exceso de bagazo en tolva de retorno	1.56
Atascamiento de compuerta de retorno	0.73
Rotura de banda transportadora	3.0
Otras reparaciones	1.51
Total	9.7 días

Fuente: Elaboración propia de Informes Oficiales de Corrida
del Ingenio Casasano.

Las anteriores cifras indican que del aumento global de 13.7 días perdidos entre 1984 y 1986, 9.7 días corresponden al sistema propio de aprovechamiento del bagazo, durante los cuales hubo que parar la molienda y mantener las calderas a baja presión utilizando solo combustible, dejando de consumir 2654 toneladas de bagazo.

6. Evaluación de la combustión.

Conociendo la comparación y flujo de materiales combustibles a las calderas, se pueden calcular por los registros obtenidos en cuanto a cantidad y calidad de gases los indicadores que conduzcan a la estimación de la eficiencia térmica de cada generador. El método utilizado se basa en las formulaciones expresadas en la revisión de la literatura (ver numeral V), propia de la combustión, tanto de bagazo como petróleo:

6.1 Generador No.1

6.1.1. Flujo y exceso de aire

$$\text{Flujo de bagazo : } M_b = 1974.6 \text{ kg/hora}$$

$$\text{Flujo de Combustóleo: } M_c = 856.4 \text{ l/hora}$$

$$A_c = 856.4 (12.71(0.85) + 38.1(0.105) + 4.76 (0.035))$$

$$A_c = 12831 \text{ kg/hora de aire seco a condiciones normales}$$

$$A_b = 1974.6 (12.71(0.464) + 38.1 (0.065-0.435/8))$$

$$A_b = 12435 \text{ kg/hora de aire seco a condiciones normales}$$

$$W_{as} = 12831 + 12435 = 25266 \text{ kg}$$

$$Y_{sn} = 1.0 \text{ kg/m}^3 \text{ a } T=35^\circ\text{C y } 0.92 \text{ kg/cm}^3$$

$$V_{as} = 25266 \text{ m}^3$$

$$F = 1.04$$

$$W_{ah} = 26277 \text{ kg/hora de aire húmedo a condiciones reales}$$

$$V_{ah} = 26277 \text{ m}^3/\text{hora de aire húmedo a condiciones reales}$$

Conociendo el peso (W_{ah}) y volúmen (V_{ah}) de aire húmedo necesario para la combustión con $m=1$, podemos calcular el exceso de aire, mediante el cómputo del aire frío que entra a través del ventilador, así:

$$\text{Area (A)} = 0.51\text{m}^2 \text{ (5.5 pies}^2\text{)}$$

$$\text{Densidad del aire (D)} = 1.32 \text{ (} P_B/T \text{)}$$

$$P_B = 27.75 \text{ pulg. de Hg.}$$

$$T = 540.6 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$D = 0.067 \text{ lb/pies}^3 \text{ (1 kg/m}^3\text{)}$$

$$v = 1096.2 \text{ (} P_v/D \text{)} \text{Exp} 0.5^*$$

$$P_v = 1.77 \text{ pulg de agua (Apéndice 5)}$$

Siendo P_v = presión de velocidad en pulg. de agua; así:

$$v = 5634 \text{ pies/min (1717 m/min)}$$

$$Q_A = \text{Caudal de aire: } 1717 \text{ m/min} * 0.51\text{m}^2 =$$

$$875.7\text{m}^3/\text{min.}$$

$$= (30987 \text{ p.c.n.})$$

que se corresponde a una velocidad de 28.6 m/s, valor muy superior a las recomendaciones de Hugot (12 m/s).

$$Q_A = 52542 \text{ m}^3/\text{hora, por tanto}$$

$$W_A = 52542 \text{ kg/hora}$$

Fórmula integrada al tubo de Pitot (Dwyer Instruments, Inc.)

$$m = 52542 \text{ kg/hora} / 26277 \text{ kg/hora} = 2.0$$

Empleandose para la caldera el 100% de exceso de aire para el quemado conjunto en los hornos de combustóleo y bagazo.

De los cálculos anteriores el 50.8% del aire teórico total debe suministrarse para el quemado de combustóleo (13343.5 m³/hora), y si consideramos que la combustión completa del petróleo demanda un 15% de exceso de aire, se estarían utilizando realmente para el combustóleo 15345 m³/hora, dejando 37197 m³/hora para la combustión del bagazo. Esta situación conduce a que el bagazo alimentado se está quemando con el 187% de exceso de aire; esto lo demuestra las altas temperaturas a la salida de la chimenea y las bajas temperaturas de los hornos (ver apéndice 5).

Hugot (36) recomienda que para bagazo con el 50% de humedad la temperatura en el horno debe ser de 925°C.

6.1.2 Velocidad y Descarga de Gases de Escape.

$$P_v = 0.47 \text{ pulg}$$

$$A = 0.70 \text{ m}^2 \text{ (7.6 pies}^2\text{)}$$

$$P_b = 27.75 \text{ Pulg. Hg}$$

$$T = 861^\circ\text{R}$$

$$D = 1.325 \cdot (P_b/T) = 0.043 \text{ lbs/pies}^3$$

$$v = 1096.2 (0.47/0.043) \text{Exp}0.5 = 3624 \text{ pies/min} = 1104.6$$

m/min

$$Q_g = \text{descarga de los gases de escape} = 773.2 \text{ m}^3/\text{min} \\ (27542 \text{ pies}^3/\text{min})$$

$$Q = 46392 \text{ m}^3 / \text{hora}$$

Como la caldera tiene dos ductos a la salida de los gases de escape, el flujo total de gases será:

92784 m³/hora lo que equivale a 63472.7 kg de aire por hora.

El exceso ante la entrada de aire y la salida de gases de 10930 kg/hora, se debe a la entrada de aire frío a través de las compuertas bagaceras, mirillas y fugas en la puerta de hornos, y al vapor de agua generado por la humedad del bagazo.

6.1.3 Composición de los gases de escape.

La constitución de los gases de escape está de acuerdo con las variaciones de carga en molienda y/o fábrica y en los cambios o etapas de los combustibles. En el apéndice 5, se señala la composición de gases registrados mediante instrumentos de medición.

Si se supone el eficiente quemado del combustóleo, se estaría generando el 13% de CO₂ el que disuelto en el flujo másico total de gases, aportaría el 3.14%. De ser válido esto, y como su concentración medida es del 9%, la combustión del bagazo solo estaría participando dentro del balance global con el 5.86%, cifra muy baja si se tiene en cuenta que el porcentaje de

CO₂ que le correspondería de acuerdo con la proporción de gases deberá ser del 7.6%, según recomendación de Hugot (tabla 9)

6.1.4 Pérdidas y eficiencia de la Combustión.

Teniendo en cuenta que los gases de la chimenea están constituidos por la mezcla de los productos de combustión del bagazo y combustóleo, conociendo además la composición, proporciones y los índices de exceso de aire para cada combustible; se pueden determinar por separado, las pérdidas en la combustión de cada combustible para luego ponderarlas y obtener la eficiencia global de la combustión o eficiencia del generador.

6.1.4.1. Por el Combustóleo.

% carga: 0.73 (obtenido para el nivel global del ingenio)

Máxima carga continua: 17.5 (ton/hora)(0.73) = 12.9 ton./hora

En condiciones de operación normal

$M_c = (856.4 \text{ l/hora})(0.93 \text{ kg/l}) = 796.4 \text{ kg/hora}$

$m = 1.15$

Composición del combustóleo

$c = 86\%$; $H_2 = 10.5\%$ y $S = 3.5\%$

$T_1 =$ Temperatura ambiente = 27°C

$T =$ temperatura de salida de los gases = 205°C

Las moles de gas a partir de los componentes 100 lbs de combustible

son:

del Carbono a $\text{CO}_2 = 7.17 \text{ lb-mol}$

del Hidrógeno a $\text{H}_2\text{O} = 5.25 \text{ lb-mol}$

del Azufre al $\text{SO}_2 = 0.11 \text{ lb-mol}$

Así, las moles teóricas de O_2 necesarias para la combustión de 100lb de combustóleo serán:

$$\text{C} + 1/2\text{H}_2 + \text{S} = 7.17 + 1/2(5.25)+0.11 = 9.91 \text{ lb-mol}$$

para $m = 1.15$; serán : $9.90 (1.15) = 11.39 \text{ lb-mol de } \text{O}_2$.

Este oxígeno arrastrará: $11.4(3.76) \text{ lb-mol de } \text{N}_2/\text{lb-mol de } \text{O}_2 = 42.83 \text{ lb-mol de } \text{N}_2$.

Luego, el aire seco suministrado será:

$$42.83 + 11.39 = 54.22 \text{ lb-mol, que llevan}$$

$$54.22 * 0.04 = 2.16 \text{ lb-mol de agua a condiciones del ingenio}$$

La composición de los gases de combustión en lb-mol, será:

$$\text{CO}_2 = 7.17$$

$$\text{N}_2 = 42.83$$

$$\text{O}_2 = 11.39 - 9.90 = 1.49$$

$$\text{SO}_2 = 0.11$$

$$\text{H}_2\text{O} = 7.41, \text{ de los cuales } 5.25 \text{ son}$$

originados por la combustión del Hidrógeno y 2,16 por la humedad del aire, y así, el calor perdido por estos gases para 100 lb de combustóleo será:

$q_{\text{CO}_2} = C_{p\text{CO}_2} \text{ lb-mol}(\Delta T)$; el valor de C_p es obtenido de la gráfica 1

$$q_{\text{CO}_2} = (9.75 \text{ BTU/lbMol}^\circ\text{F})(7.17 \text{ lb-mol})(352^\circ\text{F})$$

$$= 246.07 \text{ BTU/Lb (136.70 kcal/kg)}$$

$$q_{O_2} = (1.49)(7.2)(352) = 37.76 \text{ BTU/lb (20.98 kcal/kg)}$$

$$q_{N_2} = 7.0(42.83)(352) = 1055.33 \text{ B.TU/lb (586.29}$$

kcal/kg)

$$q_{SO_2} = 10.2(0.11)(352) = 3.95 \text{ BTU/lb (2.19 kcal/kg)}$$

Las pérdidas por agua en el aire serán:

$$q_{H_2O} = 2.16 \text{ mol (8.2 BTU/lb.mol}^\circ\text{F)}(352^\circ\text{F)} \\ = 62.34 \text{ BTU/lb(34.63 kcal/kg)}$$

Por calor sensible del agua:

$$q_{H_2O} = 5.25(8.2)(352) = 151.536 \text{ BTU/Lb(84.19 kcal/kg)}$$

Por calor latente del agua:

$$q_{H_2O} = 5.25(2417)18 = 2284.06 \text{ kJ/kg (546.43 kcal/kg)}$$

Pérdidas no Consideradas:

$$q_{nc} = 10820 \text{ kcal/kg}(0.10) = 1082 \text{ kcal/kg}$$

donde 10820 es el PCA y 0.10 es el factor que el evaluador estima por el estado particular de las calderas.

