

**UNIVERSIDAD CENTRAL  
MARTA ABREU DE LAS VILLAS  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
CENTRO UNIVERSITARIO JOSÉ MARTÍ PÉREZ  
SANCTI SPIRITUS**

**CENTRO DE ESTUDIOS DE ENERGÍA Y PROCESOS  
INDUSTRIALES**

**TITULO**

**METODOLOGÍA PARA INCREMENTAR EL APORTE DE  
ELECTRICIDAD CON BAGAZO Y ALTERNATIVA DE  
COMBUSTIBLE PARA GENERAR FUERA DE ZAFRA.**

**Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor  
en Ciencias Técnicas.**

**Autor: Prof. Aux. Ing. Osvaldo Romero Romero, MSc**

**Tutores: Prof. Tit., Ing. Rolando Alfredo Hernández León, Dr C  
Prof. Tit., Ing. Héctor Pérez de Alejo Victoria, Dr C**

**Sancti Spiritus  
2005**

EXERGO

*"Emplearse en lo estéril cuando se puede  
hacer lo útil;  
ocuparse en lo fácil cuando se tienen  
bríos para  
intentar lo difícil,  
es despojar de su dignidad al talento"*

*José Martí.*

# AGRADECIMIENTOS

# AGRADECIMIENTOS

Alguien dijo una vez que las gracias son un combustible en el motor de la vida, también se dice que precedían los banquetes y proporcionan alegría y buena voluntad, ese es el sentido de esta página para quienes han puesto un grano de arena en este trabajo.

- En primer lugar un agradecimiento especial a mis tutores, el Dr. Rolando A. Hernández León, por su agudeza para proponer el proyecto que dio lugar a esta tesis y toda su dedicación; el Dr. Héctor Pérez de Alejo Victoria, por sus enseñanzas hacia una concepción científica de cada uno de los temas tratados, ambos son profesores y amigos de muchos años.
- Al colectivo de trabajadores del CEEPI, quienes sufrieron las caídas, disfrutaron los éxitos y contribuyeron con desprendimiento en todo este trabajo, ellos fueron además quienes más me exigieron para llevarlo hasta el final.
- Al colectivo del departamento de Ingeniería Química de la facultad de Química y Farmacia de la UCLV, principales críticos científicos de este trabajo, los debates con ellos permitieron alcanzar la estructura final del mismo; además porque con muchos de ellos di mis primeros pasos en el mundo de la ingeniería química cuando fueron mis profesores de pregrado.
- A mis estudiantes, quienes contribuyeron con creatividad y dedicación a cada una de las tareas de investigación que aportaron a este trabajo.
- Al joven colectivo de relaciones internacionales del CUSS, quienes prácticamente solos han tenido que enfrentar tareas desconocidas, pero no han dudado en hacerlo y liberar parte de mi tiempo para este trabajo.
- A Lire y Pablito por haber soportado tantas horas en soledad, compartir el sacrificio, dar aliento en momentos difíciles y la ayuda necesaria para alcanzar el objetivo final.
- A los trabajadores del Central Melanio Hernández, especialmente al personal técnico y de dirección, con quienes he compartido muchas horas de trabajo y han aportado también a la realización final de este.
- A directivos y trabajadores del CUSS, muchos, muchos de ellos han aportado anónimamente a la realización de esta tesis.
- A todos los que siempre creyeron en el proyecto de caña energética y lo hicieron suyo todo el tiempo para aportar también a este trabajo, especialmente Tony, Obregón y Ermeregildo.
- A los amigos del CIEN, La Habana, por el apoyo en el diagnóstico ambiental.

A ellos y a todos los que de una forma u otra tuvieron que ver con este trabajo

**MUCHAS GRACIAS**

# DEDICATORIA

## **DEDICATORIA**

### **A MIS PADRES Y HERMANOS:**

Por haber sido el sostén permanente de toda mi vida como estudiante y profesional, y con quienes no he podido compartir en estos años de trabajo todo el tiempo que hubiese querido.

### **A LIRE Y PABLI:**

Por el importante estímulo de su eterna presencia y por la enorme deuda en tiempo de compartir y jugar que para con ellos tengo y que sé, no me exigirán pagar en toda su cuantía.

### **A MIS COMPAÑEROS DEL CEEPI:**

Por ser los primeros en apoyarme y no poner condición alguna para estimularme y exigirme; por ellos y para ellos fue una gran parte del tiempo dedicado a este trabajo.

# SÍNTESIS

## SÍNTESIS

El presente trabajo se origina a partir de la necesidad de incrementar el aprovechamiento energético del bagazo para aportar electricidad al SEN con termoeléctricas anexas a fábricas de azúcar, y la búsqueda de una alternativa para garantizar la factibilidad económica de inversiones con tecnologías modernas de cogeneración, al generar más de 7000 horas anuales. El objetivo del mismo es proponer una metodología para determinar las posibilidades de incrementar la entrega de electricidad a la red pública por fábricas de azúcar y una alternativa de combustible para generar fuera de zafra.

Para validar la metodología propuesta se estudia la fábrica Melanio Hernández y se evalúa la factibilidad tecnológica y económica de una inversión para generar electricidad todo el año, si se procesa caña energética como materia prima al terminar la zafra. Se realizan estudios de potenciales de generación, diagnóstico energético, simulación, se desarrolla un trabajo experimental para determinar las posibilidades de fermentar jugos de caña energética y se obtienen modelos de operación con la nueva materia prima, así como análisis económico de inversiones en condiciones de incertidumbre.

El trabajo demuestra la novedad científica y la validez de la metodología propuesta, ya que permite mejorar los resultados de entrega de electricidad de la fábrica al SEN y favorece inversiones en plantas de cogeneración; al mismo tiempo, hace evidente la factibilidad tecnológica del uso de la caña energética como materia prima para producir combustible y explotar plantas de cogeneración todo el año, lo que posibilita que la inversión sea atractiva y de poco riesgo.

# SUMMARY

## SUMMARY

The present work is carried out starting from the necessity to increase the energetic use of the bagasse to give electricity to the grid from thermoelectric annexed to sugar factories, and the search of an alternative to assure the economic feasibility of investments with modern technologies of cogeneration, because they generate electricity more than 7000 annual hours. The objective of this is to propose a methodology to determine the possibilities to increase the electricity supply to the public net from sugar factories and an alternative of fuel to generate outside of the sugar season.

To validate the proposed methodology is studied the sugar factory Melanio Hernández and it is evaluated the technological and economic feasibility of an investment to generate electricity all the year, if energetic sugar cane is processed by the mills as a new raw matter. They are carried out studies of generation potentials, energetic diagnostic, simulation; it is developed an experimental work to determine the possibilities to ferment juices of energetic sugar cane and are obtained operation models with the new raw matter, as well as an economic analysis of the investments under conditions of uncertainty.

The work demonstrates the scientific novelty and the validity of the proposed methodology, since it allows to improve the results of electricity supply to the net from the sugar factory and it favors the investments of cogeneration plants; at the same time, he makes evident the technological feasibility of the use of the energetic sugar cane as raw matter to produce fuel and to exploit cogeneration plants all the year, that facilitates that the investment is attractive economically and of little risk.

# INTRODUCCIÓN

## Introducción

La situación energética mundial, el aumento de los precios del petróleo y la contaminación del medio ambiente han hecho que en los últimos años el mundo preste mayor atención al uso de las fuentes renovables de energía, desarrollándose diversas y modernas tecnologías para explotar estas fuentes energéticas.

El uso de las fuentes renovables de energía puede remontarse a la época del descubrimiento del fuego, pero el desarrollo de la utilización de los combustibles fósiles dio lugar a una disminución de su uso a inicios del siglo XX [Goz 96] y [Rom 97]. A partir de los años 70 de ese propio siglo, se comienza a producir la crisis de los combustibles, lo que para muchos autores fue realmente una crisis de los precios de los mismos [Rom 97]. Un poco más adelante en el tiempo, finales de los años 80 principio de los 90, sobreviene el derrumbe del campo socialista europeo.

Todo esto tuvo una elevada repercusión en la crisis económica en que se sumió Cuba a partir de esos años; como resultado de la cual la disponibilidad energética del país se vio disminuida de una manera vertiginosa, no solo por la carencia misma de fuentes de energía, sino también por el déficit de recursos para la reposición y modernización de las plantas termoeléctricas, lo que provocó severas afectaciones a la producción de energía eléctrica. Esto se reflejó en la disminución de la producción de bienes de consumo, ya que algunas plantas de producción debieron cerrar, fue necesario realizar cortes del servicio eléctrico a la población, en muchos casos hizo necesaria la realización de esfuerzos adicionales para garantizar el servicio eléctrico sobre todo a los hospitales y otros centros priorizados.

Ciertamente, estas afectaciones alcanzaron valores elevados, debido a la dependencia petrolera en que se ha desarrollado la economía cubana, provocada esta en primer lugar, por la no-existencia en Cuba de otros combustibles fósiles como el carbón o el propio gas natural y en segundo lugar, por una baja utilización de las tecnologías para el aprovechamiento de las fuentes renovables, alguna de las cuales como la solar y la eólica necesitan inversiones muy altas, a veces inaccesibles para países subdesarrollados. Otras como las biomásas no se aprovechan aún de forma eficiente y en todo su potencial. Lo anterior provoca que la dirección del país tenga que gastar grandes sumas de dinero para adquirir el combustible necesario en el mercado mundial, lo que a su vez se ve afectado por los cambios constantes de los precios de los mismos en este mercado. Tal es así que en el año 1996 Cuba se vio obligada a gastar 100 millones de dólares más para adquirir la misma cantidad de combustible que se había planificado a principios de año y en el 2000 se gastaron 500 millones más para adquirir la misma cantidad del año 99, según se reporta [May 97] y [Cur 01].

En realidad, en Cuba se han trazado estrategias para disminuir los consumos de combustibles, lo que posibilitó que a partir de la mitad de los años 90 del siglo XX la economía cubana comenzara un proceso de reanimación anual consumiendo prácticamente la mitad y menos del combustible que se gastaba en los años 80. Sin embargo, hay que decir que los esfuerzos realizados hasta el año 2003 han permitido que en Cuba se genere actualmente cerca del 100 % de la energía eléctrica con recursos nacionales, pero se mantiene una disponibilidad deficiente de generación eléctrica y no se ha producido un elevado impacto en la disminución de combustibles fósiles en este sentido; solo se ha desarrollado el uso de los paneles fotovoltaicos para suministrar energía a algunos inmuebles separados de las líneas eléctricas del servicio público, mientras que existe instalado un solo parque eólico compuesto por dos aerogeneradores en la isla de Turiguanó, al norte de Ciego de Ávila, por lo que sigue siendo una necesidad el aumento del aprovechamiento de las fuentes renovables de energía en el país. Es sabido que la principal reserva energética renovable de Cuba está en la caña de azúcar, ya que de una zafra, como las desarrolladas hasta 1990 y en las que se producían entre 6 y 8 millones de toneladas de azúcar, el país podía obtener en forma de bagazo una cantidad aproximada a 3,5 millones de toneladas equivalente a petróleo y, si se tenían en cuenta otros residuos este potencial llegaba hasta los 6 millones de toneladas equivalentes a petróleo según datos reportados [Gru 95]. Si las producciones de azúcar se mantienen en los 4 millones de toneladas métricas, después de las transformaciones en la estructura productiva del Ministerio del Azúcar, MINAZ, el potencial energético de la biomasa cañera que se producirá anualmente será de alrededor de 3 millones de toneladas equivalente a petróleo.

A mediados de los años 90 la Unión Nacional Eléctrica, UNE, propuso un programa de desarrollo en el que se realizaba un análisis del crecimiento estimado del consumo de energía en el país hasta el 2005, así como de la potencia instalada y las medidas que serían necesarias para dar respuesta a la demanda estimada; en esta propuesta se planteaba incrementar en 100 MW la potencia instalada utilizando bagazo y residuos agrícolas de la cosecha cañera, RAC [UNE 95] y [Gru 95]. El logro de este objetivo no ha sido posible hasta hoy, a pesar de inversiones realizadas en el área energética de la producción azucarera cubana, pero se han mantenido en muchos casos las presiones del vapor a generar o se hicieron ligeros incrementos en la presión del vapor.

Esta situación se presenta en Cuba a pesar de que el año 2000 se inició con una potencia instalada en el mundo de más de 1000 MW para cogeneración con bagazo en proyectos comerciales que incluyen una elevación considerable de la presión del vapor y el uso de turbinas de alta eficiencia para la generación de energía eléctrica. Otros casi 500 MW estaban

en fase de montaje como se plantea [DeL 00]. Países como Brasil, China, Australia y Cuba no han podido desarrollar el uso de la cogeneración en la industria azucarera debido a políticas regulatorias, falta de financiamiento e insuficiente base de conocimientos para el uso de estas tecnologías.

A todas estas causas se debe sumar una muy importante y que está referida, a que estas tecnologías por los altos valores de inversiones que requieren no se pagarían si solo trabajan durante zafras cortas, entendiéndose hasta 150 días, por lo que su instalación requiere disponer de un combustible alternativo para explotar la tecnología por 300 días (7000 h) o más anuales. En el caso de Cuba, aunque se han estudiado algunas alternativas de combustible para generar electricidad después de la zafra, todas las estudiadas presentan limitaciones de diferentes tipos para su aplicación industrial y no existe una alternativa que sea viable tecnológica y económicamente.

Los países de mayor desarrollo en el uso de la tecnología de cogeneración con bagazo, como Reunión y Hawaii, utilizan un combustible fósil al terminar la zafra y generan valores entre 90 y 160 kWh / tc, de los que el 60 % como promedio es a partir de bagazo; pero en el caso de Cuba, la tecnología instalada y las condiciones de operación permiten que la generación actual esté en el orden de los 25 kWh/tc [Kin 91], [Riv 91], [Vald 96] y [Rom 97].

Para un país como Cuba, el uso de tecnologías para aprovechar el potencial energético del bagazo debe permitir incrementar el índice de generación de electricidad por tonelada de caña procesada, pero en primer lugar debe posibilitar incrementar la entrega neta de energía eléctrica al Sistema Electro Energético Nacional (SEN); por lo cual es necesario analizar tanto la generación como el uso de la energía en la fábrica, de manera tal que se logre incrementar la entrega neta al SEN.

En este contexto, a pesar de que se han propuesto y demostrado varias herramientas para el estudio de los sistemas termoenergéticos azucareros, STA, no existe una metodología de análisis que permita realizar un estudio profundo en una fábrica de azúcar para incrementar la cantidad de energía eléctrica que se puede entregar al SEN y producir una transformación integral en la concepción de generación y uso de la energía que cree las bases para saltos tecnológicos superiores, dirigidos a alcanzar los máximos valores posibles de generación y venta de energía eléctrica y asegurar además por esta vía una mayor diversificación e integración de las producciones de azúcar y derivados.

Lo anterior permitió definir como **Problema Científico** que, la falta de una metodología para elevar la entrega de electricidad al SEN y de una nueva alternativa de combustible para generar energía eléctrica después de la zafra, limitan las posibilidades de incrementar la

generación eléctrica, como alternativa y soporte de la diversificación en la industria azucarera, en un marco ambiental favorable.

Por lo que el **Objetivo General** del presente trabajo es desarrollar una metodología de análisis novedosa, que permita establecer las vías y los métodos para incrementar la entrega de energía eléctrica al SEN y demostrar la factibilidad tecnológica y económica de una nueva variante de combustible para generar energía eléctrica al terminar la zafra en centrales azucareros integrados a producciones de derivados.

Para dar cumplimiento a este objetivo se desarrollaron los siguientes **Objetivos específicos**.

1. Proponer una metodología para incrementar la entrega de electricidad al SEN, basada en el análisis sistémico de procesos.
2. Aplicar la metodología a un caso específico.
3. Proponer una nueva variante de combustible para generar energía eléctrica al terminar la zafra y demostrar la factibilidad tecnológica y económica de su utilización.

Por lo que se planteó como **Hipótesis** que, si se propone y valida una metodología para elevar la entrega de electricidad al SEN y una nueva alternativa de combustible para generar energía eléctrica después de la zafra, aumentarán las posibilidades de incrementar la generación eléctrica como alternativa y soporte de la diversificación en la industria azucarera en un marco ambiental favorable.

El **Objeto de Estudio** son las fábricas de azúcar que decidan incrementar sustancialmente la entrega de electricidad al SEN y el **Campo de Acción** lo es la generación, el consumo y la entrega de energía en las mismas.

En el trabajo se desarrolla y valida una metodología basada en el análisis sistémico de procesos, que integra de forma armónica y lógica varias herramientas automatizadas y procedimientos de cálculo para el análisis de los sistemas termoenergéticos azucareros y otras para el análisis económico de inversiones; además se realiza un trabajo de investigación hasta el nivel industrial para validar las posibilidades tecnológicas de una nueva materia prima, que asegure el combustible para continuar la generación de electricidad después de la zafra. En la realización del mismo se utilizan métodos teóricos y empíricos, destacándose el método hipotético deductivo, el dialéctico, la experimentación, la simulación, la medición y la observación. En su ejecución se realizan balances de masa, de energía y exergía, así como análisis económicos y de optimización.

**En correspondencia con el trabajo el autor defiende los siguientes aportes.**

1. Una metodología basada en el análisis sistémico de procesos, que integra herramientas automatizadas cubanas para la simulación y análisis de los STA y procedimientos de

cálculo, que posibilitan proponer alternativas y establecer las vías y métodos para incrementar la entrega de electricidad al SEN.

2. La caña energética como una alternativa para producir combustible y generar energía eléctrica después de la zafra, así como la propuesta sobre cómo organizar la operación anual de una fábrica que procesa esta materia prima al terminar la zafra azucarera para incrementar significativamente la generación de electricidad. Esto implica la integración material y energética todo el año de fábricas de azúcar y derivados. Se precisa que no siempre es rentable producir electricidad todo el año solo con caña energética, ya que es necesario producir azúcar un período de tiempo y se optimizan los períodos de la operación anual.
3. Nuevos conocimientos sobre la utilización de caña energética, dado por:
  - Comportamiento comparativo de los medios de transporte, el TANDEM y las calderas cuando se procesa caña energética y azucarera, incluido un modelo matemático comparativo de la humedad del bagazo y la eficiencia de las calderas.
  - Comparación del valor calórico del bagazo de caña energética, con el bagazo de caña azucarera, cosechada de forma típica e integralmente.
4. Una alternativa para disminuir los principales inconvenientes tecnológicos al utilizar jugo de caña energética mezclado con miel final como sustrato en la fermentación alcohólica.
5. Un diagnóstico comparativo de las emisiones de gases de una planta de cogeneración con turbinas de extracción condensación de una fábrica de azúcar, con las de una termoeléctrica convencional.
6. Una profundización en el análisis de factibilidad económica de inversiones para cogenerar en una fábrica de azúcar, que incluye una solución para estudiar la sensibilidad económica de la combinación de diversas variables mediante el empleo de una matriz de diseño experimental y la determinación del perfil de riesgo.

#### **Novedad científica del trabajo:**

1. La metodología desarrollada y la integración de herramientas de análisis de procesos para la simulación y análisis de los STA y procedimientos de cálculo para determinar las mejores alternativas cuando se decide elevar la entrega de electricidad al SEN.
2. Nuevos conocimientos sobre la utilización de caña energética, dado por:
  - a. Comportamiento comparativo de los medios de transporte, el TANDEM y las calderas cuando se procesa caña energética y azucarera, incluido un modelo

matemático comparativo de la humedad del bagazo y la eficiencia de las calderas.

- b. Comparación del valor calórico del bagazo de caña energética, con el bagazo de caña azucarera, cosechada de forma típica e integralmente.
3. La propuesta para diferenciar y optimizar los períodos de operación en una fábrica de azúcar integrada a producción de alcohol que genera electricidad después de la zafra, con caña energética.
4. Una alternativa para disminuir los principales inconvenientes tecnológicos al utilizar jugo de caña energética mezclado con miel final como sustrato en la fermentación alcohólica.

# CAPITULO I

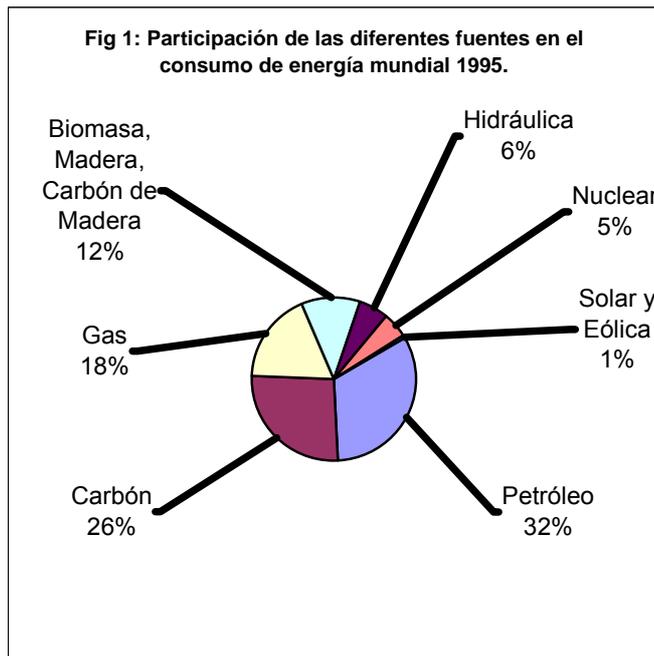
## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 1.1 Situación energética mundial.

A partir de los años 70 del siglo XX se produce en el ámbito mundial lo que se conoce como la crisis de los combustibles, la cual se ha manifestado a través de un incremento de los precios de los combustibles fósiles y ha estado motivada entre otras cosas, por el conocimiento de clientes y suministradores de que las reservas mundiales de estos combustibles son limitadas. [Tur 93] escribió que estas reservas alcanzarían solo para algo más de 300 años y recientemente [UPM 97] reporta que las reservas mundiales de petróleo son de poco más de 1 billón de barriles y el consumo diario es de alrededor de 63 millones, por lo que la relación reserva / demanda prevé una durabilidad de 44 años. El 66 % de estas reservas están localizadas en el Medio Oriente. [Ann 1] revela datos similares y afirma que con los niveles de incremento de la extracción de 1997, de un 2 % anual, estas reservas serían suficientes solo hasta el 2026; pero que si se produjera una disminución del 2 % de la extracción podrían alcanzar hasta el 2078, aproximadamente. Sin embargo, el Gas natural tendría reservas para 65 años, según los niveles actuales de explotación de acuerdo con estos autores, mientras el carbón tendría una duración de 220 años.

Por otra parte, problemas a gran escala como son el efecto invernadero y las lluvias ácidas tienen como causantes principales las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y nitrógeno (NO<sub>x</sub>) que se producen al quemar combustibles fósiles [Goz 96], [Rom 97]. Pese a las severas restricciones, especialmente en Japón y la Comunidad Europea, para regular las emisiones de estos gases y los incrementos de eficiencia con el uso del ciclo combinado, no se ha logrado disminuir sensiblemente las afectaciones ambientales existentes [Smi 95] y [Eur 95]. Esto constituye otro elemento importante dentro de esta crisis, ya que la necesidad de buscar nuevas alternativas energéticas está basada no solo en las pocas reservas de combustibles fósiles de que se dispone, sino también, en la necesidad de disminuir el impacto ambiental negativo de la generación de energía a partir de este tipo de combustible.

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta la humanidad está referido a la producción de energía por vías limpias, con bajo impacto sobre el medio ambiente. En contraposición a eso el consumo actual de energía en el mundo es una cantidad equivalente a 13 650 millones de toneladas de carbón anuales, la distribución porcentual de las diferentes fuentes energéticas se puede observar en la [figura 1](#).



Fuente: [Sch 01]

Según [UPM 97] esta situación se agravó en 1996 donde el carbón representó un 27 %, el petróleo un 40 % y el gas un 25 %. Este trabajo señala también que a largo plazo existirá un debilitamiento de la demanda total que se estima por algunas instituciones internacionales entre un 1,7 y 2,1 % hasta el 2010. En cuanto a las tendencias evolutivas del entorno energético, se prevé según la propia fuente un incremento de la participación del gas, la continuidad de la participación del petróleo y el carbón, una disminución de la participación de la energía nuclear y un incremento del aporte de las fuentes renovables de energía, por lo que se necesita contar con herramientas para el desarrollo de proyectos con estos fines. [Tor 02] coincide con el autor en tal sentido y refiere cómo los últimos estudios del caso cubano indican la necesidad de una total reconversión del esquema energético para el 2030.

[Sch 01] ofrece una valoración en los cambios de concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de 1960 a 1995 medidos en Hawai, la que se incrementó en ese período de 315 a 360 ppm y más adelante muestra el gráfico que relaciona el incremento de la temperatura ambiente con la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico e insiste en que el problema del cambio climático está en los puntos de trabajos de muchos investigadores y políticos del mundo actual, aunque los problemas de los cambios de la atmósfera y su relación con los cambios climáticos están siendo minimizados aún hoy por algunas personas muy influyentes, entre ellas lamentablemente el actual presidente de los Estados Unidos de América, George W. Bush. Para la humanidad, el camino hacia el ahorro de energía y la disminución del impacto ambiental por la generación energética debe conducirse a través de los siguientes elementos.

1. Elevar la eficiencia de las termoeléctricas.
2. Trabajar por una mayor eficiencia en el uso final de la energía.
3. Utilizar tecnologías que ahorren energía.
4. Incrementar el uso de la cogeneración y la integración de los procesos.
5. Producir energía a partir de fuentes renovables: hidráulica, solar, eólica y biomasa.

Los dos primeros serían de relativamente fácil aplicación, ya que estos aspectos se pueden lograr trabajando con los hombres vinculados a la generación y uso de la energía a través de métodos de gestión que permitan alcanzar mejores resultados y sin grandes inversiones; el uso de tecnologías ahorradoras, pasa sin embargo por limitaciones en cuanto a falta de financiamiento para adquirirlas; en el caso de la cogeneración se necesita también de inversiones, en tanto la cogeneración con fuentes renovables aporta un mayor impacto sobre la economía de los países y los empresarios, así como sobre el medio ambiente.

La producción de energía a partir de fuentes renovables, sin embargo, debe ser analizada con mayor profundidad, ya que la energía hidráulica tiene un potencial limitado y su desarrollo debe ser tenido en cuenta pero no puede aportar mucho a la solución del problema; el uso de la energía solar es técnicamente posible, pero esas tecnologías son aún muy caras, si se desea sustituir cantidades apreciables de combustibles en la generación eléctrica; de otro lado, el uso de la energía del viento ha tenido un determinado incremento sobre todo en países desarrollados y lo va a seguir teniendo. Según [Sch 01] en Alemania por ejemplo, existe una potencia instalada con turbinas de viento hasta el año 2000 de más de 5000 MW y se aspira a una potencia de 25 000 MW en el 2010; sin embargo, está limitado también por los potenciales de los vientos que existen en las diferentes regiones y por el precio de adquisición de las tecnologías.

La biomasa como fuente de energía renovable parece tener junto a la energía eólica un elevado peso en los potenciales existentes, aunque se requiere el uso de grandes áreas y los medios de transporte necesarios, debiéndose señalar además, que el incremento de la población mundial requiere de mayores áreas para la producción de alimentos, lo que limita la disponibilidad de suelos para la producción de biomasa.

La caña de azúcar es una excepción, ya que la producción combinada de azúcar y energía podría ser el mejor ejemplo de utilización de la biomasa para la generación de energía, sin competir con la producción de alimentos. Según [Sch 01], para una producción mundial de más de 100 millones de toneladas de azúcar por año, se necesitan cerca de 1000 millones de toneladas de caña, de cuyo procesamiento se obtienen cerca de 300 millones de toneladas de bagazo; este bagazo tiene un valor calórico húmedo de alrededor de 8000 kJ/kg, en un

rango de humedad entre 45 y 55 %. Significaría entonces alrededor de 82 millones de toneladas de carbón equivalente, lo que representaría un 0,6 % del consumo mundial de carbón equivalente, que como se señaló anteriormente, es de 13 650 millones de toneladas anuales, por lo que visto a ese nivel la biomasa cañera no parece tener una gran importancia.

En su análisis [Sch 01] considera que los grandes productores de azúcar como India, Brasil, Australia y Sudáfrica, son países con muchas disponibilidades de combustibles fósiles por lo que para ellos la producción de energía a partir del bagazo no posee un significado especial, El autor considera que este punto de vista debe analizarse de una forma diferente, ya que los problemas energéticos y medioambientales no pueden ser observados puntualmente y de otra parte, para los países productores de petróleo los posibles ahorros de energía se podrían convertir en mayores exportaciones. En este sentido [Win 01], [Bak 00], [Gop 97] y [Osa 00] hacen referencias a los esfuerzos de la India, Brasil y Australia en el desarrollo del uso del bagazo como fuente energética, en ellos se presentan diferentes ejemplos y se declara que para Brasil el uso del bagazo como combustible podría significar cubrir el 10 % de las necesidades energéticas.

El propio [Sch 01] reconoce el significado que para islas como Cuba, Mauricio y Reunión tiene el uso de la cogeneración en la industria azucarera a partir del bagazo como combustible. Este tema en el caso particular de Cuba será analizado más adelante.

En resumen, existe consenso entre varios autores de que la disponibilidad de combustibles fósiles es limitada y que existen problemas globales que están vinculados al uso de estos; en contraposición, la distribución porcentual de las principales fuentes energéticas que se utilizan para cubrir la demanda mundial muestra una amplia mayoría de los combustibles fósiles. Dentro de las vías con que cuenta la humanidad para aliviar los problemas energéticos y ambientales, está un mayor aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, dentro de las que destaca el uso de la biomasa para la cogeneración. De manera muy especial el uso de la biomasa cañera con estos fines aunque a nivel mundial no tendría un alto impacto en la solución del problema, su utilización no compite con la producción de alimentos y para Cuba puede tener una elevada repercusión en su economía y su balance energético.

## **1.2 Situación energética cubana.**

En el desarrollo de la esfera energética en Cuba se destacan por [Ann 2] tres etapas fundamentales: la primera hasta 1959 caracterizada por una baja potencia instalada (397 MW) y el suministro de energía a solo el 56 % de la población; la segunda etapa hasta 1989

caracterizada por un sostenido desarrollo que permitió un incremento de la capacidad instalada hasta 3 083 MW y un suministro de energía a través del SEN al 95 % de la población. Esta última se caracterizó además por un suministro estable de combustible por parte de los países del entonces campo socialista de Europa. Mientras tanto, la tercera etapa se extiende hasta hoy y se caracteriza por un insuficiente suministro de combustible, esto ha llevado al país a la búsqueda de alternativas para una mayor independencia energética y se expresa en el Programa de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía del Gobierno Revolucionario, aprobado en 1993.

Los esfuerzos de independencia energética llevaron a la necesaria utilización del petróleo crudo cubano, el que posee un elevado contenido de azufre, cenizas y alta viscosidad; los problemas de calidad de este combustible y la falta de repuestos para las plantas térmicas agravaron la situación energética del país en la mitad de los años 90 y aun hoy son evidentes. A partir de entonces se trabaja en un proceso de modernización de estas plantas para poder asimilar el crudo cubano sin afectar la disponibilidad de las mismas; esto ha llevado a que en la actualidad se alcance cerca del 100 % de la generación energética a partir de este combustible, pero este autor coincide con [Tor 02], de que se avizoran nuevas amenazas a esa viabilidad debido a la contaminación por azufre y el carácter no renovable del crudo cubano, así como que la vida útil de las actuales plantas está llegando a sus finales.

Sin embargo; se conoce que la producción de bagazo en zafras cubanas llegó a ser de hasta 20,5 millones de toneladas y unos 4 millones de RAC (paja, cogollo y hojas), aunque a partir de la campaña 2002 - 2003 estos valores deben mantenerse alrededor de la mitad como es conocido por todos. Hasta la zafra del 2002 este sector consumía alrededor de 15 millones de toneladas de bagazo para cubrir solamente el 74 % de su demanda energética, esto evidencia que aunque la principal reserva energética del país está en la caña de azúcar, su aprovechamiento actual no es suficiente ni para cubrir la demanda de la industria azucarera.

Es conocido que las reservas de petróleo crudo cubano son limitadas también. A pesar de lo reportado por [Ann 2] de que la producción de este combustible no superaría la cifra de 1,4 millones de toneladas anuales, se conoce que en la actualidad se han alcanzado niveles de extracción anuales de alrededor de 4 millones de toneladas y en el 2005 debe superar los 4,5 millones, según reporta [CuE 01]. De igual forma, la utilización de la hidroenergía es también limitada y de un potencial máximo de 650 MW solo existen instalados alrededor de 55 MW. Al mismo tiempo, para el aprovechamiento de la energía eólica se realizan en Cuba estudios de potenciales y solo existen instalados dos aerogeneradores de 225 kW en la isla de Turiguanó. Por otra parte, los costos de las tecnologías para utilizar la energía solar son aún

muy altos, como para sustituir grandes cantidades de combustibles en la generación eléctrica, aunque su utilización es factible para el suministro descentralizado de energía a regiones aisladas.

Todo lo anterior implica que en Cuba es una necesidad que a mediano plazo se pueda satisfacer con bagazo toda la demanda energética del Ministerio del Azúcar y a largo plazo que esta industria pase a ser un suministrador del SEN, que permita producir reducciones considerables del consumo de combustibles fósiles. Para lograr estos objetivos se hace necesario realizar estudios profundos de cada una de las plantas y examinar los potenciales de cogeneración existentes en cada una, evaluando no solo posibilidades de nuevas tecnologías, sino también cómo entregar mayor cantidad de energía al SEN con el equipamiento instalado.

Por otra parte según [Cur 01] la segunda fuente de biomasa en Cuba es la obtenida de la explotación forestal, el área boscosa es de casi 3 millones de hectáreas y el potencial de producción se estima en 3 millones de metros cúbicos. El uso de esta biomasa alcanzó en 1990 la cantidad de 1,32 millones de metros cúbicos de leña y 63 mil toneladas de carbón, fundamentalmente para la cocción de alimentos y a partir de 1992 ganó aún más en importancia, pero su uso para la generación de energía eléctrica es solamente de interés para el suministro en zonas aisladas o como complemento en caso de plantas de cogeneración de la industria azucarera.

En resumen, el desarrollo del sector energético en Cuba posibilitó una amplia electrificación del país llegando a cubrir un 95 % de la población, pero estuvo caracterizado por la posibilidad de adquirir los combustibles de los países socialistas y por una elevada dependencia del consumo de petróleo, por lo que los cambios en el entorno energético internacional imponen la necesidad de un desarrollo innovador y cambios renovadores en la generación de energía en el país.

Por otra parte, es opinión de la mayoría de los autores, que el bagazo de caña es la principal reserva energética renovable cubana y en la actualidad su utilización no permite cubrir toda la demanda de la industria azucarera; mientras la mayoría de los trabajos sobre este tema indican que las demás fuentes de energías renovables no pueden contribuir aún a una disminución apreciable del consumo de petróleo para el suministro de electricidad en Cuba, por lo que para el país se plantea como una necesidad que la industria azucarera dé pasos hacia el cubrimiento de su demanda y hacia la generación de excedentes de electricidad para entregar al SEN como vía para independizar la base energética cubana del consumo de petróleo.

### **1.3 Cogeneración.**

La cogeneración es definida mayoritariamente como la producción conjunta de dos tipos de energías a partir de una misma fuente energética [CON 95A], [HerL 92], [Cab 96], [Aco 95], [Nic 00]. Basado en lo anterior se puede plantear que en la industria azucarera desde el surgimiento de las máquinas de vapor se ha cogenerado, aunque en la actualidad hablar de cogeneración implica cambios tecnológicos que posibiliten entregar electricidad a las líneas de distribución públicas; con bagazo el uso de esta tecnología significa disminuir además las emisiones al medio ambiente por tratarse de una fuente renovable [Rom 97], [Rom 00].

#### **1.4 Situación mundial de la cogeneración.**

La cogeneración ha sido utilizada por los industriales desde 1905; sin embargo, no fue hasta la crisis de los precios de los combustibles fósiles de los años 70 que se comenzó a trabajar en el mundo para implementar mayor cantidad de esquemas que entreguen energía eléctrica a la Red pública, ya que se logran ahorros de energía primaria, sustitución de combustibles fósiles por otros y estos esfuerzos han permitido la aparición de una nueva oferta de equipamiento eléctrico alternativo, según reportan varios autores [CON 95A], [Kin 91], [USA 94], [Rom 01], [Mor 04]. El desarrollo de estas tecnologías en Europa ha sido ampliamente difundido por varios autores [Gue 92], [Cel 92], [Bro 92] y [DeJ 92] que han reportado cómo el uso de las mismas ha tenido un amplio incremento en países como España, Italia y Portugal, donde, debido a la necesidad de reducir emisiones, existe una política clara alrededor de este tema y las empresas generadoras y distribuidoras de electricidad ofrecen un precio extra por la energía eléctrica generada por cogeneración y especialmente la que se produce a partir de fuentes renovables de energía. Una situación similar se presenta en América Latina, donde a modo de ejemplo se puede citar el caso de México, que tenía en 1997 cerca de 300 permisos para autoabastecimiento industrial con una potencia nominal de 3 300 MW y se crearon mecanismos a través del Programa Nacional de Modernización Energética para que la industria generara como mínimo 10 TWH anuales para el 2000 [Nor 92].

Se concluye que en la mayoría de los países del mundo se estimula la cogeneración para entregar electricidad a las redes públicas, por lo cual a partir de la mitad de la década del 80 y en los primeros años de los 90 se logró un incremento sustancial en la potencia instalada para cogenerar; en la mayoría de los países se dan mejores precios a la energía eléctrica obtenida por cogeneración y especialmente las que utilizan recursos energéticos renovables, ya que las compañías de distribución de electricidad tienen en cuenta los costos evitados y las ventajas medioambientales de dichas plantas.

#### **1.5 La cogeneración en Cuba.**

En Cuba la existencia de esquemas para cogenerar en el sector industrial no azucarero, no tiene muchos antecedentes y solo se reporta que en Antillana de Acero y Papelera Cubana existían turbos de 12 y 7 MW respectivamente que hoy no se explotan [Isa 97]. Sin embargo, la industria azucarera en Cuba ha utilizado ciclos de cogeneración durante muchos años, aunque es justo señalar que los esquemas tradicionales de la industria azucarera cubana han estado dirigidos a autoabastecerse de la energía mecánica y el calor del proceso, siendo características comunes en la mayoría de los ingenios el uso de varias calderas de baja presión, máquinas y turbinas de vapor para mover los principales equipos, y turbogeneradores de baja potencia para la autosuficiencia eléctrica [Cab 96], [FraSM 94].

A partir de la mitad de la década del 60 la industria azucarera comenzó un proceso de reconversión energética que permitió disminuir el número de calderas obsoletas en un 25 % y seguidamente se ha trabajado para aumentar el aprovechamiento de las fuentes de energía de esta industria (bagazo y RAC), buscando fundamentalmente eliminar el consumo de energía eléctrica del SEN [MIN 95]. En los últimos años, los resultados energéticos de la industria azucarera en Cuba han estado afectados por la inestabilidad de la molida y las bajas producciones cañeras, lo cual provocó un decrecimiento sustancial de la caña molida a partir de 1991; esto, unido al incremento de la electrificación sin una consecuente modificación de los esquemas de generación de energía eléctrica, hicieron que en 1997 en la industria azucarera de Cuba el consumo de energía presentó un costo equivalente a 30 dólares por tonelada de azúcar como promedio, aunque algunas fábricas lograban menos de 10 [MIN 95], [HerM 95], [Isa 97].

En el 93 se había concluido el montaje de 42 turbos existentes en el país y ya en el 2002 las líneas de distribución de energía eléctrica llegaban a todos los centrales del país, de los cuales 80 estaban sincronizados; todo ello, permitió que en 100 días de zafra se podía lograr entre el 78 y el 80% de autoabastecimiento e índices de generación de 24 kWh/tc, si se usaban las instalaciones con eficiencia. Las reformas hechas en la industria azucarera cubana a partir de la zafra 2002 – 2003 produjeron una reducción significativa en el número de fábricas en operación, sin embargo, las plantas que se mantienen en proceso poseen las mayores capacidades de caña a procesar, lo que constituye un aspecto positivo para incrementar la entrega de energía eléctrica al SEN.

Para mejorar los resultados energéticos, se han montado calderas de entre 1.1 y 2.7 MPa (11 y 28 ata) y turbos de 1,5 a 12 MW, pero estas proyecciones parecen insuficientes para lograr los resultados que necesita el país, por lo que el MINAZ trabaja para incrementar la motivación de

los industriales para producir excedentes de energía eléctrica y para ello proponen elevar las presiones de trabajo del vapor por encima de 2.8 MPa [UNE 95], [Rom 00], [RomA 01].

Para estimular la generación de excedentes de electricidad, la UNE debe considerar los precios actuales en que se compra la energía eléctrica cogenerada y fundamentalmente la obtenida del bagazo que es una fuente renovable [MIN 95]; esto debe constituir una prioridad y debe ser analizado y trazado como una política que permita a aquellas empresas que cogeneran tener ventajas económicas adicionales respecto a las que no lo hacen, pues en la actualidad el precio de la energía eléctrica que exportan las fábricas cogeneratoras, se dice es el mismo a que se paga el comprado al SEN. La realidad es que en ocasiones es más barato.

La industria de la caña de azúcar es la fuente más importante de biomasa con que cuenta el país para la generación de energía y constituye la única a partir de la cual se está generando electricidad, según lo planteado por [Ann 2] y [Cur 01]. Sin embargo, los reportes bibliográficos sobre el necesario incremento de la cogeneración con bagazo en Cuba, no pasan más allá del análisis de potenciales de una o de todas las fábricas, como los trabajos de [Lar 00], [Schr 00], [Roq 01], [San 98], [Gon 00] y [Goz 99]. Desde otro punto de vista, otros autores concentran su atención en las necesidades del mejoramiento de la eficiencia energética [DeA 01], [Nap 01], [Mar 01], por lo que este autor considera de una importancia primordial proponer una metodología novedosa para realizar estudios encaminados a generar y utilizar energía con eficiencia en la industria azucarera y posibilitar así un incremento significativo de la entrega de energía eléctrica al SEN.

La cogeneración con bagazo en Cuba ha estado en las estrategias de desarrollo del MINAZ y de hecho ha tenido avances en el tiempo; sin embargo, no se ha producido el salto cuantitativo y cualitativo necesario para convertir a este sector en un importante suministrador de energía eléctrica a la red pública; por su parte, las transformaciones realizadas en el MINAZ durante el 2002, crean mejores condiciones para introducir tecnologías de cogeneración en las fábricas que se mantendrán en operación. Sin embargo, se necesita de estudios en cada fábrica encaminados a demostrar la factibilidad de implementar el uso de las mejores soluciones para entregar mayor cantidad de electricidad al SEN.

### **1.6 Tecnologías para la cogeneración.**

Entre las tecnologías reportadas en la literatura como factibles de utilizar en la cogeneración, están los motores alternativos de combustión interna, que se utilizan fundamentalmente para relaciones calor electricidad entre 0,2 y 2 [Tec 87], [Rom 97]; a pesar de tener ventajas por ocupar pequeños volúmenes y las inversiones ser relativamente pequeñas, no son propias para la industria azucarera, fundamentalmente por el tipo de combustible que se utiliza, aunque en

la actualidad se estudia el uso de estos motores acoplados a gasificadores de biomasa como vía para incrementar las posibilidades de generación energética a partir de bagazo [Per 04] .

Las turbinas de vapor son de amplia utilización en los sistemas que operan con biomasa y están basadas en el ciclo Rankine, fueron introducidas en el mercado hace unos 100 años y tienen un amplio uso en las plantas de generación total con turbinas de condensación pura. En la cogeneración pueden utilizarse turbinas de contrapresión o de extracción condensación y en la industria azucarera cubana tradicionalmente se han usado turbinas de contrapresión con vapores de bajos parámetros, lo que ha limitado las posibilidades de generar electricidad para entregar al SEN, aunque en varias fábricas del mundo se utilizan en la actualidad las turbinas de extracción condensación [Kin 91], [CON 95B], [Rom 00].

Por esto en la actualidad se trabaja por elevar los parámetros del vapor para incrementar la eficiencia del ciclo, disminuir el índice de consumo de vapor por kWh generado y de esa forma lograr mayor producción de electricidad; si se desea generar una mayor cantidad de energía eléctrica se debe pensar en las turbinas de extracción condensación para estabilizar la demanda de vapor a la caldera y satisfacer mayor demanda eléctrica con independencia del consumo de vapor del proceso [Rom 97].

Una tecnología que promete mucho es la basada en las turbinas de gas, las cuales pueden alimentarse con gas natural o se pueden acoplar a un gasificador de biomasa u otro combustible. Por una alta eficiencia termodinámica motivada por las altas temperaturas del ciclo, así como las bajas emisiones al medio, esta tecnología constituye un magnífico candidato para el perfeccionamiento de los actuales esquemas de cogeneración, máxime con el desarrollo actual de las turbinas aeroderivativas y el uso de las turbinas de gas inyectadas con vapor según varios autores [Lar 94B], [Wil 96], [Bra 97], [Ogd 90], [Lar 91A]

Aunque investigadores como [Ven 00], [Lar 00], [Sal 00], y [Wal 00] hacen referencias al uso de esta tecnología usando biomasa cañera como combustible, está limitada en la actualidad para su uso en la industria azucarera, sobre todo porque los gasificadores de biomasa cañeras no están lo suficientemente desarrollados para su comercialización y uso industrial, además porque las posibilidades de producción de vapor para proceso con estas tecnologías, necesitan de un profundo cambio en las tecnologías y eficiencia del proceso que permitan obtener un índice de consumo de vapor menor de 300 kgv/tc [RomA 00].

En la actualidad los sistemas alternativos de cogeneración en una fábrica de azúcar, producen alrededor de 20 a 25 kWh/tc como promedio durante el período de zafra en Cuba; sin embargo, se conoce que con turbinas de extracción condensación se pueden producir entre 80 y 120 kWh/tc, siendo mayor mientras más se incremente la eficiencia en el uso del vapor de

proceso, este valor puede llegar hasta 240 kWh/tc si se genera todo el año; en el caso de las turbinas de gas se podrían obtener generando todo el año 460 kWh/tc [Lar 91B], [Kin 91], [Con 94], [Rom 97].

Como puede apreciarse existen tecnologías disponibles en la actualidad, como los motores de combustión interna, las turbinas de vapor y las turbinas de gas que permiten diseñar esquemas para fábricas de azúcar que aseguren un incremento de la generación y venta de electricidad al SEN y alcanzar índices de generación de energía eléctrica superior a los 100 kWh/tc; sin embargo el índice que se alcanza en Cuba como promedio no sobrepasa los 25 kWh/tc, lo que demuestra la necesidad de proponer métodos que aseguren elevar este indicador a partir de las tecnologías disponibles en el mercado.

### **1.7 La cogeneración a partir de biomasa cañera.**

En 1957 se considera según [PRO 99], [PRO 00] y [Dee 00] el inicio de la cogeneración con su concepto actual en Mauricio, ya que en esa época una fábrica entregaba energía eléctrica de forma intermitente a la RED pública; sin embargo, esto se lograba con presiones del vapor directo de bajas presiones aún a 1,7 MPa, por ese entonces se entregó a la red 0,3 GWh. Después de la crisis energética de los 70 se inicia una segunda fase de la tecnología en este país y se incrementan las presiones a 3,0 MPa, se comienzan a usar turbos que permitían condensar una parte del vapor y esto les permitió entregar 43 GWh a la RED en los años siguientes. El desarrollo económico de Mauricio produjo un incremento de la demanda energética, que era de 392 GWh en 1985 y se estima de 2 300 GWh para el 2005. Para ello el gobierno lanzó un programa de desarrollo de la cogeneración con bagazo, lo que permitió llegar a 11 fábricas entregando energía a la RED y usando carbón como combustible después de la zafra. Según [Del 00], en este país en los últimos dos años se han instalado más de 50 MW y otros 70 MW están en fase de montaje. Varios autores [Ann 6], [Vis 00], [Coc 00], [Bak 00], [Gop 97], [Tya 00], [DeeA 00] y [Pal 00] hacen referencia al desarrollo de proyectos de Cogeneración en Australia, Nicaragua, Colombia y la India; sin embargo, la cogeneración a partir de caña de azúcar tuvo hasta 1995 un desarrollo limitado a pocos países y sobre todo a los de mayor nivel económico.

A partir de 1995 se produce un incremento del uso de esta tecnología en la industria azucarera de caña en todo el mundo. Para que se tenga una idea, en 1995 existía una potencia mundial instalada en esta industria de 400 MW y en los inicios del 2000 ya había instalados y en operación 1 100 MW, en tanto otros 450 se encontraban en fase de montaje. En el caso de la India, según [DeL 00], es en 1995 que se trabaja el primer proyecto comercial de cogeneración

con Bagazo; sin embargo, la capacidad de generación con bagazo se incrementó de menos de 30 MW a más de 250 MW, en tanto unos 375 MW se instalaban a principios del 2000.

Una encuesta hecha acerca de las fábricas de azúcar del mundo por la Winrock International en la década de los 90, indicó que los principales impedimentos que se le presentaban a la generación de energía exportable, asumiendo que existía una red regional o pública eran altas inversiones para las tecnologías de cogeneración, zafras cortas, leyes en contra de la exportación de electricidad cogenerada, bajos precios de compra, y baja eficiencia térmica en las fábricas [Gru 95], [Aco 95], [Fab 96], [Vald 96], [HerF 89].

De lo anterior se desprende que es necesario trabajar en buscar la financiación de las tecnologías de cogeneración, buscar combustibles alternativos para el período después de la zafra y desarrollar leyes que estimulen la cogeneración, a la vez que las fábricas mejoren sus eficiencias térmicas en general. Sin embargo, la factibilidad de la cogeneración en fábricas de azúcar a gran escala ha sido bien demostrada y documentada en Hawái, Mauricio, Reunión y ha sido introducida en varios países más [Gru 95], [Aco 95],[Pad 95], [Kin 91], [Riv 91], [Vald 96], [DeeA 00], [Rei 00].

Como se puede apreciar, el desarrollo de la cogeneración en las fábricas de azúcar, para entregar energía eléctrica a la Red, ha sido estudiado en una buena cantidad de países productores, algunos de los cuales muestran resultados que constituyen una prueba elocuente de las ventajas de estas plantas. Esto se ha logrado incrementando la presión del vapor e instalando y usando turbos de extracción condensación; en todos los casos se busca generar fuera de zafra con un combustible alternativo, que mayoritariamente es carbón, gas, petróleo y en menor medida otras biomásas; en estos países también existen estímulos en los precios de la energía eléctrica cogenerada.

### **1.8 La cogeneración y el medio ambiente.**

La situación ambiental en el mundo es uno de los problemas de gran importancia a resolver, esto ha dejado de ser una preocupación de grupos minoritarios, que generalmente dirigían sus acciones a resolver situaciones concretas y se ha convertido en un problema que exige soluciones coordinadas a nivel mundial por parte de los gobiernos y distintos agentes sociales [Fab 96], [Vald 96], [Aco 95], [Rom 97].

La preocupación por el efecto invernadero no es nueva, pues el físico Arrhenius en 1896 expresaba en su teoría que al duplicar la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se produciría un calentamiento global. Sin embargo, esta cuestión comenzó a verse con seriedad solo a partir de la segunda guerra mundial, cuando en 1948 se constituyó la primera Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, organismo privado que precedió a todo convenio

intergubernamental. En 1968 se realizó en París la primera reunión oficial para tratar el tema donde participaron organismos internacionales como la ONU y en 1972 se reunieron representantes de 113 naciones en Estocolmo; en esta reunión se acordó que el 5 de junio sería el día mundial del medio ambiente, atendiendo a los resultados de la misma. En 1992 se realizó la cumbre de la tierra en Río de Janeiro, en 1997 se firmó el protocolo de Kyoto, otras conferencias como las de Buenos Aires, Berlín y Johannesburgo han tenido lugar, otras están aún por realizarse, pero existen todavía muchas preocupaciones sobre los problemas ambientales y los pasos dados hasta hoy no han podido marcar un giro en la problemática ambiental como se refleja en diferentes análisis [Ann 7], [Leh 99], [Web 01], [Ann 8] y [Ann 9]. Este giro solo será posible con el desarrollo de proyectos que produzcan un efecto real sobre la emisión de gases, residuales u otros desechos hacia el ecosistema.

Entre las causas que influyen en el deterioro del medio ambiente están el empleo de la población de metales y la energía que se produce en el planeta [Fab 96] y [Rom 97]. Según [Web 01] en el protocolo de Kyoto se acordó que los países industrializados disminuyan sus emisiones de gases de invernadero en un 5 % anual hasta el año 2012, pero se dejó un hueco que consiste en los llamados "certificados para emisión", lo que puede convertir el cumplimiento de este protocolo en un verdadero negocio de venta de certificados; esto podría ser una oportunidad para la implementación de proyectos con energías renovables que podrían vender certificados de emisiones a través del mecanismo de desarrollo limpio y obtener ganancias adicionales.

La generación de energía es desafortunadamente una de las causas que contribuyen de manera importante, a aumentar los principales problemas como el efecto invernadero y las lluvias ácidas. Las energías renovables son la mejor opción para producir energía eléctrica con el mínimo de impacto ambiental. Por ello existe un interés creciente por su desarrollo, y en la mayoría de los países de nuestro entorno se cuenta con programas tendientes a incrementar su aporte a los balances energéticos [FraSM 94] y [Bor 97B]. Una cualidad importante que se atribuye a la biomasa está referida a las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases que provocan efecto invernadero, ya que las emisiones de gases por combustión de la biomasa tienen su origen en el ciclo biológico de la planta que dio origen a esa biomasa, mientras las emisiones de combustibles fósiles no pertenecen al ciclo atmosférico, si no al geológico [FraSM 94], [Mes 01], [DeT 00] y [Leh 99].

Según [Ram 93] y [Ann 11] el uso del bagazo como combustible se caracteriza por emisiones nulas de CO<sub>2</sub> y que las emisiones resultantes de su combustión son fundamentalmente

partículas y bajas cantidades de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>, aunque las emisiones se consideran nulas teniendo en cuenta

el ciclo completo del carbono; es decir, el consumo del azúcar por los seres humanos y la interrelación de estos con el medio a través del proceso respiratorio, teniendo en cuenta que en la producción de caña se utiliza una determinada cantidad de combustible fósil, sobre todo para la siembra y atenciones culturales de las plantaciones. En este sentido hay que destacar que tanto las emisiones asociadas a la producción cañera como las asociadas al consumo de azúcar están presentes aún cuando no se genere energía eléctrica de forma eficiente con el bagazo que se obtiene en la fábrica.

Autores como [Quint 98] hacen referencia a que en una ha de caña se obtienen 70 t de caña en tanto se absorben 55 t de CO<sub>2</sub> de la atmósfera, se sabe también que el bagazo u otra biomasa renovable en comparación con los combustibles fósiles generan cantidades pequeñas de contaminantes [Vald 96]. Las tecnologías de cogeneración con biomasa, poseen ventajas ecológicas muy importantes en comparación con las centrales convencionales de carbón o petróleo, como la de no dar lugar a emisiones de azufre, cantidades insignificantes de partículas, además es posible reducir los NO<sub>x</sub> en un 90 % y el CO<sub>2</sub> en un 60 % [Aco 95]; sin embargo no existen análisis teóricos ni prácticos sobre el balance de emisión y absorción de gases de efecto invernadero en una instalación moderna de cogeneración con bagazo, comparada con una termoeléctrica convencional.

En este sentido [Mes 01], [Obr 01] y [Ann 12] establecen como premisa que la cogeneración con biomasa cañera tiene efectos positivos sobre el medio ambiente, ya que las emisiones líquidas de CO<sub>2</sub> son negativas; es decir, si a las emisiones brutas se le descuenta el gas que es absorbido por la planta durante el ciclo vegetativo. En Cuba tampoco se encontraron trabajos que reportaran una comparación efectiva de la generación de energía eléctrica usando biomasa cañera con tecnologías modernas en cuanto a emisiones de gases con los combustibles tradicionales. En el Centro de Investigaciones de la Energía Nuclear (CIEN), perteneciente al CITMA, se pudo comprobar que a pesar de poseer las herramientas necesarias, los estudios de emisiones en los nuevos proyectos de cogeneración con bagazo no habían podido ser estudiados con profundidad, ya que carecían de algunas informaciones y métodos de análisis para ello [Per 00].

Se concluye que, aunque se reportan las ventajas ambientales de utilizar bagazo como fuente energética, es importante realizar estudios para profundizar en el efecto ambiental que sobre la emisión de gases de efecto invernadero podría tener una planta de cogeneración con bagazo al

compararla con una termoeléctrica convencional, lo que constituiría un aporte del trabajo, ya que no existen reportes bibliográficos anteriores que brinden información al respecto.

### **1.9 Cogeneración fuera de zafra.**

En las fábricas donde se quiera instalar tecnologías modernas para cogenerar y donde las zafras son cortas, menores de 150 días, se hace necesario la búsqueda de un combustible económicamente viable para generar después del período de zafra, ya que dado los altos costos de inversión de estas tecnologías, deben explotarse durante todo el año, mas de 7000 h, para garantizar la recuperación económica de la inversión.

Cuando se revisan las alternativas de combustibles para fuera de zafra, reportadas por [Osg 91], [Gru 95], [MINAZ 01] se hace referencia al bagazo, pero del ahorro de la zafra azucarera, lo cual está limitado por la disponibilidad del mismo, la paja de caña y los residuos agrícolas de esta planta, biomasa que según [CasC 99], solo podría almacenarse por un período máximo de 90 días, se consume una cantidad de energía en su recolección equivalente a casi el 50 % de su potencial y su recolección no debe ser superior al 50 % del disponible, lo que limita su utilización para períodos largos después de la zafra o recolectar de varias fábricas para asegurar la generación en una de ellas. No pueden perderse de vista además, los inconvenientes que para el suelo puede tener el uso total de los RAC, ya que como se sabe influyen en el control de las malas yerbas al romperse la denominada cobertura de paja de los campos; esto implica el uso de mayor cantidad de herbicidas químicos, influye también en la compactación del suelo y dificulta el reciclaje de los nutrientes al suelo. Este tema es tratado por [Lim 00] y [Man 00], cuando al analizar el impacto sobre la agricultura de la recolección de los RAC, hacen referencia a todo lo anterior e incluyen lo referente a la erosión del suelo, así como una mayor susceptibilidad a plagas de las plantaciones cañeras en estas áreas.

Otras alternativas incluyen el uso de biomasa de Eucalipto u otras plantas herbáceas, lo que estaría limitado por el tiempo necesario para producir la biomasa en estos bosques que generalmente sobrepasa los 4 años, en contraposición con los campos de caña que producen toda la biomasa en períodos entre 12 y 18 meses [MINAZ 01A] y [Mor 04]. Por otra parte, la extensión de la zafra azucarera encuentra varias limitaciones para utilizarse como alternativa de producción de combustible, ya que en el período lluvioso estas variedades poseen bajos rendimientos azucareros y para extender la zafra todo el año deben duplicarse prácticamente las áreas cañeras actuales. Por su parte el uso de combustibles fósiles, además de no existir amplia disponibilidad de los mismos en Cuba, su uso en plantas de centrales azucareros no compite en eficiencia con las termoeléctricas y no ofrece las ventajas ambientales de la biomasa.

Se puede resumir que la instalación de una planta moderna de cogeneración necesita de un combustible alternativo para generar después de la zafra y asegurar una operación de la planta superior a las 7000 h. En el caso de Cuba no existen elevadas disponibilidades de combustibles fósiles con estos fines, aunque su uso en este tipo de planta no sería competitivo con las termoeléctricas convencionales, además no disminuiría el efecto ambiental del uso de estos combustibles con fines energéticos; por otra parte, la utilización de caña azucarera estaría limitada en este período por los bajos rendimientos agrícolas, mientras que el uso de los RAC sería útil para cubrir una parte del tiempo, pero para todo el período tendría algunas limitaciones, dado por problemas en el almacenamiento y en los sistemas de recolección, por lo que se requiere buscar una alternativa viable para continuar la generación de electricidad después de la zafra.

### **1.10 La caña energética.**

Variedades energéticas de caña de azúcar son aquellos individuos, preferentemente F1, originados de cruzamientos entre *Sacharum Officinarum* y *Sacharum Spontaneum* que utilizan con eficiencia la energía solar y poseen alta producción de biomasa, tanto en tallos como en caña integral, y que, además presentan un grupo de características botánicas favorables que las hace aptas para crecer vigorosas en suelos de media fertilidad, en condiciones de secano, produciendo el doble de materia seca ( MS ) por área que las variedades productoras de azúcar y cinco o más veces MS que los bosque energéticos más precoces. Referencias dadas por [HerL 00] presentan una comparación que demuestra el incremento de la producción de materia seca de estas variedades con relación a otras plantas y las variedades azucareras. [Ver anexo 47.](#)

En los países productores de azúcar del mundo, era difícil suponer que la caña de azúcar podía ofrecer productos más ventajosos y de mayor utilidad económica que el azúcar. Sin embargo, con el agravamiento de la crisis energética mundial, los elevados precios del petróleo y la caída progresiva de los precios del azúcar hay que prestar mayor atención a la diversificación del cultivo y extraer de la caña no solo azúcar sino todo lo que es capaz de producir, por lo que ha sido un interés de estos países el desarrollo de una estrategia para incrementar su competitividad a través de una mayor diversificación industrial con el uso integral de la materia prima, como ha sido discutido en los trabajos hechos por [FerM 96], [Alm 99], [Gal 96], [Hor 00], [GonS 03]. En este sentido, el autor considera que las variedades de caña energética ofrecen una alta producción de biomasa y tienen características botánicas que las hacen aptas para crecer y ser cosechadas en condiciones adversas de suelo y clima, por lo que tienen las condiciones teóricas para ser utilizadas como la materia prima ideal a procesar al

terminar la zafra azucarera y extraer de ellas el bagazo necesario como combustible para la cogeneración en este período y asegurar la integración más allá de la etapa de zafra, lo que no tiene antecedentes en la bibliografía consultada.

[KeL 86] es la única referencia encontrada sobre este tema, el cual hace un análisis de las posibilidades de extender la zafra para generar energía con el uso de variedades de elevado contenido de fibra, pero su trabajo se limita a evaluar teóricamente las posibilidades de producción de azúcar, alcohol y electricidad a partir de la comparación de tres variedades con diferentes contenidos de fibra, sin realizar una investigación de las posibilidades reales de realizar la operación de la fábrica.

De todo lo anterior se deduce que el uso de estas variedades de caña energética para la cogeneración fuera de zafra podría ser un elemento novedoso de gran valor para la cogeneración en Cuba y que su uso necesita de estudios que permitan conocer la composición de los jugos de estas variedades y las posibilidades del mismo para otras producciones que garanticen incrementar a su vez el valor agregado de esta materia prima, siendo consideración de este autor que el uso de este jugo para producir alcohol propuesto por [Gru 95] parece ser la mejor opción para ingenios con destilerías anexas, pero se deben estudiar las posibilidades de fermentación de estos jugos con este y otros fines.

Por otra parte, la utilización de estas variedades como materia prima para producir electricidad y alcohol deben ser estudiadas en los planos teórico y práctico, para establecer los aportes que esta materia prima puede realizar al balance productivo de la planta, a la integración de las producciones de azúcar y derivados y para demostrar la factibilidad tecnológica de su utilización.

### **1.11 Sustratos para la producción de etanol y biomasa de levadura.**

Si se revisan las tecnologías en el ámbito mundial de producción de etanol y levadura a partir de caña de azúcar, se constata que se hace a partir de variedades de cañas azucareras, que tienen como promedio 30 % de bagazo y 70 % de jugo, que las hay con uso de los jugos directos, clarificados, de filtros de cachaza y mieles, con células inmovilizadas, empleando levaduras o bacterias, recirculando biomasa de levadura y/o parte de los mostos de la destilación, con hidrólisis enzimática de la celulosa del bagazo para convertirla en azúcares fermentables, etc. Aspectos publicados en artículos técnicos [Gomz 90], [Val 97] y [Fab 98], [dIC 01], [dIC 02] y folletos comerciales ilustrados entre otros [Bio 82] y [Flo 82], [Lle 99]; pero utilizando como sustrato jugos de cañas energéticas, no se ha encontrado referencia alguna. La necesidad de estudiar el comportamiento de los diferentes sustratos utilizados para la fermentación alcohólica es reportado por [Fab 98], quien desarrolla los modelos y analiza el

comportamiento de mezclas de sustratos; estudios similares se reportan por [dIC 02], quien además recomienda el análisis del comportamiento del proceso y del tratamiento del sustrato o la mezcla de ellos antes de ser usados en el proceso industrial.

Hace más de veinte años, Cuba adquirió plantas francesas y austriacas con un potencial de producción de unas 100 000 t de levadura torula/año según [Sas 85] y [Sen 87], que empleaban como sustrato mieles finales y sales como fuentes de  $N_2$  y  $P_2O_5$ , con el propósito alternativo entre otros, de disponer de fuentes de proteínas para formular piensos con el objetivo de la alimentación avícola y porcina fundamentalmente. En la búsqueda de sustratos alternativos para estas producciones, en el Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar se realizaron estudios usando jugos de cogollos de cañas azucareras [Bri 86], siendo precisamente estos jugos los que más se parecen a los de cañas energéticas por sus características.

La importancia de estudiar cada uno de los sustratos es discutida por [Lle 99] y [Jov 00] quienes analizan las limitaciones de la miel B para la fermentación y caracterizan la miel final respectivamente. De igual forma [Fab 98] y [dIC 01] hacen referencia a diferentes estudios de sustratos y mezclas de estos para la fermentación alcohólica, lo que demuestra la necesidad de estudiar cada sustrato o mezclas de ellos por separado.

En resumen, existen referencias de varios sustratos para la producción de alcohol, pero las posibilidades tecnológicas de la fermentación alcohólica utilizando jugos de caña energética no ha sido estudiada hasta hoy. Se conoce que los jugos de caña son una buena fuente de carbono para la fermentación alcohólica, pero es necesario estudiar las características de los jugos de caña energética y sus posibilidades como sustrato para este proceso, así como qué resultados se podrían esperar de su utilización.

### **1.12 Integración y diversificación.**

La diversificación como concepto ha ido evolucionando desde las tecnologías más simples hasta las producciones de productos sintéticos, incrementándose el índice de valores agregados de las materias primas, alcanzándose valores de 5 y hasta 20 en los procesos más complejos, lo anterior es reportado por [GonS 91], [Oqu 02] y [dIC 02]. Sin embargo, [Oqu 02] al hacer referencia a una lista de tecnologías de derivados en Cuba no incluye la energía eléctrica, producto que para este autor es una importante opción para incrementar el aprovechamiento integral de la caña como materia prima. Por su parte [dIC 02] al hablar de las debilidades de la matriz DAFO dada por otros autores sobre la biomasa, refiere los problemas de infraestructura tecnológica, la integración energética no resuelta y las características cíclicas de los cultivos.

En este sentido [GonS 03] plantea la necesidad de un esfuerzo innovador para el desarrollo de la industria química y especialmente en Latinoamérica, reconociendo que el incremento de la competitividad en la industria azucarera solo es posible con un desarrollo prospectivo integrado en lo material y energético de las fábricas de azúcar y las de derivados, lo que debe lograrse mediante reconversión de instalaciones y la elevación de la diversificación, sobre la base de un desarrollo energético sostenible. Sobre este particular [dIC 02] analiza diferentes alternativas para una mayor integración en la fábrica Melanio Hernández, pero sus propuestas están concentradas solamente en el período de zafra, por lo que adolece de una solución para la integración al terminar la campaña azucarera.

[GonS 91] hace referencia a la importancia del análisis complejo de proceso para intensificar los sistemas tecnológicos de la industria química y lo califica como un amplio análisis científico técnico y técnico económico de procesos existentes o concebidos para tomar decisiones más científicas y responsables.

En resumen, es de gran importancia la utilización del análisis complejo de proceso en la búsqueda de alternativas de intensificación de los procesos y a su vez los reportes sobre integración energética en la industria azucarera y de derivados en Cuba están dedicados fundamentalmente al período de zafra. Por lo que la búsqueda de una alternativa de combustible al terminar la zafra puede ser interesante para la integración durante todo el año entre una fábrica de azúcar y las plantas de derivado anexas, lo cual no tiene antecedentes en Cuba y otros países productores de azúcar de caña.

### **1.13 Metodologías para el análisis de plantas termoeléctricas en una fábrica de azúcar.**

Incuestionablemente que para obtener los mejores resultados de generación eléctrica y entrega de electricidad al SEN, se necesitan seguir métodos adecuados que garanticen el mejor aprovechamiento de los recursos, el alcance de los objetivos productivos propuestos y la recuperación económica de las inversiones necesarias; en este caso debe tenerse en cuenta además que en la industria azucarera cubana generalmente se adaptan tecnologías a plantas ya existentes donde los equipos en general de la mayoría de las fábricas presentan obsolescencia tecnológica con relación a fábricas que entregan electricidad a la Red pública en muchos países del mundo.

[Pet 68] señala varios aspectos a tener en cuenta en las consideraciones generales del diseño de plantas que van desde la selección adecuada del lugar hasta la polución que esta produce al medio ambiente, así como las condiciones de salud y seguridad; es evidente que estos elementos deben ser tenidos en cuenta al proponer una planta termoeléctrica en la industria azucarera, aunque en esta es necesario además tener en cuenta los cambios tecnológicos y de

gestión que se deben producir para que se puedan adaptar con éxito las nuevas condiciones y parámetros de operación a la planta ya existente.

En el desarrollo de una fábrica para entregar electricidad, resulta imprescindible elevar la eficiencia termoenergética de toda la planta para lograr aprovechar el máximo de la energía primaria consumida. [HerL 93] propone cuatro etapas de trabajo que deben ejecutarse para el estudio en fábricas cubanas que incluyen: el análisis de la tecnología existente, incremento de la eficiencia, posibilidades de equipamiento existente en el país y las inversiones de nuevas tecnologías. Este procedimiento se considera adecuado para la situación cubana, pero no define las herramientas necesarias para ejecutarlo y además se da para desarrollar en etapas, siendo perfectamente posible que estas etapas se realicen a la vez; por otra parte, no se tienen en cuenta factores tan importantes como el estado energético de la fábrica, sus resultados tradicionales y la aptitud y actitud del personal de la fábrica en cuestión, lo cual constituye sin lugar a dudas un elemento que no se debe perder de vista.

En la realización de un estudio para definir el esquema de cogeneración [CON 95B] propone una encuesta para obtener datos e informaciones; en realidad lo que se necesita es una guía para la recolección de los datos, esta publicación ofrece una metodología para seleccionar sistemas de cogeneración, pero está enfocada fundamentalmente a sistemas que cubren las demandas de electricidad y calor; por otra parte, no analiza los aspectos energéticos relacionados con el proceso que consume el calor dentro del esquema de cogeneración.

Por su parte [Per 95A] explica que existen dos vías fundamentales para entregar más electricidad neta a la red que son: Consumir menos electricidad y Generar más electricidad; sin embargo, no define las herramientas necesarias, los aspectos a discutir y los elementos a indagar para alcanzar los dos aspectos anteriores. Este autor considera que se necesita además consumir menos energía mecánica y térmica en el proceso. Para una mayor eficiencia energética en el uso de la energía del bagazo, para disminuir los consumos de leña y energía eléctrica del SEN se propone por [Per 95B] trabajar en un programa de mejoramiento energético de las plantas a través de 4 pasos: crear grupos de mejoras, buscar y definir problemas, simulación por computadora, buscar e implantar las soluciones y entrenar al personal de operación.

En correspondencia con lo anterior [Bor 00], [Rom 01], [Rom 96A] y [Cam 93] hacen referencia a una metodología para aplicar un programa de mejoramiento continuo de la eficiencia energética a cualquier tipo de industria. De esta se pueden usar varios elementos en una estrategia de análisis y mejoramiento de una fábrica de azúcar que desee incrementar la

entrega de electricidad al SEN, como son los balances de masa y energía, así como los análisis exergéticos.

Los análisis exergéticos parecen no ser muy útiles, porque para su realización se necesita primeramente realizar balances de masa y energía; sin embargo, existen algunas diferencias entre exergía y energía que demuestran que los análisis exergéticos son importantes como un escalón superior en el análisis para detectar potenciales de una manera rápida. Su utilización en la industria azucarera ha sido ampliamente difundida en Cuba y su aplicación en plantas modernas de cogeneración es a juicio de este autor un elemento a considerar [Cal 88], [Cru 94], [Cam 93], [Roq 96], [Rom 00], [Ben 00].

Cualquier metodología de trabajo para el análisis de variantes de mejoramiento o inversión que posibilite los necesarios incrementos de entrega de electricidad a la red pública necesita herramientas de análisis de los sistemas termoenergéticos azucareros, que permitan el análisis automatizado de los mismos. Existen varios sistemas que permiten realizar esta tarea, pero al revisar lo alcanzado en este campo en Cuba se observa claramente que existe todo un potencial desarrollado por nuestros especialistas en este campo, como son el AGE-OPTIMO, TERMOAZÚCAR - ANSTE, SINFAD, Energía, etc. [Gil 00], [Goz 00] y [DeAC 00]. Sin embargo, no existe reportada una metodología de análisis para el incremento de la entrega de electricidad al SEN por fábricas de azúcar que utilice de forma armónica estas herramientas.

De los métodos que se establecen por la bibliografía para realizar los estudios de cogeneración en el sector industrial, todos proponen diferentes pasos, pero se basan en analizar las características de las instalaciones industriales y las posibilidades que estas ofrecen para mejorar los niveles de cogeneración, sobre todo a partir de las demandas de calor y electricidad, a la vez que se analizan disponibilidad de combustible y perspectivas de desarrollo. [GonS 91] hace referencia a la utilización del análisis complejo de procesos en la intensificación de la producción de varias industrias, basado en estas ideas se han desarrollado en los años siguientes metodologías para la reactivación de plantas de Torula [SaH 99], para la integración energética entre los procesos de azúcar, pulpa y papel de bagazo [Pue 02A], así como [Oqu 02] presenta una metodología para estudios de diversificación en una zona geográfica. Sin embargo, no se encuentra en la literatura una metodología de análisis que haya sido propuesta y utilizada para el incremento de la entrega de electricidad a las redes de distribución eléctrica en fábricas de azúcar que cuentan con instalaciones de cogeneración o trabajan por la instalación de tecnologías con estos fines.

Si tenemos en cuenta que desde los clásicos [Pet 68] hasta los autores más actuales como [HerL 93], [Per 94], [GonS 91] o [Goz 00], describen elementos a considerar en el diseño de

plantas como son: disponibilidad de materia prima y agua, emisiones de gases y aguas residuales, posibilidades de transportación de materias primas y productos terminados y la necesidad de simulación de los procesos, es evidente que se necesita de una secuencia lógica que permita analizar todos y cada uno de estos elementos, además de otros que son igualmente importantes.

En resumen, se puede identificar la necesidad de una metodología para poder establecer elementos de transformación y/o inversión que deben acometerse para un mejor aprovechamiento de plantas de cogeneración, definiendo que para ello es importante mejorar la eficiencia energética y es por tanto necesario diagnosticar la situación energética de la fábrica en cuestión como base para los trabajos posteriores de remodelación e inserción de nuevas tecnologías en las condiciones prácticas de la fábrica. Para los análisis de la situación energética actual y las variantes propuestas se considera que existe suficiente potencialidad en las herramientas de simulación desarrolladas en Cuba, pero no se han integrado de forma adecuada con estos fines.

#### **1.14 Vías para el incremento de la eficiencia energética y la entrega de energía eléctrica.**

Para lograr incrementos de la eficiencia energética y extraer la máxima energía del combustible disponible, deben atenderse de forma prioritaria varios elementos. Como reportan [Riv 91], [Sil 94], [Zyl 91] y [Rom 01], es necesario atender todos los aspectos de la generación y consumo de energía, no solo en el área energética sino también en el proceso.

Según se reporta en la literatura el índice de consumo de vapor (IC) en la industria azucarera actual oscila entre 300-500 kgv/tc, aunque existen fábricas en la actualidad que presentan IC muy inferiores a estos valores. Este consumo en las fábricas de azúcar puede variar entre el 40 y 70 % de la caña molida. En Cuba se estima una cifra promedio del 55 % de la caña [Lod 87], [MIN 95], [Rom 01]. Para el mejoramiento de este indicador debe considerarse la utilización al máximo de las extracciones en el área de evaporación, el empleo de nuevas tecnologías como son los evaporadores de placa de flujo descendente y la posibilidad de usar el vapor de los tachos para el calentamiento del jugo como reporta [Rom 99]. Hoy se reportan fábricas, sobre todo en la industria de remolacha, que consumen 250 kgv/t o menos, a partir del uso de estas tecnologías como es reportado por [RomA 01] y [Rom 03].

En la búsqueda del incremento de la eficiencia energética en la industria azucarera se hace necesario trabajar de modo prioritario con los hombres, la capacitación y la estimulación como vía para incrementar la eficiencia general de la industria, incluida la energética; lo que debe constituir un punto de partida. Si los hombres conocen y analizan sistemáticamente los resultados energéticos de la fábrica y participan en la toma de las decisiones adecuadas, los

resultados de la eficiencia energética serán sin dudas superiores; esto debe conducir al establecimiento de grupos de mejoras de la eficiencia energética, enmarcado en un programa de mejoramiento continuo de la eficiencia energética, que debe contener todos los elementos del sistema y estar basado en la necesidad de mejorar constantemente los resultados alcanzados [Per 95B], [Cam 93], [Bor 00], [Góm 00] y [Rom 01].

### **1.15 Análisis económico en proyectos de cogeneración.**

Indudablemente que un proyecto de cogeneración en las condiciones de Cuba debe pasar por un minucioso análisis y evaluación de la inversión a realizar, incluyendo evaluaciones de riesgo, pues en primer lugar este tipo de proyectos son muy susceptibles a la situación macroeconómica y por otra parte, las limitaciones financieras son por si solas un factor suficiente para desechar una inversión. Lo anterior coincide con los planteamientos de [Kel 92], [Cop 97] y [Bol 95]; sin embargo, los análisis financieros de inversiones en los trabajos de ingeniería en Cuba se han limitado a evaluar indicadores financieros como VAN, TIR y período de recuperación en el mejor de los casos, pues en otros, solo se analizan las ganancias a obtener por las inversiones previstas.

Lo anterior se puede comprobar al revisar los trabajos de [Rey 99], [Fab 99], [SaT 99], [CMJ 00], [VerC 00], [Jov 00] y [Dom 01], de los cuales solo uno realiza un análisis de sensibilidad con una de las variables que influyen; sin embargo para este autor es de gran importancia trabajar con los criterios VAN, TIR y período de recuperación, pero incluir además análisis de riesgos con métodos probabilísticos y no probabilísticos como sugiere [Kel 92] y que permiten dar una idea de cual puede ser el resultado a esperar de la inversión aún cuando las condiciones reales cambien con relación al momento del análisis. Este punto de vista coincide con trabajos reportados por [Fue 97] en el análisis de la incertidumbre económica de una planta de acetal y [Lau 03] en el análisis de inversiones de plantas químicas a partir de biomasa.

Se concluye que, al realizar el análisis económico de una planta para cogenerar en la industria azucarera cubana es de vital importancia trabajar con todos los indicadores financieros de la inversión a realizar, pero de manera especial, analizar los riesgos económicos de la inversión para poseer una mayor claridad en las negociaciones hacia la búsqueda del financiamiento necesario para la inversión, lo cual no tiene precedente en el contexto de esta industria.

### **1.16 Optimización.**

Los trabajos de ingeniería, según [Edg 01] necesitan del diseño inicial del equipamiento y de la forma de realizar la operación en períodos largos; la optimización ayuda a encontrar en esas circunstancias los parámetros del equipamiento o la operación para obtener mayores

ganancias, mínimos costos y mínimas pérdidas energéticas. La optimización requiere de una función objetivo bien definida, una restricción de igualdad y restricciones de desigualdades.

Según el propio autor y otros como [MoM 97], [BroK 91], [BroK 96] y [Dou 02] existen dos categorías generales de modelos para la optimización, los basados en la teoría física del problema y los basados en la descripción empírica, también llamados modelos a caja negra. Para la optimización de procesos se dan 6 etapas generales de trabajo que son.

1. Analizar el proceso, hacer lista de variables, definir características de interés.
2. Determinar criterios de optimización y función objetivo específica.
3. Desarrollar expresiones matemáticas, desarrollar un modelo válido para el proceso o el equipo, incluir las restricciones de igualdad e desigualdad.
4. Si el problema es muy largo y complejo, descomponer en partes si es posible o simplificar la función objetivo y el modelo.
5. Aplicar técnicas de optimización al estado matemático del problema.
6. Chequear la respuesta y examinar la sensibilidad de los resultados a los cambios de los coeficientes en el problema y las restricciones.

En la bibliografía consultada, sin embargo, no aparece referenciado ningún trabajo de optimización a fábricas de azúcar en las que se genere energía eléctrica todo el año, por lo que es importante analizar los valores óptimos de la duración de cada uno de los diferentes períodos de operación de la planta si se desean alcanzar las mayores ganancias.

#### **CONCLUSIONES PARCIALES**

1. Se necesitan métodos en países y regiones para un mejor aprovechamiento de las fuentes renovables de energía. En Cuba el uso de la biomasa cañera es de singular importancia, por lo que profundizar en las vías para elevar el aprovechamiento energético de este recurso energético es importante para los cambios en la estructura energética que el país requiere.
2. Las metodologías existentes en Cuba presentan limitaciones para, mediante análisis complejo de procesos, establecer en una fábrica de azúcar las vías y los métodos para incrementar la entrega de electricidad al SEN, propiciar una mejor preparación de los recursos humanos y materiales antes de introducir nuevas tecnologías y evaluar aspectos tecnológicos, económicos y ambientales en proyectos de cogeneración con bagazo.
3. La bibliografía indica, que las inversiones en tecnologías modernas de cogeneración son la mejor opción para elevar el aprovechamiento energético del bagazo, pero su inversión requiere de un combustible alternativo para generar fuera de zafra y asegurar

así su operación por más de 7000 h anuales y que las alternativas de combustible estudiadas en Cuba no siempre son viables para estos fines, por lo que es de mucha importancia el estudio de otras fuentes energéticas que puedan ser usadas en esta dirección.

4. No existen experiencias en Cuba de fábricas de azúcar que generen electricidad todo el año, ni estudios realizados para optimizar la duración de los períodos de operación en ellas, lo que debe ser un aspecto a considerar en el análisis del trabajo.

# CAPITULO II

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PARA INCREMENTAR LA ENTREGA DE ENERGÍA ELÉCTRICA AL SEN

## 2.1 Propuesta de una Metodología de análisis.

Los resultados de la búsqueda bibliográfica, el conocimiento de la situación energética cubana, del potencial energético del bagazo y la experiencia práctica en la industria de la caña de azúcar, hicieron posible desarrollar una metodología de análisis para aplicar en fábricas de azúcar donde se desea elevar la entrega de electricidad al SEN. La metodología se basa en un análisis sistémico de procesos para elevar este indicador con las instalaciones existentes y/o con nuevas inversiones, según las ideas propuestas por [GonS 91]. Se parte de la selección de una fábrica y la revisión de sus políticas de desarrollo, incluye el estudio de las instalaciones energéticas y la propuesta de nuevas variantes de modificaciones e inversiones tecnológicas para generar energía eléctrica y vender los excedentes al SEN. Se incluye también un análisis de las alternativas de combustibles para cubrir la demanda de las instalaciones en todo el período de operación estimado. El método de trabajo propuesto consta de cinco partes fundamentales:

1. Selección de la fábrica a partir de un análisis de potenciales y consideración de la política de desarrollo de la misma.
2. Diagnóstico y propuestas de mejoramiento e inversiones en el esquema energético de la fábrica de azúcar.
3. Determinación de potenciales para elevar la entrega de energía eléctrica al SEN.
4. Propuesta y evaluación de alternativas de combustibles para asegurar la generación en los períodos de operación estimados.
5. Demostrar la factibilidad, tecnológica, ambiental y económica de la inversión que se proponga con estos fines.

Puede observarse que la estrategia parte de una adecuada selección de la fábrica, a la que se le determinan puntos débiles en el esquema energético y se proponen y evalúan alternativas de mejoramiento e inversión para actuar sobre los puntos débiles del esquema; se trabaja en la eficiencia energética integral del equipamiento como vía para elevar la entrega de electricidad al SEN. Finalmente, se evalúan alternativas de combustibles para cubrir la demanda de las inversiones, si es necesario, y se realiza análisis económico y ambiental de la alternativa de inversión propuesta. Ver resumen en el diagrama heurístico (No 1).

El **objetivo del presente capítulo** es dar una información detallada de la metodología propuesta, así como de las bases científicas que la sustentan.

## 2.2 Desglose de los elementos principales de la metodología.

A partir del diagrama heurístico, se definirán en los epígrafes siguientes cuales son los pasos a realizar al aplicar cada uno de los elementos incluidos en la metodología para establecer las vías y los métodos que permitan precisar las posibilidades de incrementar la entrega de energía eléctrica al SEN y las principales herramientas de trabajo para la misma.

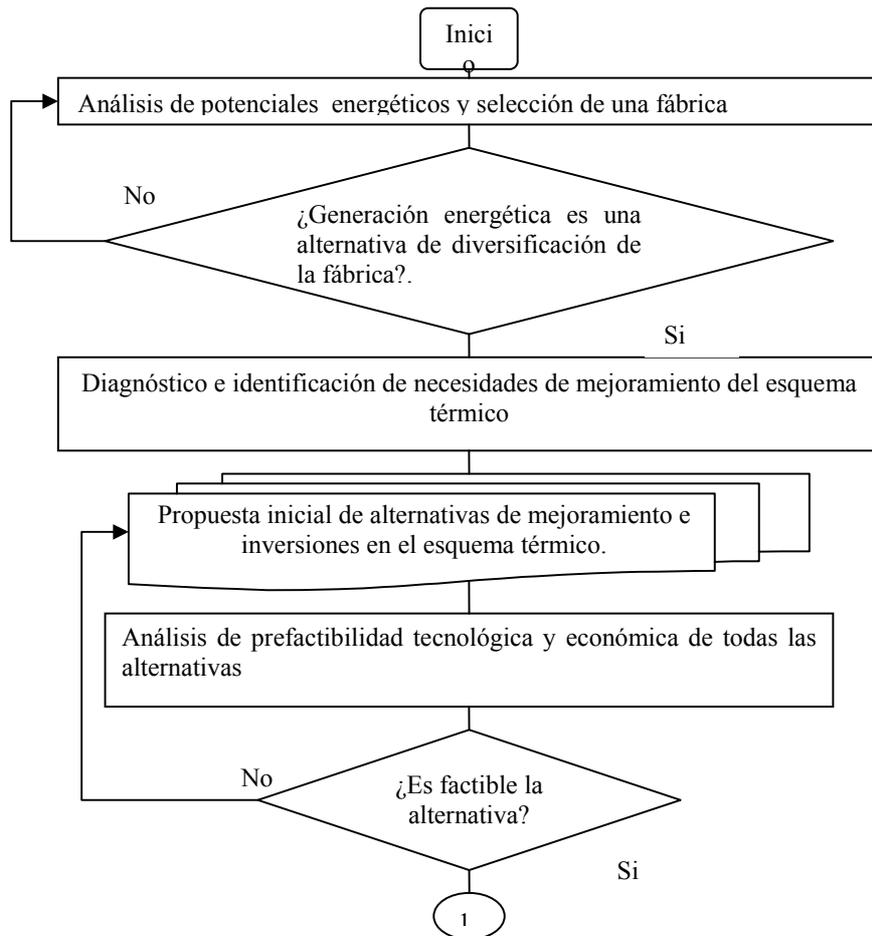


Diagrama No 1: Diagrama heurístico de la metodología de análisis.

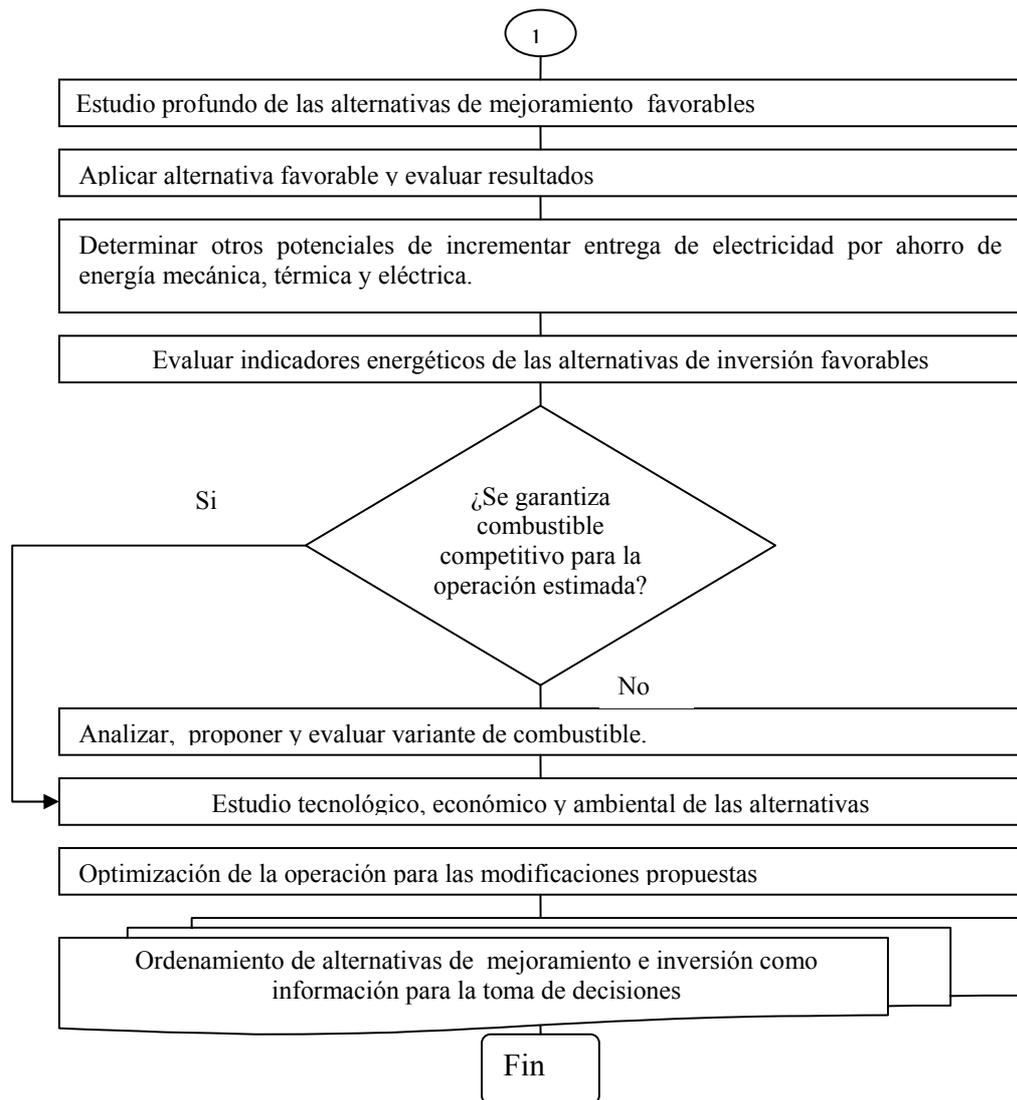


Diagrama No 1: Diagrama Heurístico de la metodología de análisis.