Pérdidas por radiación y conducción (gráfica No.2)

según el % de carga y máxima carga continua:

$$q_{rc} = 10820 \text{ kcal/kg} * 0.045 = 487 \text{ kcal/kg}$$

Así, las pérdidas totales q_t por kg de combustóleo serán:

$$q_t = (136.7+20.98+586.29+2.19+34.63+84.19+546.43)+ \\ (108.2 + 487.0) = 2980 \text{ kcal/kg de combustible.}$$

Así, la eficiencia del generador (η_c), al quemar combustóleo será:

$$\eta_c = 100 - q_t/\text{PCA} * 100$$

$$\eta_c = 100 - 3197/10820 * 100 = 72.5\%$$

Si el vapor producido a 9.4 kg/cm², tiene una entalpía

(hv) de 667 kcal/kgv, el rendimiento en la generación de vapor (g_c) será:

$$g_c = (10820 \text{ kcal/kg})(0.725/(667 \text{ kcal/kgv})) = 11.83 \text{ kgv/kg}$$

$$g_c = (11.83 \text{ kgv/kg})(0.93 \text{ kg/l}) = 11.0 \text{ kgv/l}$$

6.1.4.2. Por la combustión del bagazo.

$$M_b = 1974.6 \text{ kg/hora}$$

$$T = 205^\circ\text{C}$$

$$n = 2.85$$

$$W = 50.7\%$$

Según la fórmula (24), las pérdidas de calor sensible en los gases de escape (q), serán:

$$q = 205 ((1-0.505)((1.4)(2.87) + 0.5/(1-0.505)))$$

$$q = 510.2 \text{ kcal/kg}$$

El calor Q transmitido al vapor de agua será:

$$Q = (PCB - q)\alpha\beta\psi$$

siendo PCB = 1813 kcal/kg, los otros factores para las según las condiciones de la caldera serán :

$$\alpha = 0.95; \beta = 0.90 ; \psi = 0.80, \text{ así}$$

$$Q = (1813.4 - 510.2) 0.95 \cdot 0.90 \cdot 0.8$$

$$Q = 891.4 \text{ kcal/kg}$$

~~Luego el rendimiento del generador, quemando bagazo será:~~

$$\eta_b = (Q/PCA) . 100$$

$$\eta_b = 891.4 \text{ kcal/kg} / 2245 \text{ kcal/kg} = 39.7\%$$

Si la entalpía (hv) del vapor vivo es de 663 kcal/kgv entonces:

$$g_b = (891.4 \text{ kcal}) / (\text{kgb} / 663 \text{ kcal/kgv})$$

$$g_b = 1.34 \text{ kgv/kgb}$$

Con g_b y g_c , se puede calcular la eficiencia global del generador η_g ,

así:

$$\eta_g = [796.4(11.83) + 1974.6(1.34)] / [796.4(10820/663) + 1974(2245/663)]$$

$$\eta_g = 0.613 = 61.3\%$$

6.2. Generador No.2.

6.2.1. Flujo y exceso de aire.

$$M_b = 3709.3 \text{ kg/hora}$$

$M_c = 690 \text{ l/hora}$ (642.2 kg/hora) a condiciones normales de operación

$$P_B = 27.7 \text{ m.m Hg}$$

$$A_c = 642.2 \text{ kg/l} \text{ (14.97 kg.aire/kg combustible)}$$

$$= 9614.1 \text{ kg de aire/hora}$$

$$A_b = 3709.3 \text{ kg/hora} \text{ (6.3 kg aire/kg combustible)}$$

$$= 23368 \text{ kg de aire seco/hora}$$

$$W_{as} = 32982 \text{ kg/hora}$$

$$F = 1.04$$

$$W_{ah} = W_{as} (F) = 34302 \text{ kg de aire húmedo}$$

$$V_{ah} = 34302 \text{ m}^3/\text{hora}$$

$$\lambda = 0.95 \text{ m}^2 \text{ (10.22 pies}^2 \text{)}$$

$P_v = 0.31$ pulg. de agua (apendice 5)

$v = 2376$,pies/min (724.1 m/min) = 12.1m/s

$Q_A = 24296$ pies³ /min (688 m³ /min)

Del total de aire de entrada, se debe restar el aire cedido a la caldera 3, (Q_{2-3}).

$A_{2-3} = 0.15$ m² (1.61 pies²)

Temperatura del aire caliente : 195° C (843° R)

$D = 1.32$ (27.7/843) = 0.043 lbs/pie³(0.68 kg kg/m³)

$P_v = 0.12$ pulg. de H₂O (Apéndice 5)

$v = 1096.2(0.47/0.043)Exp^{0.5} = 3624$ pies/min (1105 m/min)=18.4 m/s

$Q_{2-3} = 3624$ pies/min (1.61 pies²) = 5835 pies³ /min (165.7 m³ /min)

$W_{2-3} = 165.7 \times 0.68 = 112.7$ kg/min

De esta forma, el aire neto impulsado a la caldera 2, para la combustión de

bagazo y combustóleo sera:

Aire neto = 688 kg/min - 112.7 kg/min = 575.3 kg/min
= 34518 kg/hora

Por lo tanto:

$m = (34518 \text{ kg/hora}) / (34302 \text{ kg/hora}) = 1.0$ (aprox.)

Lo que implica una deficiencia en el flujo de aire húmedo de 13651.4 kg/hora, según el siguiente balance:

~~Aire húmedo necesario para quemar el combustóleo (m=1.0) = 9999 kg/hora~~

Aire húmedo real para quemar el combustóleo ($m=1.15$) = 11499 kg/hora

Aire húmedo real para quemar el bagazo ($m=1.5$) = 36454 kg/hora

Aire húmedo necesario para la combustión integral = 47953 kg/hora

Deficiencia real en el flujo de aire = 13651 kg/hora

6.2.2. Velocidad y descarga de los gases de escape.

Forma: Tiro Inducido.

$A = 1.4 \text{ m}^2$ (15.06 pies²)

$T = 145^\circ\text{C}$ (753° R)

$P_B = 27.7 \text{ pulg. H}_2\text{O}$

$D = 1.32$ ($27.7/753$) = 0.0487 lbs/pie³ (0.77 kg/m³)

$v = 1096.2$ ($0.20/0.0487$)Exp^{0.5} = 2221 pies/min (677 m/min)

$Q_g = 33448$ pies³/min (948 m³/min)

$Q_g = 730$ kg/min = 43800 kg/hora

Se observa un bajo tiro en esta caldera (Apéndice 5), lo que dificulta evacuación de gases conduciendo al ahogamiento de las cámaras de combustión cuando aumenta la alimentación del bagazo. Se concluye que el déficit de aire parcialmente es admitido por entradas fuera del ventilador como las del sistema de conducción del bagazo, mirillas y puertas de hornos y por tanto la combustión de bagazo y combustóleo se llevan a cabo con el mínimo de exceso de aire requerido.

6.2.3. Composición de gases de escape.

Analizando las mediciones registradas en el apéndice 5 y suponiendo una eficiente combustión de petróleo, estaría produciendo al quemarse en condiciones de operación normal un 13% de CO_2 , el que disuelto en el flujo másico (11499 kg/hora), estaría aportando a la composición global de CO_2 en los gases de escape el 3.12% del volúmen total de estos. O sea que, el 5.88% restante vendría de la combustión del bagazo, cifra muy baja si se tiene en cuenta que su contribución a los gases de escape por esta razón debe ser del 9.88%, en función de las recomendaciones de Hugot (tabla 7) demostrándose así, una ineficiente combustión del bagazo confirmada por el porcentaje de CO. El contenido de O_2 se explica por entradas de aire fuera del impulsado por el ventilador.

6.2.4. Pérdidas y eficiencia de combustión.

Teniendo en cuenta la similitud a las condiciones de operación en el quemado del combustóleo, se puede considerar lo misma eficiencia que para la caldera 1 (72.5% y 11.83

$$.12\% = (11499/47953) * 13\%$$

$$.88\% = (36454/47953) * 13\%$$

kgs.v/kg.combustible.