### 2.3 Análisis de potenciales energéticos generales.

Se propone teniendo en cuenta el primer paso sugerido por [Oqu 02] para estudios de diversificación, realizar como punto de partida un análisis territorial de potenciales energéticos. Este permitirá definir para un conjunto de fábricas dado, cuales son aquellas que poseen un potencial significativo para entregar electricidad a la red y si se requieren inversiones o no para aprovecharlos, en el mismo debe tenerse en cuenta el potencial de bagazo de cada fábrica y del conjunto, para lo que se utiliza la información disponible en las oficinas de las empresas y fábricas sobre la producción de caña y bagazo en un período de 5 a 10 años, con lo que se calculan los siguientes potenciales.

Potencial disponible: Cantidad de combustible que se puede obtener a partir de la materia prima alcanzable para la producción de azúcar estimada, como energía equivalente que se podría generar en una termoeléctrica.

Potencial técnico: Energía que se puede obtener del combustible de que se dispone, utilizando para ello diferentes tecnologías que se podrían instalar.

Potencial realizable: Para determinar el potencial realizable es necesario estudiar cada una de las fábricas de azúcar; en cada una de ellas se debe tener en cuenta la capacidad de molienda, principales producciones, existencia o no de necesidades de bagazo para otras producciones, presión del vapor, eficiencia de calderas, potencia instalada y la disponibilidad o no de fuentes de agua.

#### **2.4 Selección de la fábrica.**

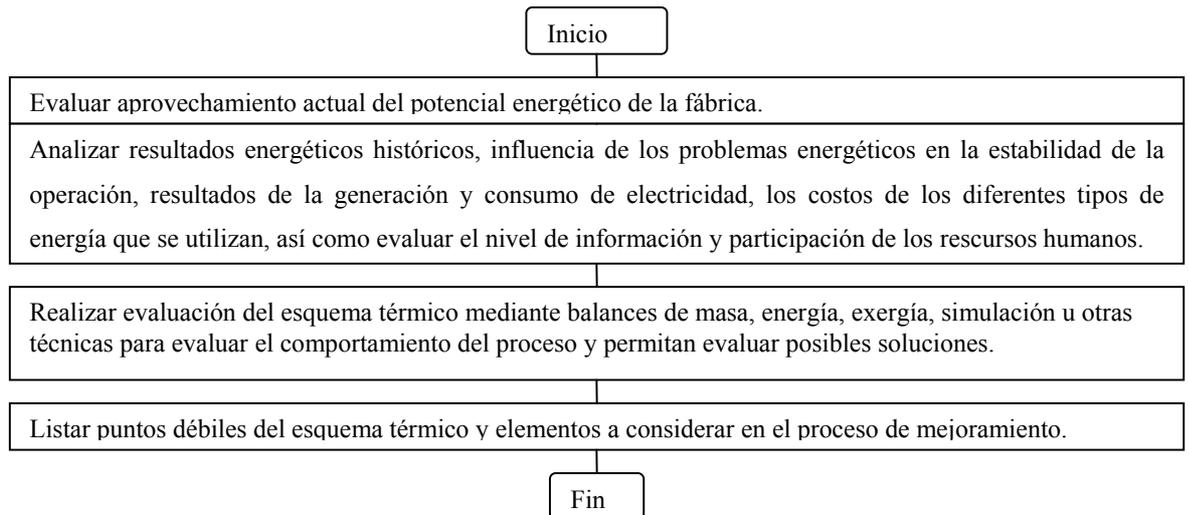
Después de evaluados los potenciales para un conjunto de fábricas es importante seleccionar la o las que se van a estudiar, para ello se deben tener en cuenta los criterios esenciales de selección dados por [Isa 98] y por [CasC 99] que incluyen el análisis de la necesidad de modernizar la base energética de una fábrica por su estado técnico, que la misma se encuentre en una zona donde se requiera incrementar la generación o existan condiciones para la interconexión con el SEN, que se asegure la materia prima para la operación, que exista una fuente cercana para el abasto de agua de enfriamiento y estar cerca de una subestación de la RED de transmisión y distribución de electricidad.

Prioridad en los planes de diversificación de la fábrica.

Como colofón en la selección de la fábrica es una necesidad determinar, si a pesar de poseer las condiciones necesarias para generar más electricidad, la cogeneración y la venta de energía eléctrica al SEN está contemplada dentro de los planes y prioridades de diversificación de la fábrica y sus directivos.

#### **2.5 Diagnóstico e identificación de necesidades de mejoramiento del esquema térmico.**

Con el objetivo de identificar las necesidades de mejoramiento del esquema energético de la fábrica seleccionada, para trabajar en las propuestas de soluciones, se propone realizar un diagnóstico basado en el método general de solución de problemas y en las herramientas estadísticas de control de proceso y la gestión de la calidad; para ello se tuvieron en cuenta varios elementos propuestos en la tecnología de gestión total eficiente de la energía propuesta por [Bor 00], se procede según el siguiente diagrama, cuyos elementos se describen más adelante y se basan también en criterios generales para el mejoramiento energético dados por [Per 95B], [Rom 96A] y [Cam 93].

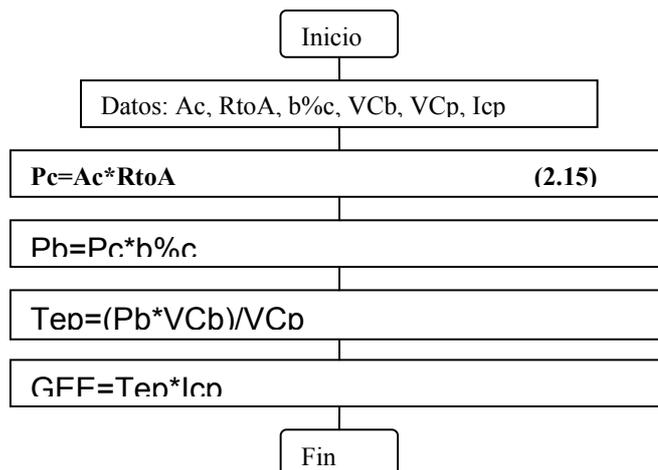


**Diagrama No 2: Diagrama de bloques para el trabajo de diagnóstico y mejoramiento energético de la fábrica.**

### 2.5.1 Diagnóstico energético.

#### Valoración del aprovechamiento del potencial energético.

Basado en aspectos propuestos por [Bor 00] se debe analizar el aprovechamiento de los potenciales de la fábrica, para ello se estima la producción de energía teórica que se puede generar y genera en la fábrica en una zafra y la energía que se podría generar si se alcanzaran las producciones previstas en el desarrollo futuro de la fábrica; esto permite determinar el aprovechamiento energético de la fábrica con la tecnología existente con relación a los valores que deben alcanzar, se utilizan ecuaciones tradicionales de balances de masa y energía y la secuencia de cálculo se muestra en el siguiente diagrama.



Donde :  $P_c$  - Producción de caña,  $A_c$  - Área cosechada,  $R_{toA}$  - Rendimiento agrícola promedio,  $P_b$  - Producción de bagazo,  $b\%c$  - Bagazo % en caña,  $T_{ep}$  - Toneladas equivalentes a petróleo,  $V_{Cb}$  - Valor calórico del bagazo,  $V_{Cp}$  - Valor calórico del petróleo,  $GEE$  - Generación de energía eléctrica teórica,  $I_{cp}$  - Índice de consumo de petróleo de las termoelectricas.

Influencia de los problemas energéticos en la estabilidad de la operación.

Para el análisis de este aspecto se propone trabajar con la información del tiempo perdido por problemas energéticos y su participación en el tiempo perdido total por interrupciones operativas, se trabaja con lo reportado por los informes de la fábrica, para determinar el número de horas perdidas por causas energéticas y el % del tiempo perdido que representa, estos datos se analizan en tablas, gráficos de tendencia y se construyen diagramas de Pareto para conocer si los problemas energéticos están dentro de los pocos vitales [Rom 97], [Rom 02A].

Resultados de los indicadores energéticos que se utilizan en el proceso de gestión.

Se propone trabajar con información de 5 o 10 años relativos a la generación y consumo de energía eléctrica en el central, así como el consumo de combustible y electricidad en este y plantas anexas de derivados. Esta información se analiza también en forma de gráficos de tendencia y tablas para estimar la situación energética de la fábrica y la evolución en el tiempo, lo cual es de mucha importancia para lograr una mejor comprensión por parte del personal que se ocupa de la gestión [Rom 97], [Rom 02A].

Los costos de la energía generada y consumida por el central.

Se propone determinar los costos de los diferentes tipos de energía que se utilizan en la fábrica, por ejemplo electricidad auto producida y comprada al SEN.

Calcular el costo de la energía eléctrica (CEE en \$ / kWh) adquirida del SEN.

$$CEE = PEE / EEc \quad (2.19)$$

Donde: EEc - consumo total anual en kWh, PEE - gastos anuales en energía eléctrica en \$.

Se determinan para una o más zafras y se comparan con el costo de la energía eléctrica auto producida por el central en igual período; se pueden determinar otros indicadores que expresen el significado del consumo de energía en los costos de producción.

Nivel de información y participación de los hombres.

La necesidad de trabajar con los recursos humanos es reportada por [Per 95B], [Bra 97], [Rom 97], [Rom 01], por lo que se propone aplicar encuestas u otras herramientas al personal de la fábrica con el objetivo de evaluar el nivel de conocimiento sobre medidas de ahorro de energía, el consumo de portadores energéticos en la fábrica, posibilidades de ahorrar energía desde su actividad en la fábrica y si poseen información energética.

### **Balances de masa, energía y exergía de la fábrica.**

Para conocer qué ocurre con el balance de masa en el proceso azucarero, así como en el balance de generación y consumo de vapor y energía eléctrica, para poder precisar en qué dirección se deben trazar las acciones de mejoramiento del proceso que garanticen un mejor

desempeño del área energética, se sugiere usar procedimientos de cálculo como el propuesto por [Esp 90].

Como un paso superior en el diagnóstico energético de la instalación se propone incluir un análisis exergético de la fábrica de azúcar, para ello se pueden utilizar diferentes metodologías como la propuesta por [Cru 94] y comentada por [Cam 93] cuyos elementos se detallan más adelante y ha sido utilizada con éxito por [Rom 02] y [Rom 97]. Este análisis permite determinar las eficiencias energéticas y exergéticas en las diferentes áreas y equipos en las fábricas de azúcar, pudiendo determinar en cada caso también los índices de consumo de combustible; estos análisis tienen la ventaja de que ofrecen una visión de hacia donde dirigir las principales modificaciones del esquema térmico al poderse verificar los resultados obtenidos por métodos exergéticos.

A continuación se realiza una exposición detallada de la metodología de análisis exergético utilizado. El medio de referencia se considera a  $28^{\circ}\text{C}$  (301 K) y 0.1 MPa (1 ata), en el caso de las exergías de concentración de las diferentes sustancias se considera como medio de referencia los contenidos de agua, sacarosa y fibra que tiene la caña que llega al central, utilizando para ello los datos promedio del laboratorio del central.

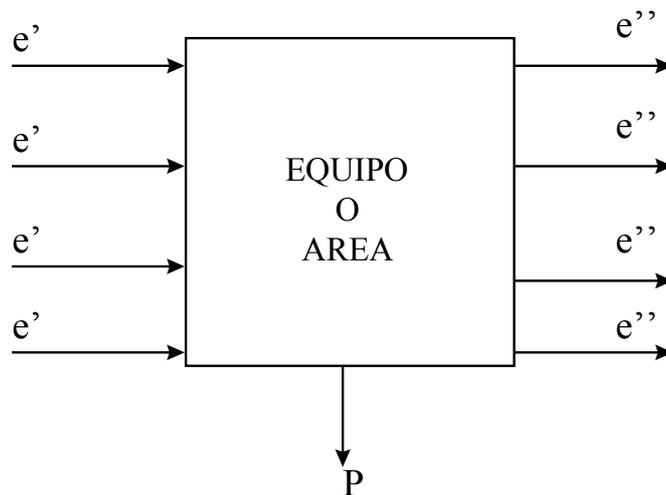


Fig. 2. 1: Representación gráfica de los flujos exergéticos.

Se determina exergía de reacción química para las sustancias caña y bagazo.

$$e_r = Vcs (1 - W) FM_i \text{ [Kw]} \quad (2.20)$$

Donde :

$e_r$  - Exergía de reacción.

$Vcs$  - Valor calórico superior ( Kj/Kg)

$W$  - Humedad en fracción.

$FM_i$  - Flujo másico ( Kg/s)

Se determina exergía de concentración a jugos, bagazo, cachaza, azúcar, miel, etc.

$$e_c = (R T_o N_i FM_i / PM) \ln (N_i \Gamma_i / N_o \Gamma_o) \text{ [Kw]} \quad (2.21)$$

Donde :

- $R$  - Constante universal de los gases ( 8.314 Kj/Kmol K)

- $N_i$  - Fracción molar del componente  $i$  en la mezcla que se analiza.

- $N_o$  - Fracción molar del componente  $i$  en el medio.

- $PM$  - Peso molecular del componente  $i$ .

- $T_o$  - Temperatura del medio ( K ).

- $\Gamma_i$  - Coeficiente de actividad del componente  $i$  en la sustancia.

- $N_i$  - Fracción molar del componente  $i$  en el medio.

- $\Gamma_o$  - Coeficiente de actividad del componente  $i$  en el medio.

Se determinan además exergías de flujos o térmicas para todas las sustancias Agua y Vapor.

$$e_t = [(i_i - i_o) - T_o ( S_i - S_o )] FM_i \text{ [Kw]} \quad (2.22)$$

Donde :

$i_i$  - Entalpía de la sustancia según su T Y P. ( Kj/Kg).

$S_i$  - Entropía de la sustancia según su T y P. ( Kj/Kg).

$I_o$  - Entalpía de la sustancia en las condiciones del medio.

$S_o$  - Entropía de la sustancia en las condiciones del medio.

Para los jugos, las exergías térmicas se determinaron por la expresión :

$$e_t = [(1 - 0.0056 Bx) \{ (T_i - T_o) - T_o ( \ln T_i / T_o ) \}] 4,1868 FM_i \text{ [Kw]} \quad (2.23)$$

Donde :

$Bx$  - Brix de la sustancia en %.

$T_i$  - Temperatura de la sustancia. ( K ).

En el bagazo la exergía térmica o de flujo se determinó por :

$$e_t = [1.475(T_i - T_o) - T_o \{ 1.475 \ln (T_i / T_o) \}] FM_i \text{ [Kw]} \quad (2.24)$$

Para la lechada de cal :

$$e_t = [4.0181 ( T_i - T_o ) - T_o \{ 4.0181 \ln T_o / T_i \} ] FM_i \quad (2.25)$$

Lodo que se obtiene en el clarificador:

$$e_t = [11.77 ( T_i - T_o ) - 3544.541 \ln (T_i / T_o) ] FM_i \quad (2.26)$$

La exergía térmica de la cachaza se calculó por :

$$e_t = [46.039955 ( T_i - T_o ) - 13864.932 \ln (T_i / T_o) ] FM_i \quad (2.27)$$

Miel final.

$$e_t = [4.1868 \{ ( 2.51208 - 0.0075362 (T_i - T_o) + 0.0033494 ( 100 - Pza ) ( T_i - T_o ) ) - T_o ( ( 2.51208 - 0.0075362 ( T_i - 273 ) + 0.0033494 ( 1 - Pza ) \ln (T_i / T_o) ) ) \}] FM_i \quad (2.28)$$

Donde :  $Pza$  - Pureza de la miel final.

Azúcar.

$$e_t = [ \{ 1.161837 + 0.0035587 ( T_i - 273 ) \} ( T_i - T_o ) - T_o \{ 1.161837 + 0.0035587 ( T_i - 273 ) \ln ( T_i / T_o ) \} ] FM_i \quad (2.29)$$

En cada equipo o área se determinaron las entradas y salidas de exergías y finalmente se determinaron las pérdidas, la eficiencia y el índice de consumo para cada uno por las siguientes expresiones.

$$P = \Sigma e' - \Sigma e'' \quad (2.30)$$

$$\eta = \Sigma e'' / \Sigma e' \quad (2.31)$$

$$G = 1 / \eta \quad (2.32)$$

Donde :  $P$  - Pérdidas de exergía en el equipo o área

$\eta$  - Eficiencia del equipo o área en fracción.

$G$  - Índice de consumo del equipo o área.

Análisis usando simulación y sistema experto.

Para profundizar en el estudio del sistema termoenergético de la fábrica, pues este constituye el punto de partida de los trabajos a realizar, se recomienda la simulación del esquema térmico de la instalación. Existen herramientas desarrolladas por varios autores cubanos que son un valioso potencial para ello y para el estudio de variantes de mejoramiento con el objetivo de incrementar la entrega de electricidad al SEN, el uso integrado de estas herramientas cubanas con este fin es un aporte del autor.

Se propone trabajar de forma integrada con la estrategia de análisis dada por [Goz 96], que incluye el programa de simulación modular en estado estacionario Termoazúcar y el sistema experto ANSTE. Además se recomienda utilizar los software de simulación OPTIMO, desarrollado en la delegación del MINAZ de Villa Clara [Gil 00], el SINFAD desarrollado en el ICIDCA y el Energía desarrollado en la UCLV [DeAC 00], [Rom 01]. El OPTIMO posee buenas cualidades para estudiar de forma rápida las posibilidades de generación de energía eléctrica y sobre todo si se pretenden comparar alternativas de esquemas térmicos en el proceso, el SINFAD posibilita un mejor estudio del esquema de evaporación del central a partir de establecer parámetros termodinámicos de los equipos y calcular el comportamiento general de la instalación, el ENERGÍA posibilita realizar determinaciones rápidas de toda la instalación a partir de la modificación de parámetros generales, en tanto la estrategia Termoazúcar ANSTE posibilita un mayor nivel de información de los parámetros generales del proceso y los equipos, así como recomendaciones de aspectos a revisar en el esquema y brinda amplia información para los balances de exergías.

### **2. 5. 2 Identificación de necesidades de mejoramiento del esquema térmico.**

Como resultado del diagnóstico debe quedar un listado y evaluación de las principales debilidades del esquema térmico para poder incrementar la entrega de electricidad al SEN, así como identificar qué modificaciones son necesarias en el esquema para incrementar la eficiencia general y las posibilidades de obtención de excedentes de electricidad.

### **2.6 Propuesta inicial de alternativas de mejoramiento y de inversiones.**

Conocidos los puntos débiles de la instalación para un mayor aporte de electricidad a la red pública; teniendo en cuenta también las perspectivas de desarrollo de la fábrica, se desarrolla un trabajo con expertos, para hacer propuestas de alternativas de mejoramiento al esquema, según el equipamiento existente y otras de inversión en nuevas tecnologías que provoquen un salto superior en los resultados, todas para incrementar la entrega de electricidad al SEN.

## 2.7 Análisis tecnológico y económico inicial de las variantes.

Para el análisis inicial de las variantes propuestas, se utilizan herramientas rápidas de simulación que permitan realizar un tamizado de alternativas, para excluir del análisis posterior aquellas que no sean factibles desde el punto de vista tecnológico. Se propone simular cada variante utilizando el programa AGE-OPTIMO [Gil 00] con los datos nominales de cada esquema, se calculan índices, se tabulan y se evalúan en forma gráfica.

Análisis de prefactibilidad económica de las variantes.

Con este fin se propone realizar análisis económico de cada una de las variantes propuestas, para ello se utilizan programas como el STORM u otro que permita, con un mínimo de datos, determinar el valor actual neto (VAN), período de recuperación (PR) y la tasa interna de retorno (TIR) de cada una de las variantes en evaluación [Rom 97], [Qui 02] .

## 2. 8 Estudio profundo de alternativas seleccionadas.

Las alternativas seleccionadas como factibles tecnológica y económicamente, son estudiadas seguidamente con más detalles, para ello se propone utilizar herramientas de simulación y sistemas expertos para profundizar en los índices generales de cada alternativa, esto permite contar con recomendaciones para cada variante propuesta y con sus principales indicadores energéticos, lo que posibilita compararlas entre sí de forma más rápida y efectiva. En esta parte del trabajo se recomienda trabajar con la estrategia Termoazúcar – ANSTE [Goz 96], con la cual se obtiene una amplia información de todas las corrientes, sus componentes y parámetros generales de los equipos, así como recomendaciones para los distintos rubros del sistema experto, todo ello para cada una de las variantes en estudio, el uso de esta estrategia brinda información suficiente para los análisis exergéticos posteriores.

### Comparación entre variantes según criterios exergéticos y termoeconómicos.

Para continuar el estudio pormenorizado de variantes, se realiza análisis exergético general a las variantes seleccionadas. El objetivo fundamental es demostrar las ventajas de cada variante, para ello se determina la eficiencia exergética, las pérdidas asociadas a cada variante y el índice de consumo de combustible que corresponde; en este caso se pueden comparar los balances exergéticos de las variantes con el balance exergético del central que se realizó durante la etapa de diagnóstico.

Se realiza cálculo termoeconómico de las pérdidas de exergía, atendiendo a recomendaciones hechas por [Cam 93], para ello en cada una de las variantes se determina el costo de las pérdidas de exergía según la expresión:

$$C = \frac{ec * Cec + eee * Ceee}{ec + eee} \quad (2.33)$$

Donde:  $C$  - Costo de la exergía en  $\$/kW$ ,  $ec$  - Exergía de la caña en  $KW$ ,  $eee$  - Exergía de la energía eléctrica,  $Cec$  - Costo de la exergía de la caña,  $Ceee$  - Costo de la exergía de la energía eléctrica.

Con estos resultados se realiza un balance de costos exergéticos a partir de los balances de exergía de la fábrica, estimando el valor de las pérdidas exergéticas, como índice de comparación entre alternativas.

### 2.9 Aplicar alternativa favorable y evaluar resultados.

Después de realizado el estudio pormenorizado de las variantes seleccionadas, queda definida cuál variante de mejoramiento y cuál de inversión deben ofrecer las mejores perspectivas para incrementar la entrega de electricidad al SEN; por lo que resulta de vital importancia introducir la alternativa de mejoramiento y evaluar sus resultados, para lo cual se propone dar una elevada participación de todo el personal que trabaja en la operación de la planta. Al mismo tiempo es necesario trabajar en identificar un programa de desarrollo para llevar a vías de hecho la alternativa de inversión seleccionada, también con elevada participación del personal, se garantiza así, no solo un incremento de la generación por cambios tecnológicos, sino también por una mayor capacitación, participación y gestión de los recursos humanos [Rom 97].

### 2.10 Nuevas oportunidades de incrementar los niveles de entrega de energía eléctrica.

A partir de los puntos débiles que se identifican en el diagnóstico, se propone evaluar nuevas oportunidades de incrementar la entrega de energía eléctrica al SEN a través de la disminución del consumo de energía de la fábrica, la propuesta de este elemento de forma integrada en la estrategia es un aporte del trabajo, ya que rompe con las formas tradicionales en el estudio de la cogeneración, pues no solo propone alternativas para incrementar la generación, sino también vías de ahorro para elevar la entrega al SEN, lo anterior se demuestra si se revisan los trabajos de [Leo 99], [Nap 01], [Gon 00], [GueO 88] donde cada autor estudia el asunto desde el radio de acción de su especialidad, pero ninguno de ellos realiza un análisis de las posibilidades integrales de entregar electricidad a partir del ahorro de los diferentes tipos de energía a la vez.

#### **Potenciales de ahorro de energía eléctrica.**

Se propone realizar electrobalance de la instalación según [Leo 99], lo que permite determinar entre otras cosas las pérdidas energéticas en los circuitos de la instalación y evaluar potenciales de ahorro como el que se obtienen por reubicación de los capacitores, la utilización de motores de alta eficiencia u otros. Para realizar el análisis se propone el siguiente algoritmo.

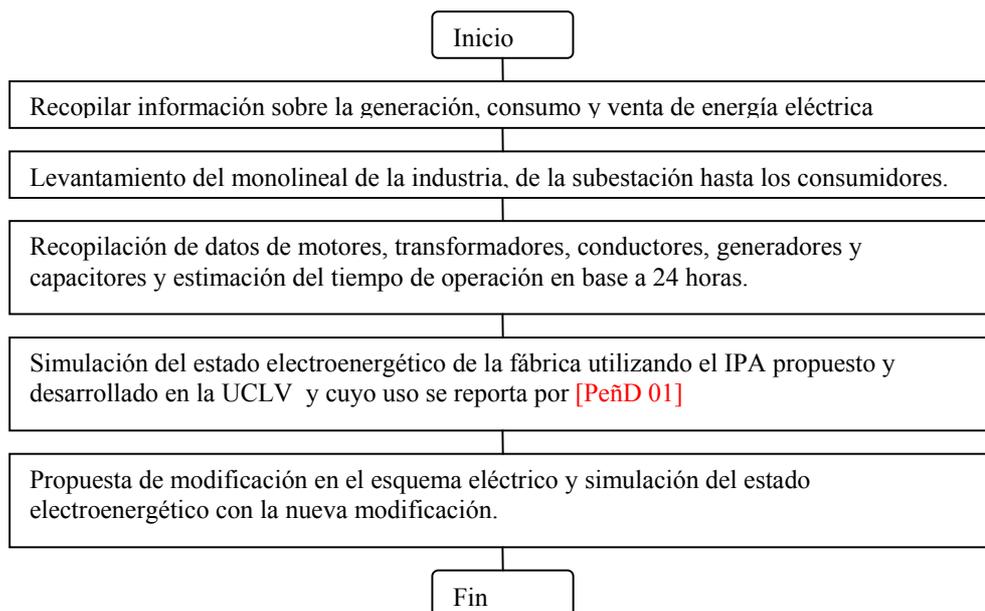


Diagrama No 3: Algoritmo para determinar los potenciales de ahorro de energía eléctrica.

### **Potenciales de ahorro de energía mecánica.**

Para analizar los posibles potenciales de ahorro de energía mecánica se propone recopilar información acerca de los principales consumidores de energía mecánica, a partir de ahí trabajar por identificar aquellos grandes consumidores de esta energía y estudiar alternativas para minimizar el consumo de estos grandes consumidores, para lo cual se pueden utilizar herramientas automatizadas, métodos de cálculos propuestos y validados por otros autores. En el ahorro de energía mecánica existe un alto potencial de entrega de electricidad, pocas veces considerado cuando se trabaja en esta dirección y existen métodos para determinarlo.

Lo primero que se debe realizar es una caracterización del estado de las cargas de los sistemas de bombeo, para ello se analizan los siguientes aspectos [Vlle 01].

- Se determina el índice de carga para cada equipo, para tener información de si el motor se encuentra subcargado o sobrecargado. Este índice es la relación existente entre la potencia real consumida o demandada y la potencia de chapa o sea:

$$\text{Índice de Carga} = \frac{N \text{ chapa}}{N \text{ régimen}} = \frac{I * V * \cos \varphi * \eta \text{ (chapa)}}{I * V * \cos \varphi * \eta \text{ (régimen)}} \quad (2.34)$$

- Se determina un índice de energía consumido o en régimen en (kWh/turno), resultado de la multiplicación del índice de energía instalado por el índice de carga.
- En ambos casos, índice de energía instalado e índice de energía a régimen, se calcula el índice total por área y el porciento que representa cada una del total, para realizar

diagramas de Pareto que caractericen a las áreas mayores consumidoras y a los motores más alejados de su carga nominal en cada área.

El ahorro de energía eléctrica ( $Ah_e$ ) se puede determinar también por la fórmula siguiente planteada por [Leo 99], [PeñD 01] y [Vlle 01]:

$$Ah_e = \sum_{n=1}^n ( Fc/100 (0.746 * Pn) * To * Ce * ((100/\eta_b) - (100/\eta_a)) ) \$ \quad (2.35)$$

**Donde :**  $Ah_e$  : Ahorro de energía (\$ / año), **N** : Horas diarias de operación, **Fc**: Factor de carga del motor a la hora n (%), **Pn**: Potencia nominal del motor (HP), **To**: Tiempo de operación anual (horas), **Ce** : Costo de la energía a la hora n (\$ / Kw.-h),  $\eta_b$ : Eficiencia del motor en operación para el estado de carga en la hora n (%),  $\eta_a$ : Eficiencia del motor sustituto para el estado de carga en la hora n (%).

Con esta información, se proceden a estudiar alternativas de utilización de estos potenciales como sería utilizar motores de alta eficiencia o el uso de reguladores de velocidad en bombas de la fábrica donde existan otros métodos de regular flujo. [PeñD 01] y [Vlle 01].

Más adelante se pueden realizar análisis de posibilidades de entrega de energía por realizar otros cambios, como por ejemplo, cambiar conductores de bagazo de rastrillo a conductores de banda donde es posible, modificar el elemento motriz del TANDEM según proceda.

### **Potenciales de ahorro de energía térmica.**

Las posibilidades energéticas por el ahorro de energía térmica es bien demostrada desde que se analizan diferentes alternativas del esquema térmico; sin embargo, aún cuando se obtengan alternativas adecuadas para la instalación y los objetivos propuestos, siempre es posible encontrar nuevos potenciales de ahorro para incrementar la electricidad que se entrega al SEN, para ello se propone seguir los mismos pasos dados para el caso de la energía mecánica.

Con el objetivo de conocer el potencial de ahorro de energía térmica del proceso se profundiza en los parámetros térmicos del área de evaporación, cocción y calentamiento para el esquema de la fábrica, se realizan nuevas simulaciones de este esquema con parámetros reales y se valora el aporte en energía eléctrica al realizar otras modificaciones. En este paso se propone trabajar adicionalmente con el software SINFAD, dada sus posibilidades de fijar parámetros y determinar resultados a esperar [Ker 75], [DeAC 00], [BarC 01].

### **2. 11 Evaluación de indicadores energéticos de la alternativa de inversión favorable.**

Para profundizar en la tecnología propuesta para la variante de inversión seleccionada, según la metodología propuesta, se propone determinar algunos indicadores, cuyo procedimiento de cálculo aparece en el diagrama No 4 y es resumido de [Con 95B]. El conocimiento de estos indicadores puede dar una información general de los resultados energéticos a esperar de la inversión, así como de su integración con las fábricas de azúcar y de derivados.

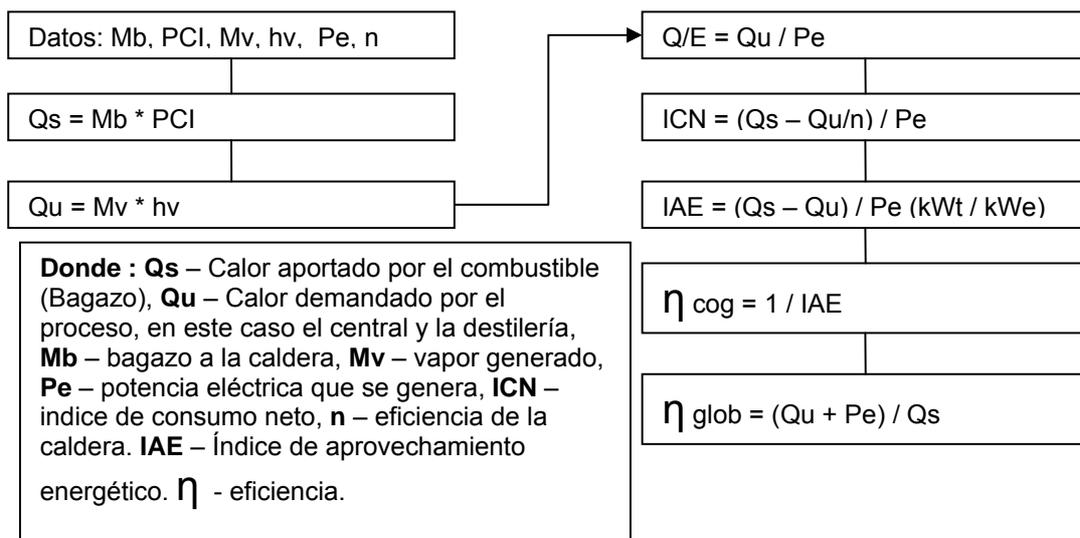


Diagrama No 4: Análisis de parámetros técnicos para el esquema de cogeneración propuesto.

## 2. 12 Evaluación de alternativa de combustible.

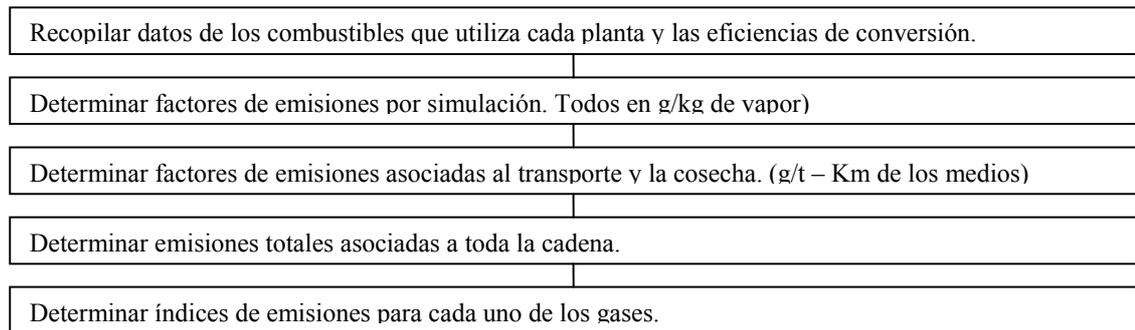
Después de realizado el estudio de las alternativas de esquemas para incrementar la generación eléctrica y la entrega de excedentes al SEN, es necesario decidir si la alternativa de inversión que se propone provoca aumento significativo de generación eléctrica y si el combustible que se produce por la operación del central es suficiente para todo el período de operación estimado, en caso de ser necesario debe estudiarse cuál es la mejor alternativa de combustible para las condiciones de operación de la fábrica, que implica determinar la disponibilidad de combustible existente en la región aledaña a la fábrica, la posibilidad de utilizar alguna fuente energética reportada en la bibliografía o proponer nuevas alternativas de combustible, factibles de producir y utilizar en el período de operación estimado. Lo anterior permite definir si la alternativa prevista es factible en lo tecnológico, pues se asegura el suministro de materia prima, en este caso combustible, para la generación de electricidad estimada.

## 2. 13 Diagnóstico ambiental de la inversión propuesta.

Después de evaluar y proponer soluciones para el suministro continuo de combustible a la planta se propone hacer un análisis del impacto ambiental que podría provocar la inversión propuesta, atendiendo en lo fundamental a las emisiones que se originan o se evitan, al poner en funcionamiento la instalación prevista, ver trabajos de [\[Rom 03B\]](#).

Se propone realizar diagnóstico de emisiones de gases, para ello se utiliza el software DECADES, que es el utilizado para hacer los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y que permite obtener factores de emisión para la generación, a partir de la simulación de la planta en estudio, además con apoyo en las bases de datos del programa GEMIS y EPA se buscan otros factores de emisión asociados a las emisiones fugitivas del cultivo de la caña y las originadas durante la extracción, transporte y procesamiento del crudo;

se recomienda hacer evaluación comparativa con plantas de generación tradicionales. El procedimiento de trabajo para determinar estos valores se resume en el **diagrama No 6**.



**Diagrama No 6: Diagrama de bloques del diagnóstico de emisiones de gases realizado**

## 2. 14 Evaluación de factibilidad económica de la inversión propuesta.

Para realizar el análisis económico se realiza un levantamiento de la información económica de toda la inversión, así como de los costos y ganancias que se esperan de su puesta en marcha; con esta información se propone trabajar con las hojas de cálculo, Deuda, Balance y Flujo, propuestas para estos fines por ingenieros del IPROYAZ o utilizar software que permitan determinar el VAN, TIR y PR y simular variaciones que quieran estudiarse [Qui 02], [Rom 04].

### 2. 14. 1 Análisis de las incertidumbres económicas para esta inversión.

Seguidamente y para profundizar en el análisis económico de la inversión se realiza un análisis de las incertidumbres económicas atendiendo a las variaciones de precios de las materias primas y productos que entran y salen al complejo integrado.

#### Análisis de sensibilidad.

Se debe realizar un análisis de sensibilidad de la inversión ante las posibles variaciones de variables claves para los resultados económicos de la inversión, tales como variaciones de precios de las materias primas o entrada, como el interés, el precio de la caña energética y azucarera, los RAC, el azúcar, o variaciones de los precios de los productos como la electricidad, el azúcar y el alcohol; para ello se asumen 5 valores de cada variable, el valor esperado, un valor optimista, otro pesimista y valores extremos optimista y pesimista. Para cada valor se determina nuevamente el VAN, obteniéndose curvas que indican el comportamiento del VAN para variaciones de cada variable [Rom 04]. Adicionalmente es oportuno utilizar otras técnicas de análisis económico como punto de equilibrio u otras.

Esperanza matemática, desviación típica y coeficiente de variación del VAN.

Con la utilización de métodos probabilísticos se puede determinar también el riesgo asociado a la inversión, se propone para ello el método dado por [Kel 92], recomendado y utilizado con éxito por [Fue 97], [Lau 03] y que se muestra a continuación.

$$E(X) = \sum X_i * P_i \quad (2.39)$$

Donde: E – Esperanza matemática de la variable,  $X_i$  – Es la variable X en el nivel i y  $P_{X_i}$  – Es la probabilidad de que la variable X este en el nivel i.

$$E(VAN) = -E(I) + \sum E(Fc) / (1+k)^i \quad (2.40)$$

Donde: VAN – Valor actual neto, I – Inversión, Fc – Flujo de caja y K – Es el interés a que se calculan las finanzas.

R

$$\sigma_X^2 = \sum_{j=1}^R ((X_j - E(X))^2 * P(X_j)) \quad (2.41)$$

$$\sigma^2(VAN) = \sigma^2(I) + \sum \sigma^2(Fc) / (1+K)^i \quad (2.42)$$

$$\sigma(VAN) = \sqrt{\sigma^2(VAN)} \quad (2.43)$$

$$CV = \sigma(VAN) / E(VAN)$$

**Donde:** CV - Coeficiente de Variación del VAN,  $\sigma(VAN)$  – desviación típica del VAN.

### **Perfil de riesgo de la inversión.**

Finalmente se propone determinar el perfil de riesgo de la inversión, utilizando para ello el método dado por David Hertz en 1964 y que se propone y explica por [Kel 92], el que se recomienda por primera vez para profundizar en los riesgos económicos en estudios de cogeneración en Cuba, lo que es un aporte de este trabajo; el mismo consiste en:

1. Identificar variables claves que configuran, a su vez, los costes e ingresos futuros.
2. Determinar los posibles valores que dichas variables pueden tomar en el futuro y asignar probabilidades a cada uno de ellos.
3. Realizar un muestreo repetido de las variables, tomando como base sus probabilidades. Para ello se utiliza el llamado método de Montecarlo que se basa en el uso de números aleatorios para simular el muestreo.
4. Se calculan los resultados financieros (VAN, y/o TIR) correspondientes a cada combinación de valores de las diferentes variables obtenidas en cada muestra.
5. Finalmente se seleccionan intervalos de clase, la frecuencia relativa y la probabilidad de ocurrencia, en fracción, de cada intervalo; para después representar gráficamente la curva

que caracteriza el perfil de riesgo del proyecto, dada por la marca del intervalo de clase y la probabilidad acumulada de ocurrencia.

El uso del perfil de riesgo para determinar incertidumbres económicas en el análisis de inversiones se utiliza por primera en los estudios de cogeneración en Cuba, no encontrándose trabajo precedente que utilizara este criterio de evaluación de inversiones.

## 2. 15 Optimización de la operación de la inversión propuesta.

Se debe realizar una optimización de la operación de la planta, atendiendo a las características de la inversión propuesta, sus condiciones de operación o a sus parámetros de proceso, el objetivo es determinar cómo debe operar la planta para alcanzar las mayores ganancias en un ciclo de operación. Esto permite establecer los parámetros de operación y la forma de operar la instalación, para a partir de la inversión a realizar obtener los mayores beneficios económicos o energéticos, según el criterio de optimización que se utilice.

### **CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPITULO**

1. Se propone una metodología de análisis novedosa, con el uso de herramientas de análisis de proceso y de simulación desarrolladas en Cuba, que permite establecer las vías y los métodos para definir, en fábricas de azúcar interconectadas, las posibilidades de incrementar la entrega de energía eléctrica al SEN. La metodología expresada y su diagrama heurístico, constituyen un aporte científico de este trabajo, no encontrándose referencias bibliográficas de metodologías similares con estos fines.
2. Un aspecto novedoso dentro de la metodología propuesta, lo es el análisis integral en el aprovechamiento de potenciales de diferentes tipos de energía en la operación de la fábrica para elevar la entrega de electricidad al SEN.
3. Se proponen aspectos novedosos en Cuba para profundizar en el análisis económico de inversiones en condiciones de incertidumbre, como la determinación del perfil de riesgo de un proyecto.

# CAPITULO III

VALIDACIÓN DE LA METODLOGÍA EN EL CASO DEL CENTRAL MELANIO HERNÁNDEZ

### Capítulo III: Validación de la Metodología en el caso del central Melanio Hernández.

El capítulo explica los resultados alcanzados al validar la Metodología propuesta en un estudio de caso en la provincia de Sancti Spiritus, donde se seleccionó el Central Melanio Hernández. En el mismo se realiza un estudio de alternativas para incrementar la entrega de electricidad al SEN, se proponen variantes para el incremento de la cogeneración a partir del equipamiento energético que posee la fábrica y se estudian variantes de inversiones en nuevas tecnologías para cogenerar. En la segunda parte del capítulo se propone una nueva alternativa de combustible para extender la operación de la planta energética al período posterior a la zafra azucarera y hacer viable una inversión para cogenerar con altos parámetros del vapor, para ello se realiza una evaluación tecnológica y económica de una inversión que opera fuera de zafra con el combustible propuesto.

#### 3.1 Análisis de potenciales energéticos generales.

La información del análisis del potencial energético de la biomasa cañera en la provincia de Sancti Spiritus hasta 1996 aparece en los **anexos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7**. Puede resumirse que el área cultivable para caña de azúcar de la provincia de Sancti Spiritus descendió en 6 años un 3 %, lo que limitó la producción cañera, pero a su vez demuestra que existe disponibilidad de área para producir más biomasa con fines energéticos. Hasta el año 95 existió un descenso continuado del rendimiento agrícola cañero, se invirtió en el año 96 al crecer ligeramente este valor, después de llegar a un mínimo de 30 mil @/cab, se alcanzaron en la provincia valores de hasta 65,9 miles de @/cab.

El potencial disponible en la biomasa cañera de este territorio es 3.2 veces superior al consumo de energía eléctrica anual y en los **anexos 6 y 7** aparece la posible generación eléctrica de ese territorio si se usan diferentes tecnologías de cogeneración. Se podía alcanzar en 1996 entre un 41 y un 70 % del potencial energético de la biomasa cañera de SS y cubrir la demanda eléctrica del territorio, si se usaran turbinas de extracción condensación o ciclos combinados con gasificación de la biomasa, la tecnología instalada en las fábricas del territorio solo era capaz de producir el 9,2 % del potencial; era posible cubrir el 71,4 % de la demanda del territorio cogenerando con bagazo, según el potencial realizable. Después de las transformaciones hechas por el MINAZ en el 2002, donde las primeras cuatro fábricas del **anexo 6** cerraron definitivamente, el territorio podría generar el 50 % de la demanda anual en una zafra de 120 días y producir electricidad 300 días en Melanio Hernández y FNTA, fábricas que deben invertir en tecnologías a alta presión y turbos de extracción condensación. Esta información fue suficiente para seleccionar la fábrica en que se realizó el estudio.

### 3.2 Selección de la fábrica.

Se seleccionó el central Melanio Hernández a partir de los siguientes criterios.

- Es la única fábrica del territorio que tiene una destilería anexa, lo que posibilitaría una integración energética todo el año, tanto en lo material como en lo energético.
- Es de las dos fábricas que se les propone cambio de tecnología en el análisis hecho del potencial realizable y aportaría cerca del 50 % de la generación con bagazo en la provincia.
- Ha sido una fábrica con problemas energéticos en la última etapa con una base energética obsoleta, lo que incidió de forma negativa en la producción azucarera de la misma.
- Tiene capacidad de molida cercana a las 5 000 t/día, adecuada para invertir en cogeneración.
- Se encuentra ubicada en un batey y en las proximidades del municipio Sancti Spiritus, así como de las localidades de Zaza del Medio y Siguaney, los que podrían ser consumidores directos de la energía eléctrica que se genere.
- A una distancia de 3 Km existe una subestación eléctrica del SEN, lo que favorece de forma considerable la entrega de energía.
- A 2 km de la fábrica corre el río Tuinucú, el que posee un caudal suficiente para cubrir la demanda de agua de la planta y el que ha sido siempre la fuente de agua de este central.
- El desarrollo de la cogeneración para vender energía eléctrica está considerado en la estrategia de diversificación de esta fábrica.

### 3.3 Diagnóstico energético.

Valoración del aprovechamiento del potencial energético.

Para el desarrollo de esta tarea, se realizó un análisis del aprovechamiento energético del central en la zafra 1997 y se comparó con una zafra teórica donde se obtenga un rendimiento agrícola de 80.5 miles de @ /cab, valor alcanzado en 1984 en las áreas cañeras de esta fábrica. Al analizar el gráfico del **anexo 8** se puede concluir que la tecnología instalada en este central no posibilitaba aprovechar el potencial energético de la biomasa que se producía, ya que solo se generaba el 5 % de lo posible y en comparación con el potencial que podría producirse alcanzándose mayores rendimientos agrícolas no sobrepasaba el 2 %. Lo anterior demostró la necesidad de realizar cambios tecnológicos en el área energética para aprovechar el potencial existente.