En cuanto a la combustión del bagazo se tiene según mediciones que:

$$m = (34302 - 11499)/24303 = 0.94 = 1 \text{ (con entradas extras de aire)}$$

$$M_b = 3709.3 \text{ kg/hora}$$

$$T = 145^\circ \text{ C}$$

$$W = 50.6\%$$

Luego: $q = 145 (1-0.505)(1.4 + 0.5/(1-0.505))$

$$q = 173 \text{ kcal/kg}$$

si :

$$\alpha = 0.95$$

$$\beta = 0.90$$

$$\psi = 0.80$$

PCB = 1813.4 kcal/kg, se tiene que las pérdidas totales (Q)

serán: $Q = (1813.4 - 173 \text{ kcal/kg}) 0.95 \times 0.9 \times 0.80$

$$Q = 1122 \text{ kcal/kg}$$

y

$$\eta_b = (1122 \text{ kcal}) / (\text{kg} / 2245 \text{ kcal/kg}) \cdot 100 = 50\%$$

y el rendimiento de vapor (g_b), será:

$$g_b = (1122 \text{ kcal/kgb}) / (663 \text{ kcal/kgv}) = 1.69 \text{ kgv/kgb}$$

Y la eficiencia global (η_g), del generador será:

$$\eta_g = [(690.6(11.83) + 3709.3(1.69))] / [(690.6(16.32))]$$

$$+3709.3(3.38)] = 0.594 = 60.6\%$$

6.3. Generador No.4

6.3.1. Flujo y exceso de aire

$$M_D = 993.1 \text{ kg/hora}$$

$$M_C = 723 \text{ l/hora (672.4 kg/hora)}$$

$$A_C = 672.4 \text{ kg/hora (14,97) = 10066 kg de aire seco por hora}$$

$$A_D = 993.1 (6.3) = 6256.5 \text{ kg de aire seco/hora}$$

$$W_{as} = 16322.5 \text{ kg/hora}$$

$$F = 1.04$$

$$D = 1 \text{ kg/m}^3 \text{ (0.066 lbs/pie}^3\text{)}$$

$$W_{ah} = 16975 \text{ kg/hora de aire húmedo}$$

$$A = 0.935 \text{ m}^2 \text{ (10 pies}^2\text{)}$$

$$P_B = 27.7 \text{ pulg. Hg.}$$

$$P_v = 0.27 \text{ Pulg. de agua}$$

$$v = 1096.2 (0.27/0.066) \text{Exp}0.5 = 2217 \text{ pies/min (771.5 m/min).}$$

$$Q_A = 2217 \text{ pies/min} * 10 \text{ pies}^2 = 22170 \text{ pies}^3/\text{min}$$

$$(721.3 \text{ m}^3/\text{min})$$

$$W_{ah} = 721.3 \text{ kg/min}$$

$$v = 12.8 \text{ m/s, (arriba del nivel máximo recomendado)}$$

Se cede a la caldera 3 aire caliente, bajo las siguientes consideraciones:

$$T = 145^\circ\text{C} \text{ (753}^\circ\text{R)}$$

$$P_v = 0.08 \text{ pulg. de agua}$$

$$A = 0.19 \text{ m}^2 \text{ (2.03 pies}^2\text{)}$$

$$P_B = 27.7 \text{ pulgada de Hg.}$$

$$D = 0.0487 \text{ lbs/pies}^3 \text{ (0.77 kg/m}^3\text{)}.$$

$$v = 1096 \text{ (0.67/0.0487)Exp}^{0.5} = 4066 \text{ pie/min (1239.3 m/min)}$$

$$Q_{4-3} = 8254 \text{ pies}^3\text{/min (236 m}^3\text{/min)}$$

$$W_{4-3} = 236 \text{ m}^3\text{/min} * 0.77 \text{ kg/m}^3 = 1813 \text{ kg/min}$$

Luego el aire húmedo en peso (W_{ah}) y volúmen (V_{ah}), neto aprovechado por la caldera 4 será:

$$W_{ah} = 721.3 \text{ kg/min} - 181.3 \text{ kg/min} = 540 \text{ kg/min}$$

$$V_{ah} = 540 \text{ m}^3\text{/min} * 60 = 32400 \text{ m}^3\text{/hora}$$

y

$$m = (32400 \text{ kg/hora}) / (16975 \text{ kg/hora}) = 1.90$$

Siendo el exceso de aire, para el quemado del combustóleo y bagazo del 90%.

En el cálculo del aire seco para $n=1$, el combustóleo utiliza el 61.7% del aire calculado, mientras que el bagazo corresponde al 38.3%. Conservando esta proporción, llevándola al aire húmedo y teniendo en cuenta que al combustóleo se le ha asignado un 15% de exceso de aire, el aire húmedo necesario para el quemado del combustóleo será:

$$1.15(0.617)(16975) = 12045 \text{ kg/hora.}$$

El aire húmedo que queda para el bagazo será:

$$32400 \text{ kg/hora} - 12045 \text{ kg/hora} = 20355 \text{ kg/hora}$$

lo que conduce a estimar un índice de exceso de aire para el bagazo (n_D) :

$$n_D = 20355/6506 = 3.12$$

o sea que para la combustión del bagazo se utiliza el 212% de exceso de aire.

Este considerable exceso de aire conducirá a elevadas pérdidas en gases de chimenea, como se puede ver para la temperatura de gases de escape (apéndice 5).

6.3.2 Velocidad y descarga de gases de escape.

Forma: tiro inducido

$$A = 0.935 \text{ m}^2 \text{ (10 pies}^2\text{)}$$

$$T = 225^\circ\text{C} \text{ (897}^\circ\text{R)}$$

$$P_v = 0.69 \text{ Pulg. de H}_2\text{O}$$

$$D = 1.32 \text{ (} 27.7/897\text{)} = 0.031 \text{ lbs/pies}^3 \text{ (0.49 kg/m}^3\text{)}$$

$$v = 1096.2 \cdot (0.69/0.031) \text{Exp}0.5 = 5171 \text{ pies/min (1551 m/min)}$$

$$Q_g = 51710 \text{ pies}^3\text{/min} = 1442 \text{ m}^3\text{/min}$$

$$W_g = 706.7 \text{ kg/min (42402 kg/hora)}$$

6.3.3 Composición de gases de escape.

Del apéndice 5, se puede hacer el mismo análisis en cuanto a la composición de los gases de escape. En este caso, el 3.8% de CO_2 sería aportado al quemado del combustóleo quedando el 6.7% para el quemado del bagazo, en lugar del 7%, como participación a la producción total de gases. según recomendación de Hugot (Tabla 7)

El alto contenido de CO , representa carbono parcialmente oxidado fruto del enfriamiento del horno a consecuencia del elevado exceso de aire. En este caso la temperatura del horno deberá ser de 1100°C (Hugot), en lugar de los 834°C señalados por el piranómetro.

6.3.4 Pérdidas y Eficiencia de Combustión.

Con la eficiencia de combustión para el petróleo de 72.5% a condiciones de operación comunes de presión y temperatura, se tiene para el bagazo:

$$m = 3.13$$

$$W = 50.6\%$$

$$T = 225^\circ\text{C}$$

$$q = 225(1-0.505)(1.4(3.12)+0.50/(1-0.505))$$

$$q = 600 \text{ kcal/kg}$$

si,

$$\alpha = 0.95$$

$$\beta = 0.90$$

$$\psi = 0.80, \text{ luego}$$

$$Q = (1813.4 - 600) 0.95 * 0.90 * 0.80$$

$$Q = 830 \text{ kcal/kg}$$

y

$$\eta_b = (830/2245) \cdot 100 = 37\%$$

$$\sigma_b = 830/663 = 1.25 \text{ kgv/kgb}$$

$$\eta_g = \frac{[(993.1(1.25) + 672.4(11.83))]}{[993.1(3.386) + 672.4(16.32)]}$$

$$\eta_g = 0.622 = 62.2\%$$

6.4. Generador No.3

6.4.1. Flujo y exceso de aire.

$$M_b = 2627 \text{ kg/hora}$$

$$M_c = 754.1 \text{ l/hora (701 kg/hora)}$$

$$A_c = 1049.3 \text{ kg/hora de aire seco}$$

$$A_b = 16550 \text{ kg/hora}$$

$$W_{as} = 27043 \text{ kg/hora}$$

$$F = 1.04$$

$$D = 1 \text{ kg/m}^3 \text{ (0.066 lbs/pies}^3\text{)}$$

$$W_{ah} = 28125 \text{ kg/hora de aire húmedo}$$

$$Q_{2-3} = 165.7 \text{ m}^3/\text{min (112.7 kg/min)}$$

$$Q_{4-3} = 236 \text{ m}^3/\text{min (181.3 kg/min)}$$

$$\begin{aligned}
 V_{ah} &= 401.7 \text{ m}^3/\text{min} \\
 &= 24102 \text{ m}^3/\text{hora (aire h\text{u}\text{m}\text{e}\text{d}\text{o cal})} \\
 W_{ah} &= 17640 \text{ kg/hora}
 \end{aligned}$$

Exceso de aire para la caldera (m),

$$m = 17640/28125 = 0.63$$

lo que significa que existe una deficiencia de 10485 kg/hora respecto al 100% del aire te6rico necesario (28125 kg/hora).

El d6ficit de aire h6medo para la combusti6n integral de la caldera se puede ver en el siguiente balance:

Aire h6medo necesario para quemar combusti6leo (m=1.15) : 12549 kg/hora

Aire h6medo necesario para quemar bagazo (m=1.5) : 25818 kg/hora

Deficiencia en el flujo de aire (38367 - 214535) : 16914 kg/hora

El indice real de exceso de aire para el bagazo (m_b), se estableceria asi:(luego de cumplir con el indice para el combusti6leo)

$$m_b = (21453-12549)/17212 = 0.52$$

Como consecuencia de la deficiencia del aire, se presenta una reacción pirolítica en el centro de la pila de bagazo que permite elevar el porcentaje de fibra quemada.

6.4.2 Velocidad y descarga de gases de escape.

Forma : tiro natural

$A = 3.6\text{m}^2$ (38.73 pies²)

$T = 370^\circ\text{C}$ (1158°R)

$P_v = 0.033$ pulg de agua

$D = 0.024$ lb/pies (0.38 kg/m³)

$v = (0.033/0.024) \times 1096.2 = 1285.0$ pies/min
 $= 385.6$ m/min

$Q_g = 49768$ pies³/min (1388m³/min)

$W_g = 1388$ m³/min (0.38 kg/m³) = 527.4 kg/min

$W_g = 31646$ kg/hora

Por el cálculo anterior se puede concluir que el sistema de tiro natural en el escape es capaz de evacuar la cantidad de aire necesario cuando $m = 1.0$. Sin embargo, si se diera la combustión completa habría que aumentar la capacidad del tiro, mediante el auxilio de un ventilador.

6.4.3 Composición de gases de combustión.

Del 10% de CO_2 registrado en los medidores y por su participación en el flujo másico total, se estaría aportando el 3.9% del CO_2 total medido para el combustóleo, dejando el 5.6% restante como aporte a la combustión del bagazo, cuando en la reacción completa deberá ser del 13%.

6.4.4 Pérdidas y eficiencia de la combustión.

Se pueden suponer grandes pérdidas en forma de calor sensible a causa de la elevada temperatura de los gases de escape (apéndice 5).

Si se mantiene la eficiencia en el quemado del combustóleo del orden del 72.5 %, se podrá calcular la eficiencia de la combustión del bagazo, bajo las siguientes consideraciones.

$$\begin{aligned}
 m_b &= 1.0 \\
 W &= 50.6\% \\
 T &= 370^\circ\text{C} \\
 \text{luego, } q &= 370 (1-0.505) \{ (1.4)(0.50) / (1-0.505) \} \\
 q &= 441.4 \text{ kcal/kg} \\
 \text{si } \alpha &= 0.95 \\
 \beta &= 0.90 \\
 \psi &= 0.80 \\
 Q &= (1813.4 - 441.4) 0.95(0.90)(0.80) \\
 Q &= 938 \text{ kcal/kg} \\
 \eta_b &= (938/2245) \cdot 100 = 41.8\%
 \end{aligned}$$

$$g_b = 938/663 = 1.41 \text{ kgv/kgb}$$

$$\eta_g = \frac{[2627(1.41) + 672.4(11.83)]}{[2627(3.38) + 672(16.32)]}$$
$$= 0.587 = 58.7\%$$

7. Balance global del vapor.

Bajo las dos formas de quemar el combustóleo a plena carga y en tiempo de paro (del apéndice 3), se puede establecer:

A plena carga:

El volúmen de combustóleo (V_c) será:

$$V_c = (4053.5 \text{ l/hora}) (195 \text{ días}) (24 \text{ horas}) (0.683)$$
$$= 12.956 \text{ } 10E+6 \text{ litros}$$

El peso W_c , será:

$$W_c = 12956 \text{ } 10E+6 \text{ litros} (0.93 \text{ kg/l}) = 12049 \text{ } 10E+6 \text{ kg}$$

El volúmen (V_{c2}) y peso (W_{c2}), consumidos en tiempo de paro será:

$$V_{c2} = (3212.6 \text{ l/hora}) (195) (24) = 4765 \text{ } 10E+6 \text{ l.}$$

$$W_{c2} = (4765 \cdot 10E+6 \text{ l}) (0.93) = 4431 \text{ } 10E+6 \text{ kg}$$

Así el consumo total (V_{ct}), (W_{ct}), en volúmen y peso respectivamente será:

$$V_{ct} = 17722 \text{ } 10E+6 \text{ l}$$

$$W_{ct} = 16481 \text{ } 10E+6 \text{ kg}$$

Si por cada kilogramo de combustóleo se generan 11.83 kg

de vapor, la generación total de vapor por combustóleo será:

$$\text{Vapor total} = 16481 \text{ 10E+6kg}(11.83) = 1.95 \text{ 10E+8kgv.}$$

El vapor generado por el bagazo (Cuadro 38), será de:

$$65.538 \text{ 10E+6 kg, y la}$$

producción total simultánea de vapor será:

$$\text{Vapor total} = 65.538 \text{ 10E+6kg} + 1.95 \text{ 10E+8kg} = 260.5 \text{ 10E+6}$$

kg

Cuadro No.38

Consumo de Bagazo y Generación de Vapor
en el Ingenio Casasano.

	CALDERA No.				
	1	2	3	4	5
kgb/hora	1974.6	3709.3	2827	993.1	--
kgv/kgb	1.27	1.69	1.41	1.25	--
kgc/hora	796.4	642.2	701.1	672.4	1029.4
kgv/kgc	11.83	11.83	11.83	11.83	11.83
Vapor gen. del Bagazo kg/hora	2508	6269	3986	1241	--
Vapor gen. del Comb./hora	9421	7597	8294	7954	12178
Vapor Total gen. kg/hora	11929	13866	12880	9195	12178
Eficiencia de gen. por bagazo η_b	39.7	50	41.8	37	--
Eficiencia de gen. por combust. η_c	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5
Eficiencia Global de gener. η_g	61.3	60.6	58.7	62.2	72.5

de los cuales el combustóleo aportó el 74.85% y el bagazo 25.15%, lo que se considera la verdadera estructura energética de los combustibles utilizados en Casasano en cuanto la generación de vapor para la última zafra.

Si se relaciona el vapor total producido con la caña molida durante la última zafra se tendría un consumo de vapor de 857 kg por TMC, cifra ligeramente inferior a la obtenida por los métodos de estimación de este parámetro para 1986 y similar al promedio nacional.

Del cuadro 38, se tiene, que el vapor generado por hora a condiciones de operación del ingenio es de 60.04 toneladas, que comparado con el vapor nominal generado en las calderas se tiene una eficiencia de generación (η_v), de:

$$\eta_v = (60.04 \text{ ton/hora}) / (75.14 \text{ ton/hora}) * 100 = 79.9\%$$

También del cuadro anterior se extrae que:

Bagazo húmedo consumido por hora : 9504 ton.

Bagazo húmedo consumido en la Zafra (195 días): 44479 ton.

Total de Bagazo consumido (según Ingenio): 46300 ton.

Total Bagazo producido: 93000 ton.

Índice real de aprovechamiento energético del bagazo: 47.82%

IX CONCLUSIONES

1. El estudio revela que el número de ingenios pasó de 75 en 1959 a 69 en 1985, no existiendo ninguna relación entre éste y la producción de azúcar o potencia instalada total.
2. En cuanto a consumo específico de energía, no existe diferenciación entre los ingenios productores de azúcar refinada y los ingenios que fabrican azúcar estándar.
3. El consumo específico de combustóleo creció en el 187% entre 1970 a 1981 a un promedio del 17% anual pasando de 11.03 l/TMC a 291/TMC. Mientras que el consumo de bagazo tuvo una leve reducción pasando de 314 kg/TMC a 305kg/TMC. Cabe señalar que la reducción de la estructura energética del bagazo del 80% en 1970 al 65% en 1985, además de su desplazamiento por el petróleo refleja la degradación de la eficiencia de combustión de la fibra. El consumo específico global, que incluye petróleo más bagazo, pasó de 122 l/TMC en 1970 a 3841/TMC en 1985 con un crecimiento exagerado del 214%, mientras que la producción de azúcar lo hizo en el 113%.

4. La producción de alcohol demandó para 1985 menos del 9% de la energía total destinada a la fabricación de azúcar, siendo la base energética el consumo de combustóleo en virtud de los días fuera de zafra que se destinan a la fabricación del líquido.

5. Los factores operacionales que más han incidido en el aumento del consumo de energía (combustóleo y/o bagazo) son los aumentos de tiempo perdido, los aumentos de los días de zafra, las reducciones de la eficiencia de molienda y el desbalance que se presenta en la combustión de calderas. Sin embargo, se observa que hasta 1983 el costo energético de 1 kg de azúcar representaba menos del 2%, cifra que se aumenta sensiblemente en 1984 y 1985 a más del 6%. Esta situación se comporta en forma paralela con los costos del combustóleo, (siendo el del bagazo nulo), que pasó de dos pesos por litro en 1983 a 20 pesos en 1985; reduciéndose así el subsidio al sector y de paso colaborando con una medida política hacia el mejor aprovechamiento energético del combustóleo.

6. El alto rendimiento de fibra en caña conduce a altos rendimientos de bagazo (330 kg/TMC), presentando en su composición media 3.5% de sacarosa, 51.7% de humedad y 2.5% de material extraño que dificultan su aprovechamiento, absorbiendo humedad y reduciendo su calidad energética.

7. La estructura energética del consumo de bagazo pasó del 83% en 1970 al 65.4% en 1985 con una tendencia a la baja en la medida que iba aumentando la oferta casi gratis del combustóleo. De los 12 millones de toneladas producidas en 1985, 10.3 millones (86.5%), se destinó a la generación de vapor con una eficiencia media de 1.87 kg de vapor por kg de bagazo; el 10% se destinó a la fabricación de pulpa para papel, el 0.85% para aglomerados el 0.15% para alimento de ganado y el 2.5% otros usos y pérdidas.

8. La potencia nominal instalada pasó de 200761 H.P. en 1959 a 543859 H.P. en 1985 con un incremento del 171% en los últimos 25 años. Se observa que hasta 1969 existían generadores que quemaban bagazo y leña con la progresiva eliminación de calderas monocombustibles en beneficio de aquellas que queman bagazo y combustóleo simultáneamente; estas últimas pasaron del 62.87% en 1959 al 91.5% en 1985. Los análisis por computador demuestran la desaparición de ingenios de menos de 3000 H.P., el mantenimiento de ingenios entre 3000 y 5000 H.P. y el rápido crecimiento de ingenios de más de 5000 H.P.. Sin embargo, el consumo de energía (H.P.hora/TMC) sigue siendo elevado en función de los índices internacionales.

9. Existe sub y sobre dimensionamiento de la capacidad teórica de molienda respecto con la potencia instalada; en gran número de ingenios ésta situación conduce a excesivas cargas

y a bajos índices de molienda con aumentos considerables del consumo de energía.

10. La eficiencia media de calderas para 1985 llegó al 56.8%, reduciéndose ésta desde 1979 en la medida en que se transforman en quemadoras simultáneas de bagazo y combustóleo. La generación de vapor en calderas pasó de 18.5 en 1959 a 24.5 en 1985 kg de vapor por cada H.P.hora instalado, como efecto de los aumentos de las presiones de generación de vapor de 9 a 16 kg/cm² para el mismo período.
11. Los métodos utilizados para la estimación del consumo de vapor demuestran la aproximación de los cálculos a índices cercanos a 850 kg de vapor por TMC.
12. Mejorando la eficiencia de generación con base en combustóleo, de 10 a 13.1 kg de vapor por litro, se podría ahorrar el 20.9% de total del petróleo consumido para 1985. En quemado de bagazo, al pasar de 1.87 a 1.98 kg de vapor por kg de bagazo, se podría ahorrar el 15.9% del combustóleo usado, consumiendo la misma cantidad de bagazo.
13. La eficiencia de los ingenios no se puede evaluar por el solo consumo de combustóleo; existen ingenios como Casasano que a pesar de ser uno de los más grandes consumidores de energía específica (litros de combustóleo por TMC), presentan favorable índice de aprovechamiento energético.