**Análisis de resultados energéticos históricos y la preparación de los recursos humanos.**

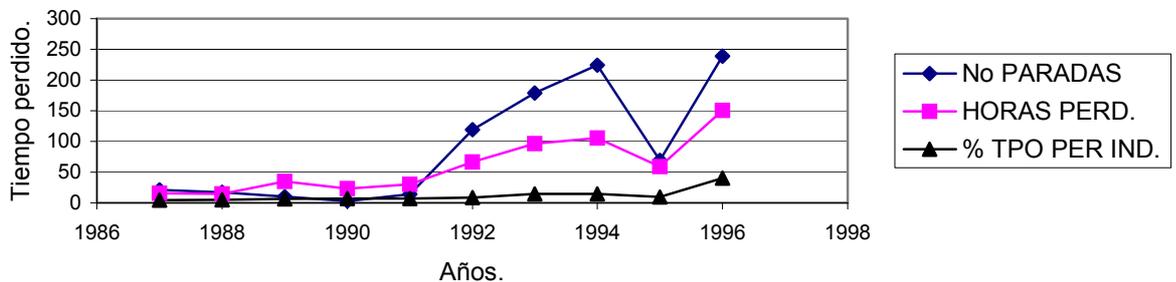
Como parte del diagnóstico energético se evaluaron diferentes variables o índices, par estimar la situación real de la generación y consumo de energía en las instalaciones de esta fábrica, como fueron:

1. Tiempo perdido por problemas energéticos y su significación en el tiempo perdido por interrupciones operativas.
2. Los resultados de generación y consumo de energía térmica y eléctrica, no solo del central sino también de la destilería, así como el consumo de otro combustible, si existe.
3. Los costos de la energía generada y consumida por el central.
4. El nivel de información y participación de los recursos humanos sobre los problemas energéticos.

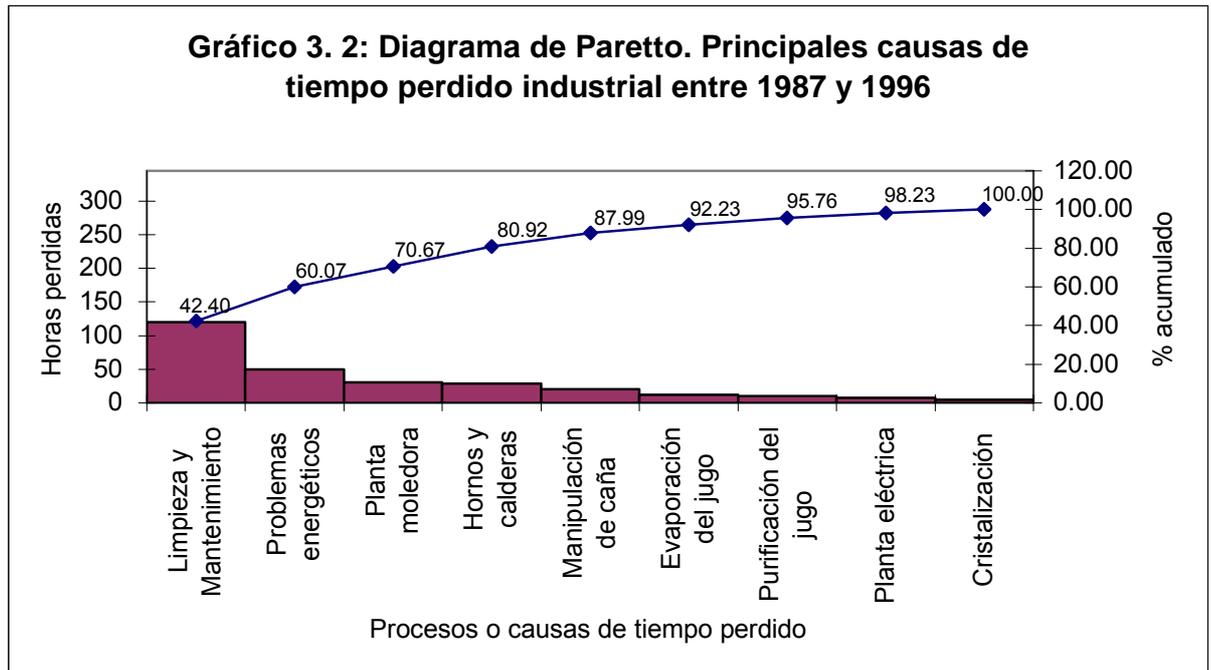
Influencia de los problemas energéticos en la estabilidad de la operación.

Para evaluar este indicador se realizó un análisis del tiempo perdido por problemas energéticos entre 1987 y 1996, información de la norma técnica 37 del MINAZ. Puede interpretarse del **gráfico 3.1** que los problemas energéticos de la fábrica habían estado incidiendo de manera negativa en la estabilidad de operación del central y que la tendencia hasta el año 96 había sido a incrementarse el tiempo perdido por problemas energéticos con pérdidas de salario de 115 172. 64 \$ equivalentes a 6.26 días de trabajo. **Anexo 10.**

**Gráfico 3.1: Incidencia del tiempo perdido por problemas energéticos en la estabilidad del central.**



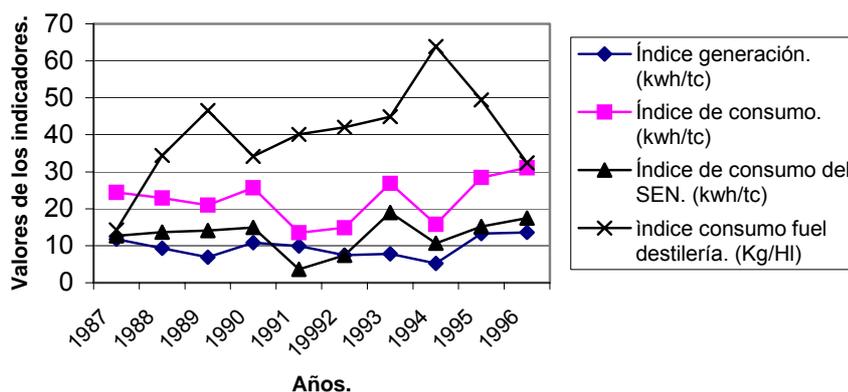
La influencia del tiempo perdido sobre los resultados de la fábrica se validó también al realizar el diagrama de Pareto, **gráfico 3. 2** y comprobarse que el tiempo perdido por problemas energéticos era la segunda causa de tiempo perdido industrial en los diez años anteriores, lo que permitió ratificar que no solo eran necesarios los cambios del equipamiento, sino también de la gestión energética y que este tema debía estar en las prioridades de la gestión en esta industria.



**Resultados de los indicadores energéticos que se utilizan en el proceso de gestión.**

Puede observarse del gráfico 3. 3 que los indicadores energéticos fundamentales, tanto del central como de la Destilería se habían empeorado en los 10 años analizados, a pesar de que se habían efectuado inversiones en el área energética en ambos casos. [Can 96], [Rom 97], [Rom 01].

**Gráfico 3. 3: Comportamiento de los principales indicadores energéticos del central.**



Los costos de la energía generada y consumida por el central.

Del análisis de los costos es significativo que el central estaba pagando la energía eléctrica al SEN a 251 \$/MWh, teniendo en cuenta el consumo y el total que se facturó, sin embargo la energía eléctrica que se producía tenía un costo de 51,11 \$/MWh, anexo 9 y 11, por tales

causas en energía eléctrica comprada al SEN el CAI pagó 4,68 \$/t de azúcar en 1997, por energía eléctrica autoproducida el costo fue de 5,85 \$/t, por la generación del vapor 14,6 \$/t ; en total por el consumo energético en el área industrial el costo fue de 25,13 \$/t. Mejorando el aprovechamiento del potencial instalado, podría disminuir el costo de producción en 6,96 \$/t.

Nivel de información y participación de los hombres en los problemas energéticos.

Para evaluar este aspecto, se encuestaron 162 trabajadores; para lograr nivel de representatividad en el diagnóstico por categorías ocupacionales, se estratificó la muestra para asignar 12 encuestas a dirigentes, 11 a personal técnico y el resto a obreros [Ver 97], [Bra 97], [Rom 97] y [Rom 01]. Se utilizó un tratamiento estadístico descriptivo y se determinó el % de respuesta en cada caso.

Al revisar el gráfico del **anexo 12** puede interpretarse el resultado estadístico de las encuestas aplicadas a los trabajadores, cuyos resultados se pueden resumir en los siguientes puntos.

**1 - Conocimiento de medidas de ahorro energético regular en la mayoría de los trabajadores.**

2 - La mayoría planteó conocer el estado de consumo de portadores energéticos en el CAI solo de forma moderada, pero un 43,57 % de los obreros no conocían nada.

3 - Un elevado número de encuestados (80 %) planteaba que con su labor podía ahorrar energía, el 20 % de los obreros, el 18,18 % de los técnicos y el 25 % de los dirigentes planteó no tener nada que hacer para ahorrar energía, demostrándose la necesidad de capacitación.

4 El 77 % estaba informados de la situación energética del país, en contradicción con el 24,29 % de los obreros, el 9,09 % de los técnicos y un 25 % de los dirigentes.

En sentido general el análisis de los recursos humanos ratificó que la capacitación de estos era deficiente e influía negativamente en los problemas energéticos de los años evaluados, demostró además que en el personal de dirección el desconocimiento era marcado respecto al resto de los encuestados, por lo que se comprobó la necesidad de un plan de capacitación que partiera de la discusión, con el personal implicado, de los análisis y soluciones de los problemas energéticos, hasta la participación en cursos de superación de todo el personal; se ratificó que para desarrollar la cogeneración es muy importante el trabajo con los hombres.

Balances de masa y energía del esquema térmico.

Al revisar el gráfico del **anexo 13**, resumen de los balances de masa y energías realizados en varios años a esta fábrica, puede entenderse que la eficiencia de los generadores de vapor disminuyó entre el 1994 y el 1996 de forma sistemática, mientras que el consumo de vapor en proceso creció en los mismos años de 420 Kgv/tc a 523,3 Kgv/tc según resultados obtenidos y reportados por [Rom 97], [Rom 01], que ratificaba la necesidad del mejoramiento energético.

### **Análisis usando simulación y sistema experto.**

Se utilizó la estrategia de análisis Termoazúcar – ANSTE y se obtuvieron precisiones energéticas de las áreas y equipos de la fábrica con varias recomendaciones en cada caso. Los resultados de la simulación caracterizaron la situación que en la práctica se estaba presentando en el ingenio, el sistema experto encontró una gran cantidad de deficiencias en el esquema energético de la industria. Una recomendación para el rubro bagazo sobrante, 11 para el uso del vapor, 9 en generación de vapor, 4 en generación y consumo de electricidad, no existieron recomendaciones para el uso del agua, en cuanto a capacidades instaladas se hicieron 11 recomendaciones.

Según simulación realizada y sistema experto las recomendaciones más importantes fueron:

- Sustituir los generadores de vapor, pues con las eficiencias de los existentes era imposible obtener mayores rendimientos térmicos.
- Disminuir la cantidad de vapor que se expansionaba en la válvula reductora, pues esto, constituye un fenómeno indeseado por las pérdidas de exergía que provoca.
- Incrementar el nivel de aprovechamiento de los turbogeneradores instalados.
- Realizar un mayor uso de las extracciones de vapor en los evaporadores, para poder disminuir el IC de vapor en proceso.
- Valorar la posibilidad de trabajar a presiones iguales o mayores que 250 psig (1.42 MPa), lo cual garantiza un menor índice de consumo de vapor por KWh generado.

La simulación de la fábrica, dentro de la estrategia, permitió definir aspectos a revisar dentro del esquema termoenergético para proponer medidas de mejoramiento, además la utilización de la simulación con termoazúcar brindó una amplia cantidad de información que facilitó posteriormente la realización del balance de exergía del esquema.

**Balance de exergía de la fábrica.**

Resultados del balance de exergía, ver **tablas 3. 1, 3. 2 y 3. 3**, así como en los **anexos 14 y 15**.

Tabla 3. 1: Resultados del balance de exergía, subsistema de transformación de la energía.

EQUIPO O AREA	$\Sigma e'$ (KW)	$\Sigma e''$ (KW)	PERDIDAS	$\eta$ %	G
Calderas	88650.19	32 408.29	56241.9	36.55	2.74
Turbos	14 624.42	12 900.8	1999.07	86.33	1.16
Valv. Reduct.	6442.75	4191.96	2250.79	65	1.54
Maquinas y bombas de vapor.	4752.05	3145.07	1190.22	75	1.33
Subsist. de transf. de la energía.	88650.19	29028.66	59621.53	32.74	3.05

Tabla: 3. 2: Resultados del balance de exergía al subsistema de transformación de la sustancia.

EQUIPO O AREA	$\Sigma e'$ (KW)	$\Sigma e''$ (KW)	PERDIDAS	$\eta$ %	G
Tandem	115 251.13	91 883.01	23 368.12	79.72	1.25
Alcalizac.	4732.79	306.56	4426.23	6.47	15.4
Calent 1	1333.79	500.89	832.90	37.55	2.66
Calent 2	1646.61	1254.53	392.08	76.2	1.31
Calent 3	2553.45	2093.99	459.46	82	1.22
Calent JC	3012.04	2473.44	538.6	82.1	1.22
Tanq. Flash	2303.99	2292.64	11.35	99.5	1.00
Clarif.	2288.49	2254.37	34.12	98.5	1.02
Preevap.	10364.08	4372.04	992.04	90.42	1.11
Múltiple efecto	8295.11	6985.93	1309.18	84.22	1.19
Tach, crist y cent.	9754.46	4866.47	4887.47	49.88	2
Filtros	391.78	296.15	95.63	75.59	1.32
Subsist. transf. de la sust.	136 530.04	94 840.57	41689.47	69.46	1.44

**Tabla 3. 3:** Resultados del balance de exergía de toda la fábrica.

EQUIPO O AREA	$\Sigma e'$ (KW)	$\Sigma e''$ (KW)	PERDIDAS	$\eta$ %	G
Central	112 765.96	14458.59	98307.87	12.82	7.8

El balance de exergías confirmó la necesidad de sustituir los generadores de vapor, ya que la eficiencia exergética de los que estaban instalados no excedía el 36, 55 % y en ellos se pierde el 63, 4 % de la disponibilidad de realizar trabajo que entra al subsistema, en la válvula reductora, en las máquinas y bombas de vapor las eficiencias exergéticas no sobrepasaban el 75 %. En el subsistema de transformación de la sustancia resultó llamativa la baja eficiencia exergética del calentador No1 y el área de tachos y cristalizadores con eficiencias de 38 y 50 % respectivamente. La eficiencia exergética del central fue de 12, 82 % y el balance se realizó con un error de 0,7 %, como se puede apreciar en los [anexos 14 y 15](#). Estos valores son superiores a los reportados por [\[Bah 91\]](#) [\[Cru 94\]](#) y [\[Rom 02A\]](#) en las fábricas analizadas por ellos, pero puede ser aún mayor si se analiza la existencia de varios potenciales para incrementar la eficiencia exergética.

### **Resumen del diagnóstico.**

Los resultados del diagnóstico de la fábrica seleccionada demostraron que los problemas energéticos constituían una prioridad a resolver, que estaban influyendo de forma negativa en los costos y la eficiencia; demostraron además que las causas fundamentales estaban en la generación de vapor y el consumo de proceso, a la vez que se comprobó que el trabajo con los

hombres necesitaba también una atención especial. En general el diagnóstico realizado permitió identificar los siguientes puntos débiles en el esquema energético.

1. Baja eficiencia de los generadores de vapor y baja presión del vapor directo.
2. Necesidad de realizar cambios en el sistema motriz del TANDEM.
3. Elevado consumo de vapor en proceso, baja eficiencia exergética en calentador1, evaporadores y tachos.
4. Necesidad de incrementar la autogeneración de electricidad, pues esta energía es menos costosa que la adquirida del SEN.
5. Deficiente capacitación de los recursos humanos.

#### 3.4 Propuesta inicial de alternativas de mejoramiento y de inversiones para cogenerar.

Conocidos los puntos débiles se desarrolló un trabajo con expertos de la empresa azucarera y de la delegación provincial del MINAZ y el IPROYAZ, para realizar propuestas de alternativas para incrementar la entrega de electricidad al SEN. Al realizar propuestas de alternativas tecnológicas del esquema térmico, se tuvieron en cuenta aquellas que proporcionarían un impacto a la venta de electricidad con algunas modificaciones en la forma de operar las instalaciones existentes o con pequeñas inversiones, al mismo tiempo se propusieron otras variantes de inversión en nuevas tecnologías que provocan un salto superior en los resultados.

Los aspectos tenidos en cuenta para la propuesta de variantes en la fábrica Melanio Hernández fueron los siguientes:

- Resultados energéticos históricos del central.
- Resultados de balances de energía, la simulación y el análisis con sistema experto.
- Resultados del balance de exergía.
- Las perspectivas de inversión en nuevas tecnologías para la cogeneración, para ello se proponen dos variantes con turbos de contrapresión y una con turbos de extracción condensación.

El trabajo permitió la propuesta de tres variantes de modificación de los esquemas de evaporación cocción calentamiento y tres de inversión en el área energética. Se destacan tres variantes cuyo objetivo central constituyó elevar el aprovechamiento de los turbos al 100 % y en todas se propone invertir en calderas de vapor y el uso de un intercambiador líquido-líquido para la primera etapa de calentamiento y montar un calentador Vampiro [Rom 97]. Ver anexos 16, 17 y 18.

Se estudiaron dos variantes de inversión con recursos disponibles en el país con el objetivo de montar 10 MW de potencia en el área energética, se realizarían inversiones en esta área que

permitan trabajar a 1.96 MPa (20 ata) y pasando todo el vapor por los turbogeneradores. Estas variantes además permiten incrementar la producción de la destilería de 600 HI/día a 900 HI/día, la que se integra energéticamente con el vapor de escape del proceso al igual que en las tres variantes anteriores. Estas últimas dos variantes se diferencian solamente en la forma de operar el área de evaporación. Ver [anexos 19 y 20 \[Rom 97\]](#).

Finalmente se analizó una sexta variante, que se muestra en los [anexos 21 y 22](#), que constituiría la variante de mayor inversión, la más abarcadora y la que implica el cambio tecnológico deseado, ya que posibilitaría montar una caldera de 140 t/h a 48 atm y 460 °C y un turbo de extracción condensación de 20 MW que se utiliza al 100 % durante la zafra y exporta al SEN 13 MW . En el período fuera de zafra continuará la operación del central con caña energética generando 16 MW y exportando 14 MW, esta variante y sus posibilidades de operación durante y después de la zafra, ha sido estudiada y reportada por el autor en los últimos años [\[Rom 97\]](#), [\[Rom 01\]](#), [\[RomB 01\]](#).

**Esto dio lugar a 6 variantes, tres de mejoramiento energético de la fábrica y tres de inversión para la cogeneración que fueron:**

- **Variante 1.** Calentador condensado - jugo en primera etapa, Vampiro y séxtuple efecto.
- **Variante 2.** Similar con quintuple efecto y PRE generando para los tachos.
- **Variante 3.** Igual con un triple y un séxtuple en serie.
- **Variantes 4 y 5.** Turbo de 10 MW, incremento de la presión a 1,96 Mpa. Variante 4 con doble y quintuple en serie y la variante 5 con triple, pre y cuádruple efecto.
- **Variante 6.** Esta variante, sería una combinación de una caldera de 140 t/h de vapor a 4,8 MPa y 460 °C con un turbogenerador de extracción condensación, el que generaría 20 MW de potencia durante la zafra azucarera y 16 MW en la zafra energética, este esquema garantiza toda la demanda de vapor de la destilería y el central, para cualquier variante de proceso que se utilice.

### **3.5 Análisis tecnológico de las variantes.**

En los [anexos 23, 24, 25 y 26](#), se muestran indicadores para el esquema que se utilizó en el año 96 y para cada una de las variantes propuestas, excepto la # 6, obtenidos mediante simulación con AGE – ÓPTIMO; puede verse que todas las variantes presentan menores índices de consumo de vapor en proceso que el esquema utilizado y que la variante # 2 es la que menos consume y se obtendría la mayor cantidad de bagazo sobrante. La variante # 4, una de las estudiadas para trabajar a 1.96 MPa es la que menor consumo de vapor en proceso presenta. Todas las variantes permiten entregar el máximo de la demanda de vapor de la

destilería, que asegura la integración energética de la producción de azúcar y derivados desde el punto de vista térmico, aunque en lo concerniente a energía eléctrica solo las variantes 4 y 5 podrían cubrir la demanda de la destilería.

### 3.6 Análisis de prefactibilidad económica de las variantes.

Para realizar el análisis económico de las propuestas se consideró una vida útil de 10 años para las variantes 1, 2 y 3 de mejoramiento y 20 para las variantes 4, 5 y 6 a largo plazo; los costos de inversión se calcularon, basándose en los costos de adquisición e instalación de los equipos de cada variante según los datos del IPROYAZ en la provincia. Por su parte los flujos de caja se determinaron teniendo en cuenta los ahorros por concepto de energía dejada de adquirir del SEN o vendida a este, así como por el combustible (fuel oil) dejado de consumir por la destilería durante el período de zafra en la producción de alcohol según [Fab 96]. Se consideró un % de interés del 22 % para todas las variantes.

En el caso de la variante que se propone a alta presión se determinó el costo de inversión de acuerdo con lo reportado por la bibliografía donde se plantea que estas tecnologías tienen costos entre 1.25 y 2 millones de dólares por MW instalado. En esta variante, No 6, la capacidad a instalar es de 20 MW y se consideró un costo total de inversión de \$ 30 000 000. Con esta alternativa el CAI exportaría 104 400 MWh de electricidad al año que vendida a un precio de 0.06958 \$/kWh., promedio ponderado a que se vende y compra la energía eléctrica, representa un flujo de caja de \$ 7 264 152 al año, añadiéndose además el valor de 5760 t de fuel oil que se dejarían de comprar para la producción de alcohol, ascendente a 645 120 \$/año y el incremento de la producción mercantil por otras producciones, ver tabla 3. 4.

**Tabla 3. 4:** Incremento de la producción mercantil del CAI por otras producciones.

Producto	U/M	Producción. + Inc. - Dec.	Precio de Venta	Valor Total
Alcohol	HI	+ 90 000	26.5	2 397 600
Levadura	tm	+750	338.05	253 875
Gas Carbonico	tm	+750	46.05	34 537.5
Azúcar	tm	-58.5	240	14 040

Se hicieron corridas de esta variante con el propio programa, considerando como precios de la energía eléctrica 5, 6, 7, 8, 9 y 10 centavos por KWh. Finalmente se hizo un análisis comparativo con el programa flujos, comparando la variante 6 generando solo durante la zafra y todo el año. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 3. 5.

**Tabla 3. 5:** Resultados del análisis económico de las 6 variantes propuestas con el STORM.

ALTERNATIVA	VAN	PR	TIR
1	1 565 674	0.31	Inf.
2	1 582 282	0.26	Inf.
3	1 582 282	0.26	Inf.
4	-9 160 100	N/A	4.96
5	-9 160 100	N/A	4.96
ALTA PRESION	21 595 000	4.6	35.23

Como se puede apreciar la alternativa a alta presión es la que mayor Valor Actual Neto (VAN) alcanza, [anexo 27](#), por lo que parece la más factible. En esta alternativa el Período de Recuperación (PR) es de 4.6 años, lo que la hace atractiva. En el caso de las propuestas a corto plazo las variantes 2 y 3 ofrecen los mejores resultados con los mayores VAN y se recuperan en menos tiempo. Las variantes 4 y 5 dan valores de VAN negativos y sus PR indican que no se recuperará en los años de vida útil de las inversiones, por lo que no son atractivas y se desechan para continuar el análisis.

La variante 6, considerando que opera solamente en una zafra de 150 días y operando 330 días con incremento de la producción de azúcar y alcohol, tendría los siguientes resultados:

Operación 150 días: VAN = - 8, 9 millones de USD. TIR = 4,8 % PR = 13,65 años.

Operación 330 días: VAN = 34,9 millones de USD. TIR = 26,5 % PR = 4,73 años.

Se ratificó así que si se invierte en esta tecnología para operar solamente 150 días la inversión no se amortiza, en tanto si se extiende la operación a 330 días los resultados financieros que se obtienen hacen atractiva la inversión. Al representar en un gráfico xy estos dos puntos, se obtiene que esta alternativa necesita operar más de 187 días anuales para que el VAN sea positivo, ver [Anexo 30 A](#).

### **3.7 Estudio profundo de alternativas seleccionadas.**

El resultado del estudio profundo de las variantes con la utilización de la estrategia Termoazúcar – ANSTE aparece resumido en los [anexos 28 y 29](#), obteniéndose los mejores resultados para la variante No 3, según la simulación y el análisis con sistema experto.

También se evaluó el índice de consumo de vapor para la generación de electricidad de la variante 6, para ello se simuló la variante utilizando el software Energía; se encontró que los incrementos de presión y temperatura del vapor generado en la caldera producen, como era de esperar una disminución en el índice de consumo de vapor y combustible por kWh de energía eléctrica que se genere, esto ratifica la necesidad de una tecnología que asegure un incremento de la presión de trabajo. [Ver anexo 30](#).

### 3.8 Comparación entre variantes según criterios exergeticos y termoeconomicos.

Pérdidas exergeticas asociadas al esquema del central y a la variante No 3 como alternativa de mejoramiento energetico y la 6 como alternativa de inversion. Ver [tablas 3. 6, 3. 7](#) y [anexo 31](#).

Tabla 3. 6: Pérdidas exergeticas del central y las variantes seleccionadas.

VARIANTE	$\Sigma e'$ (KW)	$\Sigma e''$ (KW)	Pérdidas	$\eta$ %	G
Central	112765.96	14458.59	98307.87	12.82	7.8
Variante 3	112336.4	21022.54	91313.86	18.71	5.34
Variante 6	111936.4	32092.37	79844.03	28.67	3.49

Tabla 3. 7: Costos de las pérdidas exergeticas asociadas a los diferentes esquemas.

Variante	Pérdidas de exergetica	costo de la exergetica	Costo horario	Costo diario	Costo en una zafra
Central	98307.87	0.0005245	51.56	1237.44	148492.8
Variante 3	91313.86	0.0002604	23.78	570.72	68486.4
Variante 6	79844.03	0.000012772	1.02	24.48	2937.6

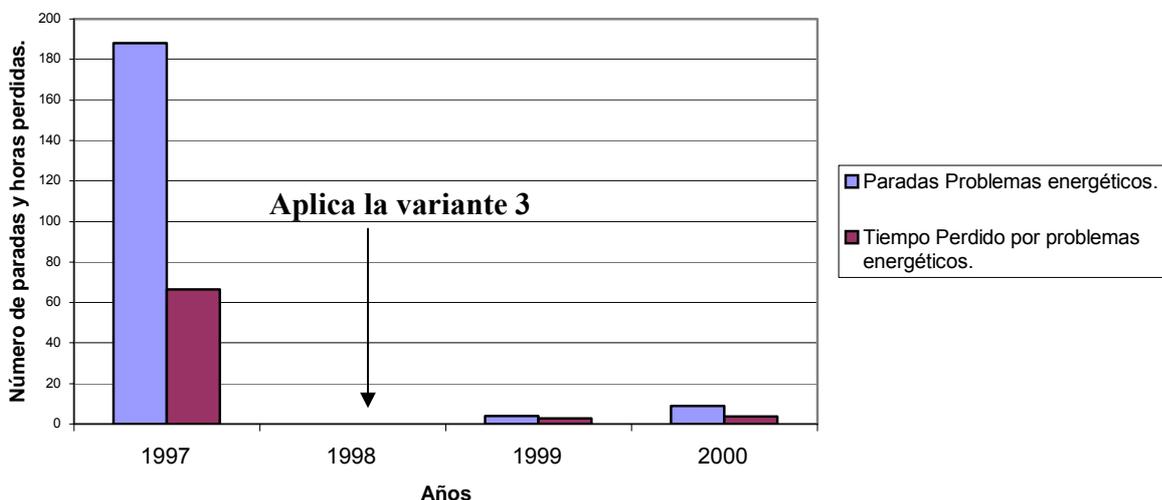
Puede apreciarse que ambas variantes posibilitan un incremento de la eficiencia exergetica general de la fábrica, disminuir el consumo de combustible y una disminucion considerable de los costos asociados a pérdidas exergeticas, confirmándose así lo planteado durante el diagnóstico. Los resultados obtenidos durante la evaluacion de las alternativas permitieron proponer a la direccion de la empresa que la mejor opcion de mejoramiento energetico era la variante tres, aunque todas mejorarian los resultados energeticos y las mayores posibilidades para invertir lo era trabajar en la alternativa 6 que se evaluó, recomendándose profundizar en la misma, pues se necesitaba que esta permaneciera en operacion cerca de 330 días anuales, pero no existía el combustible necesario para generar electricidad 180 días adicionales a la zafra azucarera.

### 3.9 Resultados parciales después de varios años de trabajo en esta fábrica.

Si se revisa en el [gráfico 3. 4](#) puede observarse, que después de aplicarse la alternativa 3 no se reportó tiempo perdido por problemas energeticos en el año 98, considérese que en el 97 existieron 188 paradas o reducciones de molida con 66. 45 horas perdidas por este concepto; sin embargo, en el 99 solo aparecen 4 paradas con 2, 75 horas y en el 2000 se reportaron por este concepto 9 paradas con solo 3, 75 h; por solo ese motivo se produjeron en estos años ahorros anuales entre 48 000 y 50 000 \$, al no incurrirse en gastos improductivos. Para ratificar la validéz de la metodologia se comprobó que del 97 al 2000 el % de aprovechamiento de los turbos se incrementó del 43 al 68 % y ya en el 2002 alcanzó el 91 %,

lográndose además un autoabastecimiento eléctrico en el 2002 del 98 %, esto hizo posible que este central entregara 2.16 kWh/tc al SEN durante esa zafra, 6.44 en el 2003 y 7.15 en el 2004.

**Gráfico 3. 4: Problemas energéticos después de aplicar la estrategia de análisis.**



### 3.10 Nuevas oportunidades de incrementar los niveles de entrega de energía eléctrica.

#### Potenciales de ahorro de energía eléctrica.

Un resumen de la situación de los costos de energía eléctrica aparece en el [anexo 32](#), aspecto que debe ser seguido de cerca en proyectos con fines de elevar la cogeneración como alternativa de integración y diversificación, ya que las relaciones de precios de venta y compra existentes hasta el 2001, desestiman económicamente la generación de energía eléctrica con bagazo. Un resumen de los electrobalances de la fábrica aparece en los [anexo 33 y 34](#).

Se realizó un estudio de la reubicación de las unidades capacitivas desde la barra central, donde estaban instalados, hasta los diferentes punto del sistema, pues a pesar de tener un factor de potencia adecuado en la barra central, en algunos circuitos, este factor resultó muy bajo. Los capacitores deben ser instalados con la observación de las exigencias de seguridad contra incendio en la pizarra de distribución de los grupos de carga, debido a que la instalación centralizada en la pizarra central es menos conveniente. Los grandes bancos de capacitores se separaron en pequeñas unidades y se distribuyeron por los circuitos que más circulaba la potencia reactiva y tuvieran mas bajo el factor de potencia. La reubicación de las unidades capacitivas aparece en el [anexo 35](#). La [tabla 3.8](#) informa de los ahorros de energía activa y reactiva que se obtiene en el electrobalance al reubicar los capacitores.

**Tabla 3. 8:** "Reducciones de perdidas por la reubicación de las unidades capacitivas"

Elemento	Perd. (kWh/d)	Perd. (KVARh/d)	Red. de Per. (kWh/d)	Red. de Per. KVARh/d)	Reducción de Perdidas en el Central. (MWh/a)	
					Activa	Reactiva
Línea	1260	932	768	24		
Transformadores	342	1842	3	433	78,64	44,47

Estos ahorros pueden convertirse en ingresos por más de 3 800 USD por zafras, si se exportan al SEN a un precio de 48 \$/MWh, puede observarse el impacto que puede tener una sola transformación en los circuitos eléctricos, esto ratifica la necesidad de profundizar en aspectos referidos al consumo de energía eléctrica si se quiere incrementar la entrega al SEN.

Potenciales de ahorro de energía mecánica.

Para evaluar el potencial de ahorro de energía mecánica, se identificaron tres elementos altos consumidores que resultaron los sistemas de bombeo, el TANDEM y los conductores para el transporte de sólidos. La [tabla 3.9](#) muestra los resultados de simular la sustitución de 11 motores subcargados de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia, solución que daría lugar a una reducción del consumo de energía eléctrica de 709 kWh/d, lo que representaría para una zafra de 120 días y un 15 % de tiempo perdido un total de 72.32 MWh/zafra que se podrían vender al SEN y producir ingresos de alrededor de 3 500 \$ para el mismo período.

**Tabla 3. 9:** "Ahorros por sustitución de motores de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia".

Motor	KW (baja efi.)	HP (alta efi.)	Fp(%)	Ef.(%)	Carga(%)	E.ahor. (kWh/d)	E.ahor. (kVARdd)
M46	100	40	23.8	10	84.1	74.4	559.7
M113	185	125	6.7	5.1	82.9	110.4	430.7
M149	180	100	15.3	6.6	89	122.4	808.2
M132	127	100	5.5	4.1	84.5	70.8	278.7
M50	65	50	8.1	3.1	99	38.4	266.3
M98	85	60	6	2.8	98.6	33.6	202.3
M252	7.46	7.5	10.8	5.7	72.3	7.2	43.4
M253	7.46	5	8.9	9.7	79.2	9.6	40.3
M268	5.5	3	20.8	9.5	99.3	7.2	44.9
M40	7.46	5	9.8	7.5	79.6	7.2	29.5
M26	55	60	2.1	3.3	87.7	36	78.3

Las [tablas 3.10 y 3.11](#) muestran la energía que se puede ahorrar y los ingresos que reportaría su venta si se utilizan reguladores de velocidad en dos bombas, en lugar de recircular jugo

para controlar el flujo, en ambos casos produciría ingresos superiores a los 2500 USD por zafra. Se realizó el cálculo con el software profesional Energy.

Tabla 3. 10: Ahorro de energía bomba de guarapo a fábrica por uso de reguladores de velocidad.

	Resumen de Resultados			
	Throttling	A.C-Drive	Recirculation	A.C-Drive
Consumo (KW.h/zaf.)	134862	83757	137422	83757
Total Energy savings	51105		53665	
USD savings	2453,04		2575,92	

Tabla 3. 11: Ahorro de energía en la Bomba Intupible 5 por el uso de reguladores de velocidad.

	Resumen de Resultados			
	Throttling	A.C-Drive	Recirculation	A.C-Drive
Consumo (KW.h/zaf.)	-	-	137422	83757
Total Energy savings	-		53665	
USD savings	-		2575.2	

En la [tabla 3.12](#), se resume el ahorro energético y el valor de su posible venta, por sustituir los conductores de tablilla para bagazo por conductores de banda. La [tabla 3.13](#) muestra el resumen de los ahorros que se obtendrían para dos variantes alternativas de accionamiento del TANDEM en comparación con las máquinas de vapor.

Tabla 3.12: Ahorro de energía y ganancias por la remodelación de dos conductores de bagazo.

Disminución de potencia en ambos conductores. (kW)	Energía que se ahorra en una zafra de 120 días. (MWh)	Valor de las posibles ventas de esta energía. (\$)
10,61	25,77	1236,96

Tabla 3. 13: Eficiencias de los equipos, consumo de potencia y costos de la energía para dos variantes de accionamiento del TANDEM.

	Alternativas		
	Sist. Actual. Maq. Vapor.	Motores eléctricos.	Motores hidráulicos.
Eficiencia de los equipos motrices. (%)	60.6	95	93
Eficiencia de la transmisión del TANDEM (%)	67.64	60	85
Eficiencia total de equipos motrices y	41	57	79

transmisiones.(%)			
Potencia requerida para accionar los equipos. (KW)	3043.3	2188.2	1577.7
Consumo de energía para una zafra. (KW.h/zaf.)	7449998.4	5356713	3862209.6
Ahorro de energía con relación al esquema actual.		2093,285.4	3587,788.8
Costo de la energía consumida para una zafra.(\$/zaf.)	294200.6	214268.5	154488.4
Ahorros con relación al esquema existente.		79932.1	139712.2

Puede apreciarse que existe un alto potencial por ahorro de energía mecánica, que para este central, según los análisis realizados se podrían ahorrar alrededor de 2,3 GWh de energía en una zafra de 120 días y un 15 % de tiempo perdido, de los que 2.1 GWh, es decir el 91 % se puede aprovechar con solo electrificar el TANDEM. Precisiones de este análisis pueden verse en los [anexos 36, 37, 38, 39 y 40](#). Definitivamente el TANDEM de esta fábrica quedó electrificado en la zafra del 2003.

Potenciales de ahorro de energía térmica.

Para evaluar estos potenciales se profundizó en parámetros termodinámicos de la operación en el área de evaporación – cocción – calentamiento, para lo cual, a la alternativa 3 ya en operación, se le realizaron nuevas evaluaciones y se propusieron nuevas líneas de mejoramiento, como el montaje de un preevaporador de más capacidad, con todos estos elementos se simuló la respuesta energética a obtener. Adicionalmente se realizó el diseño teórico de un intercambiador de calor para la primera etapa de calentamiento del jugo mezclado, el cual funciona con vapor de los tachos; se conoce que el vapor de jugo de los tachos tiene una presión absoluta que puede variar entre 0,14 y 0, 25 bar, en este caso la presión de este vapor es de 0,17 bar y tiene una temperatura de 56,6 ° C aproximadamente. Utilizando esta información se procedió al diseño teórico del equipo, utilizando para ello una hoja de cálculo de Excel dada por [\[Chr 95\]](#) y [\[Rom 99\]](#).

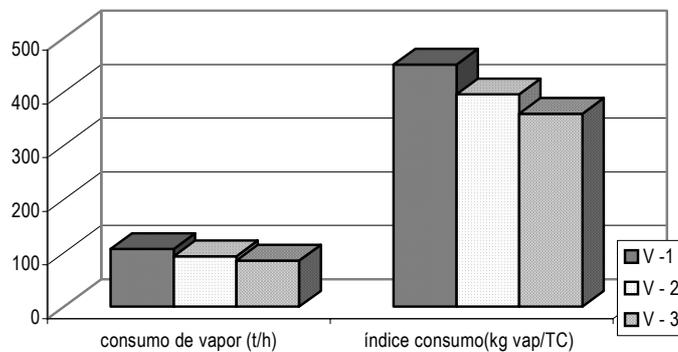
La [tabla 3.14](#) muestra los ahorros de energía que se producirían si al utilizar una turbina de extracción condensación de 23 MW de potencia y 6 MPa de presión de vapor, al esquema térmico de proceso en operación en Melanio Hernández se le incorporan un nuevo preevaporador de mayor capacidad y se mejoran los parámetros termodinámicos en evaporadores y calentadores, esto podría incrementar la generación en 0.71 MW de potencia y los ingresos en 98 150 \$/zafra.

Tabla 3. 14: Incremento de la generación por cambios en el esquema energético.

	Consumo vap(t/h)	Exergía entrada	Pérdida exergía	Exergía térmica	Generac. Electric.	Ganancias
Propuesta 3	86.1	38.96 Mw	6.56 Mw	87.11 Mw	23.69 Mw	0.71 MW
Propuesta A.	107.95	38.96 Mw	6.56 Mw	94.07 Mw	22.97 Mw	98150.4 \$

La determinación del ahorro de vapor por una nueva modificación al esquema térmico para incrementar la generación de energía eléctrica en una turbina de extracción condensación se resume en el [gráfico 3.5](#), puede verse como es posible aprovechar nuevos potenciales de energía térmica a partir del mejoramiento de los parámetros de operación de los equipos de proceso, simulados con el SIMFAD; por otra parte el diseño teórico de un intercambiador que trabaja con vapor de los tachos constituye una posibilidad novedosa de explotar mejor el potencial de los flujos térmicos intermedios del proceso azucarero, para generar mayor cantidad de energía eléctrica al SEN, algunos detalles adicionales en [los anexos 41, 42, 43, 44, 45 y 46](#).

Gráfico 3.5: Índice y consumo de vapor para las propuestas 1, 2 y 3



### 3.11 Propuesta de una tecnología para realizar el estudio.

Después de profundizar en la alternativa de mejoramiento energético seleccionada e identificar los potenciales de entrega por ahorro de energía, se trabajó con la alternativa de inversión que se eligió, para ello inicialmente se realizó un análisis de la tecnología a emplear a partir de las ofertas solicitadas a distintos proveedores y a través de un análisis con expertos de la fábrica y el MINAZ; la tecnología seleccionada para la inversión en una planta de cogeneración con altos parámetros en Melanio Hernández fue la siguiente.

Según la necesidad de incrementar la presión del vapor que llega a la turbina para disminuir los índices de consumo, se propuso montar una planta térmica basada en una caldera de 160 t/h de vapor por hora a 6 MPa y 490 ° C, que entregaría vapor a una turbina de extracción condensación de 23 MW, con extracciones de vapor a 0,96 MPa que se enviará a la destilería y a 0,25 MPa para la fábrica de azúcar, para condensar el restante a 0,008 MPa. Con este arreglo se satisface la demanda de calor y electricidad del central y la destilería; se incrementa la capacidad de molida del central de 4 600 t/d a 5750 t/d y la capacidad de producción de la destilería de 600 a 900 HI/d. Ver indicadores de este arreglo en la [tabla 3. 15](#).

De la **tabla 3.15** puede observarse que la relación Q/Ed (demandada) está dentro de lo establecido por [Con 95B] y [Con 95A] para turbinas de vapor, lo que demuestra que la selección realizada es correcta, por otra parte puede observarse como la eficiencia de la cogeneración y la eficiencia energética global de la instalación es alta, pero los mayores valores se alcanzan cuando existe una integración entre el central y la destilería, lo que se demuestra en el decrecimiento de la eficiencia después de la zafra azucarera. Estos valores ratifican la importancia de la operación del complejo diversificado e integrado.

Para la tecnología propuesta se determinaron los indicadores, según procedimiento de cálculo que aparece en el capítulo 2.

Los mismos se calcularon en este trabajo para los siguientes casos.

1. La zafra azucarera sin y con el consumo de la destilería y la planta térmica.
2. La planta térmica y la destilería sin y con la supuesta operación del TANDEM después de la zafra.

Tabla 3.15 : Indicadores energéticos de la tecnología propuesta para la planta de cogeneración de Melanio Hernández en su integración con la producción de azúcar y derivados.

Casos	Cent.	Cent. + Pta térm	Cent. + Dest.	Cent. + Dest. + Pta térm.	Pta Térm y Destilería. Molida después de la zafra.	Pta Térm y Destilería. Sin moler después de la zafra.
Q/Ed (kWt /kWe)	11,31	7,70	13,68	9,59	4,82	7,6
Q/Eg (kWt /kWe)	2,91	2,91	3,85	3,85	1,22	1,12
ICN (kWt /kWe)	1,40	1,40	0,041	0,041	2,66	2,83
IAE (kWt /kWe)	2,71	2,71	1,77	1,77	3,21	3,33
$\eta$ cog (%)	37	37	56	56	31	30
$\eta$ glob (%)	69,6	69,6	86,3	86,3	50,0	47,6

### 3.12 Propuesta y evaluación de alternativa de combustible

Después de aplicar la metodología y demostrar que la alternativa de inversión propuesta debe operar más de 186 días anuales y que en tanto mayor sea el período de operación, mayor serán también las ganancias financieras a esperar, se decidió estimar una operación de 330 días por año, para ello era necesario estudiar la disponibilidad de combustible para asegurar la generación de electricidad durante todo ese tiempo. Se analizó que cerca de la fábrica Melanio Hernández no existen reservas de combustibles que podrían cubrir la demanda de la operación al terminar la zafra, que la producción de biomasa forestal no está desarrollada en la región donde está enclavado este central, por lo que no existen condiciones para generar con leña al

término de la zafra. Se analizó la alternativa de utilizar RAC como combustible después de la zafra, pero esto solo es posible recolectando de varias fábricas según [CasC 99] y algunas de ellas ya están fuera de servicio, otras alternativas como continuar la producción de azúcar y utilizar petróleo fueron tenidas en cuenta, pero todas tenían limitantes.

Se analizaron reportes bibliográficos de variedades de muy alto contenido de fibra que se obtienen como consecuencia de cruzamientos en las estaciones de producción de variedades cañeras y que comúnmente en Cuba se les denomina variedades de caña energética, pues tienen una alta capacidad de producción de biomasa y pueden producir más de 70 % de bagazo, sin embargo no existe suficiente información de las posibilidades de producir y procesar industrialmente estas variedades.

La propuesta de alternativa de combustible que se realizó, consiste en procesar variedades de caña energética como materia prima al terminar la zafra azucarera, la que puede aportar el bagazo como combustible para continuar la operación de la planta térmica a más de 300 días y permite extraer determinadas cantidades de jugos que pueden tener utilidad en la producción de derivados y garantizar así no solo una integración energética sino también material de la producción de azúcar y derivados. La Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA) realizó un estudio de las posibilidades de producir industrialmente la caña energética y dió como respuesta, que es posible producir estas variedades en diferentes tipos de suelos, incluidos los no aptos para producir variedades azucareras, sin grandes exigencias agronómicas, alcanzar altos niveles de germinación y obtener rendimientos agrícolas entre 100 y 180 t/ha. Con la información recibida de las investigaciones agronómicas, se realizó un análisis del área agrícola necesaria para producir toda la biomasa necesaria en esta fábrica con variedades de caña energética después de la zafra o con variedades azucareras tradicionales, los resultados fueron los siguientes.

Área necesaria para la producción de biomasa con variedades energéticas y azucareras.

Área agrícola del central en 1997	.....	1018 Cab.
Área estimada después de asumir áreas de otros centrales.	.....	1350 Cab.
Rendimiento estimado para caña azucarera.	.....	80 500 @/ Cab.
Rendimiento estimado para caña energética.	.....	100 000 @/ Cab

Tabla 3. 16: Área agrícola y posibilidades de producción de biomasa cultivando caña energética y azucarera.

Área agrícola	Caña azucarera	Caña azucarera adicional.	Caña energética	Residuos a recuperar en zafra
1350 cab	1000 cab	650 cab	350 cab	
Rendimiento estimado	80 500 @/cab	80 500 @/ cab	100 000 @/cab	4,2 % de la caña

Producción de caña	925 750 t	602 210 t	402 500 t	
Días de molienda al 100 %	161 días	104 días	70 días	
Producción de biomasa.	277 725 t	180 663 t	241 500 t	38 881 t
Días de generación	220 días	143 días	266 días	43 días

Puede observarse en la [tabla 3.16](#) que bajo las condiciones estudiadas es factible producir biomasa para generar más de 330 días anuales, lo que demuestra que con el uso de las variedades energéticas como materia prima y el aprovechamiento del 4,2 % en caña de los RAC durante la zafra azucarera, es posible extender la generación eléctrica a todo el año, sin necesidad de grandes incrementos en el área agrícola necesaria; sin embargo, para extender la operación con caña azucarera se necesitaría el doble del área que con caña energética.