(H.P hora/TMC), destacándose en este sentido dentro de los ingenios entre 3000 a 4000H.P. Sin embargo, para el país en el balance global de aprovechamiento de la energía instalada es elevado, superando la gran mayoría de ingenios los 34 H.P.hora/TMC.

14. La industria azucarera con consumos de vapor del orden de 850 kg por TMC, no podrá producir ningún excedente de bagazo, aun si la eficiencia de las calderas a nivel global alcance el 78%. Sumado a lo anterior, las bajas presiones y temperaturas de generación serán los grandes obstáculos para cualquier programa de cogeneración.

Respecto al aprovechamiento energético del bagazo en el ingenio Casasano, se puede concluir que:

15. Desde el punto de vista mecánico y de diseño, el sistema de suministro y alimentación de bagazo y volumen de los hornos tienen la capacidad para absorber la totalidad del bagazo producido en el ingenio.
16. En cambio, se observa una descompensación total entre la capacidad real de quemado de combustóleo y bagazo y la potencia de ventiladores, tanto de alimentación de aire como de salida de gases de escape, conduciendo a reducidas eficiencias en los generadores de vapor. Sobresale que las calderas 1 y 4 presentan índices de exceso de aire superiores a 200, mientras que las calderas 2 y 3 tienen

deficiencias grandes en el suministro de aire. Esta situación origina bajas eficiencias de generación de vapor con bagazo (1.40 kg de vapor por kg de bagazo) y rendimientos globales de combustión del orden de 60%.

17. El ingenio Casasano tradicionalmente ha consumido solo petróleo en el orden de 60 litros/TMC; en las dos últimas zafras se quemó el 32.6 y 49.9% del total del bagazo producido. Se destaca que el bagazo participó en 1985 en el 21.7% de la energía total consumida, mientras que en 1986 lo hizo con el 30%. Antes de 1985 el consumo medio de vapor fué de 830 kg/TMC pasando a 1090 kg/TMC en las últimas dos zafras, mostrando inestabilidad en el diseño para el aprovechamiento del bagazo.
18. Sobre la base de mediciones, para el Ingenio Casasano la verdadera estructura energética es del 25.15% para bagazo y 74.85% para combustóleo en lugar del 34% y 66% señalados sobre los registros respectivos para bagazo y combustóleo durante la última zafra.
19. El tiempo perdido total pasó de 34 días en 1984 a 62 en 1986, de los cuales en la última zafra el sistema de aprovechamiento energético del bagazo absorbió 9 días (14.5%).

20. Los registros indican que no existe ninguna compensación entre las variaciones de la capacidad teórica de molienda y la potencia nominal instalada, mostrando una reducción de la eficiencia de molienda a costa de un progresivo aumento de los días de zafra.
21. La entrada de aire frío por mirillas de hornos y compuertas bagaceras, reduce la temperatura de hornos afectando la calidad de la combustión. Esta situación origina la formación de inquemados que aumentan los períodos de limpieza del horno y reduce el volumen de la cámara de combustión.
22. No existe significancia estadística entre aquellos factores que se consideran influyen en el consumo de combustóleo para las tres últimas zafras.
23. Los bajos índices de CO_2 , menores de 10 para la combustión integral de bagazo y combustóleo demuestran la baja eficiencia de combustión en los generadores de vapor.

X RECOMENDACIONES

A Nivel Nacional:

1. Uno de los factores que incide en el aumento de la productividad de la caña es el incremento del porcentaje de fibra en el tallo. Esta situación origina en el plano agrícola un aumento artificial de la productividad, mientras que el plano de fábrica conlleva a elevar los costos de extracción del jugo y a producir mayores cantidades de bagazo. Se debe definir luego sobre el plano agrícola si el país demanda de variedades de caña productoras de bagazo o de azúcar, ya que de un lado, se obtienen menos de 90 kg de azúcar por TMC, mientras que por el otro, se producen más de 330 kg de bagazo por TMC.
2. Las reacciones del subsector Azúcar frente a los aumentos de los precios del combustóleo a partir de 1983, demuestran que una política de precios de energía acompañada de algunos estímulos a aquellas unidades productivas que logren ahorros significativos de energía mediante un mayor control de operación y la implementación de cambios tecnológicos, es el camino a seguir para lograr abatir en el corto plazo los consumos específicos de energía en el sector azucarero.

3. Se debe ajustar mejor la potencia instalada real de los ingenios respecto a la capacidad real de molienda y a la fabricación de azúcar. Esto conducirá a mejorar la eficiencia de molienda y el factor de carga de los ingenios.
4. Dentro de las circunstancias actuales por sus características y producción, el bagazo podría sustituir el 15.9% del combustóleo empleado mejorando las condiciones de operación, para elevar la participación estructural en el consumo nacional del 65.4% al 81.3%. Sobre esta base, logrando producir bagazo con 49% de humedad, el poder calorífico del mismo podría ascender a 1880 kcal por kg, produciendo un aumento en la oferta de energía en la combustión el equivalente a 1920 millones de litros de combustóleo, frente a una demanda de 1030 millones de litros en 1985, pudiendo la industria ser autosuficiente en materia de energía.
5. Obtener un bagazo de mejor calidad como combustible implica reducir el contenido de material extraño como tierra y cenizas, aumentar los coeficientes de extracción de sacarosa y reducir los índices de imbibición en la molienda.
6. En materia de consumo de vapor se debe hacer una evaluación completa de los procesos que demandan mayor consumo de energía como son: evaporadores, cristalizadores y molinos. Esto determinará la real capacidad de cada proceso.

y permitirá lograr balances más racionales de masa y energía reduciendo los paros que aumentan las pérdidas de tiempo y por tanto el consumo no productivo de energía.

7. La política de aumentar la participación energética del bagazo vía adaptación de generadores para quemar combustóleo y bagazo no ha tenido los resultados esperados, ya que se demuestra que mediante esta técnica se reduce la eficiencia global de las calderas y la capacidad de generación, causada especialmente por la baja eficiencia de combustión del bagazo. Esto indica la necesidad urgente de realizar estudios a fondo sobre la adaptación de calderas de monocombustible a calderas de bagazo y combustóleo.
8. No se debe justificar la producción de azúcar del país con base en los incrementos de los días de zafra, sino, mediante la reducción de los tiempos perdidos; de esta forma se podrá moler la misma o mayor cantidad de caña con el mismo consumo de energía, reduciéndose así el consumo específico de vapor o energía por unidad de producto molido o terminado.

A Nivel de Ingenio:

9. Se debe adaptar la producción a la real capacidad de los ingenios desde el punto de vista de la infraestructura mecánica y de calor.

10. En las circunstancias actuales se debe rediseñar los sistemas de suministro y evacuación de aire y gases calientes de los generadores de vapor.
11. Se debe evitar entradas adicionales de aire a través de los sistemas de alimentación de bagazo y mirillas de hornos.
12. Diseñar y construir tuberías de aire en la base de los hornos quemadores de bagazo que permita darle mayor suspensión en la caída y quemado del bagazo.
13. Instrumentar con controles a los generadores de vapor para que se logre establecer su rendimiento durante un régimen de operación.
14. Reducción de las pérdidas de tiempo en lo referente a sistemas de suministro y alimentación de bagazo, mediante un mejor sistema de mantenimiento y control.

XI BIBLIOGRAFIA

1. Acosta, T.R. Perspectives of Biomass as an Energy Source in the Dominican Republic, Alternative Energy Sources, Vol.3, 1983.
2. Alexander, A.G., The Energy Cane Alternative to Sugar Planting, University of Puerto Rico, Puerto Rico 0928, 1983.
3. Alvarez, C., Ahorro de Energía en la Industria Azucarera, Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F., 1983.
4. Araguez, I., Perspectivas en la Industria Azucarera, Aspectos Energéticos, Geplacea, Tecnología 1, México, 1983.
5. Atchison, J.E., The Industrial uses of Bagasse and its Fuel Value as compared to Fossil Fuels, Sugar and Azúcar, March, 1983.
6. Azúcar, S.A. de C.V., Estadísticas Azucareras, México, D.F., 1980.
7. -----, Estadísticas Azucareras, México, D.F., 1982.
8. -----, Estadísticas Azucareras, México, D.F., 1983.
9. -----, Estadísticas Azucareras, México, D.F., 1984.
10. -----, Estadísticas Azucareras, México, D.F., 1985.
11. -----, Informe Final de Actividades 1985-1986, México, D.F., 1987.
12. -----, Desarrollo Operativo, 1976-1981, Tercera Edición México, D.F., 1981.
13. -----, Desarrollo Operativo, 1980-1985, Subdirección de Planeación y Desarrollo, México, D.F., 1986.
14. Babcock and Wilcox, Co., Steam, its generation and use, 38th edition, 1971.

15. Baguant, J., Electricity Production from the biomass of the sugar cane Industry in Mauritius, Biomass, J, 1984, p.p.283-297.
16. Bouvert, P.E., et al., Identificación de las condiciones básicas de la generación económica de electricidad para el público a partir del bagazo sobrante en los ingenios azucareros, Banco Mundial, Washington, 1982.
17. Brigon, S.A., Manual de utilización de mediciones en calderas, México, D.F., 1982.
18. Buffete Internacional, Procedimiento para la Selección de Ventiladores PPT-14, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1983.
19. Cóseres, M.A., Consumo de energía en la Industria, Colegio de México, México, D.F., 1984.
20. Cundy, A.V., Combustion of Bagasse, Fuel, Vol., 62, p.p.775-780, 1983.
21. De Araujo, J. de A., Racionalización energética de ingenios azucareros, III Seminario Latinoamericano de Bioenergía, Guatemala, 1983.
22. De Almeida, V.R., Bagasse of sugar cane, International Sugar Journal, 51 (1449), 232, 1983.
23. Departamento de Comercio, Guía para el aprovechamiento del calor de desperdicio, NBS Handbook 121, Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, México D.F., 1977.
24. Elkoury, J.M., An experimental electrical generating unit using sugar cane bagasse as fuel, Alternative Energy Sources III, Vol.3, C.R.I. Washington, p.p.253-268, 1983
25. Enriquez, M., Bagazo de Caña, I Curso de Biomasa como Fuente de Energía, IMETA, México, 1987.
26. Estrada, J., et al. Diagnóstico de combustión de centrales termoeléctricas, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, 1983.
27. Flambert, F., Bagasse pour le production d' energie électrique, applications en Haïti, Revue de l'énergie, No.379, p.p. 651-655, 1986.
28. Galvez, L.O., Uso racional de la energía en la Industria Azucarera, "la experiencia cubana". La Habana, (Cuba), 1983.

29. González, A., et al., Peletizado y briqueteado de residuos vegetales como fuente básica de energía para la industria, Tesis profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F., 1985.
30. González, M., Refinación de petróleo y gas, Seminario sobre Energéticos, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Mor., México, 1978.
31. Guerrero, J., Ahorro de energía en la industria azucarera. VII Seminario Nacional sobre el uso racional de Energía, México, 1985.
32. Guzmán, O.M., et al., Uso eficiente y conservación de Energía en México: Diagnóstico y Perspectivas, Colegio de México, México, D.F., 1985.
33. Hamm, J.R., Utilization of fluidized Combustion in Energy Recovery from Solid wastes, Transaction ASME, 168, Vol., 102, Sept., 1986.
34. Honig, P., Principles of Sugar Technology, Vol.I, 1a. Edition, Elsevier, 1963.
35. Hornburg, C.D., Geothermal resource utilization: paper and cane sugar Industries, Florida, 1975.
36. Hugot, E., Manual para Ingenios Azucareros, Cía. Editorial Continental, Séptima Edición, México, 1984.
37. Humbert, R.D., The growing of sugar cane for energy, Energy Economics, Agrichemical, July - August, 1978.
38. I.M.P., Energéticos Demanda Sectorial: Análisis y Perspectivas, México, D.F., 1975.
39. ICINAZ, Alta eficiencia en la Industria Azucarera: Mantenimiento y Explotación, I Conferencia Internacional sobre la Industria Azucarera, La Habana, Cuba, 1986.
40. Lamb, B.W., Combustion of Bagasse: Literature review, Sugar Technology Review, 4 (1976/1977), p.p.89-30.
41. Lewis, C.W., Fuels From Biomass, Energy Outlay vs. Energy Returns, Washington D.C., Nov., 1976.
42. Manual del Azucarero Mexicano, Cía Editorial del Manual Azucarero, S.A., México, D.F., 1960, 1970, 1978, 1979, 1980, 1981, 1983, 1984, 1985, 1986.

43. Maranhao, L.E.C., Desfibradores de Cana, Sua Influencia na extracao das moendas, PLANALSUCAR, Brasil, 1981.
44. Meade, G.D., Mnual de Azúcar de Caña, Novena Edición, Mantaner y Simon, Madrid, 1967.
45. Ministério das Minas e Energia, Republica Federativa do Brasil, Balanco Energético Nacional, 1983.
46. -----, Aprovechamiento Energético dos residuos da Agroindustria da cana - de- acucar, Rio de Janeiro, 1981.
47. Mukherjee, S., et al., Production of by - product power in sugar Industry for rural electrification, Journal Institute Engine., India, 64, CH2, p.p.50-55 1964.
48. Malik, R.K., et al., Energy Utilization in sugar cana production in North India, Energy, Vol. 8, No.4, p.p. 291-294, 1983.
49. Mc Intyre, R.J., Cogeneration and the sugar factory, Journal of Electrical and Elec., Eng., Vol.5, No.1, Australia, 1985.
50. Nathan, R.A., Fuel from Sugar Crops, Technical information center, U.S., Department of Energy, USA ,1978
51. N.A.S., Firewood crops, National Academy of Sciences, Washington, D.C., USA,1978.
52. Nacional Financiera, S.A., La Economía Mexicana en Cifras, México, D.F., 1981.
53. Neto, J.C., Aprovechamiento energético del bagazo de caña en el Brasil, Copersucar, Piracicaba, Brasil, 1983.
54. OLADE, Requerimientos Futuros de Fuentes No Convencionales de Energía en América Latina, Quito (Ecuador), 1980.
55. OCDE-OLADE, Cooperación Internacional para el Uso Racional de Energía en la Industria, Lima (Perú), 1983.
56. Patarau, J.M., By-Products of the cane sugar industry, Elsevier, Londres, 1969.
57. Paul, S., The gift of bagasse and other by-products of sugar cane industry, Energy Management, Jan-March, p.p.45-53, 1985.
58. Polack, J.A. et al., Sugar Cane: Positive energy source for alcohol, Lousiana State University, Baton Rouge, USA, 1981.

59. Peres, N.P., Eficiencia en Calderas de la Industria Cañera, serie STAB, No.1, Sao Paulo Brasil, 1982.
60. Ramírez, F.A. La Termodinámica Aplicada a los Proyectos de Generadores de Vapor, Tesis Profesional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, I.P.N., México, 1980.
61. Reay, D.A., Guía para el Ahorro de Energía en la Industria, International Research and Development Co. Ltd., England, 1977.
62. Sazor, N., Peletización y uso racional de la Energía biomásica en la Industria del Azúcar, tercer seminario latinoamericano de bioenergía, ICAITI, Guatemala, 1983.
63. Shuler, M.L., Utilization and Recycle of Agricultural Wastes and Residues, C.R.C. Press Inc., Boca Raton, Florida, USA, 1975.
64. Solis, A., Aprovechamiento Integral de los Derivados de la Caña de Azúcar con Fines Energéticos, Pecuario e Industrial, Tesis profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F., 1985.
65. Spencer, G.L. et al., Cane Sugar Handbook, 9th Edition, John Wiley and Sons, 1964.
66. SEMIP, Balances Energéticos 1982-1983-1984-1985, México, D.F., años correspondientes.
67. S.R.I. International, Biomass Energy: A Business Opportunities Program, Vol.2, 1982.
68. TU.C.C. Effect of Cane Burning on Syrup Properties and Sugar Quality, International Sugar, 77, 914, p.p.38.
69. UAM, Seminario sobre uso eficiente de energía en hornos industriales, México, D.F., 1986.
70. Van Wylen, et al., Termodinámica, John Wiley and Sons, 3th edition, 1978.
71. Watson, J.A., The reduction of sugar loss in cane sugar refinery., 15th Congr. ISSCT, Liverpool, U.K., 1974.

APENDICE 1

INTERVALO DE FRECUENCIA DE POT. INSTALADA

ANO: 1959

INTERVALO: 0 < HP < 1000

FRECUENCIA: 16

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
200.00	15.82	303.36	178.07
650.00	197.15	79.13	46.45
705.00	181.82	93.06	54.63
700.00	334.30	50.25	29.50
900.00	470.10	45.95	26.97
950.00	107.94	211.24	124.00
625.00	106.12	141.35	82.97
800.00	45.00	426.67	250.45
605.00	271.19	53.54	31.43
900.00	240.00	90.00	52.83
400.00	51.61	186.00	109.18
400.00	4.62	2080.00	1220.96
150.00	7.97	451.76	265.19
400.00	8.93	1075.20	631.14
200.00	6.00	800.00	469.60
760.00	400.00	45.60	26.77

INTERVALO: 1001 < HP < 2000

FRECUENCIA: 25

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
1175.00	110.00	256.36	150.49
1175.00	26.81	1051.69	617.34
1080.00	199.20	130.12	76.38
1250.00	350.94	85.48	50.18
1525.00	465.60	78.61	46.14
1075.00	305.04	84.58	49.65
1065.00	248.80	102.73	60.31
1440.00	305.15	113.25	66.48
2000.00	646.55	74.24	43.58
1962.00	572.31	82.28	48.30

1580.00	637.88	59.45	34.90
1159.00	853.33	32.60	19.13
2000.00	740.30	64.84	38.06
1340.00	607.55	52.93	31.07
1040.00	871.43	28.64	16.81
1280.00	566.15	54.26	31.85
1300.00	385.92	80.85	47.46
1650.00	635.42	62.32	36.58
2000.00	684.62	70.11	41.16
1650.00	738.89	53.59	31.46
1295.00	386.96	80.32	47.15
1195.00	365.57	78.45	46.05
1490.00	385.45	92.77	54.46
1200.00	342.11	84.18	49.42
1200.00	137.84	208.94	122.65

INTERVALO: 2001 < HP < 3000

FRECUENCIA: 13

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
2320.00	848.57	65.62	38.52
2100.00	593.51	84.92	49.85
2751.00	1217.39	54.23	31.84
2700.00	1038.94	62.37	36.61
2300.00	453.58	121.70	71.44
2600.00	1465.79	42.57	24.99
2800.00	865.38	77.65	45.58
2750.00	717.81	91.95	53.97
2794.00	1068.12	62.78	36.85
2400.00	565.82	101.80	59.76
2900.00	1120.00	62.14	36.48
2500.00	1347.83	44.52	26.13
2900.00	789.55	88.15	51.74

INTERVALO: 3001 < HP < 4000

FRECUENCIA: 7

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
3600.00	1256.76	68.75	40.36
3150.00	1155.84	65.41	38.39
4000.00	2284.00	42.03	24.67
3564.00	1049.18	81.53	47.86
4000.00	2838.89	33.82	19.85
3180.00	1281.08	59.57	34.97
3365.00	771.01	104.75	61.49

INTERVALO: 4001 < HP < 5000

FRECUENCIA: 7

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
4140.00	950.23	104.56	61.38
4800.00	3832.94	30.06	17.64
4244.00	974.60	104.51	61.35
4950.00	1441.77	82.40	48.37
4600.00	3070.37	35.96	21.11
5000.00	3355.84	35.76	20.99
4340.00	1806.15	57.67	33.85