Lo anterior dio lugar a la propuesta de una nueva solución para la operación integrada de fábricas de azúcar durante todo el año, utilizando los RAC y caña energética al terminar la zafra. La estrategia registrada como solicitud de patente con el número 2002 - 0249, es un aporte del presente trabajo, pues la propuesta de esta materia prima para generar electricidad después de la zafra no ha sido reportada anteriormente y los reportes hechos por [\[Mor 04\]](#) y [\[MINAZ 01A\]](#), hacen referencia a residuos forestales o combustibles fósiles, pero una propuesta que utilice variedades cañeras para aportar el combustible no tiene precedente en la bibliografía consultada. La operación de la fábrica con esta alternativa estaría caracterizada por los períodos de operación siguientes, información que puede profundizarse en el [anexo 47](#).

- **Zafra azucarera.** Se desarrollará en el período de tiempo que normalmente se realiza según las condiciones climáticas de cada región o país. En este período se procesará solamente la caña azucarera.
- **Zafra energética (No 1) en molienda.** Se desarrollará al terminar la zafra azucarera y en la misma se procesará caña energética como materia prima, la que aportará bagazo como combustible y jugo.
- **Zafra energética (No 2) sin molienda.** Se desarrollará al terminar la zafra energética en molienda o en aquellos días en que la operación del TANDEM, durante la zafra azucarera, deba interrumpirse por problemas ajenos a la fábrica; en este período solo se generará energía eléctrica con biomasa almacenada.

Validación de las ventajas de la nueva variante de combustible.

Para validar que la alternativa de combustible propuesta puede tener ventajas sobre otras de las analizadas, se realizó un cálculo de prefactibilidad económica para la inversión de 23 MW,

extendiendo la operación con cuatro combustibles diferentes, las posibilidades de combustibles se describen a continuación.

1. Producir azúcar todo el año, teóricamente no es atractiva por la situación climática y los bajos rendimientos azucareros a partir del bimestre abril – mayo [HerL 00] y [Gru 95]. Considerando que se recolectan un 4,2 % de RAC y que la caña azucarera después de la zafra tendría un rendimiento azucarero promedio de 9 %; se asumió que se venderá todo el azúcar y la electricidad excedente.

2. Usar los RAC, esta variante, limitada porque la disponibilidad de los mismos, de la propia fábrica, no es suficiente para la generación durante todo el período fuera de zafra y porque su almacenamiento se recomienda para períodos inferiores a 90 días. Aunque su utilización puede asegurar el cubrimiento de la demanda de combustible por un período que dependerá del sistema de recolección y transportación que se diseñe para cada fábrica en específico [HerL 00] y [CasC 99]. Se consideró un precio promedio de 13 \$/t considerando lo reportado por [CasC 99] y que sólo se vendería el azúcar de la zafra y la electricidad.

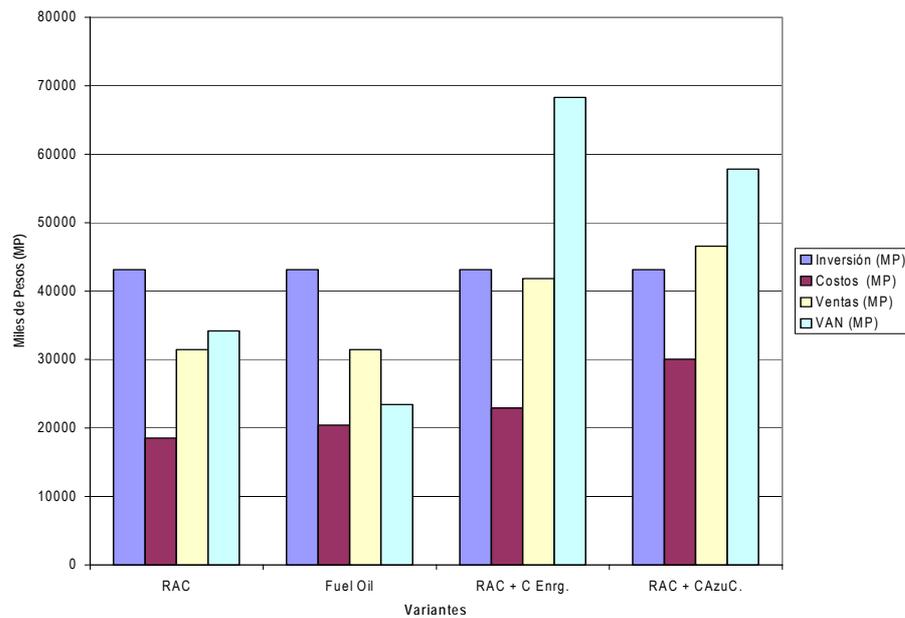
3. Utilizar Crudo Cubano, esta variante, que no es atractiva pues es combustible no renovable, no ofrece los beneficios ambientales de la biomasa según [Tor 02] y por otra parte su utilización fuera de zafra no compite con termoeléctricas convencionales, ya que estas poseen mayor eficiencia energética integral que las plantas anexas a centrales azucareros [HerL 00]; se consideró precio de canasta del crudo de 104 \$/t, según reportes revisados en la empresa eléctrica provincial y a que está en el entorno de los 110 \$/t reportado por [CasC 99]. Se consideraron solo las ventas de azúcar y electricidad.

4. Procesar caña energética, esta variante es la propuesta principal de este trabajo y se basa en la capacidad de producir biomasa de estas variedades, con la variante adicional de que el jugo que se obtenga podría ser usado para producir alcohol [RomB 01], [Gru 95] y [HerL 00], conociendo de antemano que su cosecha no tendría las exigencias de la caña azucarera y por tanto se podrían utilizar máquinas cosechadoras que pudieran cortar en condiciones de mayor humedad, al mismo tiempo, como estas cañas no tienen condiciones para producir azúcar, los factores climatológicos y de rendimientos azucareros no son importantes. Se considera un precio para la caña energética similar al de la caña azucarera y que se obtienen ingresos por las ventas de azúcar, alcohol y electricidad.

Para el análisis de variantes se utilizó la hoja de cálculo Flujo de análisis de inversiones y se determina VAN, TIR y PR de cada variante, considerando como datos de entrada solo la inversión, los costos de las materias primas necesarias y las ganancias por ventas de los productos, se asume valor similar para la inversión en todas las variantes.

El **gráfico 3.6** muestra los valores de inversión, así como costos y ventas anuales para el complejo integrado utilizando diferentes alternativas de combustible después de la zafra, también se da el valor del VAN para cada alternativa de combustible; puede concluirse que, la variante con caña energética ofrece el valor más atractivo del VAN, lo que demuestra que sería la solución de elección para asegurar el combustible después de zafra; más precisiones en el **anexos 48**.

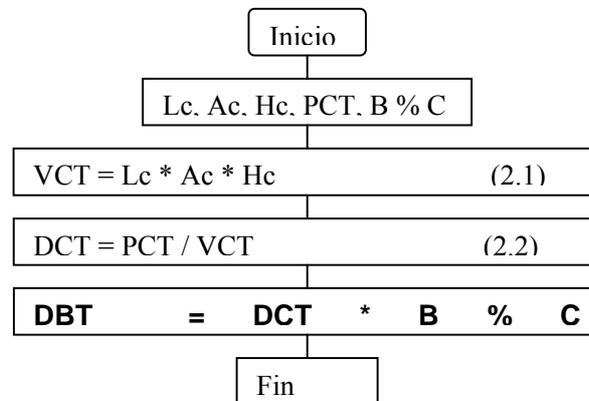
Gráfico 3. 6: Comparación del VAN entre variantes de combustible para después de zafra.



Factibilidad tecnológica de usar caña energética. Prueba industrial.

Para evaluar la factibilidad tecnológica de utilizar caña energética como materia prima al terminar la zafra se realizaron varias pruebas industriales y se evaluaron diferentes parámetros del proceso con caña energética y se compararon con sus valores al procesar caña azucarera; se realizaron mediciones en los días de zafra azucarera y durante las pruebas con caña energética, estos resultados comparativos son un aporte de este trabajo, pues no aparecen reportes bibliográficos de estudios anteriores sobre el uso industrial de caña energética como materia prima. El objetivo fue demostrar la posibilidad de cosechar, transportar y procesar esta caña energética con el equipamiento que se utiliza durante la zafra azucarera, para comprobar la factibilidad de procesar estas variedades de manera continua al terminar el procesamiento de la caña azucarera, para ello se evaluó el transporte de la caña, la preparación, la molida, así como la generación de vapor con el bagazo de estas variedades.

Transporte de la caña: Para evaluar el comportamiento de los medios de transporte se realizaron mediciones de las cargas de caña en carros de ferrocarril y se determinó la densidad específica de la caña transportada según el siguiente diagrama de bloques.



Donde: VCT es **Volúmen de la caña transportada (M<sup>3</sup>)**, Lc es **Largo de la carga (M)**, Ac es **Ancho de la carga (M)**, Hc es **Altura de la carga (M)**, DCT es **Densidad de la caña transportada**, DBT es **la densidad del bagazo transportado**, PCT es **Peso de caña transportada** y B % C es **% de Bagazo de la caña determinado en el laboratorio**.

Preparación de la caña: Para comparar la preparación de la caña se tomaron muestras de la caña preparada y se determinó el índice de preparación, utilizando las mismas técnicas de muestreo y análisis del laboratorio, para ambos tipos de variedades de caña.

Molida de la caña: Para evaluar los resultados de la molida de la caña se realizaron corridas y se determinaron los valores de extracción en % de cada molino, consumo de potencia de los motores en el área de preparación de caña y de molinos, los valores de Bx del jugo primario y mezclado, la cantidad de agua de imbibición y el % añadido. Además se realizó un diseño experimental factorial completo, para obtener el modelo de la humedad del bagazo en función de la molida, la presión de los molinos y la cantidad de agua de imbibición, las variables a utilizar se seleccionaron atendiendo a los resultados reportados por [Góm 02], quien al hacer un diseño experimental con superficie de respuesta en el TANDEM de Melanio Hernández encontró que para la humedad del bagazo estas fueron las variables que entraron en el modelo. El diseño se realizó para dos niveles tanto a caña energética como azucarera; se fijaron los valores a nivel industrial y se tomaron muestras del bagazo para determinar la humedad, a cada experimento se le realizó una réplica. Con los resultados de los experimentos se obtuvo por regresión lineal utilizando el SPSS el modelo de la humedad en función de estas variables, **anexo 49**, con el paquete statistic se obtuvo el diagrama de contorno de la humedad para cada tipo de caña.

Evaluación del área de calderas: Para evaluar la generación de vapor, se realizaron mediciones a la composición de los gases de la caldera y se estimaron la eficiencia y las emisiones que se

producen, tanto al procesar caña azucarera como energética. De estas corridas se reunieron 32 valores con caña azucarera y 31 con caña energética, obteniéndose finalmente por regresión lineal con el SPSS un modelo de la eficiencia de la caldera para ambos tipos de caña en función de algunos parámetros importantes de las calderas como la cantidad y los parámetros del vapor, así como de la humedad del bagazo y el exceso de aire a la caldera, **anexo 50**. Además se tomaron muestras de bagazo procedente de caña azucarera cosechada por los métodos tradicionales, cosechada integralmente y de caña energética, a estas muestras se le determina el valor calórico superior; se determina también la relación fibra dura - meollo. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la eficiencia en las calderas y que se trabajaron en una tabla excel para facilitar los cálculos.

$$\% \text{NO}_x = \% \text{NO} + \% \text{NO}_2 \quad (2.4)$$

$$\% \text{CO}_2 = 21 - \% \text{O}_2 - \% \text{CO} \quad (2.5)$$

$$\text{ExAire} = 21 / \% \text{CO}_2 \quad (2.6)$$

$$\text{VCB} = 4250 - (4850 * f \text{ Humedad}) \quad (2.7)$$

$$\text{Pérdidas Q}_2 = T \text{ gases} * (1 - \text{Hdad}) * ((1,4 * \text{Exc Aire}) + ((0,5 / (1 - \text{Hdad})) - 0,12)) \quad (2.8)$$

$$\text{Q}_2 = (\text{Pérdidas Q}_2 / \text{VCB}) * 100 \quad (2.9)$$

$$\text{Q}_3 = (60 * \% \text{CO}) / (\% \text{CO} + \% \text{CO}_2) \quad (2.10)$$

$$\text{Q}_4 = I \text{ Bacharac} / 1,95 \quad (2.11)$$

$$\text{Q}_5 = (\text{D Vapor} / 50) * 6 \quad (2.12)$$

$$\text{P Totales} = \text{Q}_2 + \text{Q}_3 + \text{Q}_4 + \text{Q}_5 \quad (2.13)$$

$$\text{Eficiencia} = 100 - \text{P Totales} \quad (2.14)$$

El **gráfico 3.7.1** da información acerca de la relación entre el bagazo de la caña energética y la caña azucarera, obtenidos en los análisis de laboratorio realizados durante la prueba industrial; nótese que este valor es siempre mayor que 1 y se mueve entre 1.2 y 2 aproximadamente. Por su parte, los **gráficos 3.7.2 y 3.7.3** expresan la densidad de caña y bagazo en los medios de transporte llenos; puede observarse que aunque se puede transportar menos cantidad de caña, la cantidad de biomasa que llega al central es mayor cuando se transporta caña energética.

Si se revisan los **gráficos del 3.7.4 al 3.7.10**, se observa el comportamiento de la preparación de la caña y la extracción en los molinos al procesar los dos tipos de variedades, puede observarse que se obtiene un índice de preparación similar para ambas variedades, al igual que la extracción, el Bx del jugo, la humedad del bagazo y el consumo de potencia de los molinos, lo que demuestra que el TANDEM puede asimilar la nueva materia prima, sin que ocurran grandes cambios en los resultados generales del área. Por su parte, los **gráficos 3.7.11 y 3.7.12**, muestran los resultados de la eficiencia de las calderas y el valor calórico del bagazo de ambas variedades, puede verse que la eficiencia fue relativamente inferior en los días con caña energética, aunque el valor calórico superior del bagazo no varía por el tipo de variedad. La

tabla 3.17 y los anexos del 51 al 63, refuerzan estas informaciones. Estos resultados no habían sido reportados anteriormente, por lo que son un aporte de este trabajo.

Modelo obtenido para la humedad del bagazo procesando ambas variedades.

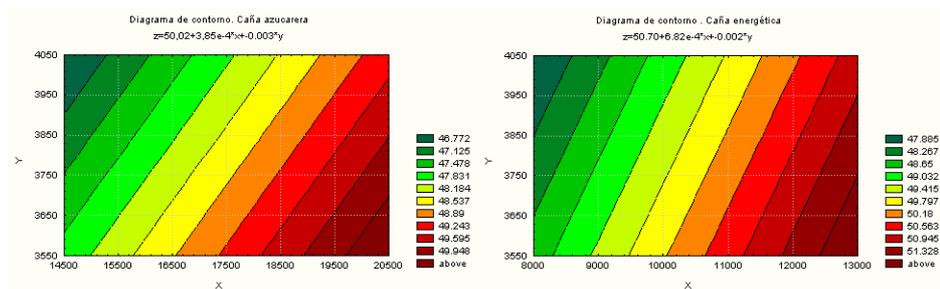
El diseño experimental 2<sup>3</sup> para determinar el modelo matemático de la humedad del bagazo, en función de la molida horaria, la cantidad de agua de imbibición y la presión de los molinos, permitió obtener los siguientes modelos matemáticos para ambos tipos de variedades

Caña azucarera:  $Hdad = 50.02 + 3.85 \times 10^{-4} (\text{molida horaria}) - 0.003 P \quad R^2 = .9979$

Caña energética:  $Hdad = 50.71 + 6.82 \times 10^{-4} (\text{molida horaria}) - 0.002 P \quad R^2 = .9990$

Puede observarse que en ambos casos son incluidas las variables molida horaria y presión de los molinos en el modelo, lo que permite concluir que el tipo de variedad que se procese no influirá significativamente en los resultados de la humedad del bagazo, aunque las variaciones de la molida horaria con caña energética tendrán mayor influencia en la humedad del bagazo al ser dos veces mayor el coeficiente obtenido, lo cual es lógico, ya que la fibra es también dos veces mayor en estas variedades. Estos resultados constituyen también un aporte del trabajo, no encontrándose referencias anteriores de ellos, ver anexo 63. Los siguientes diagramas dan el contorno de humedad a esperar cuando se combinan la molida horaria y la presión, obsérvese que los diagramas de contorno son similares para caña anergética y azucarera, con la única diferencia de que los valores de molida con caña energética son de alrededor del 60 al 70 % con relación a caña azucarera.

Contornos de Humedad según modelo abtenido al procesar caña azucarera (Izaquierda)  
 Contornos de Humedad según modelo abtenido al procesar caña energética. (Derecha)



Modelos obtenidos para la eficiencia de las calderas al utilizar bagazo de ambas variedades.

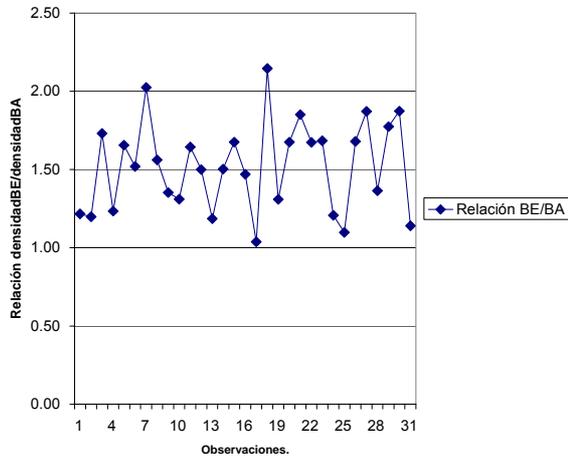
CA:  $Efic = 102.43 - 5.13 (\text{exceso aire}) - 30.13 (\text{hdad bagazo}) - 0.102 (\text{t vapor/h}) \quad R^2 = 0.9014$

CE:  $Efic = 101.74 - 5.31 (\text{exceso aire}) - 26.95 (\text{hdad bagazo}) - 0.117 (\text{t vapor/h}) \quad R^2 = 0.8597$

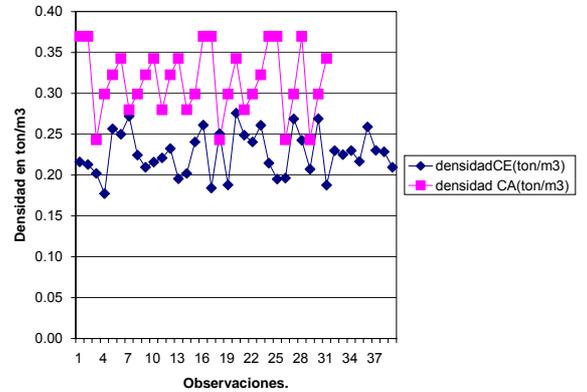
Obsérvese que estos modelos son similares, lo que demuestra que el tipo de caña que se procese no influirá en el trabajo de las calderas. Los modelos obtenidos, anexo 64, para

comparar la operación de las calderas al procesar ambas variedades constituye un aporte del trabajo, sin que se hayan encontrado reportes anteriores sobre este particular.

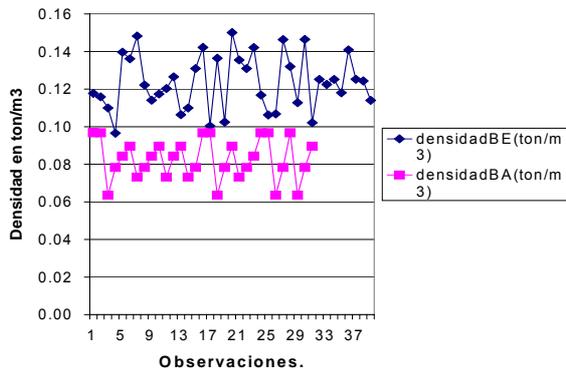
**Gráfico 3.7.1: Relación entre el bagazo de caña energética y el de la caña azucarera transportado.**



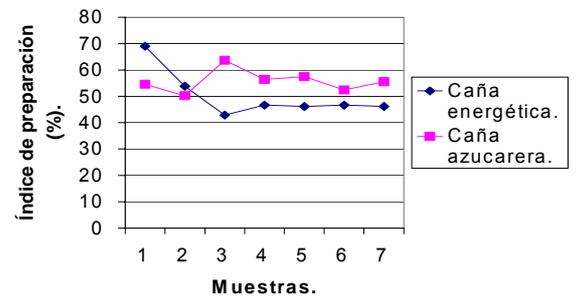
**Gráfico 3.7.2: Comportamiento de la densidad volumétrica de la materia prima para los dos tipos de variedades.**



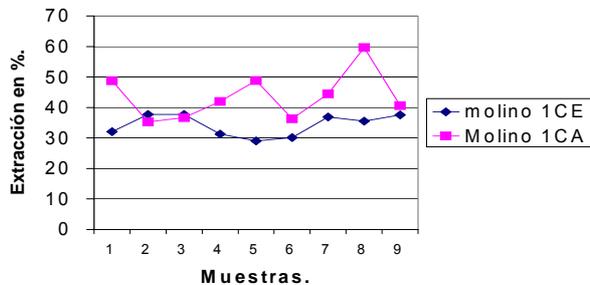
**Gráfico 3.7.3: Densidad en toneladas de bagazo por m3 de los medios de transporte.**



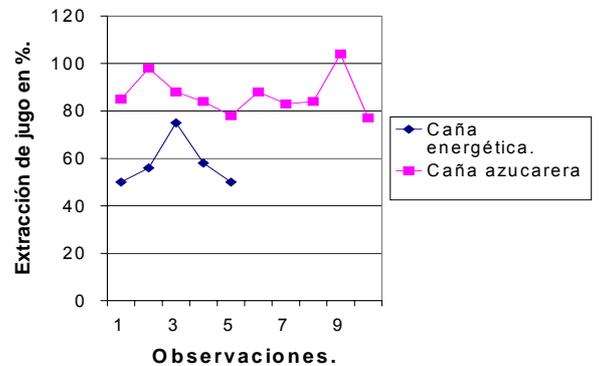
**Gráfico 3.7.4: Comportamiento del índice de preparación de la caña para los dos tipos de variedades.**



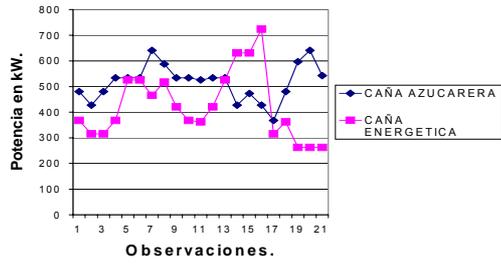
**Gráfico 3.7.5: Extracción calculada del molino 1 procesando los dos tipos de variedades.**



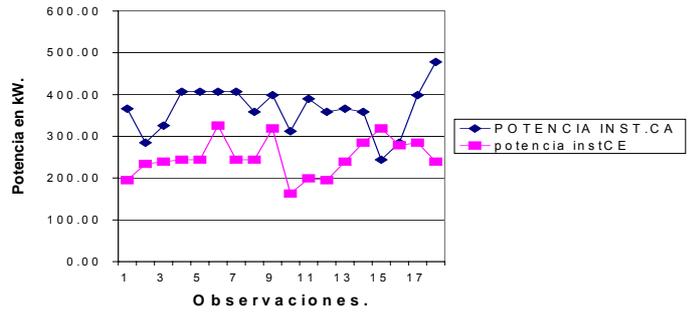
**Gráfico 3.7.6: Cantidad de jugo extraído % de la caña procesada.**



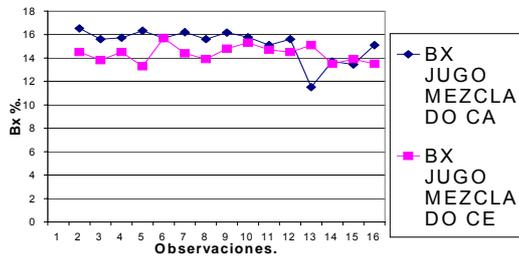
**Gráfico 3.7.7: Consumo de potencia de los molinos 5 y 6 procesando los dos tipos de variedades.**



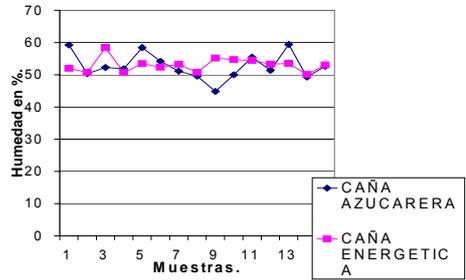
**Gráfico 3.7.8: Consumo de potencia en el motor de la cuchilla de picar No 1.**



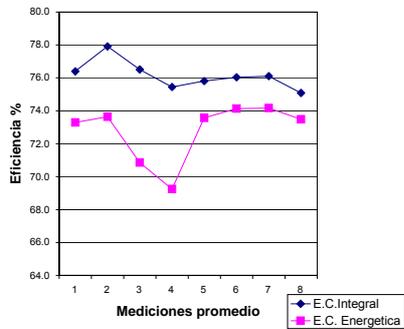
**Gráfico 3.7.9: Bx obtenido del jugo mezclado procesando los dos tipos de variedades.**



**Gráfico 3.7.10: Humedad del bagazo en % procesando los dos tipos de variedades.**



**Gráfico 3.7.11: Evaluación de la eficiencia energética en G.V con bagazo de caña integral y caña energética en el CAI Melanio Hernandez.**



**Gráfico 3.7.12: Valor Calórico Superior del Bagazo en distintos análisis.**

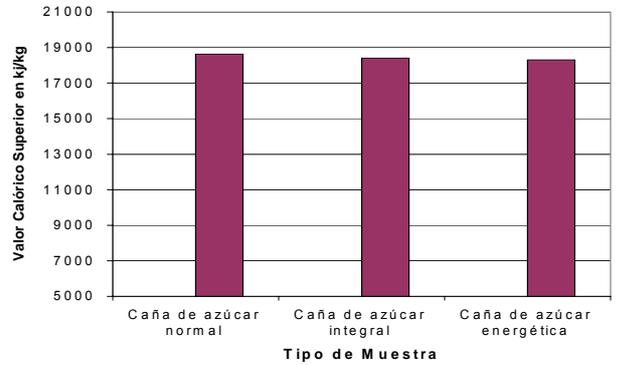


Tabla3.17: Eficiencia de las calderas utilizando los dos tipos de bagazo

Medicion		Energética	Azucarera	% NO2	PPM	12	10
Parametro	U-M	10,00	10,10	% Nox	PPM	63	56
% O2	%	10,3	9,9	%SO2	PPM	0	0
% CO	%	0,35	0,4	Tgases	C	177	176
T Amb	C	38	38	% CO2	%	10,35	10,7
D Vapor	Ton	29	29		<b>g</b>		
T Vapor	C	257	257	Perdidas Q2	Kcal./Kg	325,90	316,00
P Vapor	Lbs/pulg <sup>2</sup>	161	170	Q2	%	18,2	17,6
T Agua Alim	C	38	37	Q3	%	1,96	2,16
Exe. Aire	%	2,03	1,96	Q4	%	3,1	3,1
Humedad	%	0,507	0,507	Q5	%	3,5	3,5
Bacharac		6	6	Perd. Tot.	%	26,7	26,4
VC Bagazo	Kcal./Kg	1791,05	1791,05	<b>Eficiencia</b>	<b>%</b>	<b>73,3</b>	<b>73,6</b>

Evaluar posibilidades de incrementar uso de caña energética como materia prima.

Dado que al procesar caña energética en el TANDEM se obtiene un jugo que no debe ser desechado como un residual de efectos ambientales negativos y su uso aportaría ganancias a la rentabilidad del uso de esta materia prima; se realizó una evaluación de las posibilidades de utilizar este jugo como materia prima para un nuevo producto, con las siguientes ventajas:

- Evita emitir un residual líquido contaminante.
- Incrementa el valor agregado de la caña energética como materia prima dentro de un complejo diversificado.
- Asegura combustible e integración material y energética de las producciones.

En la propuesta se tiene en cuenta el supuesto de que estas cañas, además de poseer poco jugo y que los mismos no tienen un elevado potencial azucarero, si portan cantidades apreciables de azúcares fermentables, para ser utilizados en producciones por vía fermentativa. Por lo anterior se analiza que estos jugos podrían ser útiles para producir alcohol o alimento animal, como por ejemplo, levadura. Se estudió la utilización de este jugo para la producción de alcohol; esto posibilita incrementar las producciones de alcohol y levadura para alimento animal o en su defecto disminuir los consumos de miel final para estas producciones, elevando la rentabilidad de la inversión. Se estudió la composición macro de los jugos de las variedades de caña energética C 90 – 176, C 90 – 178 y otras con características similares como la My 5775, My 5777 y la 28Ng251. Se determinó Bx, Pol, Reductores, Pureza, PH e infermentables; además se calculó el % de bagazo en caña por los métodos tradicionales en el laboratorio.

Se realizaron experimentos para estudiar la fermentación, se montaron varios grupos experimentales en el laboratorio, se utilizaron botellones de cristal de 10 litros como fermentadores, los que se llevan hasta 7 litros de volumen. Se consideró que la ausencia de Biotina en el jugo de caña energética dificulta la fermentación de este jugo por si solo, por lo que se utilizó como sustrato mezclas de jugo y miel. Los grupos de experimentación que se probaron perseguían estudiar el comportamiento de la fermentación de las mezclas comparada con la de miel final sola; además se estudian otros grupos experimentales que persiguen analizar el efecto de la presencia de agua en el jugo como consecuencia de la imbibición, el uso de jugo procedente de cañas con varios días de cortadas y el tratamiento térmico del jugo, el cual se propone como medida para mejorar la espumación y la acidez aparecida en los primeros experimentos realizados.

En todos los casos se utiliza la miel final que se estaba consumiendo en la destilería durante los experimentos, se fija un valor de 120 g/l de azúcares reductores totales (ART) para todos los grupos y se añade 1 g/l de Urea para simular la concentración de N<sub>2</sub> que viene remanente de los prefermentadores y 4 g/l base seca de la cepa de levadura *saccharomyces* que se utiliza en la producción, simulando la siembra de un fermentador con un prefermentador. Los grupos se identifican como sigue [Vent 96], [Ull 97] [Obr 00] y [Rom 01B]:

- Grupo 1: Patrón para la fermentación de miel diluida con agua, bajo las mismas condiciones industriales.
- Grupo 2: Jugo de caña energética solo, buscando la concentración deseada de azúcares reductores con miel final.
- Grupo 3: Jugo de caña energética más 30 % de agua, simulando el agua de imbibición, más miel final para llevar a la concentración deseada de reductores para la fermentación.
- Grupo 4: Patrón para la fermentación de miel diluida con agua, bajo las mismas condiciones industriales.
- Grupo 5: Jugo de caña energética solo, buscando la concentración deseada de azúcares reductores con miel final.
- Grupo 6: Jugo de caña energética solo, buscando la concentración deseada de azúcares reductores con miel final, pero con un tratamiento térmico previo a ebullición entre 2 y 3 minutos.

Adicionalmente se estudia el efecto de utilizar cañas atrasadas sobre los resultados de la fermentación, teniendo en cuenta que la zafra alcoholera se va a desarrollar en el período lluvioso, lo que impone la necesidad de cortar caña en exceso en los días secos y almacenar los sobrantes para procesarlos en los días lluviosos, evitando las paradas de la central térmica;

para ello se montan otros 6 grupos [Ull 97] y [Obr 00], los números 7, 8, 9, 10, 11 y 12, en los que se utiliza para el 7 y el 10 una muestra patrón de miel y agua, en el 8 y 11 jugo más miel sin calentamiento, pero usando cañas de entre 10 y 15 días de cosechada en el primero y de entre 16 y 20 en el segundo; de forma similar se realizaron los grupos 9 y 12, solo que en ellos se realizó tratamiento térmico por ebullición durante 2 minutos.

La realización de estos experimentos permite demostrar una influencia positiva del tratamiento térmico sobre la espumación y la acidez en la fermentación de estos jugos y a su vez la influencia del atraso de las cañas, pero surge una nueva problemática, pues el tratamiento térmico por ebullición durante 2 minutos tiene un efecto positivo sobre la espumación y la acidez, pero aparecen dificultades en la formación de alcohol, de biomasa y en la eficiencia, lo que indica la aparición de inhibidores de la levadura, ante posibles reacciones del tipo aldólico, cuando se lleva el calentamiento hasta la ebullición. Por el motivo anterior se hacen también 4 grupos experimentales con miel y jugo sin tratar, sometidos a calentamiento hasta 80 °C y 90 °C durante 20 minutos y a ebullición entre 2 y 3 minutos, los que se numeran como grupos 13, 14, 15 y 16 respectivamente, para estos últimos grupos se usa jugo de cañas con entre 12 y 16 días de cortadas [Ull 97] [Rom 01B] y [Obr 00].

A los experimentos se le controlaron los siguientes datos.

- Kilogramos de cada componente (Kg).
- ART de inicio y final (g/l)
- PH de inicio y final.
- Acidez de inicio y final.
- g de crema/10 g de batición
- % alcohólico.
- Tiempo de fermentación (h).
- Temperatura de inicio y terminación (°C).
- Eficiencia alcohólica, de levadura y total (%).
- % de alcohol y formación del % de alcohol en volumen por hora.
- Formación de gramos de biomasa / litro de batición por hora.
- Formación de espuma (Normal, Alta y Muy Alta).

Todos los experimentos se estudian individualmente, ya que en cada uno se monta una muestra patrón, para ello se realiza el tratamiento estadísticos utilizando el paquete de programas SPSS versión 9.0; el análisis estadístico se realiza con el objetivo de determinar si existen diferencias significativas entre los experimentos y para ello se realizan las siguientes pruebas estadísticas.

**H de Kruskal-Wallis:** Alternativa no paramétrica a la ANOVA de un factor. Contrasta si varias muestras independientes proceden de la misma población. Asume que la variable subyacente tiene una distribución continua, y requiere al menos un nivel de medida ordinal.

**U de Mann Whitney:** (Mann-Whitney U) Prueba no paramétrica para verificar que dos muestras independientes proceden de la misma población. Más fiable que la prueba de la mediana puesto que utiliza los rangos de los casos. Alternativa no paramétrica a la prueba t. Requiere al menos un nivel ordinal de medida. Esta prueba usa los rangos de los casos para calcular la U.

El tratamiento estadístico se inicia aplicando la prueba de Kruskal Wallis a todas las variables medidas durante el experimento, con este test se comprueba la existencia de diferencias significativas o no entre los experimentos y a las variables que presentaban diferencias significativas se les aplica la prueba de Mann Whitney para verificar si existen diferencias significativas entre los experimentos individualmente.

Los resultados de la caracterización de los jugos de caña energética aparecen en las **tablas 3.18 y 3.19**; de las mismas se puede resumir lo siguiente:

- Los valores de Bx, % de Pol y pureza azucarera de estos jugos, demuestran que los mismos no están aptos para producir azúcar, validándose la suposición al respecto. En este sentido estos jugos tienen purezas inferiores al compararlos con jugo de caña azucarera y jugo de los filtros, estos últimos reportados por **[Fab 98], [Jov 00] y [dIC 02]**.
- Para los valores de % de Pol y % de azúcares reductores, se hace evidente que estos jugos tienen azúcares fermentables, pero no lo suficiente para ser fermentados por sí solos.
- Los valores de bagazo en caña son superiores al 70 %.
- El atraso de la caña produce un deterioro de la pureza dado por la acción de microorganismos y un incremento del Bx y el bagazo en caña, dado fundamentalmente por la evaporación del agua por acción natural.

**Tabla 3. 18.** Características medias de jugos de cañas energéticas de 1 a 6 días de cortadas, 1996.

% Brix	% Pol	% Az.Red	% Pureza Azucarera	PH	% Infirm.	% Bagazo
14.89	9.65	2.35	64.80	4.94	No detectado	72.62

**Tabla 3. 19.** Características medias de jugos de caña energética. Hasta 20 días de cortada, 1997.

Tiempo de cortadas	% Brix	% Pol	% Azúcar reductores	% Pureza Azucarera	PH	% Infirm.	% Bagazo
De 2 a 9 días.	15.69	8.82	2.69	56.21	4.30	No det.	70.25
De 10 a 15 días.	16.96	7.00	3.95	41.27	4.73	No Det.	75.87
De 15 a 20 días.	16.48	6.74	4.07	40.90	4.08	No det.	76.15

Se pueden apreciar en la [tabla 3. 20](#), sobre los resultados de los experimentos de fermentación a escala de laboratorio, que lo más significativo fue, como en los ensayos donde se utilizó jugo de caña energética mezclado con miel final (No 2 y 3), no solo se logró la fermentación y la producción del alcohol y levadura en el fermento, sino también, que este ocurrió con una mayor eficiencia, siendo mayor en la muestra con jugo y miel y algo inferior en la muestra con jugo, miel y agua; entre las muestras con jugo no existió diferencia significativa, pero entre estas y la muestra con miel final sí existió, ver [anexos del 65 al 70](#).

Es de significar además que en los ensayos con jugo apareció una elevada espumación que no se observó en la muestra patrón con miel final y a su vez se produjo un incremento de la acidez muy inestable en todos los ensayos, este inconveniente no aparece reportado por otros autores al utilizar jugos como sustrato de la fermentación alcohólica, ver [anexos del 71 al 75](#), aunque el mayor incremento se produjo en las muestras con jugo; en el caso de la espumación existió diferencia estadística altamente significativa entre los ensayos, pero en la acidez no existió.

Puede señalarse también que el DQO esperado para la fermentación de mezclas con estos jugos deben ser inferiores a las que se producen con miel final [[HerL 98](#)], [[Obr 00](#)], por lo que las emisiones al medio ambiente serán atenuadas o en su defecto el trabajo a realizar en el tratamiento de los residuales. Ensayos realizados durante 1997 buscaron fundamentalmente si existía efecto o no del tiempo de cortada la caña sobre la fermentación y además se trabajó con el tratamiento térmico del jugo, previo a la fermentación, para evaluar si esto produjese algún efecto sobre la espumación y el incremento de acidez en el proceso de fermentación; los resultados más generales aparecen en las [tablas 3. 20 y 3. 21](#).

**Tabla 3. 20:** Comparación del comportamiento de algunos parámetros de la fermentación con Jugos de caña energética y con miel final, 1996.

Parámetro	Miel final	Jugo
Tiempo de fermentación (h).	14.330	16.000
Aumento de acidez, g Hac/l.	0.78	3.03
% Alcohol v/v formado/hora.	0.367	0.473
g/l de biomasa formado/hora.	0.351	0.452
% Eficiencia en Fermentación	86.25	96.19
Temperatura promedio °C.	27.5	27.8
Formación de Espuma.	Normal	Alta
D.Q.O. mostos, mg/l.	58 200	23 500

**Tabla 3. 21:** Parámetros de la fermentación con jugos de caña energética de hasta 20 días de cortada y calentados dos minutos de ebullición, 1997.

Parámetro	De 2 a 9 días			De 10 a 15 días			De 16 a 20 días		
	Miel	Jugo	Jugo Cal.	Miel	Jugo	Jugo Cal.	Miel	Jugo	Jugo Cal.
Tiempo de Ferm. hr.	15.94	16.63	20.72	17.42	21.20	21.92	17.30	19.40	19.70
Aumento acidez, g Hac/l.	0.87	2,08	1,21	0.92	1.73	1.08	1.03	2.03	0.67
% Alcohol v/v form./hora.	0.33	0.39	0.29	0.308	0.320	0.220	0.306	0.368	0.196
g/l biomasa form./hora.	0.27	0.20	0.21	0.290	0.070	0.090	0.270	0.120	0.100
% efic. en ferm.	86,65	84,55	74,72	88.92	92.33	61.05	82.00	94.34	58.12
Temp. Promedio, °C.	28	28	28	27	27	28	28	28	29
Formación de espuma.	Norm.	Alta	Norm.	Norm.	Alta	Norm.	Norm.	Alta	Norm.

En el experimento 2 donde se realizaba un shock térmico por ebullición al ensayo número 6, se pudo comprobar que el shock térmico por ebullición produce un efecto positivo sobre la espumación y el incremento de acidez de la fermentación, pero al mismo tiempo aparecen problemas con la velocidad de formación de alcohol y levadura, así como con la eficiencia del proceso, esto puede ser atribuible a reacciones de tipo aldólicas que dan lugar a la formación de inhibidores de la levadura durante la ebullición. Por su parte en la [tabla 3. 22](#) puede observarse que el calentamiento a temperaturas entre 80 y 90 ° C produce un efecto positivo sobre la espumación y el incremento de acidez durante la fermentación, ocurriendo a la vez un incremento de la eficiencia del proceso cuando se compara con la ebullición del jugo o con el jugo sin tratamiento térmico previo.

**Tabla 3. 22:** Parámetros de la fermentación con jugos de caña energética calentados a 80<sup>0</sup>C, 90<sup>0</sup>C y ebullición en 1997. Cañas con 12 a 16 días de atraso.

Parámetro	Jugo sin calentar	Jugo a 80 <sup>0</sup> C	Jugo a 90 <sup>0</sup> C	Jugo a ebullición
Tiempo de Ferm., hr.	17.500	17.600	17.700	18.200
Aumento acidez, g Hac/l.	2.03	1.12	1.02	0.97
% Alc. v/v formado/hora.	0.400	0.400	0.390	0.300
g/l biomasa form./h.	0.300	0.290	0.290	0.200
% Efic. en Ferm.	92.85	93.20	93.00	76.40
Temp. Prom., <sup>0</sup> C.	29	29	29	30
Formación de espuma.	Alta	Normal a Moderado	Normal	Normal

De todo el trabajo experimental se puede observar que al utilizar caña energética como materia prima del central para producir bagazo y generar energía eléctrica fuera de zafra, se puede usar el jugo extraído a las mismas para producir alcohol por fermentación en mezclas con mieles finales de la zafra azucarera; esta solución permite incrementar el valor agregado de la planta de cogeneración que se instale al permitir producir mayor cantidad de alcohol y con mayor eficiencia. Como resultado de este trabajo se demuestra, que el jugo de caña energética antes de ser usado en mezcla con miel final para la fermentación debe ser sometido a un tratamiento térmico, el cual debe realizarse por calentamiento sin alcanzar la ebullición durante 20 minutos, recomendándose una temperatura de entre 80 y 90 ° C para este tratamiento, por lo que se propuso una tecnología para producir alcohol a partir de mezclas de jugos de caña anergética con miel final, la cual se presentó como **patente con número de solicitud 2002 – 0251**, ver **anexo 76**, que constituye una descripción completa del proceso a seguir para utilizar jugos de caña energética para producir alcohol por fermentación y es un aporte de este trabajo.

En sentido general la fermentación de mezclas de jugo de caña energética y miel final en el laboratorio permitió obtener un % alcohólico en los mostos entre 5.78 y 7.38 %, excepto dos valores de 4.23 y 4.34 cuando se realizó tratamiento térmico por ebullición. En los experimentos realizados con jugo más miel se obtuvo en el 58 % de los casos % alcohólico superior a 6.88 %, valores que son superiores a los reportados por **[Fab 98]**, quien en ninguna de sus variantes alcanzó % alcohólicos superiores a 6 %; de igual forma **[dIC 02]** en el punto 6 al mezclar jugo de los filtros, miel y agua en la fábrica Melanio Hernández obtuvo 6,87 % como el mayor valor de % alcohólico, por su parte **[Jov 00]** al estudiar diferentes tipos de cepas para fermentación alcohólica en la propia fábrica este valor no sobrepasó los 5.23 %, esto evidencia que podrían esperarse

mejores resultados al utilizar jugo de caña energética en comparación con otros sustratos y sus mezclas estudiados por estos autores.

En las dos últimas tablas del [anexo 77](#) puede observarse los resultados de la fermentación industrial de caña energética realizada durante una prueba el año 2002, en estas tablas puede verse que el % alcohólico de 4,55 obtenido con jugos es similar a los de 4,51 y 4,64 obtenidos con miel final antes y después de la prueba, con jugo de caña energética sin embargo, el tiempo de fermentación y los reductores residuales fueron menores; de igual forma los parámetros de calidad del aguardiente obtenido fueron superiores al utilizar jugo de caña energética, según análisis organoléptico y los análisis del laboratorio de la destilería.

### 3. 13 Diagnóstico del impacto de la planta en la emisión de gases de efecto invernadero.

Para estimar las toneladas kilómetro (t-Km) para cada uno de los medios de cosecha y transporte utilizados en la cosecha y transporte de la caña, se propone y aplica el procedimiento que se explica más adelante. Esto permite determinar los gramos de gases emitidos por la cadena de transportación los que al sumarlos con las emisiones por generación, da las emisiones totales de la planta térmica. Un análisis detallado de estas emisiones, comparándolas con una CTE posibilita resumir las ventajas y desventajas, en este aspecto, la utilización de un bagazo respecto al crudo cubano para generar la misma cantidad de energía eléctrica, [anexo 78](#).

Método propuesto y utilizado para estimar las t-Km de los medios para las nuevas condiciones que tendrá la CT [\[BarC 01\]](#). Ver [anexo 78](#).

Datos: V, T, Pp, L, M Teórica, M esperada, d.	
$C_{tea} = V * T * P_p * L$	(2.36)
$I_e = C_{tea} / M_{teórica} * M_{esperada}$	
$C_{teaE} = I_e * d$	
	(2.38)

**Donde:** **Cteq** - Caña transportada equivalente en t – km/d, **V** – Número de viajes de cada equipo diario, **T** – Número promedio de trailer por equipos, **Pp** – Peso promedio de cada trailer, **L** – Longitud promedio de los viajes por equipo, **Ie** – Índice equivalente según molida en t – km/d, **M teórica** – Molida teórica del año base, **M esperada** – molida esperada para las nuevas condiciones, **d** – Número días transportando caña.