INTERVALO: 5001 < HP < 10000

FRECUENCIA: 6

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
5025.00	2020.14	59.70	35.04
5700.00	3491.00	39.19	23.00
8782.00	2944.44	71.58	42.02
5330.00	3943.94	32.43	19.04
5710.00	3080.95	44.48	26.11
6265.00	2163.46	69.50	40.80

INTERVALO: 10001 < HP < 40000

FRECUENCIA: 1

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
13630.00	9875.00	33.13	19.45

INTERVALO DE FRECUENCIA DE POT. INSTALADA

AÑO: 1969

INTERVALO: 0 < HP < 1000

FRECUENCIA: 2

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
675.00	266.15	60.87	37.21
600.00	83.33	172.80	105.63

INTERVALO: 1001 < HP < 2000

FRECUENCIA: 10

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
1500.00	514.06	70.03	42.81
1350.00	546.97	59.24	36.21
1124.00	427.03	63.17	38.62
1325.00	540.98	58.78	35.93
2000.00	696.67	68.90	42.12
1030.00	218.33	113.22	69.21
1390.00	764.86	43.62	26.66
1514.00	480.88	75.56	46.19
1040.00	502.70	49.65	30.35
1630.00	644.44	60.70	37.11

INTERVALO: 2001 < HP < 3000

FRECUENCIA: 12

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
2530.00	1276.71	47.56	29.07
2850.00	941.89	72.62	44.39
2450.00	460.81	127.60	78.00
2350.00	741.79	76.03	46.48
2450.00	1629.82	36.08	22.05
2200.00	2045.83	25.81	15.78
2470.00	1926.83	30.77	18.81
2980.00	1756.98	40.71	24.88
3000.00	1921.79	37.46	22.90
2200.00	1039.06	50.82	31.06

2130.00	1039.39	49.18	30.07
2250.00	966.15	55.89	34.1

INTERVALO: 3001 < HP < 4000
 FRECUENCIA: 8

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
3600.00	2526.03	34.20	20.91
3486.00	3982.61	21.01	12.84
3350.00	1779.03	45.19	27.63
3500.00	741.67	113.26	69.23
3380.00	1301.52	62.33	38.10
3025.00	1331.82	54.51	33.32
3700.00	1105.17	80.35	49.12
3250.00	1900.00	41.05	25.10

INTERVALO: 4001 < HP < 5000
 FRECUENCIA: 9

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
4362.00	1835.82	57.03	34.86
4200.00	2102.94	47.93	29.30
4650.00	908.00	122.91	75.13
4500.00	1427.08	75.68	46.26
4800.00	2895.00	39.79	24.33
4070.00	1524.29	64.08	39.17
4400.00	2659.38	39.71	24.27
4603.00	1996.77	55.33	33.82
4560.00	2355.77	46.46	28.40

INTERVALO: 5001 < HP < 10000
 FRECUENCIA: 15

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
5310.00	1546.88	82.39	50.36
5063.00	1977.92	61.43	37.55
5170.00	1527.12	81.25	49.67
8800.00	4777.38	44.21	27.02
6300.00	5340.66	28.31	17.31
6000.00	1611.36	89.37	54.63
6700.00	4165.71	38.60	23.60
6229.00	2416.18	61.87	37.82
5905.00	3583.13	39.55	24.18
5100.00	2422.03	50.54	30.89
5400.00	5041.46	25.71	15.71
8100.00	3150.00	61.71	37.73
8140.00	2291.30	85.26	51.12

7000.00	7371.62	22.79	13.93
5200.00	1837.18	67.93	

INTERVALO: 10001 < HP < 40000

FRECUENCIA: 9

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
10500.00	3352.56	75.17	45.95
12700.00	4735.62	64.36	39.35
23550.00	8096.30	69.81	42.67
10048.00	4539.53	53.12	32.47
11000.00	2846.88	92.73	56.69
10100.00	4240.32	57.17	34.95
38660.00	14642.25	63.37	38.74
10500.00	3152.63	79.93	48.86
18714.00	6007.02	74.77	45.71

INTERVALOS DE FRECUENCIA DE POT. INSTALADA
AÑO: 1979

INTERVALO: 0 < HP < 1000
FRECUENCIA: 1

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
924.00	368.66	60.15	38.20

INTERVALO: 1001 < HP < 2000
FRECUENCIA: 10

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
1300.00	614.71	50.76	32.23
1175.00	444.74	63.41	40.26
1100.00	614.93	42.93	27.26
1700.00	1132.39	36.03	22.88
2000.00	1077.46	44.55	28.29
1780.00	562.00	76.01	48.27
1040.00	371.64	67.16	42.65
2000.00	865.38	55.47	35.22
1630.00	426.98	91.62	58.18
1527.00	268.52	136.48	86.67

INTERVALO: 2001 < HP < 3000
FRECUENCIA: 8

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
3000.00	2026.51	35.53	22.56
2700.00	1130.88	57.30	36.39
2482.00	1954.24	30.48	19.36
2380.00	1628.85	35.07	22.27
3000.00	1032.79	69.71	44.27
3000.00	1398.11	51.50	32.70
2800.00	854.05	78.68	49.96
2250.00	1626.23	33.21	21.09

INTERVALO: 3001 < HP < 4000

FRECUENCIA: 9

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
3500.00	1722.22	48.77	30.97
4000.00	2474.65	38.79	24.63
3615.00	1904.69	45.55	28.92
3384.00	1639.06	49.55	31.46
3500.00	1455.56	57.71	36.65
3500.00	2182.54	38.49	24.44
3040.00	1196.15	61.00	38.73
3250.00	1130.77	68.98	43.80
3250.00	1363.79	57.19	36.32

INTERVALO: 4001 < HP < 5000

FRECUENCIA: 11

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
4500.00	2097.01	51.50	32.70
4362.00	2676.39	39.12	24.84
4200.00	3102.86	32.49	20.63
4650.00	3340.85	33.40	21.21
4500.00	3504.29	30.82	19.57
4500.00	3243.94	33.29	21.14
5000.00	2634.29	45.55	28.93
4700.00	2060.29	54.75	34.77
5000.00	1642.55	73.06	46.39
4603.00	2324.68	47.52	30.18
4700.00	2140.00	52.71	33.47

INTERVALO: 5001 < HP < 10000

FRECUENCIA: 19

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
5077.00	3228.00	37.75	23.97
6000.00	2215.00	65.01	41.28
7800.00	4512.86	41.48	26.34
7200.00	4644.59	37.20	23.62
10000.00	7981.54	30.07	19.09
6600.00	3037.84	52.14	33.11
7500.00	1282.86	140.31	89.10
6000.00	4506.76	31.95	20.29
10000.00	3815.63	62.90	39.94
5300.00	3135.00	40.57	25.76

6000.00	2606.52	55.25	35.08
6340.00	2113.21	72.00	45.72
7500.00	4498.65	40.01	25.41
5800.00	2607.94	53.38	33.89
6000.00	2218.64	64.90	41.21
5600.00	2629.51	51.11	32.46
6070.00	3052.17	47.73	30.31
7800.00	2345.28	79.82	50.69
6060.00	3007.81	48.35	30.70

INTERVALO: 10001 < HP < 40000

FRECUENCIA: 8

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
10500.00	3135.71	80.36	51.03
16000.00	6332.81	60.64	38.50
13226.00	4351.19	72.95	46.32
16000.00	7066.67	54.34	34.51
13950.00	3679.45	90.99	57.78
10100.00	4745.71	51.08	32.43
34860.00	11023.53	75.90	48.19
18714.00	5401.89	83.14	52.80

INTERVALOS DE FRECUENCIA DE POT. INSTALADA
AÑO: 1985

INTERVALO: 0 < HP < 1000

FRECUENCIA: 0

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
------------------	---------	---------------------------	---------------------

INTERVALO: 1001 < HP < 2000

FRECUENCIA: 4

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
1983.00	641.79	74.15	41.82
1700.00	798.48	51.10	28.82
1124.00	242.31	111.33	62.79
1040.00	445.33	56.05	31.61

INTERVALO: 2001 < HP < 3000

FRECUENCIA: 5

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
2700.00	1198.72	54.06	30.49
2100.00	1308.06	38.53	21.73
2400.00	1136.54	50.68	28.58
2130.00	556.00	91.94	51.86
2700.00	1265.28	51.21	28.88

INTERVALO: 3001 < HP < 4000

FRECUENCIA: 4

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
3500.00	1145.45	73.33	41.36
3370.00	1681.33	48.10	27.13
4000.00	1748.33	54.91	30.97
3800.00	1010.00	90.30	50.93

INTERVALO: 4001 < HP < 5000
 FRECUENCIA: 8

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
4550.00	1878.31	58.14	32.79
4500.00	2405.62	44.89	25.32
4500.00	1625.30	66.45	37.48
5000.00	2487.14	48.25	27.21
4300.00	794.44	129.90	73.26
4500.00	1565.28	69.00	38.91
4040.00	1244.64	77.90	43.94
4400.00	1777.46	59.41	33.51

INTERVALO: 5001 < HP < 10000
 FRECUENCIA: 32

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
6587.00	3115.49	50.74	28.62
7500.00	3418.64	52.65	29.70
5900.00	4479.31	31.61	17.83
5500.00	2739.47	48.18	27.18
5500.00	2836.14	46.54	26.25
8000.00	3315.49	57.91	32.66
7500.00	4983.13	36.12	20.37
6480.00	2104.62	73.89	41.68
6432.00	2784.42	55.44	31.27
10000.00	5824.71	41.20	23.24
6250.00	2919.74	51.37	28.98
7500.00	4302.74	41.83	23.59
10000.00	4549.31	52.76	29.75
8400.00	4003.70	50.35	28.40
9000.00	6829.82	31.63	17.84
6000.00	3762.34	38.27	21.59
10000.00	3976.81	60.35	34.04
7200.00	4118.57	41.96	23.66
7500.00	3950.72	45.56	25.70
6500.00	2489.33	62.67	35.34
10000.00	5000.00	48.00	27.07
6400.00	3070.31	50.03	28.22
10000.00	3950.77	60.75	34.26
7555.00	3116.90	58.17	32.81
9000.00	4611.11	46.84	26.42
7800.00	2775.64	67.44	38.04
6000.00	2748.57	52.39	29.55
8800.00	2938.46	71.87	40.54
7500.00	2603.03	69.15	39.00

5200.00	2202.90	56.65	31.95
5600.00	2260.76	59.45	33.53
6072.00	2592.31	56.22	31.71

INTERVALO: 10001 < HP < 40000

FRECUENCIA: 12

HP INSTALADOS	TON/DIA	HP-HORA/TON INSTALADOS	HP-HORA/TON REAL
5600.00	2260.76	59.45	33.53
6072.00	2592.31	56.22	31.71
11000.00	1863.41	141.68	79.90
16000.00	5348.39	71.80	40.49
10026.00	3442.65	69.90	39.42
10250.00	3723.94	66.06	37.26
10500.00	8125.32	31.01	17.49
12000.00	4551.02	63.28	35.69
12950.00	3816.67	81.43	45.93
15600.00	4779.22	78.34	44.18
38000.00	14353.03	63.54	35.84
12000.00	3263.79	88.24	49.77

APENDICE 2
ZAERA 1985/1986

FACTORES QUE INCIDEN EN EL CONSUMO DE ENERGIA

Semana	Combust. por TMC	Imbibici. %	Café molido 10E+3ton	Tiempo perd.%
1	42	11	11	46
2	75	10	7	44
3	71	12	7	47
4	50	11	10	25
5	55	18	9	34
6	53	24	12	22
7	55	19	11	29
8	56	18	12	22
9	62	11	11	35
10	54	9	13	26
11	46	11	12	33
12	57	16	12	28
13	61	17	11	36
14	52	15	12	29
15	52	13	14	21
16	55	18	12	30
17	48	18	12	30
18	60	15	11	32
19	55	16	11	34
20	54	15	11	36
21	62	21	10	32
22	63	18	11	31
23	57	16	11	29
24	67	18	10	37
25	65	20	10	39
26	68	23	11	41

APENDICE 2

ZAFRA 1985/1986

FACTORES QUE INCIDEN EN EL CONSUMO DE ENERGIA

Semana	Combust. por TMC	Imbibici. %	Café molido 10E+3ton	Tiempo perd.%
1	42	11	11	46
2	75	10	7	44
3	71	12	7	47
4	50	11	10	25
5	55	18	9	34
6	53	24	12	22
7	55	19	11	29
8	56	18	12	22
9	62	11	11	35
10	54	9	13	26
11	46	11	12	33
12	57	16	12	28
13	61	17	11	36
14	52	15	12	29
15	52	13	14	21
16	55	18	12	30
17	48	18	12	30
18	60	15	11	32
19	55	16	11	34
20	54	15	11	36
21	62	21	10	32
22	63	18	11	31
23	57	16	11	29
24	67	18	10	37
25	65	20	10	39
26	68	23	11	41

APENDICE 3

CALIBRACION DE LOS QUEMADORES DE CALDERAS EN DOS CONDICIONES DE OPERACION. CALDERA No.1

Quegador No.	lit/hora (1) a 4.7 kg/cm ²	lit/hora (2) a 4.0 kg/cm ²
1	231.15	214.9
2	215.74	200.1
3	193.75	176.3
4	215.74	194.6
----	-----	-----
4	856.38	785.9

CALDERA No.2

Quegador No.	a 6.0 kg/cm ²	a 4.5 kg/cm ²
1	240.9	176.8
2	219.5	161.9
3	230.2	177.1
----	-----	-----
3	690.6	515.8

CALDERA No.3

Quegador No.	a 6.0 kg/cm ²	a 4.0 kg/cm ²
1	174.3	186.48
2	192.2	164.43
3	180.5	136.08
4	207.1	177.80
----	-----	-----
4	754.10	664.79

CALDERA No.4

Quegador No.	a 5 kg/cm ²	a 4.0 kg/cm ²
--------------	------------------------	--------------------------

1	232.4	170.5
2	249.6	212.5
3	241.0	187.2
-----	-----	-----
3	723.0	570.2

CALDERA No. 5

Quemador No.	a 6 kg/cm ²	a 4.0 kg/cm ²
1	253.2	166.3
2	257.37	169.5
3	261.51	172.0
4	257.37	169.0
-----	-----	-----
4	1024.45	676.8
Total	4053.53	3212.6

Fuente: Mediciones directas
(1) Condiciones de plena operación.
(2) Condiciones de paro.

APENDICE 4

CALIBRACION DE LA ALIMENTACION DEL BAGAZO POR HORNO

CALDERA No. 1

Horno	Apertura de la compuerta	kgb/min	kgb/hora
1	1/2	14.16	850
1	4/4	36.40	2182
1	4/4	37.10	2228
2	1/4	4.88	292.7
2	1/4	5.88	352.9
2	1/2	15.30	918.0
2	1/2	14.46	867.0
2	3/4	25.0	1500
2	3/4	20.0	1200
2	4/4	31.0	1854
2	4/4	31.0	1854
3	1/4	0.0	0.0
3	1/4	0.0	0.0
3	1/2	13.63	8.8
3	1/2	19.64	1178
3	3/4	33.80	2028
3	3/4	38.57	2314
3	4/4	94.40	5664
3	4/4	100	6000

El óptimo determinado es:

Horno	Descarga	Grado de Apert.
1	823.6	1/2
2	360.0	1/4
3	791.0	1/2
Total	1974.6	

APENDICE 4

CALIBRACION DE LA ALIMENTACION DEL BGAZO POR HORNO

CALDERA No.2

Horno No.	Apertura de la Compuerta	kgb/min	kgb/hora
1	1/4	0	0
1	1/2	14.28	857.14
1	1/2	16.70	1000
1	3/4	46.30	2777
1	3/4	60.60	3636
1	4/4	177.6	10658
1	4/4	154.7	9282
2	1/4	--	
2	1/2	--	
2	3/4	56.8	2408
2	3/4	44.8	2688
2	4/4	88.0	5280
2	4/4	76.0	4560

El óptimo determinado es:

Horno	Descarga	Grado de Aper.
1	1953.3	1/2
2	1756.0	3/4
TOTAL	3709.3	

APENDICE 4

CALIBRACION DE LA ALIMENTACION DE BAGAZO POR HORNO

CALDERA No.3

Horno	Apertura de la Compuerta	kg/min	Kg/hora
1	1/4	6.27	376
1	1/4	10.00	600
1	1/2	16.40	985
1	1/2	12.80	968
1	3/4	40.30	2418
1	3/4	34.0	2043
1	4/4	58.5	3509
1	4/4	78.6	4719
.bl			
2	1/4	20.0	1100
2	1/4	15.75	945
2	1/2	25.15	1509
2	1/2	23.63	1418
2	3/4	59.3	3557
2	3/4	60.6	3636
2	4/4	65.3	3920
3	1/4	30.6	1836
3	1/4	51.5	2091
3	1/2	60.6	3636
3	1/2	59.2	3552
3	3/4	69.7	4182
3	4/4	74.4	4464
3	4/4	80	4800

El Optimo medido es :

Horno	Descarga (kg/hora)	Grado de Aper
1	700	1/2
2	990	1/2
3	937	1/4
Total	2627	

APENDICE 4

CALIBRACION DE LA ALIMENTACION DE BAGAZO POR HORNO

CALDERA 4

Horno No.	Apertura	kg/min	kg/hora
1	1/4	3.4	204
1	1/4	3.8	228
1	1/2	6.5	390
1	1/2	6.1	366
1	3/4	45.2	2714
1	3/4	54.0	3243
1	4/4	108.8	6528
1	4/4	99.2	5952
bl.			
2	1/4	4.0	240
2	1/4	5.8	348
2	1/2	9.3	560
2	1/2	13.0	784
2	3/4	21.8	1308
2	3/4	35.7	2145
2	4/4	10.5	6336
2	4/4	10.1	6048

El óptimo medido es:

Horno	Descarga kg/hora	Grado de Apert
1	364.8	1/2
2	628.3	1/2
Total 2	993.1	

APENDICE 5

COMPOSICION DE LOS GASES DE ESCAPE EN LAS CALDERAS DEL INGENIO DE CASASANO

(% Volúmen)

Cald.No.	CO ₂	CO	O ₂	T _g	d
	(1)	(2)	(3)	°C	g(H ₂ O)
1	9	1.8	4.8	205	1.18
2	11	2.0	1.3	145	0.31
3	10	2.6	0.1	370	0.10
4	9.5	3.5	4.2	225	0.39
5	7.5	2.0	3.9	190	0.51

(1) Mediciones promedios con Orsat y Testoryt.

(2) Mediciones promedio con Orsat

(3) Mediciones promedio con Orsat

(4) T_g, temperatura de gases a la salida de
la chimenea

(5) Tiro en la cámara de combustión.

APENDICE 5

Temperatura de los hornos bagaceros (°C)*

CALDERA

Horno	1	2	3	4
1	762	926	854	850
2	880	865	812	898
3	776		831	

* Mediciones hechas con piranómetro.

APENDICE 5

Registro de Presiones Media, Estática y Total para las Calderas del Ingenio Casasano.*

Caldera No.		(Pulg. agua) (Pulg. agua) (Pulg. de agua)		
		Pt	Ps	Pv
1	Entrada (a)	4.33	2.55	1.77
	Escape (b)	2.75	2.08	0.47
2	Entrada	3.10	2.79	0.31
	Escape	2.28	2.08	0.22
3	Entrada (2 a 3)	0.27	0.15	0.12
	Entrada (4 a 3)	0.35	0.27	0.08
	Escape	0.9	0.86	0.033
4	Entrada	2.29	2.02	0.27
	Escape	2.66	1.97	0.69

* Mediciones hechas con tubo de pitot y micromanómetro

(a) Entradas de aire con tiro forzado.

(b) Salida de gases con tiro inducido

Pt=Presión total; Ps=Presión estática; Pv=Presión de velocidad.

Nota: En este caso la calderas 5 no se evalúa por no quemar bagazo.