La [tabla 3.23](#) informa de los resultados del balance de emisiones en la cosecha y el transporte del Central para asegurar la generación energética, en la [tabla 3.24](#) se dan las emisiones totales y en la [tabla 3.25](#) los índices de emisiones en t de contaminante /GWh

Tabla 3. 23: Emisiones por transportación en la CT.(toneladas de sustancia)

	Tren	Camión 1	Tractores	Camión 2	Alzadoras	Combinada	Totales
CO <sub>2</sub>	1265.7	187.5	246.8	258.8	74.59	440.4	2473.8
SO <sub>2</sub>	15.69	0.46	0.256	0.65	0.077	0.46	17.6
NO <sub>x</sub>	9.23	1.94	3.054	2.68	0.92	5.45	23.3
Partículas	3.28	0.38	0.15	0.52	0.048	0.26	4.64
CO	3.28	0.49	0.62	0.68	0.2	1.1	6.37
NMVOOC	2.26	0.22	0.256	0.299	0.077	0.46	3.57
CH <sub>4</sub>	0.23	0.0045	0.006	0.0062	0.0018	0.011	0.259
N <sub>2</sub> O	0.046	0.0045	0.006	0.0062	0.0019	0.011	0.076

Tabla 3. 24: Emisiones totales de la cadena de contaminantes en la CT.

	Generación	Transporte	Totales
CO	-	6.36	6.37
CO <sub>2</sub>	373341.8	2473.8	375815.6
N <sub>2</sub> O	-	0.076	0.07605
NO <sub>x</sub>	265.43	23.3	288.73
SO <sub>x</sub>	765.3	17.6	782.9
NMVOOC	-	3.57	3.57
CH <sub>4</sub>	-	0.26	0.26
Partículas	9501.34	4.64	9506

Tabla 3. 25: Índice de emisiones por GW-h generados(t / GW-h).

	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	NMVO C	CH <sub>4</sub>	Part.
Índice	0.036	2125.6	4.3E-4	1.6	4.28	0.02	1.4E-3	53.7

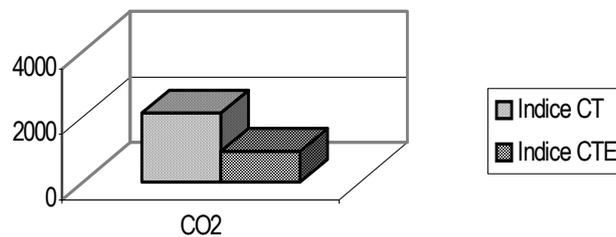
En la [tabla 3. 26](#) se observan los resultados del balance teórico realizado a la central termoeléctrica del Mariel generando también 176, 8 GWh anuales con crudo cubano, se calcularon las emisiones desde la extracción hasta la generación.

Al revisar el [gráfico 3.8](#) se comprueba que las emisiones de CO<sub>2</sub> son 2.24 veces superiores en la planta objeto de estudio que en la termoeléctrica Mariel; sin embargo, este resultado es engañoso ya que la caña de azúcar durante su desarrollo vegetativo absorbe CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Por tanto, si se tiene en cuenta, que la central térmica para generar 176,8 GWh de energía eléctrica debe procesar 1 218 022 t de caña de ambos tipos y que en una hectárea de caña se producen 70 t de caña y se absorben 55 t de dióxido de carbono de la atmósfera, según [\[Qui 98\]](#), el balance teórico demuestra que el resultado a esperar es totalmente diferente.

**Tabla 3. 26 : Emisiones en la CTE Mariel generando la misma energía.**

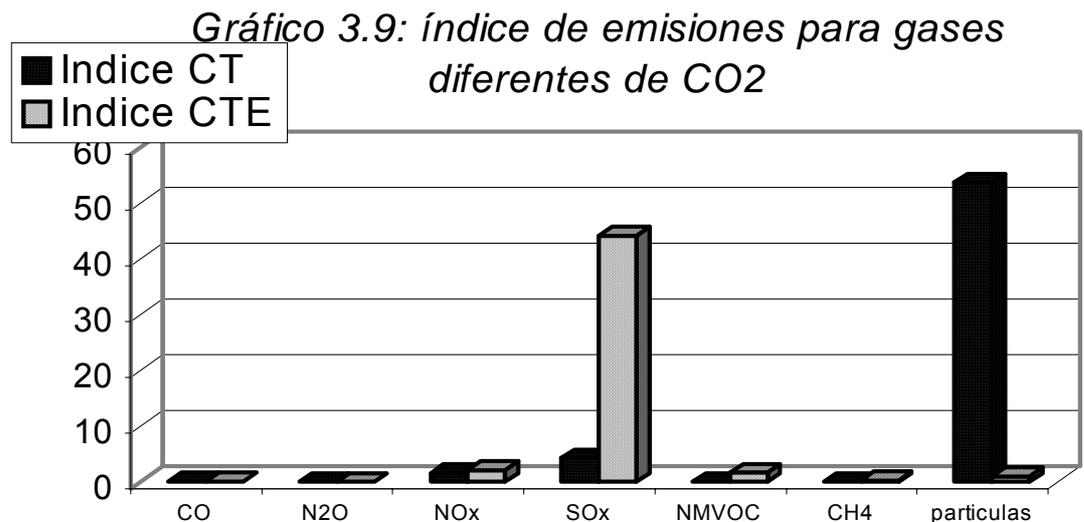
	Extracción	Transporte	Procesamiento	transporte	generación
CO <sub>2</sub>	2125.38	26.69	614.15	288.16	164510
SO <sub>2</sub>	-	-	12.65	0.73	7800.98
NO <sub>x</sub>		-	-	3.24	401.55
Partículas	-	-	-	-	178.66
CO	-	-	-	1.2	28.3
NMVOG	-	-	293.54	0.54	3.54
CH <sub>4</sub>	19.72	1.27	29.35	0.06	1.59
N <sub>2</sub> O	-	-	-	-	3.54

Gráfico 3. 8: Índice de emisiones de CO<sub>2</sub> de la CT y la CTE.



Para generar 176, 8 GWh de energía eléctrica durante un año en la central termoeléctrica de Melanio Hernández, las áreas cañeras de este central demandarán de la atmósfera 957 017, 6 t de CO<sub>2</sub>, si la emisión total es de 375 815, 6 t, entonces la emisión neta será de - 581 202 t anuales, esto significa un índice de emisiones de - 3 285, 5 t/GWh, adicionalmente en la termoeléctrica se dejarían de emitir 930 t/GWh, al no tener que generar esa energía, esto hace que al generar la electricidad en el central el índice de emisión de CO<sub>2</sub> sería de - 4215,15 t/GWh. Este resultado se corresponde con lo planteado por [Obr 01], quien hace un análisis del efecto descontaminador de CO<sub>2</sub> de la producción azucarera, ya que al balancear la emisión y consumo de este gas, en el resultado siempre es menor la cantidad que se emite que la que se absorbe por la planta; al mismo tiempo coincide también con [Mes 01] y [Ann 12] quienes plantean que las emisiones líquidas de CO<sub>2</sub> son negativas cuando se utiliza bagazo como combustible. A su vez este resultado coincide con lo descrito por [CarG 02] quien plantea que para biomasa producidas por arboles de corta rotación y herbáceas plurianuales puede llegar a tener un balance negativo en lo que a emisión de CO<sub>2</sub> se refiere. Es opinión de este autor que en el caso de la biomasa cañera por producirse de una planta de ciclo anual este efecto es más marcado, como lo demuestra el resultado obtenido, además existen emisiones asociadas al ciclo de producción y utilización de la caña como materia prima, que pertenecen a la mochila ecológica del azúcar y los derivados, por lo que utilizar la biomasa para producir energía eléctrica produce un elevado efecto descontaminador.

Cuando se analiza el resto de las emisiones, [gráfico 3.9](#), puede constatarse que la CT que se propone en Melanio Hernández podría emitir solamente más partícula que la CTE Mariel, estas últimas deben reducirse al 50 %, ya que el balance se realizó considerando que no existe separador de partículas y el proyecto lo incluye con un 50 % de eficiencia. Más información de los datos utilizados y una distribución porcentual de las emisiones por los diferentes períodos de operación que tendrá la planta se presenta en los [anexos 79](#).



Determinar que las emisiones de gases a esperar serán siempre menores que en una CTE y el hecho de que las emisiones de residuales serán menores al ser menor el DQO esperado para la fermentación de jugo y miel, se convierten en un aspecto importante en el uso de la caña energética para generar energía eléctrica fuera de zafra. Este elemento constituye un basamento importante en la búsqueda de financiamiento para esta inversión y un aporte de este trabajo, el que por primera vez presenta el balance de emisiones a esperar de un complejo integrado y generando energía eléctrica todo el año así como una distribución de los porcentajes de emisiones a esperar en cada una de las etapas de operación.

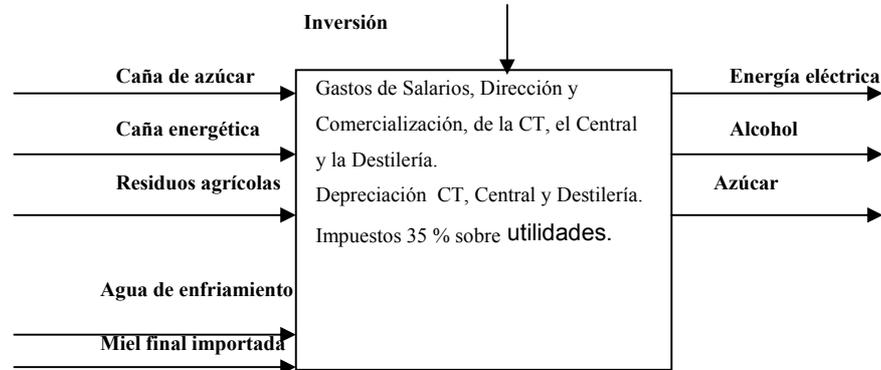
### 3. 14 Evaluación de la factibilidad económica de la tecnología.

Para realizar el análisis económico de la inversión de 23 MW en Melanio Hernández se trabajaron dos criterios fundamentales de análisis que se describen a continuación:

1. La inversión realizada produce un nivel de diversificación e integración de la fábrica en general, por lo que se hace el análisis económico del complejo integrado en su conjunto.
2. La inversión realizada produce solo incrementos de producción de azúcar por incrementarse la molida, pero su aporte más importante es la generación de

electricidad, por lo que se realiza el análisis económico de la planta energética como un negocio independiente del central y la destilería.

Descripción del primer criterio o variante.

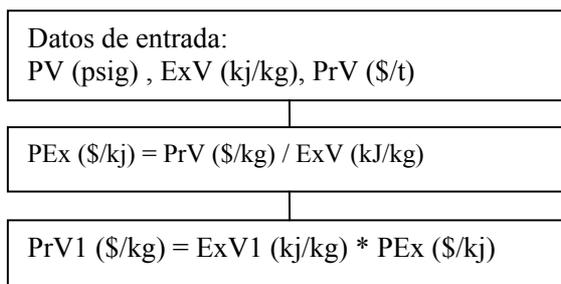


El valor de la inversión se determinó por la información recibida de los proveedores y del MINAZ y se estimó en un valor de 1,53 millones de USD por cada MWh para la tecnología de cogeneración y de 0,28 millones de USD por cada MWh para los trabajos de preparación y las obras inducidas en el central; por lo que el monto total a invertir es de 1,81 millones de USD por cada MWh.

Tabla 3. 27: Listado de los principales precios utilizados.

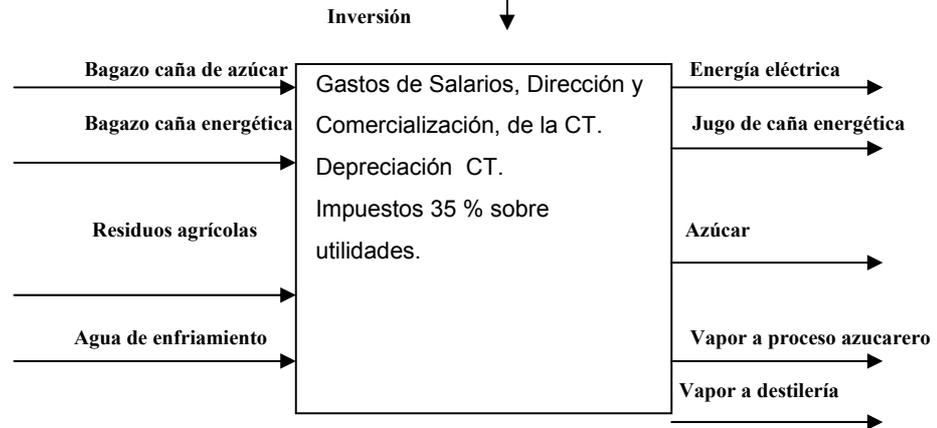
Criterio 1		Criterio 2	
Producto	Precio	Producto	Precio
Caña azucarera	21,91 \$/t	Bagazo azucarero	16,50 \$/t
Caña energética	21,91 \$/t	Bagazo energético	18,81 \$/t
Residuos agrícolas	15,46 \$/t	Residuos agrícolas	15,46 \$/t
Energía eléctrica	54, 97 \$/MWh	Energía eléctrica	54, 97 \$/MWh
Azúcar	335,00 \$/t	Azúcar	335,00 \$/t
Miel final importada	39,92 \$/t	Jugo de caña energética	17,16 \$/t
Alcohol	35,00 \$/hl	Vapor al proceso azucarero	9,52 \$/t
		Vapor a destilería	8,47 \$/t
Precio electricidad sensibilidad 1		69,7 \$ / MWh	
Precio electricidad sensibilidad 2		80,0 \$ / MWh	

El precio del vapor a proceso y a la destilería se estimó del precio actual de venta del vapor a la destilería, según se expresa en el siguiente diagrama de bloques.



Donde:  
**PV** es la presión de vapor que se vende actualmente a la destilería equivalente a140 psig  
**PrV** es el precio de comercialización actual de ese vapor equivalente a 11,47 \$/t.  
**ExV** es la exergía del vapor actual según la

Descripción del segundo criterio o variante.



La [tabla 3.28](#) muestra los resultados de la ficha de costo obtenida para cada producto del complejo integrado, se informa también las ventas anuales estimadas y el costo unitario a esperar para cada uno de los períodos de operación. Seguidamente la [tabla 3.29](#) realiza un análisis de los costos y ganancias anuales que se podrán obtener con el complejo integrado operando todo el año, definiéndose también las ganancias estimadas por cada peso invertido en la operación anual del complejo integrado.

**Tabla 3. 28:** Ficha de costos obtenida para cada producto del complejo integrado.

Partida de costo. (M USD anuales)	Azúcar (t)	Alcohol (HI)	Electricidad (MWh)	
Caña azucarera	16062,7	-----	-----	
Caña energética	-----	3115,6	4673,4	
Miel Comprada	-----	2330,9	-----	
Residuos agrícolas (RAC)	817,0	-----	-----	
Agua	33,6	11,2	14,6	
<b>Costos Variables. (CV)</b>	<b>16913,3</b>	<b>5457,7</b>	<b>4688,0</b>	
Salario y seguridad social.	975,0	136,2	119,6	
Gastos de administración.	264,7	13,6	11,9	
Gastos de mantenimiento	256,2	187,3	74,6	
Otros gastos	63,6	13,2	11,3	
Gastos comerciales	73,5	-----	-----	
Depreciación	1528,2	235,3	1437,5	
<b>Costos Fijos. (CF)</b>	<b>3161,2</b>	<b>585,6</b>	<b>1654,9</b>	
<b>Costos Totales. (CT)</b>	<b>20074,5</b>	<b>6043,3</b>	<b>6342,9</b>	
Ventas anuales estimadas.	87976,6 t	297000 HI	125125 MWh	
Costo Unitario. (USD / t, HI o MWh)	228,18 \$ /t	20,35 \$ /HI	50,69 \$ /MWh	
Desglose de los costos según los períodos de operación.				
Zafra Azucarera	Azúcar	Alcohol	Electricidad.	Total
CV	16913,3	1064,4	6,6	17984,3
CF	3161,2	266,2	752,2	4179,6
CT	20074,5	1330,6	758,8	22163,9
Costo Unitario	228,2 \$/t	9,9 \$/HI	14,74 \$/MWh	
	CV = 0,81		CF = 0,19	
Zafra Energética 1				
CV	-----	1513,2	1612,4	3125,6
CF	-----	110,0	310,9	420,9
CT	-----	1623,2	1923,3	3546,5
Costo Unitario	-----	29,1 \$/HI	76,0 \$/MWh	
	CV = 0,88		CF = 0,12	
Zafra Energética 2				
CV	-----	2879,9	3068,9	5948,8
CF	-----	209,4	591,7	801,1
CT	-----	3089,3	3660,6	6749,9
Costo Unitario	-----	29,1 \$/HI	76,0 \$/MWh	
	CV = 0,88		CF = 0,12	

Puede apreciarse que todos los productos principales aportarán ganancias al balance económico del complejo, después que se alcance la integración total de la producción durante todo el año. En este particular, el producto azúcar aportará las mayores ganancias al balance económico anual, seguido del alcohol y por último la electricidad, la que solo ofrecerá ganancias de 4,29 \$/MWh, si se considera como precio de venta el establecido en la actualidad

por el SEN; sin embargo, si consideramos un precio de venta de 70 \$/MWh, las ganancias unitarias de energía eléctrica sería de 19,31 \$/MWh y el aporte total de este producto al balance anual de la fábrica sería de 2416163,8 \$/a, incrementándose las ganancias por peso invertido a 0,35 \$/\$. Es evidente que el precio de la energía eléctrica generada es alto si lo comparamos con el costo de 28.08 USD/MWh generado en la termoeléctrica reportado por el SEN de Sancti Spiritus en febrero del 2002, el que se estima tenga un costo de 37.3 USD/MWh entregado al consumidor en Sancti Spiritus

Tabla 3.29: Costo de producción estimado, precio de venta y ganancias estimadas para los diferentes productos de la fábrica.

Producto	Costo Producc.	Precio de Venta.	Ganancias	Producción estimada	Ganancias estimadas. \$/a	%
Azúcar.	228,18 \$/t	279,2 \$/t	51,02 \$/t	87976,6 t/a	4488566,1	48
Alcohol	20,35 \$/Hl	35 \$/Hl	14,65 \$/Hl	297000 Hl/a	4351050	46
MWh	50,69 \$/MWh	54,98 \$/MWh	4,29 \$/MWh	125125 MWh/a	536786,3	6
Costo total de producción estimado.				\$/a	32461036,8	
Valor de las ventas totales.				\$/a	41837439,2	
Ganancia total estimada.				\$/a	9376402,4	
Ganancias estimadas por peso invertido.				\$/\$	0,29	

Tabla 3. 30: Resultados del análisis financiero de la inversión para cogenerar en el CAI Melanio Hernández.

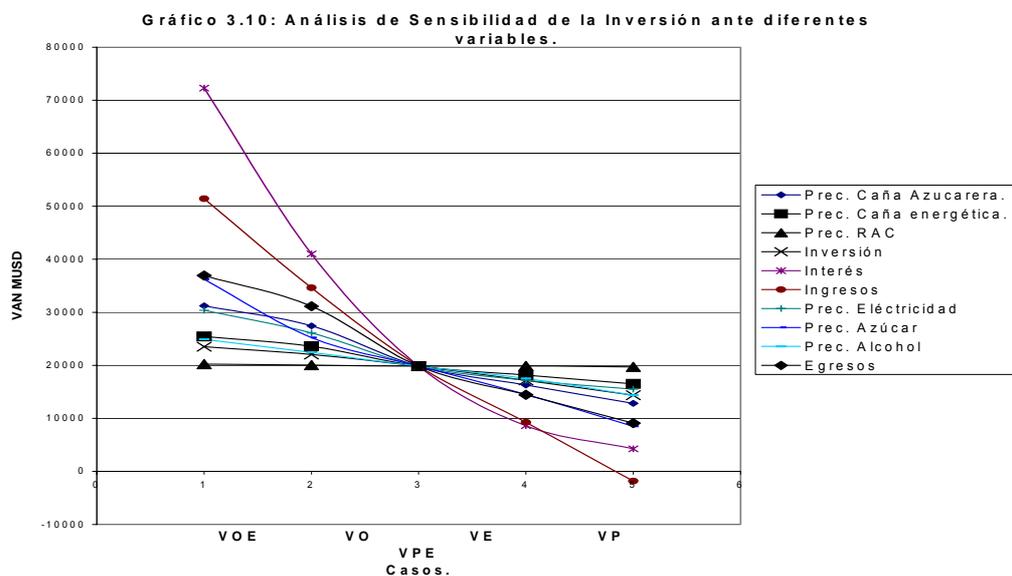
Criterio	TIR (%)	PR (Años)	VAN (MUSD)	RVAN (\$/\$)
1	27	4, 36	19. 833, 0	0,53
2	24	5,01	15. 419, 1	0,41
Sensibilidad 1	28	4, 38	24. 330, 5	0,65
Sensibilidad 2	32	4, 05	30. 585, 7	0,82

Puede observarse en el análisis financiero que para cualquier criterio que se tome en la evaluación económica de la inversión propuesta para cogenerar en esta fábrica se alcanzarán resultados positivos del VAN, períodos de recuperación entre 4 y 5 años y tasas internas de retorno superior al 24 % demostrándose la factibilidad económica de esta inversión; sin embargo, si se considera el criterio 1, que realiza un análisis del complejo integrado, los resultados financieros a esperar son mejores que si se considera la inversión en sí misma con sus gastos y ganancias propias como una inversión independiente. De igual forma, si se varían los precios de la electricidad a producir, como se observa en la [tabla 3. 30](#), los resultados que se obtienen son significativamente mejores, en tanto mayor es este valor, demostrándose que la electricidad debe contratarse a un precio de venta mayor y al parecer cuando son cercanos a los 70 \$/MWh, los resultados económicos son favorables.

### 3. 15 Análisis de las incertidumbres económicas para esta inversión.

#### Análisis de sensibilidad.

Puede observarse en el gráfico 3.10, que la inversión será sensible a todos los precios de materias primas y productos, pero la mayor sensibilidad aparece ante la variable % de interés de las finanzas y a los ingresos que se obtengan; dentro de los ingresos, es el precio del azúcar la que aparece como la de mayor sensibilidad. Esto permitió concluir que las ventas de azúcar tienen un elevado impacto aún sobre los resultados financieros de la inversión que se propone, por lo que se determinó el punto de equilibrio en base a la producción de azúcar y cuyo resultado aparece más adelante en este capítulo. Para ello se calculó el VAN de la inversión para diferentes números de días que se procesa caña azucarera, valor que varió desde 0 hasta 200 días. Este análisis responde también a la necesidad de identificar si es factible montar una planta para generar todo el año con caña energética o no, la información de este análisis constituye un aporte sobre las posibilidades de usar caña energética como materia prima para generar energía eléctrica en una fábrica de azúcar. No se profundizó en los cambios del interés del financiamiento, ya que el préstamo acordado con los financistas que se contactaron era de 6 %, es decir, coincidía con el valor optimista extremo utilizado para este análisis.



El análisis de sensibilidad tiene la limitante de que no permite hacer un análisis del efecto que provocarían las interacciones de las incertidumbres asociadas a diferentes valores, limitante que es planteada también por [Kel 92], por lo que se decidió construir una matriz para evaluar interacciones entre algunas variables.

Matriz para evaluar sensibilidad de la inversión ante interacciones de variables.

Se construyó una matriz que muestra la influencia de la interacción entre variables; para ello se utilizó una matriz de diseño experimental L9 dada por [Joc 00], mediante la cual se puede

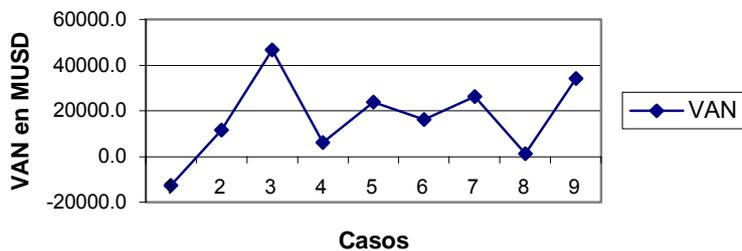
estudiar la incidencia de las interacciones de los diferentes niveles de las variables Inversión, Ingresos y Egresos. Los resultados de esta matriz se visualizaron en forma gráfica, permitiendo reconocer fácilmente la interacción entre las variables; el uso de esta matriz con estos fines no aparece reportado anteriormente, siendo un aporte de este trabajo para profundizar en los riesgos económicos de inversiones

De la **tabla 3.31** y los **gráficos 3.11 y 3.11 A**, obtenidos de la propia matriz, se puede interpretar que la sensibilidad de los criterios VAN, TIR y PR ante las interacciones de las variables inversión, ingresos y egresos es elevada, pero que solo se alcanzarán valores negativos del VAN, muy bajas TIR y demasiados altos períodos de recuperación para la combinación de todos los valores pesimistas de las tres variables. Esto indica que existe alta probabilidad de alcanzar buenos resultados con esta inversión.

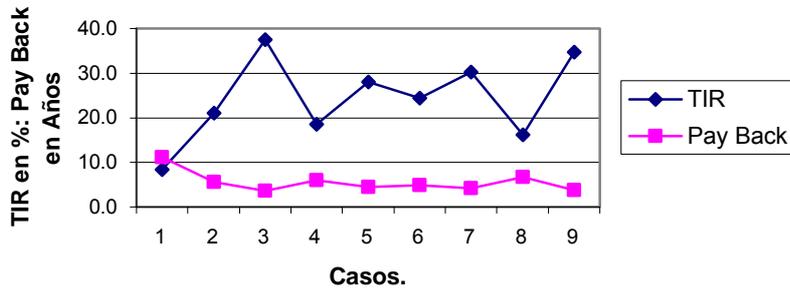
Tabla 3.31: Matriz IEI para evaluar sensibilidad con interacciones de variables.

Matrix				Valores			VAN	TIR	PR
No Caso				Inversión	Egresos	Ingresos			
1	-1	-1	-1	47150,0	31282,2	38601,1	-12608,0	8,4	11,1
2	-1	0	0	47150,0	29527,0	41827,4	11494,7	21,0	5,5
3	-1	1	1	47150,0	25953,4	45508,8	46597,6	37,5	3,6
4	0	-1	0	43125,0	31282,2	41827,4	6045,8	18,6	6,0
5	0	0	1	43125,0	29527,0	45508,8	23814,1	28,0	4,4
6	0	1	-1	43125,0	25953,4	38601,1	16218,6	24,4	4,9
7	1	-1	1	40107,0	31282,2	45508,8	26140,0	30,3	4,2
8	1	0	-1	40107,0	29527,0	38601,1	1210,0	16,1	6,7
9	1	1	0	40107,0	25953,4	41827,0	34108,9	34,7	3,8

**Gráfico 3.11: VAN de la Inversión graficado según matriz IEI**

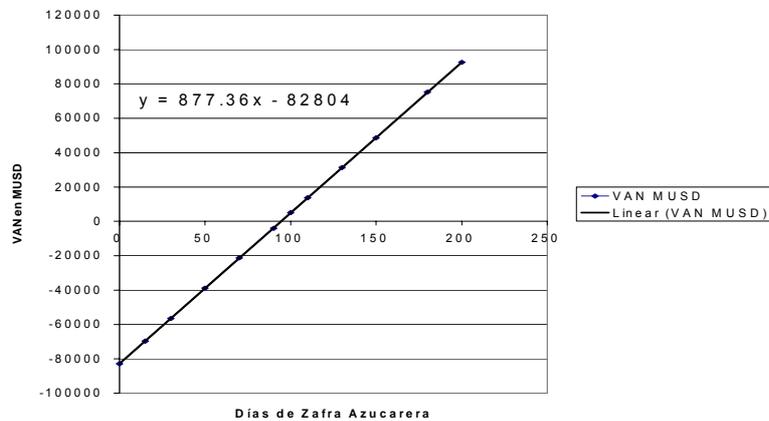


**Gráfico 3.11 A: TIR y Recuperación de la Inversión según resultados de la matriz IEI.**



Punto de equilibrio.

**Gráfico 3.12: Relación del VAN con los días de zafra azucarera para la planta de Melanio Hernández.**



Se determinó el punto de equilibrio del proyecto para los días de zafra azucarera, equivalente a producción de azúcar, **gráfico 3.12**. Puede observarse que el punto de equilibrio se alcanza para 94, 4 días de zafra azucarera, resultado que es un aporte de este trabajo y que nos indica que el uso de la caña energética en una planta como la de Melanio Hernández, no debe considerarse para todo el año, ya que las producciones de azúcar que se obtengan de la zafra azucarera tienen un importante papel aún en las finanzas de la fábrica.

Esperanza matemática, desviación típica y coeficiente de variación del VAN.

I esperada = 43 125.0 USD

E (I) = 44 581.61

VAN esperado = 19 833.0 USD

E (VAN) = 18 023,8 M\$

E (TIR) = 25,7 %

$\sigma$  (VAN) = 3651,6 M\$

E (PB) = 4,6 años

CV = 0,203

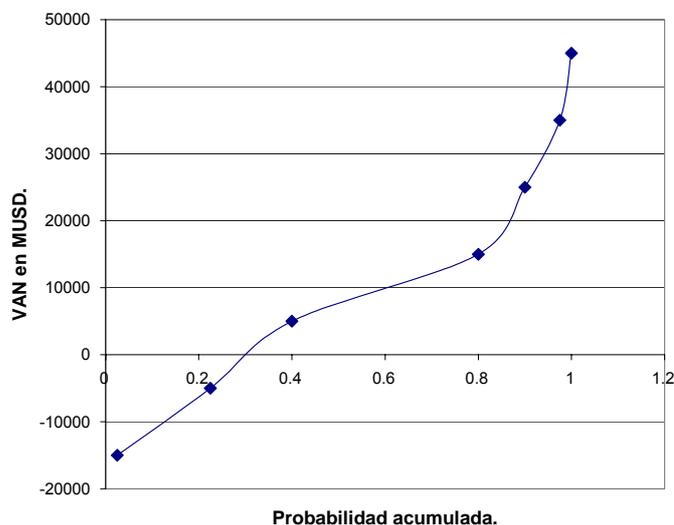
Como puede apreciarse la inversión propuesta para una planta energética de 23 MW de potencia eléctrica y procesar caña energética después de la zafra, presenta un coeficiente de

variación del VAN de 0,203, valor cercano a cero, cuando se analizan las incertidumbres económicas por métodos probabilísticos; esto demuestra que en condiciones de incertidumbre económica la desviación típica a esperar del VAN es pequeña en comparación con la esperanza matemática de este mismo valor, lo que puede entenderse como que las incertidumbres económicas que puedan presentarse a esta inversión son pequeñas en comparación con el valor absoluto que debe esperarse del VAN, esto indica que los riesgos son pequeños para este proyecto. [Kel 92], anexo 80.

### **Perfil de riesgo de la inversión.**

Puede apreciarse en el gráfico 3.13, que el proyecto para cogenerar con caña energética en el central Melanio Hernández presenta un perfil de riesgo en el que se puede interpretar que para el muestreo realizado, este proyecto va a tener entre 0,4 y 1, es decir 60 % de probabilidad, para obtener un VAN superior a los 5 000 M\$, esto ratifica que a pesar de los riesgos económicos que puedan aparecer en la vida útil del proyecto, existe una elevada probabilidad de obtener resultados económicos positivos. La obtención del perfil de riesgo de la inversión es utilizada por primera vez como criterio de evaluación de una inversión para cogenerar en la industria azucarera y en general se utiliza por primera vez para evaluar inversiones en la industria azucarera.

**Gráfico 3. 13: Perfil de Riesgo del Proyecto.**



### **3. 16 Optimización de la operación con caña energética.**

En el análisis de la optimización, para la determinación de la función objetivo, se parte de la variación en costos de producción que deben provocar a la zafra energética 2 los aportes de la caña azucarera y energética en cuanto a miel final y bagazo, a partir de los balances y aportes de estos productos en la zafra azucarera y la energética 1. Con estos resultados se obtiene la

relación del costo de producción de la destilería en función de la miel final que se aporta y la que se debe comprar para completar la producción de todo el período de operación de la destilería.

De la misma forma se procede para determinar los costos de producción de la planta de cogeneración en el período de zafra energética 2, donde se opera solamente con biomasa almacenada. El siguiente gráfico describe el análisis realizado desde el punto de vista de la división de los períodos de operación.

Central Azucarero		
Destilería	Destilería	Destilería
Planta Cogen.	Planta Cogen.	Planta Cogen.
<b>Zafra Azucarera</b>	<b>Zafra Energética 1</b>	<b>Zafra Energética 2</b>

Para realizar la optimización se desarrolla una función objetivo y se definen las restricciones de la optimización, para obtener la función objetivo se sigue el procedimiento que se describe más adelante. Se busca una función objetivo que maximice las ganancias anuales, dependiente de los días de zafra azucarera y de los días de zafra energética 1 y 2. Para la optimización se utiliza el Software GAMS, el que interactúa con un fichero de entrada y da uno de salida con los resultados de la optimización.

$$G = N G_{za} + M G_{ze1} + L G_{ze2} \quad (2.44)$$

Se desea maximizar las ganancias anuales.

$$G_{za} = (V_uC - C_uC) + (V_uD - C_uD) + (V_uPc - C_uPc) \quad (2.45)$$

**Función Objetivo** para la optimización, **donde:** **G** = Ganancia anual de la planta (pesos), **N** = Días de zafra azucarera, **G<sub>za</sub>** = Ganancia diaria de la zafra azucarera (pesos), **M** = Días procesando caña energética, **G<sub>ze1</sub>** = Ganancias diaria de la zafra energética 1. Procesando caña Energética (pesos), **L** = Días de generación con biomasa almacenada, **G<sub>ze2</sub>** = Ganancia diaria de la zafra energética 2. Generación con biomasa Almacenada (pesos).

**Donde:** **V<sub>u</sub>** = Valor de las ventas unitarias de cada una de las plantas de la Fábrica (pesos), **C<sub>u</sub>** = Costos unitarios asociados a la producción de cada una de las Plantas (pesos), **C** = Central, **D** = Destilería, **Pc** = Planta de Cogeneración.

$$EPbza = (Cm * \% Bzo ca) - Bzo req za$$

(2.46)

$$Abzo za = Epbza / Bzo req ze2$$

(2.47)

$$Epbze1 = (Cm * \% Bzo ce) - Bzo req ze1$$

(2.46.1)

$$Abzo ze1 = Epbze1 / Bzo req ze2$$

(2.47. 1)

$$L = Abzo za * N + Abzo ze1 * M$$

(2.48)

$$VuC = t az * Paz$$

(2.49)

$$VuD = hl alch. * P alch.$$

(2.50)

$$VuPc = EE * P EE$$

(2. 50. 1)

$$Am za = (Cm * 0,032 tm/tc) / (0,43 tm/hl alchl * hl alchl).$$

(2.51)

$$Am ze1 = (Cm / 5,814 tc/tm) / (0,43 tm/ hl * hl alchl).$$

(2.52)

**Balance de bagazo**, para estimar cual es el aporte a la generación de energía de cada una de las etapas de operación planificadas, **donde:** **Epbza** = excedentes de la producción de Bagazo de la zafra azucarera (t), **Cm** = Caña molida durante la zafra azucarera (t/d), **% Bzo ca** = Porcentaje de bagazo de la caña azucarera (%), **Bzo req za** = Bagazo requerido durante la zafra azucarera (t/d).

Aporte de bagazo de la zafra azucarera a la zafra energética 2, **donde:** **Abzo za** = Aporte de bagazo de la zafra azucarera en días, **Bzo req ze2** = Bagazo requerido durante la zafra energética 2 (t/d).

**Donde:** **Epbze1** = excedentes de la producción de Bagazo de la zafra energética 1 (t), **Cm** = Caña molida durante la zafra energética 1 (t/d), **% Bzo ce** = Porcentaje de bagazo de la caña energética (%), **Bzo req ze1** = Bagazo requerido durante la zafra energética 1.

**Donde:** **Abzo ze1** = Aporte de bagazo de la zafra energética 1 en días, **Bzo req ze2** = Bagazo requerido durante la zafra energética 2 (t/d).

Días de zafra energética 2.

**Donde:** **t az** = Toneladas de azúcar producidas por día, **Paz** = Precio del azúcar en el mercado.

**Donde:** **hl alch** = Hectolitros de alcohol que se producen en un día, **P alch** = Precio de un Hectolitro de alcohol.

**Donde:** **EE** = Energía eléctrica vendida diaria, **P EE** = Precio de la energía eléctrica.

**Aporte de miel de la zafra azucarera, donde:** **Am za** = aporte de miel expresado en días para producir alcohol que se obtienen de un día de zafra azucarera.

**Am ze 1** = aporte de miel expresado en días para producir alcohol que se

obtienen de un día de zafra energética 1.

Zafra Azucarera.

$$\text{Guza} = \text{VuC} - \text{CuC} + \text{VuD} - \text{CuD} + \text{VuPc} - \text{CuPc}$$

$$\text{Guza} = 93\,109.83 + 0,05 \text{ N} + 0,16 \text{ M}$$

Zafra Energética 1.

$$\text{Guze1} = \text{VuD} - \text{CuD} + \text{VuPc} - \text{CuPc}$$

$$\text{Guze1} = 0,05 \text{ N} + 0,16 \text{ M} - 47\,479.8$$

Zafra Energética 2.

$$\text{Guze2} = \text{VuD} - \text{CuD} + \text{VuPc} - \text{CuPc}$$

$$\text{Guze2} = 33\,725,9 + 603,45 \text{ N} + 3292,56 \text{ M} - 8098 \text{ L}$$

La Función objetivo resultante es:

$$\text{G} = 93109,83 \text{ N} + 0,05 \text{ N}^2 + 0,21 \text{ MN} + 0,16 \text{ M}^2 - 47479,8 \text{ M} + 33725,9 \text{ L} + 603,45 \text{ NL} + 3292,56 \text{ ML} - 8098 \text{ L}^2$$

**Se establecieron como restricciones las siguientes.**

$$[\text{N} + \text{M} + \text{L} = 330], [\text{N} \geq 95] \text{ y } [\text{N} \leq 150]$$

Con estos resultados se procedió a la optimización utilizando para ello el programa Gams y obteniéndose el siguiente resultado.

Valor óptimo procesando caña azucarera  $\text{N} = 150$  días.

Valor óptimo procesando caña energética  $\text{M} = 146$  días.

Valor óptimo generando con biomasa almacenada  $\text{L} = 34$  días.

Para evaluar si cambios en la función objetivo podrían afectar los resultados obtenidos, se hicieron corridas del GAMS para + 10 % y - 10 % de los términos de la ecuación ; el óptimo de zafra azucarera se mantuvo siempre en 150, el de zafra energética 1 se movió entre 141 y 150 días y el de la 2 entre 29 y 38 días, lo que demuestra que cambios en estos terminos no producirían grandes variaciones en los resultados de la optimización.

Teniendo en cuenta que en 5 años, los días promedios de lluvia en Sancti Spiritus en los días de zafra energética han sido 45, se hizo una corrida adicional, con una nueva restricción de que los días de zafra energética 2 debían ser 45 o más, en este caso el resultado fue una zafra energética 2 de 45 días y una energética 1 de 135 días, manteniendose la zafra azucarera en 150 días.

La información reunida al aplicar la metodología a la fábrica Melanio Hernández permitió validar que la misma permite incrementar la entrega de electricidad al SEN a partir del mejoramiento energético de las instalaciones, a la vez que posibilita evaluar alternativas de

inversiones para producir un efecto de cambio en las relaciones de generación y consumo de electricidad, o lo que es lo mismo en la entrega de electricidad al SEN. La validación de la metodología propuesta en la fábrica Melanio Hernández permitió proponer una nueva materia prima para procesar fuera de zafra, como alternativa de combustible para extender la generación de electricidad a todo el año, lo anterior permitió encontrar diferentes empresas interesadas en financiar este proyecto, a partir de la información recopilada en todo el trabajo. En las primeras negociaciones con la empresa Franco-Italo-Germana ABB ALSTON POWER, se acordó un financiamiento extranjero de 36, 7 millones de Euros, un financiamiento nacional de 6,5 millones de USD es además necesario.

### CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

1. Validar la metodología para incrementar la entrega de electricidad en el central Melanio Hernández permitió producir ahorros por disminución de tiempo perdido entre 48000 y 50000 \$ por zafras, cubrir el 100 % la demanda eléctrica de la fábrica de azúcar y entregar al SEN entre 2 y 7 kWh/tc de energía eléctrica del 2002 al 2004.
2. Se encontró un potencial de cogeneración en esta fábrica de 2.68 MW de potencia, mediante opciones tecnológicas para mejorar la eficiencia integral de generación y uso de la energía, aspecto novedoso del trabajo realizado.
3. Se propuso una novedosa alternativa para generar energía eléctrica después de la zafra mediante el procesamiento de caña energética como materia prima y se ha demostrado que esta alternativa es viable tecnológica y económicamente.
4. Las pruebas industriales realizadas demuestran, que procesar caña energética no introduce cambios apreciables en la operación del TANDEM y las calderas, obteniéndose modelos matemáticos similares con ambas variedades para la operación de estas áreas.
5. Se comprobó que es factible utilizar el jugo de la caña energética como sustrato para producir alcohol en mezcla con miel final por fermentación y se ha propuesto una solución tecnológica validada industrialmente para ello.
6. Se obtuvo información novedosa de las emisiones de gases a esperar de una planta moderna de cogeneración con bagazo y se encontró que sus emisiones serán menores que en plantas tradicionales, de modo particular el índice de emisión de CO<sub>2</sub> por GWh indica que estas tendrán un balance negativo de más de 4000 t al considerar el CO<sub>2</sub> que absorben las plantaciones cañeras; las emisiones de partículas serán superiores al usar la biomasa.

7. El análisis económico demostró la factibilidad de montar la tecnología de extracción condensación, generando fuera de zafra con caña energética, en el central Melanio Hernández, con un VAN de 19,8 millones de USD y ganancias a esperar de 29 centavos por peso invertido anual.
8. El análisis del punto de equilibrio demostró, que para una inversión de esta magnitud, se necesita que la fábrica de azúcar procese caña azucarera al menos 95 días anuales.
9. El estudio de riesgos de la inversión demostró, con métodos novedosos, como una matriz para estudiar interacción entre variables y el perfil de riesgo obtenido, que estos son bajos.
10. La optimización realizada demostró que la planta deberá operarse durante 150 días con caña azucarera, 135 con caña energética y solo 45 días con biomasa almacenada.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

1. Se demostró en el estudio bibliográfico que el aprovechamiento energético de las fuentes renovables es muy importante en la actualidad, que para Cuba el bagazo constituye la principal fuente energética renovable y que no existen metodologías para elevar la entrega de electricidad al SEN en fábricas de azúcar.
2. Se propuso una metodología de análisis novedosa en Cuba, que basada en el análisis complejo de procesos, utilizando conocimientos de metodologías con otros fines, brinda las vías y los métodos para elevar la entrega de electricidad al SEN por fábricas de azúcar interconectadas y que trabajen para desarrollar la cogeneración.
3. Se validó la metodología en el central Melanio Hernández, lo que le permitió a esta fábrica autoabastecerse de electricidad y pasar de consumidora a entregar electricidad al SEN y evitar costos entre 48 y 50 mil pesos anuales por disminuir el tiempo perdido por causas energéticas.
4. Se demuestran soluciones para elevar la entrega de energía eléctrica al SEN, aprovechando potenciales de ahorro de energía eléctrica, mecánica y térmica que permitirían elevar la entrega de electricidad en esta fábrica en 1.75 MW de potencia.
5. Se obtuvo información comparativa novedosa de la operación de una fábrica que procesa caña energética y azucarera, que demuestra que los resultados generales a esperar en el TANDEM y las calderas son similares con ambos tipos de variedades.
6. Se demostró que el jugo de caña energética con un tratamiento térmico en valores entre 80 y 90 °C durante 20 minutos, asegura resultados favorables en la fermentación para producir alcohol y levadura, así como mínimos efectos negativos de espumación e incremento de la acidez que este sustrato puede producir.
7. Se demostró mediante diagnóstico de emisiones, que la planta de cogeneración propuesta en Melanio Hernández tendrá un índice de emisiones de CO<sub>2</sub> negativo de - 4215.15 t/GWh y disminuye otras emisiones de gases, con relación a una termoeléctrica convencional.
8. Se demostró que la inversión de la planta propuesta en Melanio Hernández, si se procesa caña energética después de la zafra para extender la producción de electricidad a todo el año, tendrá ganancias en operación de 29 c por cada peso invertido, un VAN de 19 millones, que deberá producir azúcar durante un período de al menos 94,4 días, así como que los riesgos de inversión serían bajos; obteniéndose, que el VAN de esta inversión con un 60 % de probabilidad será mayor de cinco millones de USD.

9. Se obtuvo que la operación óptima de la planta, para obtener el máximo de ganancia anual sería de 150 días con caña azucarera, 135 con caña energética y 45 días con biomasa almacenada.
10. Se demostró que es factible tecnológica y económicamente extender la generación de electricidad en fábricas de azúcar fuera del período de zafra si se procesa caña energética como materia prima para producir electricidad y una nueva materia prima para producir alcohol u otras producciones.

### **RECOMENDACIONES**

1. Aplicar la metodología de análisis propuesta y validada en este trabajo en aquellas fábricas que desarrollan proyectos de cogeneración.
2. Utilizar la tecnología de cogeneración procesando caña energética al terminar la zafra como vía para extender de forma competitiva la operación de la plantas a períodos superiores a los 300 días y asegurar la rentabilidad de las inversiones.
3. Utilizar los datos obtenidos en el trabajo para introducir el uso de jugos de caña energética en la producción de alcohol por fermentación a nivel industrial y continuar las investigaciones para mejorar este proceso al utilizar este jugo.
4. Estudiar otras vías para aumentar el aprovechamiento de la caña energética como materia prima y utilizar el jugo como materia prima de otras producciones.
5. Continuar realizando pruebas industriales en el central Melanio Hernández y recopilar mayor cantidad de información para profundizar en el estudio.

# BIBLIOGRAFÍA

## BIBLIOGRAFÍA

1. [Abb 62] Abbet, Frank Stetk. "National Electrical Code Handbook".La Habana. Asociación de estudiantes de la facultad de tecnología. 1962.
2. [Aco 95] Acosta, I. Análisis bibliográfico para la cogeneración / Ismael Acosta: Leonardo Santos Macías.--TD. ISTE(MEC) 1995.-112p.
3. [Aed 01] Aedenat. Ed. Cambio Climático e Energía. Disponible en:  
URL: <http://www.ulpgc.es>
4. [Ale 79] Alexander, A. G. Sugar and energy atributes of the genus Sacharus. Alternative uses of Sugarcane for development. San Juan. Puerto Rico. March 26 – 27. 1979.
5. [Alm 99] Almazan de Olmos, O. A study on alternatives raw materials, sorce of energy and tecnologicla resources for the production of alcohol fuel in the sugar sector and its impact on the cuban sugar and derivates industry. Project for promoting carburant alcohol CFC – common fund for comoditiees ISO – Intrenational sugar organization GEPLACEA, Final Report, Sao Paulo, 2999, p. 367 – 369.
6. [Alo 96] Alonso Oliva, M. Díaz Díaz, A.E. Evaluación de las variables que más influencia presentan sobre las pérdidas y la eficiencia de un CAI Azucarero. Mirsa Alonso Oliva, Ana Elia Díaz: Osvaldo Romero Romero.--T.D.Sede Universitaria Sancti Spiritus. 1996.
7. [Alv 95] Álvarez, R. El consumo de energía en el mundo. Patrones irrepetibles. Periódico Granma, 6 de octubre de 1995.
8. [Ann1] Anónimo. Energía: Proyecciones Mundiales. Recursos, Consumo y Emisión de CO<sub>2</sub> . Disponible en:  
URL: <http://www.geocities.com/combusem/ENERGIA.HTM>
9. [Ann 2] Anónimo. Cuba, 3p. Disponible en:  
URL: <http://www.fao.org/docrep/T2363s/t2363s0s.htm>
10. [Ann 3] Anónimo Cogeneration Plant at RockyPoint Sugar Mill. Disponible en:  
URL: [http://www.elementalpower.com/News/news\\_details.asp?news\\_id=35](http://www.elementalpower.com/News/news_details.asp?news_id=35)
11. [Ann 4] Anónimo. Sugar Mill Cogeneration. Disponible en:  
URL:<http://solstice.crest.org/renewables/bioenergy-list-archive/9807/msg00038.html>
12. [Ann 5] Anónimo. Tamil Nadu sugar mill adopts cogeneration technology. Disponible en:  
URL: <http://www.usaid.gov/in/whatsnew/artcles/cogeneration.htm>
13. [Ann 6] Anónimo. Dry Cane Cleaning: The Mauritius Experience. Disponible en:  
URL: <http://www.usaid.gov/in/whatsnew/artcles/cogeneration.htm>
14. [Ann 7] Anónimo. Generación de energía versus medio ambiente.  
URL : <http://www.oni.escuelas.edu.ar>
15. [Ann 8] Anónimo. Energía y medio ambiente. Disponible en:

- URL: <http://www.mcyt.es>
16. [Ann 9] Anónimo. Enfrentar los excesos con renovada energía: Buscar soluciones. Disponible en:  
URL: <http://www.consumersinternacional.org/righday97>.
17. [Ann 10] Anónimo. Amigos de la tierra denuncia que las emisiones de dióxido de carbono han aumentado un 31 % en España. Disponible en:  
URL: <http://www.ideal.es>
18. [Ann 11] Anónimo. Emisiones de CO<sub>2</sub> Derivadas del uso de la Biomasa en el Sistema Energético Brasileño. Disponible en:  
URL: <http://www.mct.gov.br>
19. [Ann 12] Anónimo. The Energy Balance and The Greenhouse Gas Emissions. Disponible en:  
URL: <http://www.its.de>
20. [Ann 13] Anónimo. Ventajas económicas en el uso de motores de alta eficiencia y variadores de velocidad en centrales. Disponible en :  
URL: <http://www.ase.org/programs/international/mexico/motores.htm>
21. [Bah 75] Baloh, T. Wärmeatlas für die Zuckerindustrie. Verlag M. & H. Schaper. Hannover. 1975.
22. [Bah 91] Baloh, T. Energiewirtschaft in der Zuckerindustrie. Verlag Dr. Albert Bartens. 1991. 490 p.
23. [Bak 00] Bakthavatsalam, V. IREDA's Role in Promoting Bagasse Cogeneration in India. Newsletter of the International Cane Energy Network "International Cane Energy News", April 2000, 5 p.
24. [Bar 93] Barbosa Cortés, A. Silva Lora, E. Posibilidades de incremento da generacaon do eletricidade pelo sector sucroalcooleiro No estado de Sao Paulo. Universidad de Campinas. 1993.
25. [BarC 01] Barrera Cardoso, E. L. Cogeneración. Variante de esquemas térmicos y emisiones asociadas en el CAI Melanio Hernández. Ernesto Luis Barrera Cardoso:Osvaldo Romero Romero.--T.D.UCLV. 2001.
26. [Ben 00] Benitez Fundora, A. J. Método Termoeconómico aplicado a nuevas soluciones energéticas para la industria azucarera/Artemio Jesús Benítez Fundora:Alberto Calvo González.- Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor den Ciencias Técnicas. Matanzas, 2000.
27. [Bio 82] Biostil. Licencia Alfa-Laval. Folleto ilustrado. Rev. Brasil Azucarero No. 6. 1982. P. 78-91.

28. [Bol 95] Bolten, S. E. Administración Financiera. Noriega editores. Limusa. España. 1995. 757 p.
29. [Bor 00] Borroto Nordelo, A. Campos Avella, J. C. De Armas Teyra, M. Gestión energética integral en la agroindustria de la caña de azúcar. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
30. [Bor 97] Borroto Nordelo, A. Borroto Bermúdez, JA. Los sistemas energéticos y sus costos ambientales. CEEMA. Universidad de Cienfuegos, 1997.
31. [Bra 97] Bravo Amarante, E. Perspectivas para la introducción de una energética sostenible en la provincia Sancti Spiritus a partir de una estrategia de educación energética ambiental/Edelvy Bravo Amarante:Eduardo López Bastida.--Tesis para optar por el grado científico de Master of Science en eficiencia energética y Diseño Térmico. UCF.1997.
32. [Bri 86] Brizuela. M.A. y col. Obtención de biomasa a partir de jugo de cogollo de caña. Revista ICIDCA, Cuba. No.3, Vol XX, sep – dic /86, p.1-6.
33. [BroK 96] Brooke, A. Kendrick, D. Meeraus, A. A user's guide and the Solver Manuals of GAMS. GAMS Development Corporation. Washington.1996
34. [Bro 92] Brown, M. La cogeneración en la nueva Europa. La dimensión política. Cogeneración para la energía y el medio ambiente. Editorial ENAGAS. IDAE. CE.Madrid. Octubre. 1992.
35. [Bua 91] Buarque, J. y col. Eletricidade do cana. Electrobras. 1991.
36. [Cab 96] Cabrera Gorrín, O. Valdivia Rojas, M. Romero Romero, O. Potencial de cogeneración en la industria azucarera de Sancti Spiritus. Trabajo presentado al Forum Provincial del MINAZ. Sancti Spiritus. Nov. de 1996.
37. [Cal 81] Calvo González,A. E. Exergía, entropía y anergía. Ingeniería energética.Voll. II No. 2. Agosto, 1981.
38. [Cal 88] Calvo González, A. E. Método exergético de análisis de la industria azucarera/Alberto Calvo González – Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISPJAE, La Habana, 1988.
39. [Cal 91] Calvo, A. E.; Morales, J. L. y Quintana, R. "Aplicación de los métodos de diseño sistemático de esquemas térmicos a la industria azucarera." Revista Ingeniería Energética N° 1. Vol. XII. ISPJAE, Ciudad de La Habana. 1991. Pág. 67-74.
40. [Cam 93] Campos Avella, J.C. Diplomado de ahorro de energía. Facultad de Ingeniería. Universidad de Guadalajara. México. 1993.
41. [Can 96] Cancio, J. León, E. Diagnostico de los costos energéticos. Joel Cancio, Eliécer León:Osvaldo Romero Romero. Proyecto de Curso. Sede Universitaria Sancti Spiritus.1996.

42. [Car 93] Carpentier, A. E. y col. Future biomass based electricity supply in northeast brazil. Biomass and bioenergy Vol 4, No 3, pp 149-173.1993.
43. [CarG 02] Carrasco García, J. E. Aspectos Medioambientales de la producción y uso de la biomasa como recursos energético. Trabajo presentado en el encuentro ambiental Almeriense: En busca de soluciones. 2002.
44. [CMJ 00] Carrillo, M. J. Factibilidad técnico económica de las pequeñas producciones en el beneficio de Feldespato para sustituir importaciones/María Julia Carrillo:Luis Gómez Rodríguez:Rafael Quintana Puchol.—Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas.Santa Clara. 2000.
45. [Cas 90] Castellanos Alvarez, J. A. Análisis de alternativas del esquema térmico de evaporación, calentamiento y cocción de un central azucarero que entrega energía eléctrica al SEN y bagazo a fábrica de papel/Juan A Castellanos Alvarez : Vicente González Rodríguez.-- .Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Cienfuegos. 1990. 96 p.
46. [CasC 98] Castillo Coto, A. L, Rivero Cañizarez, D. González Suárez, E. Guía para evaluar uso de biomasa como combustible para la generación eléctrica en la industria azucarera cubana. Centro Azúcar. No 2. 1998. p. 51.
47. [CasC 99] Castillo Coto, A. L. Prospectiva Tecnológica para la Logística de la Cogeneración con BiomasaResidual en la Industria Azucarera/ Ana L Castillo Coto; Erenio González Suárez.—Tesis presentada en opción al grado científico de Docotor en Ciencias Técnicas. Cienfuegos. 1999. 96 p.
48. [Cas 92] Castro Ruz, F. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Mensaje de Fidel Castro. Río de Janeiro.1992.Oficina de publicaciones del consejo de estado.
49. [Cel 92] Celozzi, M. El desarrollo reciente de la cogeneración en Italia. Cogeneración para la energía y el medio ambiente. Editorial ENAGAS, IDAE, CE. Madrid. Octubre. 1992.
50. [Chr 95] Christoph D, Manzke, E. Nutzung von Brüden der Verdampfungskristallisatoren zur Rohsafterwärmung in einem neuen Robündelwärmeübertrager in der Zuckerfabrik Groningen. Zuckerindustrie No 2, 1995.
51. [Coc 00] Cock, J. Briceño, C. O. Torres, J. Energy from Cane Trash in Colombia. Newsletter of the International Cane Energy Network "International Cane Energy News, April 2000, p. 6.
52. [Con 95B] Comisión Nacional para el ahorro de energía. Diseño de sistemas de cogeneración. CONAE. Secretaría de Energía. México. 1995.

53. [Con 95A] Comisión Nacional para el ahorro de energía. Esquemas de cogeneración. CONAE. Secretaría de Energía. México. 1995
54. [Con 94A] Consoni, S. Larson, E. D. Biomassgasifier/ Aero-derivative gas turbine combined cycles. Part A: Technologies and performance modeling. Center for energy and environmental studies. Princeton University. 1994.
55. [Con 94B] Consoni, S. Larson, E. D. Biomassgasifier/ Aero-derivative gas turbine combined cycles. Part B: Performance calculations and economic assessment. Center for energy and environmental studies. Princeton University. 1994.
56. [Cnt 98] Contreras Moya, A. M. Herrera Rodríguez, Z. Domínguez, E. R. Análisis técnico económico de esquemas de tratamiento físico químico para aguas residuales de refinerías. Centro Azúcar No 3. 1998.
57. [Cop 97] Copia. Fundamentos de Financiación Empresarial. Cuarta Edición. Tomo I. Capítulo 2 al 9. La Habana. 1997. 376 p.
58. [CrO 01] Cruz Fonticiella, O. y col. Exportación de electricidad en el central Mariana Grajales. Centro Azúcar No 3. 2001. P 30 – 37.
59. [Cru 94] Cruz Torres, E.A. Análisis del uso de la energía en el proceso de fabricación de azúcar/Elizabeth Ananay Cruz Torres: Juan Carlos Campos Avella.--T.D. UCF.1994.
60. [CuE 01] Cubaenergía. Datos y cifras de interés sobre energía. 2001. Disponible en:  
URL: <http://www.cubaenergia.cu>
61. [Cur 01] Curbelo Alonso, A, Garea Moreda, B. Contribución de la biomasa no cañera a la generación de electricidad en Cuba, 4p. Disponible en:  
URL: <http://www.fao.org/docrep/T2663s/t2363s0i.htm>
62. [DaS 96] Da Silva, Walter, A. C. O sector sucroalcoholeiro e a producao de eletricidade a partir do suprodutos do caña. Universidade estadual do Campinas. 1996. 28 p.
63. [DeAC 00] De Armas, C. M. Modelación y Simulación de procesos: Necesidad y Utilidad. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
64. [DeAC 98] De Armas, C. M. Sobre modelación y simulación de procesos con un enfoque energético en el área de evaporación-calefacción. VII curso-seminario internacional de turbo maquinaria. Querétaro, junio de 1998.
65. [DeA 01] De Armas Teyra, M. Desarrollo de la cogeneración en la provincia de Cienfuegos. Alternativas y resultados en condiciones de mínimos recursos. Trabajo presentado y publicado en la Conferencia Internacional la Eficiencia Energética y el Medio Ambiente. Camagüey, 2001.

66. [Dee 00] Deepchand, K. Progress in Bagasse Development in Mauritius and Future Short – Term Prospects. Newsletter of the International Cane Energy Network “International Cane Energy News, April 2000, p. 2 - 3.
67. [DeeA 00] Deepchand, K. Overview of bagasse energy cogeneration in Mauritius. ISSCT Engineering and Energy Workshop, Cogeneration. Mauritius. 22 – 29 October 2000.
68. [DeJ 92] De Jesús Ferreira, J. Cogeneración en Portugal. Cogeneración para la energía y el medio ambiente. Editorial ENAGAS, IDEA, CE. Madrid. Octubre 1992.
69. [Del 97] De la Cruz, O. Una triada hacia la eficiencia. Periódico Granma, 8 de enero de 1997.p.5.
70. [dIC 01] De la Cruz Soriano, R. González Suárez E. Darias Pérez, R. Efecto de la extracción del jugo de los filtros sobre el costo de producción del azúcar crudo en un central con destilería anexa. Centro Azúcar No 1. 2001.
71. [dIC 02] De la Cruz Soriano, R. Aplicación del análisis complejo de procesos en el análisis de alternativas de integración del complejo agroindustrial Melanio Hernández y la destilería Paraíso/ Raquel de la Cruz Soriano: Erenio González Suárez.—Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Santa Clara. 2002. 93 p.
72. [DeL 00] De Laquil, P. Progress Developing a Sugar Cane Cogeneration Industry. Newsletter of the International Cane Energy Network “International Cane Energy News, April 2000, p. 1.
73. [DeT 00] De Tord, M. El fomento de las energías renovables, 27/06/2000. Disponible en :  
URL: <http://www.ictnet.es>
74. [Dom 01] Domínguez Alonso, J. F. Modelación, simulación y optimización del proceso de transferencia de masa que ocurre en la cristalización de azúcar por enfriamiento a escala industrial/Felix Juan Domínguez Alonso.—Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Matanzas. 2001.
75. [Dou 02] Douglas, PL. Course about Real Time Optimization. University of Sancti Spiritus. 2002.
76. [Edg 01] Edgar, T.F., Himmelblau, D. M., Lasdon, L. S. Optimization of chemical processes. Segunda edición. Ed McGraw-Hill. New York. 2001. 651p.
77. [Esp 90] Espinosa Pedraja, R. y col. Sistemas de utilización del calor en la industria azucarera. Ed EMPES.1990.440p.
78. [Eur 95] European commission for science. Research and development. Extern Program: Externalities of energy, Vol. 4, Oil and Gas, EUR. 16523EN, 1995.
79. [Fab 98] Fabelo, J. A. Modelación y optimización de la etapa de fermentación Alcohólica utilizando diferentes sistemas de sustratos. V Simp. Anal. y Dis. Plantas Quim. U.C.L.V. 1998 . Cuba. c-10.

80. [Fab 99] Fabelo Falcón, J. A. Estudio de la etapa de fermentación alcohólica utilizando diferentes sustratos/José A. Fabelo Falcón:Lourdes Martínez Mederos.--Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Santa Clara. 1999.
81. [Fab 96] Fabregas Ríos, M:E. Análisis y alternativas de la cogeneración en un CAI con destilería anexa/ Mirian E Fabregas: Osvaldo Romero Romero.--T.D. UCLV. 1996.
82. [Fer 96] Fernández Comas, A. Rocío Barreto, P. E. Perspectivas para la certificación de calidad según la serie ISO 9000 en la industria azucarera. Caso Melanio Hernández/Anabel Fernández Comas, Pablo E Rocío Barreto:Osvaldo Romero Romero.--T.D. Sede Universitaria Sancti Spiritus.1996.
83. [FerM 96] Fernández Font, M. Perspectivas del mercado mundial azucarero hasta el año 2000, participación de Cuba. Rev. Cuba Foreign Trade. No 1, 1996. p 82 - 83
84. [Flo 82] Flo-biohol. Floating biomass alcohol plant. Folleto ilustrado. Neppson Kikai and Tsukishima Kikoi. Japón. 1982.
85. [FraCS 91] Francis, C.S. Cogeneration potential and cost. En proceeding of the international conference on energy from sugar cane.--Hilo-Hawai,1991.-p389-395.
86. [FraSM 94] Francisco, S. M. Energías Renovables, industria y medio ambiente. En: economía industrial. El reto industrial del medio ambiente. Centro de publicaciones del ministerio de industria y energía.1994.-p27-42.
87. [Fue 97] Fuentes Mora, M. Llanes López, C. González Suárez, E. La incertidumbre económica en la inversión de una planta de acetal a partir de bioetanol. Folleto UCLV. 1997.
88. [Gal 96] Gálvez, L. La diversificación y sus ventajas comparativas. Seminario Taller. Facultad de Ingeniería y Arquitectura "Ing. Amin Abel Hasbua". República Dominicana. 1996.
89. [Gar 96] García Luis, J. Coordinación, comprensión y unidad como nunca antes. Periódico trabajadores, 16 de septiembre de 1996. p.16.
90. [GarA 98] García Rodríguez, A. y col. Desarrollo de la tecnología de producción de biomasa protéica para la alimentación animal en zonas de economía sostenible. Centro Azúcar. No 2. 1998.
91. [Gil 00] Gil Rivera, D. y col. Análisis energético para un central azucarero (AGE-Óptimos). Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
92. [Góm 00] Gómez Avilés, B. Romero Romero, O. González, L. A. El control de proceso y su influencia en la eficiencia energética. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
93. [Góm 02] Gómez Avilés, B. Ponz Murguía, R. Azaret Gali, A. Romero Romero, O. Diseño experimental con superficie de respuesta como herramienta para el control de procesos en

análisis multivariable. CD de la 3ra Conferencia Internacional de Ciencias Empresariales. UCLV. 2002.

94. [Gomz 90] Gómez, E. y col. Evaluación de diferentes métodos de tratamientos a jugos de cañas para su utilización en procesos de fermentación. II Seminario Internacional sobre azúcar y derivados de la caña. Cuba. Diversificación 90, T-1, p.131.
95. [Gon 00] González Pérez, F. Castellanos Alvarez, J. A. Puerta Fernández, J. F. Remodelación para la cogeneración de un ingenio azucarero de la provincia de Cienfuegos. Centro Azúcar No 2, 2000, p 9.
96. [Gon 02] González Pérez, F. Castellanos Alvarez, J. A. Control operacional de algunos factores agroindustriales que afectan la cogeneración en ingenios azucareros/Felix González Pérez:Juan Antonio Castellanos Alvarez.—Resumen de la tesis en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Cienfuegos 2002.
97. [GonS 91] González Suárez, E. Utilización del análisis de procesos en la intensificación de la producción en distintas industrias de Cuba. Tesis para optar por el grado científico de doctor en ciencias técnicas. UCLV. Santa Clara. 1991.
98. [GonS 03] González Suárez, E y otros. Integración material y energética de un complejo azucarero en : Producción de Acetal a partir de Bioetanol. Ed. Miguel Laborde. Argentina, 2003. p 197 – 202.
99. [Gop 97] Gopinath, S. Cogeneration Expanding in the Indian Sugar Industry. Newsletter of the International Cane Energy Network “International Cane Energy News”, July 1997, 8 p.
100. [Goz 96] Goza León. O. Estrategia de análisis para lograr un uso más eficiente de la energía en los centrales azucareros/Osvaldo Gozá León: Héctor Pérez de Alejo Victoria.--Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Ciudad de la Habana 1996.
101. [Goz 99] Gozá León, O. y col. Mejoras de la Cogeneración en un central con refinería. ATAC No 2, 1999, p 46.
102. [Goz 00] Gozá León, O. Pérez de Alejo Victoria, H. Modelación Simulación y Análisis Integral de Sistemas Termo energéticos de Azúcar Crudo y Refino. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana. 2000.
103. [Gru 95] Grupo de investigaciones energéticas. La cogeneración en la industria azucarera, una solución necesaria para el desarrollo sostenible. Proyecto de investigación. Sancti Spiritus. 1995.
104. [GueO 88] Guerra, O. Máquinas de transporte continuo. Ed.--- Pueblo y Educación. Ciudad de La Habana, 1988.

105. [Gue 92] Guerrero García, J. La cogeneración en el marco del plan de ahorro y eficiencia energética. Cogeneración para la energía y el medio ambiente. Editorial ENAGAS. IDAE.CE.Madrid. Octubre de 1992.
106. [HerF 89] Hernández Fonseca, J. y col. La cogeneración a altas presiones: Un imperativo económica a nuestro alcance. 1ra Conferencia internacional sobre alta eficiencia en la industria azucarera. Mantenimiento y explotación. MINAZ.ICINAZ.ATAC.1989.
107. [HerL 92] Hernández León, R.A. Notas del curso de cogeneración. Pamplona. España. 1992.
108. [HerL 93] Hernández León, R.A. Pasos a seguir en cada central azucarero para incrementar la generación de energía eléctrica a partir del bagazo y la paja de caña. Dirección de energía del Poder popular Provincial. Sancti Spiritus. Noviembre. 1993.--5p.
109. [HerL 98] Hernández León. R. A., Obregón, J., Romero, O. Cogeneración Continua usando el bagazo como combustible. International Sugar Journal, vol C, agosto 1998.
110. [HerL 00] Hernández León, R. A. y col. Cogeneración durante todo el año en la industria azucarera usando caña energética como segundo combustible. Informe final del proyecto 00603098. Sancti Spiritus; Abril 2000.
111. [HerM 95] Hernández Monzón, N. Estudio de las posibilidades de cogeneración en el CAI Simón Bolívar/Niurys Hernández Monzón: Osvaldo Romero Romero. Humberto García León.-- T.D. UCLV. Santa Clara.1995.
112. [Hil 90] Hillairet, J. Co Generation. Centrls electriques a bagasse. Electricite de france. 1990.
113. [Hor 00] Horta Nogueira, LA. y col. Estudio alternativo de la caña de azúcar como recurso alimenticio y energético - un modelo integrado. FAO. Marzo 2000.
114. [Hou 79] Hougen, O.A. y col. Principio de los procesos químicos. Parte II.Ed Pueblo y Educación. La Habana 1979.
115. [Hug 80] Hugot, E. Manual para ingenieros azucareros. Ed revolucionaria. La Habana. 1980.
116. [Isa 97] Isac Pino, J. L. Entrevista Personal. Jorge Isac Pino. Especialista de la UNE. La Habana Marzo de 1997.
117. [Isa 98] Isac Pino, J.L., Casillo Coto, A. L. Centrales eléctricas con biomasa cañera, problemas de implementación. Documento circulado en la UNE y el MES. 1998.
118. [Joc 00] Jochner, R. H. Matos, J. E. Designing for Quality. An introduction to the best of Taguchi and Western methods of Statistical Experimental Desing. ASQC. Quality Press American Society for Quality Control Mitwaukce Wisconson. Edit. Quality Resources.. A division of the Kraus Organization Limited White Plains. New York. 2000.
119. [Jov 00] Jover de la Prida, J. A. Caracterización de la fermentación alcohólica de melazas en función de los componentes volátiles no etanol. Tesis presentada en opción del grado científico

de doctor en ciencias técnicas/Josefina Aurora Jover de la Prida: María Lourdes Martínez Mederos.—Santa Clara. 2000.

120. [KeL 86] Kennlside, W. An economic analysis of cane sugar production. Proseeding of the international XIX congress of the ISSCT. September. 1986. Jakarta. p.1026-1035.
121. [Kee 78] Keenan, J.H. y col. Steam Tables. Thermodynamic properties of water including vapor, liquid and solid phases. (SI Units). Wiley – Interscience. New York. 1978.
122. [Kel 92] Kelety Alcaide, A. Análisis y Evaluación de Inversiones. 2da Edición. Ed. Romaya-Valls. España 1992. 173 p.
123. [Ker 75] Kern, D. Procesos de transferencia de calor. Edición Revolucionaria. La Habana. 1975.
124. [Kin 91] Kinoshita, C.M. Potencial for cane energy. Proseeding of the international conference of energy from sugar cane. September. 1991. Hawai. 10-13.
125. [Lar 94A] Larson, E.D. Biomass-Gasifier/aeroderivative gas turbine combined cycles. Part A: Technologies and performance modeling/En: Cogen Turbo Power. 94 conference.-- Oregón: S.N.S. 1994.
126. [Lar 94B] Larson, E.D. Biomass-Gasifier/aeroderivative gas turbine combined cycles. Part B: Performance calculations and economic assessment/En: Cogen Turbo Power 94. Conference.-- Oregón: S.N.S. 1994.
127. [Lar 91 A] Larson, E.D. y col. Biomass gasifier Steam injected gas turbine cogeneration for the cane sugar industry. Institute of gas technology. Chicago. 1991. 14 p
128. [Lar 91B] Larson, E.D. [Biomass - Gasifier Steam injected gas turbine cogeneration for the cane sugar industry/En: Energy from biomass and water.--Chicago: S.N.S. 1991.
129. [Lar 90] Larson, E.D. Biomass-Gasifier Steam Injected gas turbine cogeneration. Journal of engineering for gas turbine and power: USA: 112, 1990.
130. [Lar 00] Larson, E. D. Williams, R. H. Lima Verde Leal, M. R. Biomass Integrated-Gasifier/Gas Turbine Combined Cycle Technology for Sugarcane Processing Industries: Possibilities for Cuba. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana. 2000.
131. [Lau 03] Lauchy Ceñudo, A. Llanes López, C. González, Suárez, E. Machado, J. La incertidumbre económica en las inversiones de plantas de química a partir de biomasa. Centro Azúcar 30 (1): enero – marzo, 2003. p 57 – 63.
132. [Leh 99] Lehman, H. Protección ambiental, de los recursos y el clima. Importancia del uso Racional de Energía como contribución a un desarrollo sostenible. Eficiencia energética y energías renovables, No 1, Año 1, marzo 1999. Disponible en:

URL: <http://www.mem.gob.pe>

133. [Leo 99] León Benítez, C. A. y Percy Viego, F. Ahorro de energía mediante el empleo de motores de alta eficiencia en la industria azucarera. Centro Azúcar, No 3. 1999.
134. [Lim 00] Lima Verde Leal, M. R. José Hassuani, S. The collection of sugar cane bagasse and trash for an advanced cogeneration system. ISSCT Engineering and Energy Workshop, Cogeneration. Mauritius. 22 – 29 October 2000.
135. [LimA 00] Lima Verde Leal, M. R. José Hassuani, S. Sugar Cane Trash Recovery for Use Supplementary Fuel for Power Generation. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
136. [Lle 99] Llerena, G y col. Alternativas de sustratos para la producción de alcohol. Cuba Azúcar. No 3. 1999. P 49 - 52
137. [Lod 87] Lodos, J. Cordobés, M. La caña de azúcar, fuente de combustible almacenable y electricidad. Colección GEPLACEA. 1987.
138. [Man 00] Manechini, C. The Impact of Cane Trash on Wedd Control. Newsletter of the International Cane Energy Network "International Cane Energy News, April 2000, p. 7.
139. [Mar 01] Marrero Ramírez, S. Nuñez Bosch, O. González Palau, I. Evaluación del consumo de portadores energéticos en el proceso industrial de fabricación de azúcar. CD-ROM La Eficiencia Energética y el Medio Ambiente. ISBN:959-16-0079-8. Ed. Universitaria Camagüey. 2001.
140. [May 97] Mayoral, M.J. Precisan principales objetivos de trabajo del partido en la esfera económica para el año. Periódico Granma. 7 de enero de 1997. p.8.
141. [Men 01] Meneses Ruiz, E, Pérez Martín, D. Establecimiento y evaluación de indicadores de desarrollo sostenible de la electro energética cubana, 10p. 2001. Disponible en:  
URL: <http://www.cfvarela.org/Conf98/pp04.htm>
142. [Mer 00] Merlo Ramírez, M. Hernández León, R. A. Romero Romero, O. Molido de caña integral. Una mirada a sus posibilidades energéticas. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
143. [Mer 02] Merlo Ramírez, M. Hernández León, R. A. Romero Romero, O. Posibilidades Energéticas de la Molido de Caña Integral. Centro Azúcar, Vol 29, No 2. 2002.
144. [Mes 01] Mesa Orama, J. y col. Balance de CO<sub>2</sub> en la obtención de energía renovable a partir de caña de azúcar. Disponible en :  
URL: <http://www.plantiodireto.com.br>
145. [MIN 95] MINAZ. Ed. Situación actual y proyección del programa de desarrollo de las fuentes nacionales de energía en la agroindustria azucarera. Ministerio del azúcar. La Habana. Octubre. 1995.

146. [MINAZ 01] MINAZ. Ed. Brasil: Estudio alternativo de la caña de azúcar como recurso alimenticio y energético. Un modelo integrado (I). Boletín de alerta informativa para los cuadros de dirección del MINAZ. Año 2, No 1. La Habana. Enero 2001.
147. [MINAZ 01A] MINAZ. Ed. Brasil: Estudio alternativo de la caña de azúcar como recurso alimenticio y energético. Un modelo integrado (II). Boletín de alerta informativa para los cuadros de dirección del MINAZ. Año 2, No 2. La Habana. Febrero 2001.
148. [MinSS 00] MINAZ . Estudio de factibilidad para la prueba tecnológica con caña energética en el CAI "Melanio Hernández". Documento del MINAZ. Sancti Spiritus. Diciembre del 2000.
149. [Mor 04] Morand, A. Bagasse Cogeneration. Global Review and Potential. World Alliance For Decentralized Energy. Junio 2004.
150. [MoM 97] Morari, M. Grossmann, IE. Chemical Engineering Optimization Models with GAMS. Carnegie Mellon University. July 1997.
151. [Mor 95] Morgenroth, B. Autsmeyer, K, E. Mauch, W. Experiencias con el evaporador de placas de flujo descendente y conceptos para esquemas en el proceso de la eficacia de energía en la industria azucarera de cañas. Publicación especial. GP 122 en. Deutsche Babcock. 1995.
152. [Nav 00] Navarro, P. Valorización del potencial de una energía renovable, el bagazo. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
153. [Nap 01] Nápoles García, M. y col. Un estudio de la sensibilidad de las variables de procesos en los sistemas termo energéticos azucareros. CD-ROM La Eficiencia Energética y el Medio Ambiente. ISBN:959-16-0079-8. Ed. Universitaria Camagüey. 2001.
154. [Nic 00] Nicaragua Sugar Estates Limited. Ed. Mensaje de Nuestro Presidente 1999 - 2000. Disponible en:  
URL : <http://www.nicaraguasugar.com/news.html>
155. [Nor 92] Noriega Giral, L:E. Oportunidades para empresas europeas en los programas de cogeneración en MEXICO. Cogeneración para la energía y el medio ambiente. Editorial ENAGAS.IDAE:CE:Madrid. Octubre. 1992.
156. [Obr 00] Obregón, J., Hernández León. R. A., Romero, O. Producción de alcohol y biomasa de Levadura con jugo de caña energética. Seminario Internacional "Energía en la Agroindustria de la caña de azúcar". La Habana. Noviembre del 2000.
157. [Obr 01] Obregón Luna, J. Ciclo combinado integrado de producciones-servicios-medio ambiente durante todo el año a partir de las cañas. Trabajo presentado al evento provincial de la ATAC. Sancti Spiritus. Octubre del 2001
158. [Ogd 90A] Ogdem, J.M. y col. Economy and cogeneration in cane sugar factory. Center for energy and environmental studies. Princenton University. 1990.

159. [Ogd 90] Ogden, J. M. y col. Gas turbine technology in the cane sugar and alcohol industries. Center for energy and environmental studies. Princeton University. 1990.
160. [Osa 00] Osava, M. Brasil : Crisis energética fomenta fuentes alternativas, 8 de noviembre del 2000. Disponible en:  
URL: <http://www.eurosur.org/rebelion/ecologia/brasil081100.htm>
161. [Osg 91] Osgood, H. Alternative off-season biomass fuels for sugarcane factories. Proseeding of the international conference of energy from sugar cane. September. 1991. Hawai. 10-13.
162. [Oqu 02] Oquendo Ferrer, H. Alternativas de desarrollo prospectivo de los derivados de la caña de azúcar/ Hilda Oquendo Ferrer: Erenio González Suárez.—Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Camagüey. 2002. 109 p.
163. [Pad 95] Padilla García, O. Estudio de las posibilidades de cogeneración en el CAI Remberto Abad Alemán/Odonis Padilla García: Osvaldo Romero Romero, José A Hechemendia Reyes.--TD. UCLV. Santa Clara. 1995.
164. [Paj 02] Pajón Poblet, M. De la Cruz Soriano, R. González Suárez, E. Estudio Comparativo sobre posibilidades para la producción de alcohol. Centro Azúcar No 2. 2002.
165. [Pal 00] Palmer, C. The development of biomass collection for cogeneration projects in NSW sugar mills. ISSCT Engineering and Energy Workshop, Cogeneration. Mauritius. 22 – 29 October 2000.
166. [PeñD 01] Peña Cuenca, D. Estudio electro energético, cogeneración y ahorro de energía en el CAI Melanio Hernández. Darío Peña Cuenca:Osvaldo Romero Romero.--T.D.UCLV. 2001.
167. [Peñ 00] Peña Velásquez, C. Castro Pérez, S. Resultados de la utilización de variedades de caña de azúcar con fines energéticos en los centrales de la provincia Las Tunas en el período 1995 - 1998. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
168. [Per 89] Pérez de Alejo Victoria y col. Manual de usuario del sistema de programas Termoazúcar. Versión 2.0.ISPJAE-ISTC,1989.
169. [Per 95A] Pérez de Alejo Victoria, H. Comunicación personal. Febrero. 1995.
170. [Per 76A] Pérez de Alejo Victoria, H. La simulación del proceso azucarero. Disertación de grado. ISPJAE,1976.
171. [Per 76B] Pérez de Alejo Victoria, H. Metodología para balances de masa y energía y costos de producción de azúcar crudo. ATAC. La Habana.12-20,1976.
172. [Per 95B] Pérez de Alejo Victoria, H.at el. Como hacer un uso eficiente de la energía en un central azucarero. Conferencia mundial sobre la biomasa para la energía, el desarrollo y el medio ambiente. Sección 2.8. Habana. Enero. 1995.

173. [Per 78] Pérez de Alejo Victoria, H. y col. Empleo de la simulación digital en el análisis del proceso azucarero. Cuba azúcar. La Habana.25-31,1978.
174. [Per 94] Pérez de Alejo Victoria, H. y col. Método alternativo para calcular la posible generación de electricidad en un ingenio azucarero con máquinas de vapor para el movimiento del TANDEM. II conferencia de termo energética industrial,UCLV,1994.
175. [Per 92] Pérez de Alejo Victoria, H. y col. Método para elevar la eficiencia energética en los centrales azucareros. 46 congreso de la ATAC.Santiago de Cuba, noviembre.1992.
176. [Per 04] Pérez de Alejo Victoria, H. Comunicación Personal. La Habana. Abril del 2004.
177. [PeF 00] Pérez Egusquiza, F. Rubio González,A. Knudsen González, J. Limpieza en seco de la caña; recolección, transportación y preparación de la paja a granel como combustible. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
178. [Per 00] Pérez Martín, D. Comunicación Personal. Centro de Investigaciones de la Energía Nuclear. La Habana, Marzo del 2000.
179. [Pet 68] Peters, M. S. Timmerhaus, K. D. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. Ed Pueblo y Educación. La Habana. 1968.
180. [PRO 99] PROSI Magazine. Ed. Participants from India attend a training programme on sugar mill cogeneration. No 368, Mauritius, september 1999. Disponible en:  
URL : <http://www.prosi.net/mag99/368sept/cogen368.htm>
181. [PRO 00] PROSI Magazine. Ed. Cogeneration to ensure viable sugar industry. No 382, Mauritius, november 2000. Disponible en:  
URL: <http://www.prosi.net/mag2000/382nov/issct382.htm>
182. [Pue 01] Puerta Fernández, JF.; Castellanos Álvarez, JA; González Pérez, F. Análisis de alternativas de integración energética de un ingenio de producción de azúcar crudo con una fábrica de papel.(Primera parte). Revista Centro Azúcar, N<sup>o</sup> 4 , 2001, p 16-21
183. [Pue 02] Puerta Fernández, JF.; Castellanos Álvarez, JA.; González Pérez, F. Análisis de alternativas de integración energética de un ingenio de producción de azúcar crudo con una fábrica de papel.(Segunda parte). Revista Centro Azúcar, N<sup>o</sup> 1 , 2002, p 26.
184. [Pue 02A] Puerta Fernández JF. Integración energética entre los procesos de producción de azúcar crudo, pulpa y papel de bagazo /Juan Francisco Puerta Fernández:Juan A. Castellanos Alvarez Victoria.--Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. UCF.2002.
185. [Quint 98] Quintana Pérez, C. y col. Impacto ambiental debido a la combustión de la biomasa cañera en la industria azucarera cubana. Centro Azúcar. No 2. 1998. p. 48.

186. [Qui 02] Quintero Concepción, E. J. Análisis tecnológico y económico durante la preparación de un central azucarero para asimilar una planta de cogeneración con caña energética como segundo combustible. Esteban Jesús Quintero Concepción: Osvaldo Romero Romero.—Tesis para optar por el título de Maestro en Ciencias en análisis de procesos. En redacción. UCLV. 2002.
187. [Ram 93] Ramanathan, R. A. Multiobjective programming approach to energy resources allocations problems. International Journal of energy research. India.17 (105):105-119, January.1993.
188. [Rei 00] Rein, P. Co-generation in the USA. ISSCT Engineering and Energy Workshop, Cogeneration. Mauritius. 22 – 29 October 2000.
189. [Rey 99] Reymond Alamo, A. La intensificación de procesos en la estrategia tecnológica integral. /Antonio Reymond Alamo:Irenia Gallardo Aguiar.--Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas .Santa Clara.1999.
190. [Riv 91] Riviera, M.P. Power cogeneration in Reunión Island. Proseeding of the international conference of energy from sugar cane.September.1991.Hawai.
191. [Rod 95] Rodríguez Ibarra, E. Estudio de las posibilidades de cogeneración en el CAI Melanio Hernández/Eduardo Rodríguez Ibarra:Osvaldo Romero Romero. Rogelio Cárdenas.--T.D. UCLV.1995.-
192. [Rom 94] Romero Romero, O. De LA Cruz Soriano, R. Crítica a la Operación energética en centrales azucareros. Trabajo presentado en la II conferencia de termo energética industrial.UCLV.1994.
193. [Rom 95] Romero Romero, O. y col. Método termo económico. Una herramienta para los análisis de factibilidad económica en fábricas de azúcar. Trabajo presentado al Forum provincial de la ATAC. Sancti Spiritus. 1995.
194. [Rom 96A] Romero Romero, O. Ahorro de energía en la industria. Notas de clases. 1996
195. [Rom 96B] Romero Romero,O. Cabrera Gorrin, O. Evaluación del estado actual de la cogeneración en un CAI con destilería anexa. Trabajo presentado en la III conferencia de termo energética industrial. UCLV. 1996.
196. [Rom 97] Romero Romero, O. Evaluación técnico económica de diferentes variantes para cogenerar en un central con destilería anexa/Osvaldo Romero Romero:Héctor Pérez de Alejo Victoria.--Tesis para optar por el grado científico de Master of Science en eficiencia energética y Diseño térmico. UCF.1997.
197. [Rom 99] Romero Romero, O. Berechnung einer Variante zur Verrinderung des Dampfverbrauches einer Zuckerfabrik mit der Nutzung von Brüden der

Kristallisationsanlage/Osvaldo Romero Romero:D. Chistoph.—Projektarbeit. Bibliothek des Zuckerinstitutes Berlin, August 1999.

198. [Rom 01] Romero Romero, O. Pérez de Alejo Victoria, H. Hernández León, R. A. Experiencias de un estudio energético como paso previo en el desarrollo de una planta de cogeneración en la industria azucarera. CD-ROM La Eficiencia Energética y el Medio Ambiente. ISBN:959-16-0079-8. Ed. Universitaria Camagüey. 2001.
199. [Rom 01A] Romero Romero, O. Un vistazo a las concepciones y resultados energéticos de la industria azucarera alemana. CD-ROM La Eficiencia Energética y el Medio Ambiente. ISBN:959-16-0079-8. Ed. Universitaria Camagüey. 2001.
200. [Rom 01B] Romero Romero, O. y col. Eine umweltfreundliche Losung für die Kraft-Wärme-Kopplung in Zuckerfabriken Cubas. Newsletter No 4. Berlin. Mayo 2001.
201. [Rom 02A] Romero Romero, O. y col. Estudio energético para el desarrollo de una planta de cogeneración en la industria azucarera. Revista Centro Azúcar. No 3. Año 2002.
202. [Rom 02B] Romero Romero, O. y col. Método Termo económico: Una herramienta para los análisis de factibilidad económica en fábricas de azúcar. Revista Centro Azúcar. No 2. Año 2002.
203. [Rom 03] Romero Romero, O. Aproximación a las concepciones y resultados energéticos de la industria azucarera alemana. Revista Centro Azúcar. Editorial Feijó. UCLV. Santa Clara. Año 2003.
204. [Rom 03A] Romero Romero, O. Nutzung von energetischem Zuckerrohr als Rohmaterial zur Erzeugung von Elektroenergie in der Zuckerindustrie. Trabajo presentado al internacionales Energiseminar. Berlín. Junio del 2003.
205. [Rom 03B] Romero Romero, O y col. Cogeneración y emisiones asociadas en el central Melanio Hernández. IV Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Palacio de las Convenciones. La Habana. Junio del 2003. ISBN 959-7164-45-0
206. [Rom 04] Romero Romero, O. y col. Cogeneración durante todo el año en la industria azucarera, análisis de factibilidad y riesgos económicos. Tercer taller caribeño de energía y medio ambiente. Universidad de Cienfuegos. Marzo del 2004.
207. [Rom 04A] Romero Romero, O. y col. Optimización de la operación de una planta de cogeneración con bagazo. Tercer taller caribeño de energía y medio ambiente. Universidad de Cienfuegos. Marzo del 2004.
208. [Roq 96] Roque Díaz, P. y col. Estudio de prefactibilidad de una instalación demostrativa de la tecnología de cogeneración de electricidad basada en el proceso de gasificación de biomasa(bagazo y paja) Turbina de gas en ciclo combinado. CETA. UCLV. 1996.

209. [Roq 01] Roque Díaz, P. El análisis de la industria sucroenergética en Cuba está muy relacionado con el camino del sol. Disponible en:  
URL: <http://www.cubasolar.cu>
210. [Ros 92] Rosillo, F.Hall, D. Biomass energy, forests and global warming. Energy Policy, Vol.2, Editorial Butterworth.--Heinemann, 1992.
211. [Rui 95] Ruiz de la Torre, J. Técnicas de energías renovables en la ingeniería, arquitectura y agricultura. ABENGOA .SA Sevilla. 1995.
212. [Sal 00] Salo, K. Gasification Technologies for sugar cane biomass. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana. 2000.
213. [San 98] Sánchez Machado, I. Alvarez Luna, M. Roque Díaz, P. Valoración Crítica de un estudio de caso sobre cogeneración en la industria azucarera de Cuba. Centro Azúcar. No 1. 1998. p 63.
214. [SaH 99] Santos Herrero, R. Estrategia de análisis para la reactivación de las instalaciones actuales de levadura Torula/Ronaldo Santos Herrero:Elena Rosa Domínguez.—Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Santa Clara.1999.
215. [Sas 85] Sasson, A. Las biotecnologías: desafíos y promesas. UNESCO/CIB, La Habana. Cuba. 1985. p. 216.
216. [Sch 01] Schick, R. Cogeneration (Kraft – Wärme – Kopplung in der Rohrzuckerindustrie). Zuckertechnologisches Kolloquium im Zuckerinstitut Berlin am 14. 6. 2001, 6 p.
217. [Schr 00] Schirmer, B. Cogeneration scheme with additional 9 MW condensing turboset, using spare bagasse and cane waste in a 7000 tcd sugar factory in Cuba. ISSCT Engineering and Energy Workshop, Cogeneration. Mauritius. 22 – 29 October 2000.
218. [Sen 87] Seneg, J. C. La nueva biotecnología. Promesas y Realizaciones. Revista El Correo, UNESCO, Año XL, Marzo 1987. p.10.
219. [She 00] Sherrit international corporation. Bagasse cogeneration in CAI Abel Santamaría. A prefactibility study. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
220. [Sil 94] Silva Lora, E.Barrera del Campo, E. Potential for electricity from biomass residues in Cuba. ISPJAM.1994
221. [Smi 95] Smith, D.J. Combined-cycle gas turbine: The technology of choice for new power plant. Power Engineering International, May-jun, 19
222. [Tec 87] Técnicas de conservación energética en la industria. Tomos I y II. Edición revolucionaria. La Habana. 1987.

223. [Tor 92] Torrez Martínez, J. Caña de azúcar: Petróleo verde. Trabajo presentado en la I conferencia de termo energética industrial. CETA. UCLV. 1992.
224. [Tor 02] Torrez Martínez, J. Información Preliminar del Proyecto "Energía de la Biomasa Cañera". Observatorio Cubano de Ciencia y Tecnología. Habana, 2002.
225. [Tya 00] Tyagarajan, R. Cogen experience in India: A business perspective. ISSCT Engineering and Energy Workshop, Cogeneration. Mauritius. 22 – 29 October 2000.
226. [Tur 93] Turrini, E.O. O caminho do sol. Editorial Vozes. Julho 1993. Petrópolis. Brasil.
227. [Ull 97] Ulloa León, J. G. Evaluación del jugo de caña energética atrasada para la producción del alcohol con levadura. Adalberto Ventura Fernández:Joaquín Obregón Luna.--T.D.UCLV. 1996.
228. [UPM 97] UPME. Ed. Energía. 1997. Disponible en.  
URL: <http://www.upme.gov.co/energia/pen/entorno.htm>
229. [USA 90] U.S.A. United States Agency for international development energy from sugar cane. Interconection of sugar mills to the Thainland Electrid Power Grid.--Washinton D.C.S.N.S.1990.-  
-123p
230. [USA 94] U.S.A.United States Agency for international development energy from sugar cane. Cogeneration in Honduras/USAID.--Washinton D.C.1994.--123p
231. [USA 91] U.S.A. United States Agency for international development energy from sugar cane. Export option for five sugar mills in Costa Rica/USAID.--Washington D.C.1991.--140p.
232. [USA 86] U.S.A.United States Agency for international development energy from sugar cane. Jamaica cane/Energy project feasibility study. Ronco consulting corporation, Bechtel National Inc./USAID.--Jamaica:1986.--9-14p.
233. [UNE 95] UNE. Programa de desarrollo del sector eléctrico en Cuba. Unión nacional eléctrica. Informe técnico. La Habana. Septiembre de 1995.
234. [Val 97] Valdés, A. y col. Caña de Azúcar: Generación de Electricidad, Alcohol y Biogas. Teleinfo CN 980 403, MINAZ, Cuba, p. 1-13.
235. [Val 00] Valdés, A. Fiandor, H. Ventajas y desventajas del procesamiento industrial de caña integral. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
236. [Vald 96] Valdivia Rojas, M.M. Diagnóstico y factibilidad de la cogeneración en la industria azucarera de Sancti Spiritus/Madeline M Valdivia Rojas: Osmel G Cabrera Gorrín.--T.D. UCLV.1996.
237. [Vale 94] Valero Capilla,A. Lozano Serrano, M.A. Curso de Termo economía. II Tomo. Universidad de Zaragoza.España.Julio de 1994.

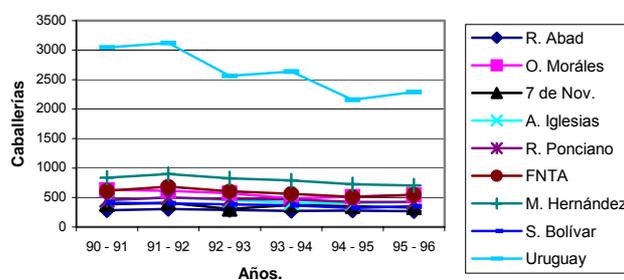
238. [Vlle 01] Valle Toledo, R. Alternativa de ahorro de energía en el CAI Melanio Hernández. Rómulo Valle Toledo:Osvaldo Romero Romero.--T.D.UCLV. 2001.
239. [Ven 00] Vennemo, H. Kjørven, O. Ellis, A. Alternative Energy Supply for Cuba : Economic, Institutional and Financial Feasibility of Major Investment program in Sugarcane Biomass Energy. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana, 2000.
240. [Vent 96] Ventura Fernández, A. Evaluación del jugo de caña energética para la producción del alcohol con levadura. Adalberto Ventura Fernández:Joaquín Obregón Luna.--T.D.UCLV. 1996.
241. [VerC 00] Vera Cabezas, L. M. Extracción de alcoholes de alto peso molecular a partir de la cachaza y sus derivados/Luisa Mayra Vera Cabezas:Gretel Villanueva Ramos.—Tesis presentada en opción del grado científico de doctor en ciencias técnicas. Santa Clara. 2000.
242. [Ver 97] Vera, J.F. Diagnóstico del conocimiento de la problemática energética para la introducción de conceptos de energética sostenible en la provincia de Sancti Spiritus/Jorge Felix Vera:Edelvy Bravo Amarante.--T.D.Sede Universitaria Sancti Spiritus. 1997.
243. [Vie 96] Viena.25 de noviembre. Países de la OPEP intentan mantener altos precios. Periódico Granma 26 de noviembre de 1996. p.8
244. [Vis 00] Viswanathan, S. A Greenfield Sugar Mill Cogeneration Plant Succes Story. Newsletter of the International Cane Energy Network "International Cane Energy News, April 2000, p. 4.
245. [Wal 00] Waldheim, L. Atmospheric Gasification for Power Generation; Status and Aplication in the Sugar Industry. Trabajo presentado en el evento internacional de energía del MINAZ. La Habana. 2000.
246. [Web 01] Weber, G. Aire for export. Otro mercado para globalizar. Disponible en:  
URL: <http://www.brecha.com.uy>
247. [Wil 96] Willians, R.H. Renewable energy sources for fuel and electricity. Center for energy and enviromentals studies. Pricenton University. Washinton. 1996.
248. [WIN 01] Winrok. Ed. 2001. Disponible en:  
URL: <http://www.winrok.org/reep/trash.htm>
249. [Zyl 91] Zylberstain, D. Teixeira Coelho, S. An economic evaluation of sugar cane use for electricity production and it's enviromentatl consequenses on avoided carbón emission in Brazil. Proseeding of the international conference of energy from sugar cane.September.1991.Hawai.

ANEXOS

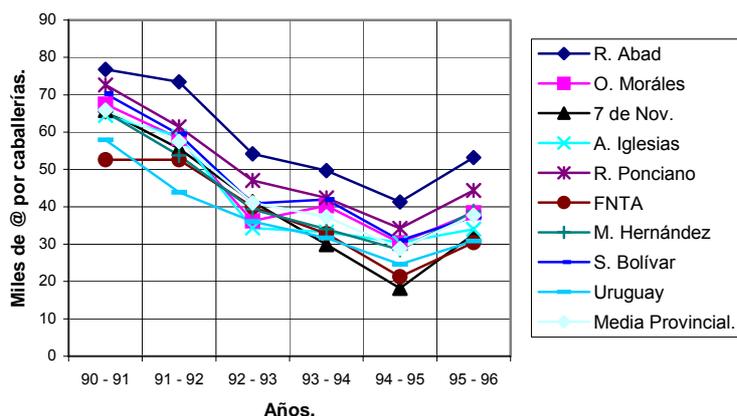
Anexo 1: Área Cañera Cultivable de los CAI de Sancti Spiritus en Caballerías.

Años	90 - 91	91 - 92	92 - 93	93 - 94	94 - 95	95 - 96
R. Abad	281,7	303,7	287,1	275,6	276,5	270,6
O. Morales	634	618,2	574,5	485,2	517,8	541,2
7 de Nov.	382,7	409,4	306,7	374,5	351,1	329,9
A. Iglesias	452,6	499,8	460,4	408,3	406,6	425,5
R. Ponciano	457	500,5	476,3	470,9	427,4	428,7
FNTA	617,5	686,2	605,7	562,6	512,3	547,3
M. Hernández	837,2	897,9	824,4	786,9	726,6	706,1
S. Bolívar	412,3	397,5	385,8	369,8	320,8	354,9
Uruguay	3047,7	3120,8	2560,9	2636,7	2160,3	2289,6

Anexo 2: Área cañera cultivable por CAI en el territorio espirituario entre 1990 y 1996.



Anexo 3: Rendimiento Agrícola cañero en Sancti Spiritus del 90 al 96.



Anexo 4: Resumen del potencial disponible de biomasa cañera en Sancti Spiritus en 1996.

Rto Agric. (@/cab)	Bagazo caña. (%)	Producc. Bagazo. (t)	Recuperación de RAC. (%)	Producción de RAC. (t)
65 900	30 *	1 802 759 (1442207)	6 *	320 000 (288441)
Petróleo equiv. (t)	Consumo en gen. (g/kWh)	Potencial de gen. (GWh)	Consumo diario en SS. (MWh)	Consumo Anual en SS. (GWh)
334 641 (272826)	286 *	1170 (954)	1000	365

\* Valores estimados para los cálculos.

Anexo 5: Potencial técnico teórico de cogeneración en Sancti Spiritus en 1996.

Tecnología	Índice (kWh/tc)	Caña (tc)	Potencial (GWh)
Turbina de Contrapresión	40	5 400 564,4	216,022 (121,394)
Turbina Extracción Condensación	90	5 400 565,4	486,050 (273,137)
Ciclos de gasificación	150	5 400 565,4	810,080 (455,228)

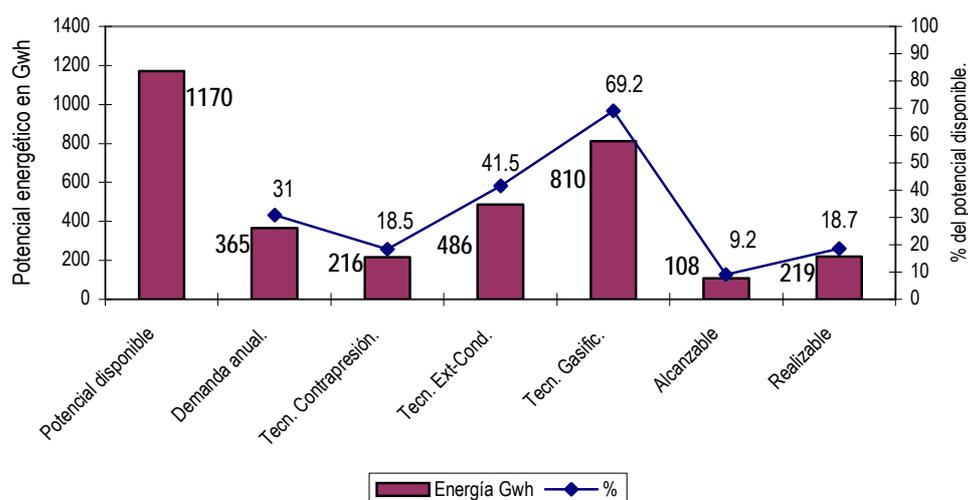
(Cálculos después del cierre de varios centrales) Caña estimada: 3 034 850 tc/a

Anexo 6: Potencial realizable de cogeneración en la provincia de Sancti Spiritus 1996.

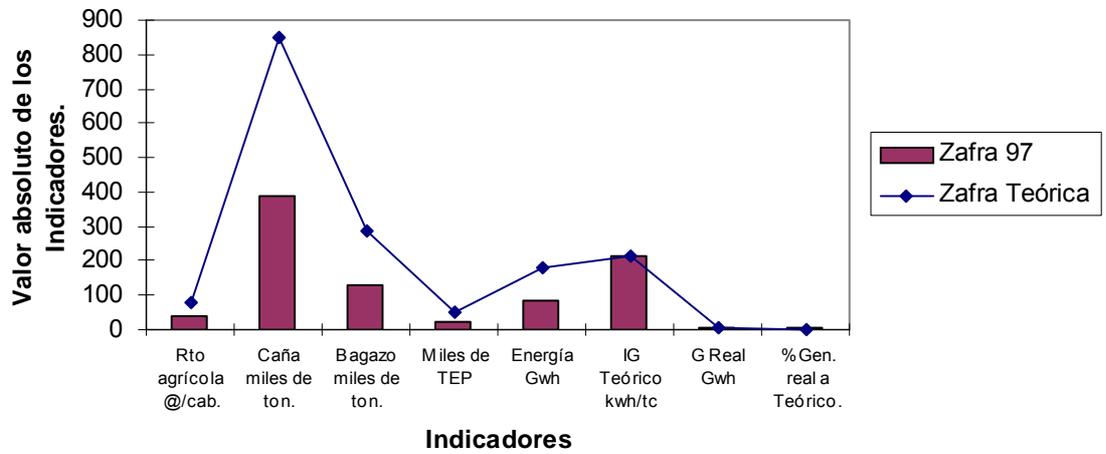
CAI	P. ACTUAL ( MW)	P. PROPUESTA (MW)	P. ENTREGAR (MW)	Energ. Entregar (GWh)	Energ. Entregar. Ext. Ope.
R Abad	1.5	3.2	0.7	2.02	
S Bolívar	0.5	3.6	0.8	2.30	
A Iglesias	1.5	3.4	0.7	2.02	
7 de Noviembre	1.5	3.2	0.7	2.02	
R Ponciano	6.5	6.5	1.4	4.03	4.03
O. Morales	3.0	6.3	1.3	3.74	3.74
FNTA	6.0	17.0 **	11	31.68	79.20
M Hdez	4.0	20.0 **	13	37.44	93.60
Uruguay	13.0	13.0	1.3	3.74	3.74
Total	37.5	76.2	30.9 (28)	88.99 (80.63)	184.31

\*\* Instalando turbos de extracción condensación.

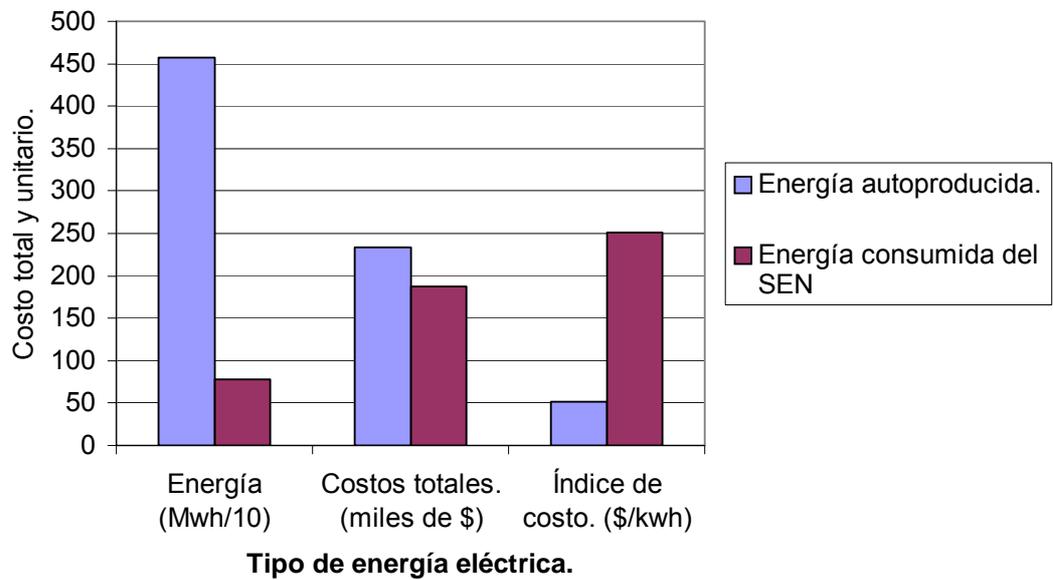
Anexo 7: Relación de los potenciales energéticos calculados para el territorio espiritano en 1996.



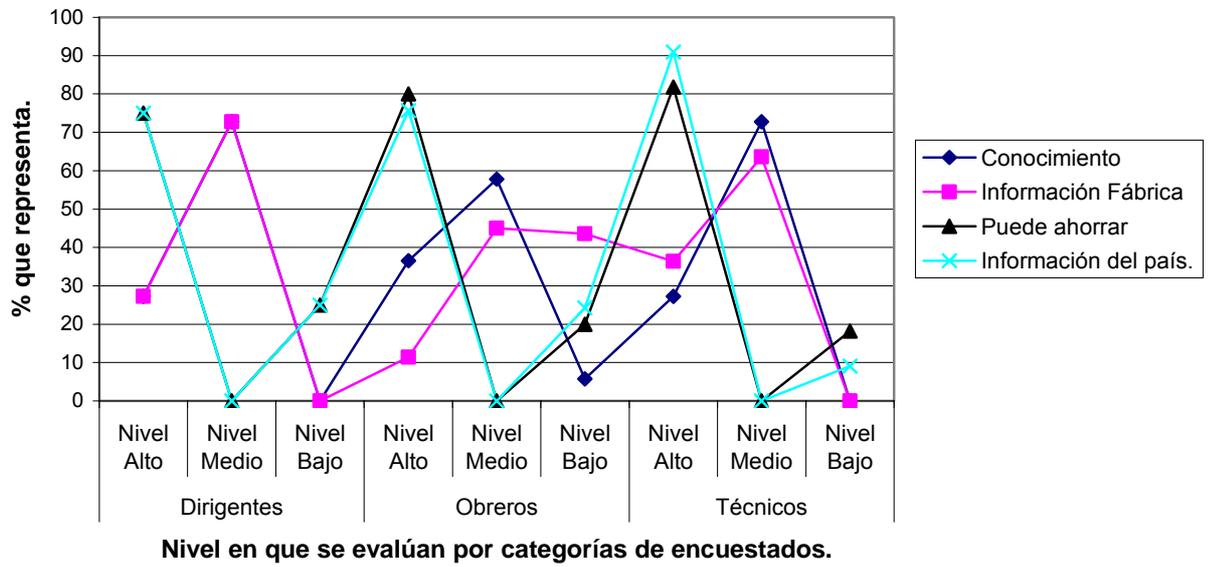
**Anexo 8: Aprovechamiento del potencial energético del CAI para dos condiciones diferentes.**



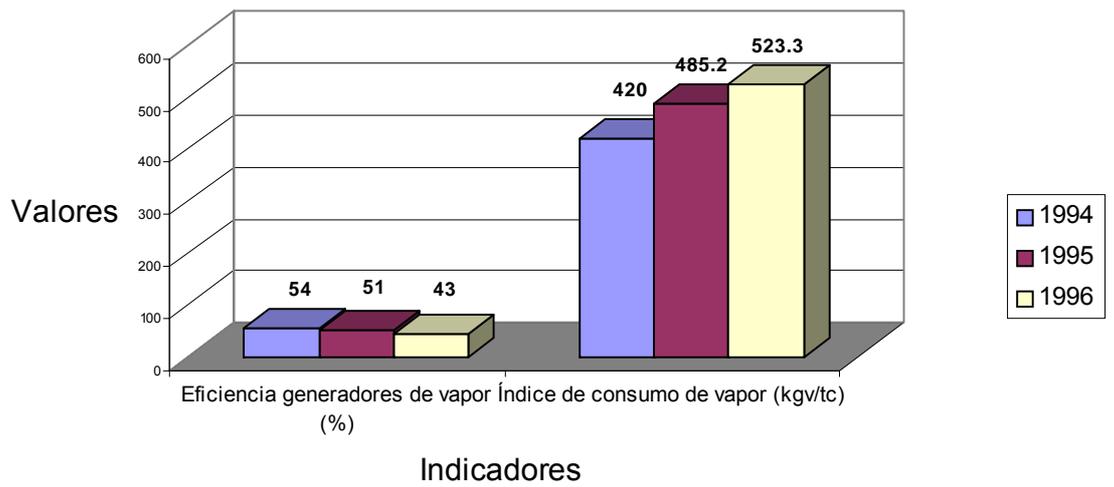
**Anexo 9: Costos de la energía eléctrica.**



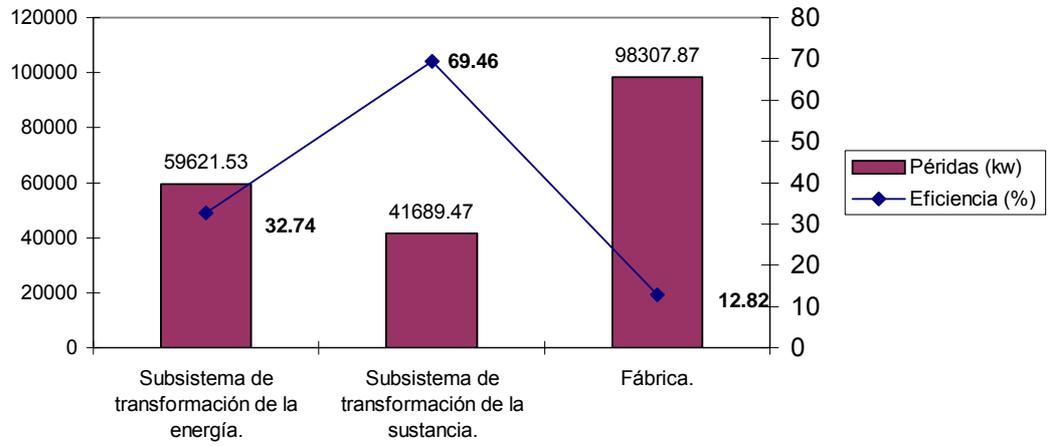
**Anexo 12: Resultados de la encuesta sobre conocimiento y participación en soluciones energéticas.**



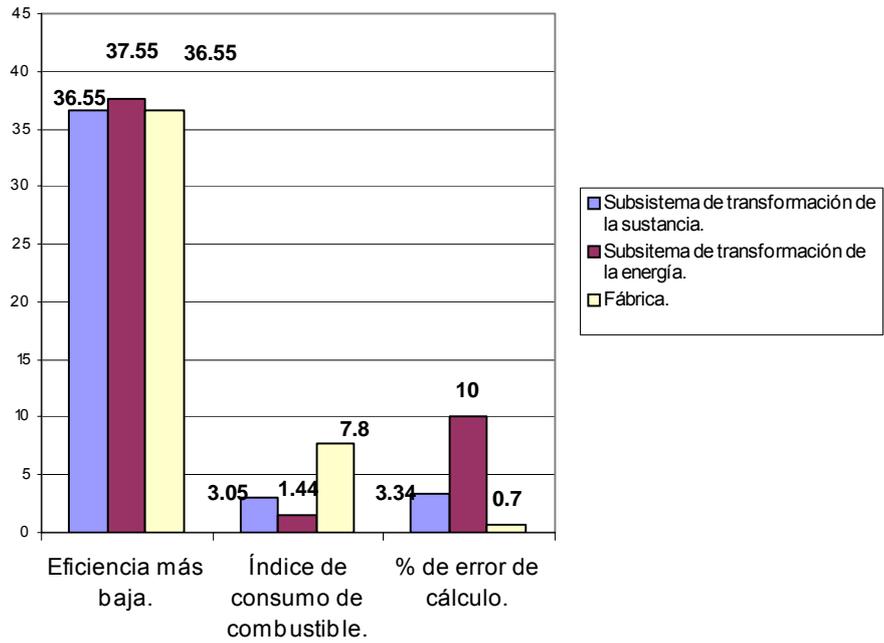
**Anexo 13: Resultados generales de los balances de masa y energía realizados durante tres años.**



**Anexo 14: Pérdidas y eficiencias exergéticas por subsistemas y de la fábrica.**



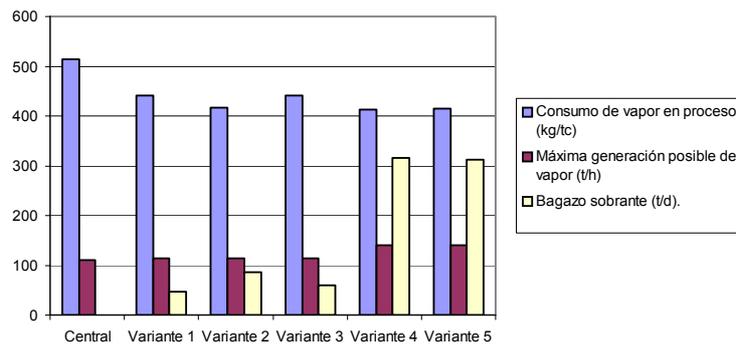
**Anexo 15: Eficiencia exergética, consumo de combustible y % de error del balance de exergía.**



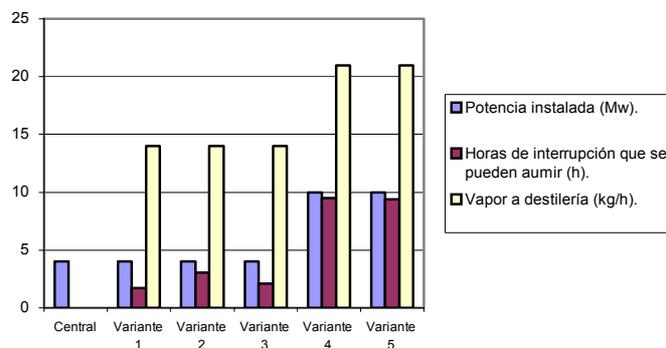
Anexo 23 : COMPARACIÓN DE INDICADORES ENTRE EL ESQUEMA ACTUAL Y LAS VARIANTES ESTUDIADAS, EVALUADAS POR EL AGE.

INDICADORES	E. A.	V 1	V 2	V 3	V 4	V5
CONSUMO DE VAPOR EN PROCESO(kg/tc)	513.3	440.4	416.9	440.2	412.9	415.0
DEMANDA MÁXIMA DE E.E. (kW)	3700	4400	4400	4400	6500	6500
CAPACIDAD INSTALADA (kW)	4000	4000	4000	4000	10000	10000
GENERACIÓN MÁXIMA DE VAPOR SEGÚN BAGAZO (t/h)	110.7	113.15	113.15	113.15	139.6	139.6
BAGAZO PRODUCIDO (t/h)	55.58	55.58	55.58	55.58	55.58	55.58
CONSUMO DE BAGAZO (t/h)	53.4	51.46	49.78	50.94	41.21	40.37
BAGAZO SOBRANTE (t/d)	0	46.63	86.86	59	316.6	312.73
HORAS DE PARADA QUE SE PUEDEN ASUMIR. AGUA (t/h)	0	1.69	3.05	2.11	9.51	9.41
% VAPOR POR REDUCTORA	-1.54	-3.97	+0.13	-2.78	-0.14	-0.64
GENERACIÓN TOTAL (kW)	3393	4000	4000	4000	9350	9350
CONSUMO DEL SEN. (kW)	-200	-400	-400	-400	+2850	+2850
VAPOR A DESTILERÍA (t/h)	0	14	14	14	21	21

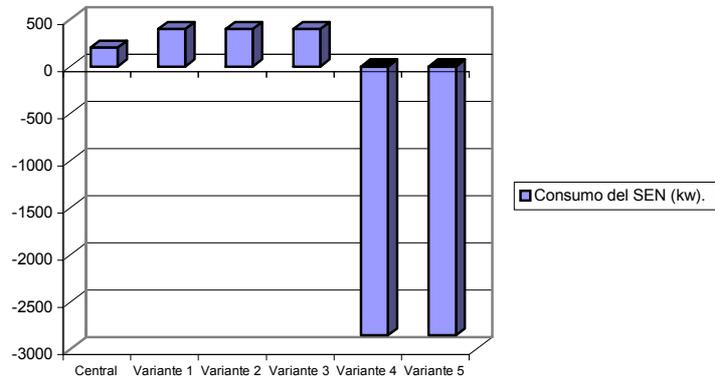
Anexo 24: Comportamiento de algunos indicadores energéticos de las variantes según AGE - OPTIMO.



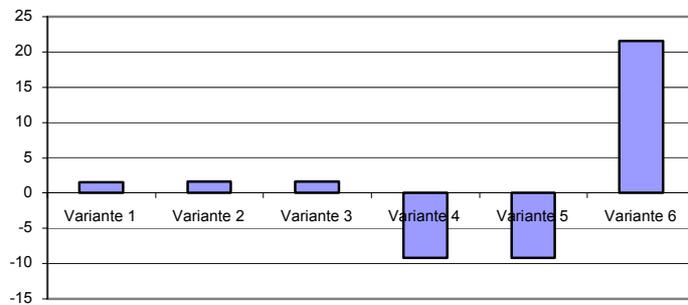
Anexo 25: Otros indicadores según AGE - OPTIMO.



**Anexo 26: Consumo del SEN (kw) de cada variante según AGE - OPTIMO.**



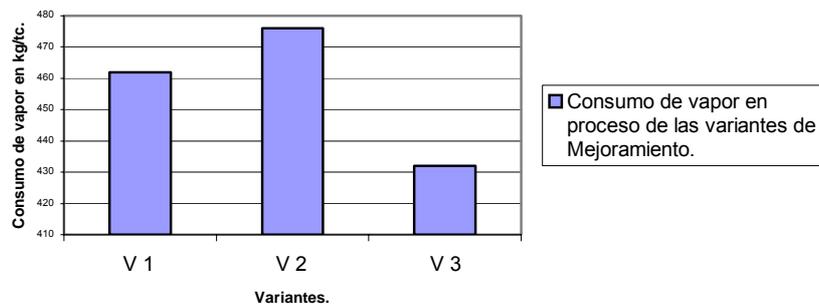
**Anexo 27: VAN de las variantes analizadas.**



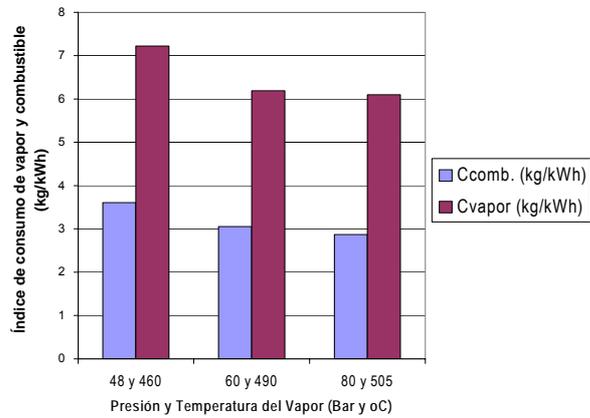
**ANEXO 28: COMPARACIÓN DE INDICADORES ENTRE VARIANTES UTILIZANDO LA SIMULACIÓN CON TERMOAZÚCAR.**

INDICADORES	V 1	V 2	V 3	V ALTA PRESION
CONSUMO DE VAPOR EN PROCESO (kg/tc)	462	476	432	432
GENERACIÓN TOTAL DE VAPOR (t/h)	102.65	105.32	96.8	141
BAGAZO SOBRANTE (t/h)	6.90	5.42	10.13	2,03
% VAPOR POR REDUCTORA	21.41	23.29	19.08	0
INDICE DE GENERACIÓN DE VAPOR (kgv/kgb)	1.81	1.81	1.81	2,6
SE CUMPLEN LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN	SÍ	SÍ	SÍ	Si

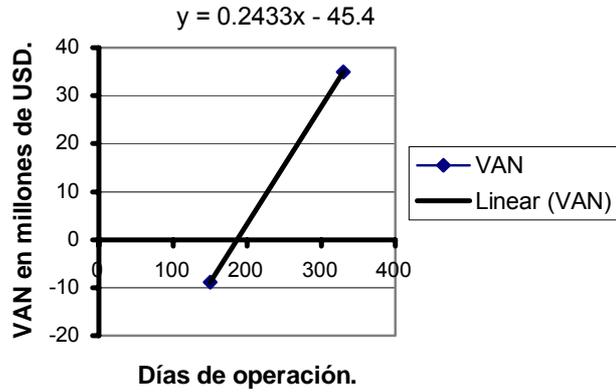
**Anexo 29: Consumo de vapor en proceso de las variantes de Mejoramiento usando simulación.**



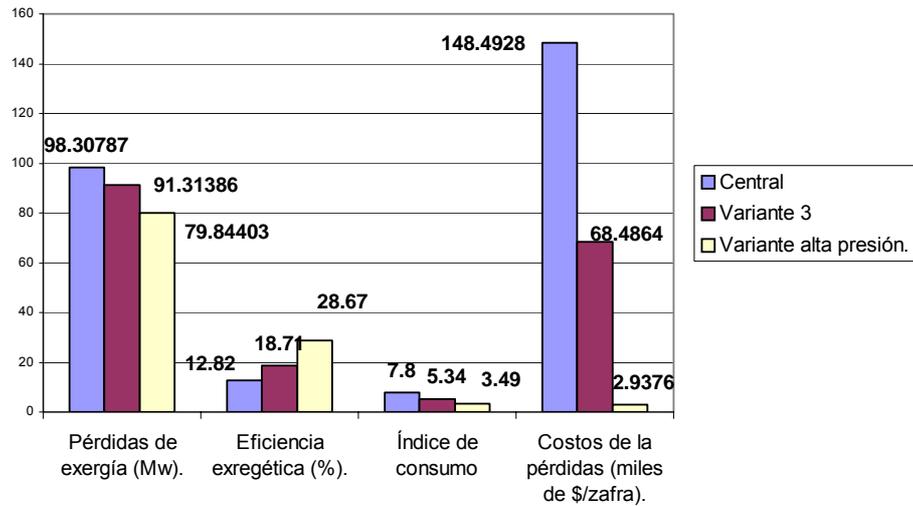
**Anexo 30 Índices de consumo de combustible y vapor para diferentes condiciones del vapor de la variante a alta presión.**



**Anexo 30 A: VAN de la Variante 6 en función de los días operación.**



**Anexo 31: Comparación de los balances de exergías.**



Anexo 32: "Precios de compraventa de energía eléctrica en el central" Año 2001.


**El costo de la energía generada en el CAI se determinó por:**

Gasto del Combustible	=	106 933 \$
Gastos de Salario	=	22 176 \$
Gastos de Reparaciones	=	122 159 \$
Gastos de Amortización	=	4 596 \$
Gastos totales de generación	=	255 864 \$
Energía eléctrica generada	=	5 134 MWh

Costo de generación en el año 2000 = 49, 84 \$/MWh.

Costo reportado en el año 1997 = 51, 11 \$/MWh.

Anexos 34: Resultados del electrobalance simulando la reubicación de los capacitores.

	KWh	kVArh	kWh(p)	kVArh(p)
Generación	86157	9315	3490	0

	KWh	kVArh	kWh(p)	kVArh(p)
Generación	86929	4929	3490	0
a)SEN	13225	-1425	0	0
b)Generadores	73704	6354	3490	0
Cargas	84556	65563	6515	0
a)M.Inducción	82751	64674	6515	0
b)M.Sincrónicos	0	0	0	0
c)Otras	1805	889	0	0
Capacitores	0	63861	0	0
Sistema	0	0	2373	3227
a)Transformadores	0	0	345	1862
b)Líneas	0	0	2028	1365
c)Otros	0	0	0	0
ConsumoTotal	86929	68790	2373	3227

a)SEN	12453	2264	0	0
b)Generadores	73704	7051	3490	0
Cargas	84556	65563	6515	0
a)M.Inducción	82751	64674	6515	0
b)M.Sincrónicos	0	0	0	0
c)Otras	1805	889	0	0
Capacitores	0	59021	0	0
Sistema	0	0	1601	2774
a)Transformadores	0	0	341	1842
b)Líneas	0	0	1260	932
c)Otros	0	0	0	0
ConsumoTotal	86157	68336	1601	2774

ANEXO 35: Ubicación propuesta para los bancos de capacitores

UBICACIÓN	KVAR	VOLTAJE	#UNIDADES	CONEXIÓN	SIMBOLOGIA	FASES
B.iny.sur	80	440	1	Δ	C1	3F

caldera (BQS)	45	440	4	Δ	C2	3F
Intupibles.	45	440	1	Δ	C3	3F
Molinos	45	440	6	Δ	C4	3F
cuchilla #1	140	440	1	Δ	c.cuchilla#1	3F
B.Iny.Caldera	45	440	2	Δ	C6	3F
Rastrillo de bagazo	45	440	1	Δ	C7	3F
Filtro	45	440	3	Δ	C8	3F
Caldera #7	45	440	1	Δ	C9	3F
Basculador	45	460	2	Δ	C10	3F
Cristalizadores.	45	440	2	Δ	C12	3F
Motor de 500	250	6300	1	Δ	C11	3F
Aseas	45	440	8	Δ	C13	3F
Centrif. 2da	45	440	1	Δ	C14	3F
Cent.3era	45	440	1	Δ	C15	3F
B.Iny.Norte	45	440	2	Δ	C16	3F
B.agua.cali. p.	45	440	1	Δ	C5	3F
Bs.vacio y tachos	45	440	3	Δ	C18	3F
Granel1	45	440	1	Δ	C19	3F
B.gur.def.	45	440	1	Δ	C5	3F
cuchilla #1	45	440	2	Δ	c.cuch.1	3F
Barra 1	45	440	3	Δ	C17	3F
Barra2	45	440	1	Δ	C20	3F

Anexo 36: Resumen del análisis del índice de carga de los motores eléctricos.  
Equipos altos consumidores cuyo índice de carga es bajo.

AREA	Equipos consumidores de energía.	Energía consumida (Kw.h/turno)	Consumo referido al total del área.	Índice de carga. (%)
Basculador	B. Hidráulica al basculador	720	80	61.3
Molinos	B. guarapo a fábrica 2,	791	58	66
	B intupible 6	325.2	24	74
	B intupible 5	301.4	22	69.7
Generación vapor	B. de inyección a caldera 2	798	93	80
Purificación	B. guarapo mezclado 1.	1007	55	105

ANEXO 37: Resultados del análisis con el sistema Energy para diferentes métodos de regulación de flujo a la salida de dos bombas.

#### Bomba de guarapo a fabrica:

##### Datos de entrada:

System design head (bar) -----	6.1
Peak head (bar) -----	7.22
System static head (bar) -----	2.44
Pump design brake power (Kw) -----	49
Total power rating of motor (Kw) -----	55
Motor efficiency at full speed and load (%) -----	89
Drive power rating (Kw) -----	49
Drive efficiency at full speed and load (%) -----	100

Total number of hours of operation per year (h/year) ----	2448
Cost of electricity (cents per Kw.h) -----	4
System to compare with (select number) -----	1

- 1 – Throttling
- 2 – Constant volume
- 3 - Recirculation

**Resultados:**

Resultados				
% of flujo	% of time	Hrs/yr	Throttling (Kw.h/zaf.)	A.C-Drive (Kw.h/zaf.)
100	50	1224	73232	66668
50	30	734	38894	12363
30	20	490	22736	4786
Total			134862	83757
Total savings			51105	
USD savings			2044	

***Bomba Intupible 5:***

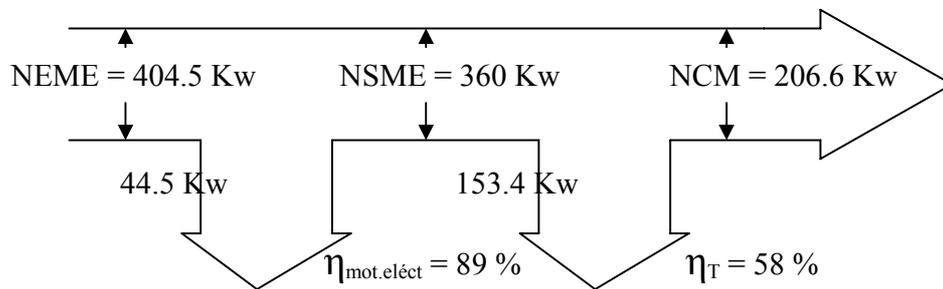
**Datos de entrada:**

System design head (bar) -----	2.5
Peak head (bar) -----	313
System static head (bar) -----	1
Pump design brake power (Kw) -----	49
Total power rating of motor (Kw) -----	55
Motor efficiency at full speed and load (%) -----	89
Drive power rating (Kw) -----	49
Drive efficiency at full speed and load (%) -----	100
Total number of hours of operation per year (h/year) ----	2448
Cost of electricity (cents per Kw.h) -----	4
System to compare with (select number) -----	1

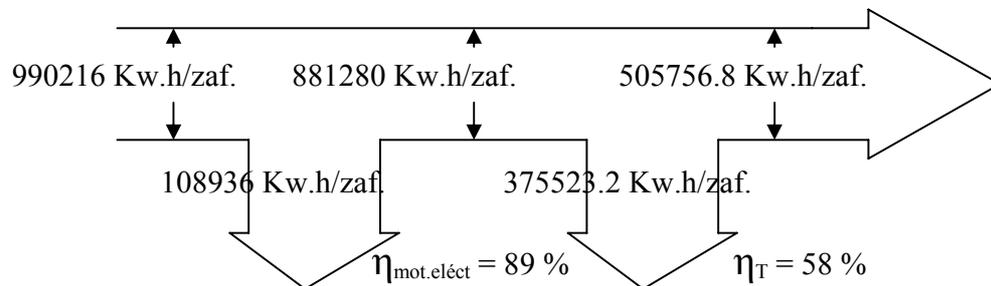
- 1 - Throttling
- 2 - Constant volume
- 3 - Recircula

Resultados				
% of flujo	% of time	Hrs/yr	Recirculation (Kw.h/zaf.)	A.C-Drive (Kw.h/zaf.)
100	50	1224	73232	66668
50	30	734	40010	12363
30	20	490	24180	4786
Total			137422	83757
Total savings			53665	
USD savings			2147	

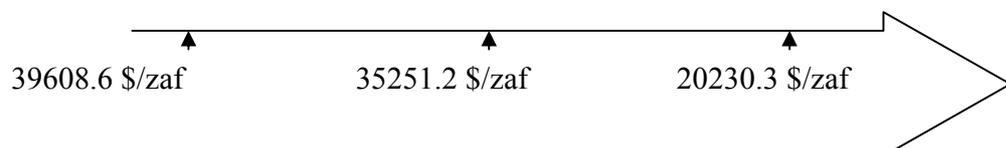
ANEXO 38: Ejemplo de diagramas de Sankey del tandem con turbinas de vapor. Molino 1.  
Sankey de potencia del molino1

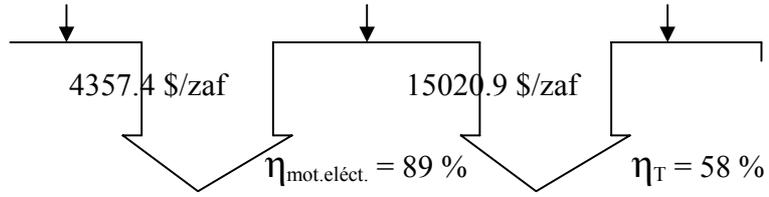


Sankey de energético del molino1

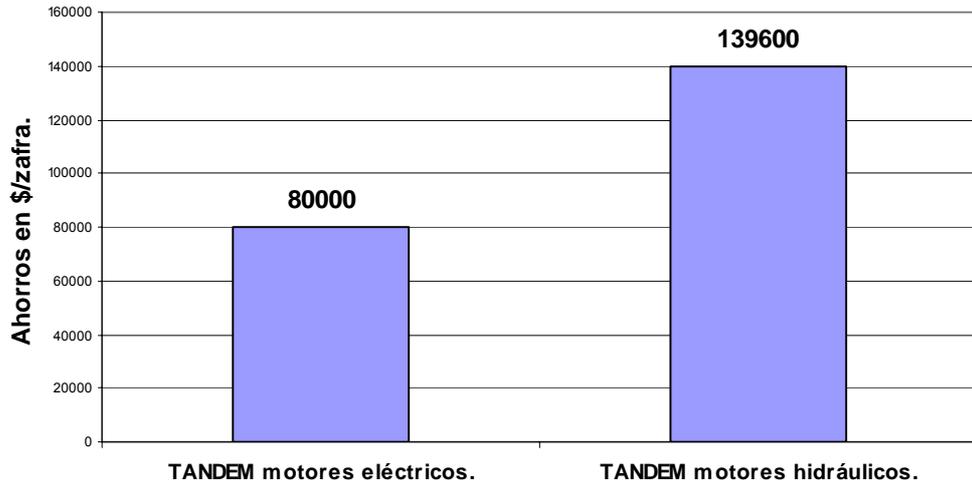


Sankey de económico del molino1

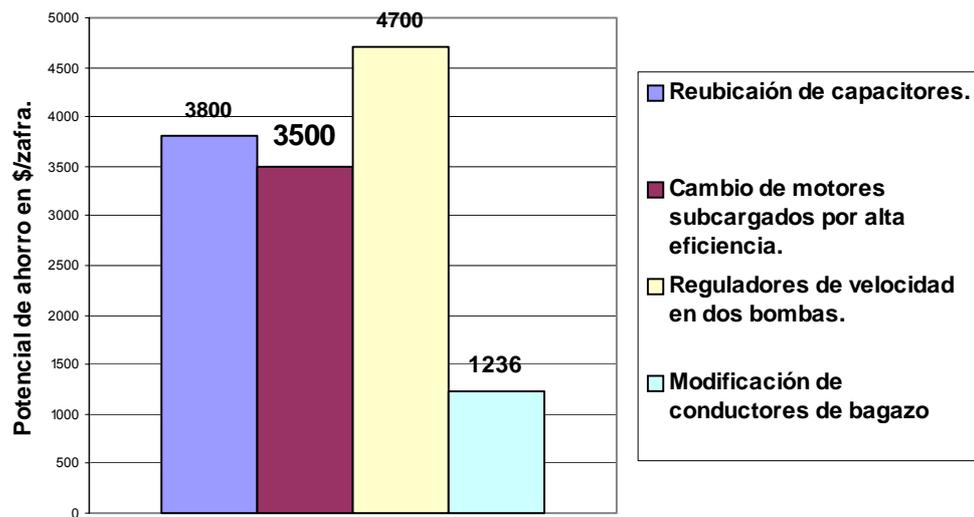




**Anexo 39: Ahorros de energía para dos variantes de accionamiento del TANDEM**



**Anexo 40: Potenciales de ahorro de energía eléctrica y mecánica.**



Anexo 41: Coeficiente de transferencia de calor de los calentadores en Kcal / m<sup>2</sup> h ° C

	Vampiro	Webre 2	Webre 3	Webre 4
Coef. TC Termoazúcar	497	751.5	766.12	741.18
Coef. TC Diseño	2637	1070	1070	1070

Anexo 42 : Coeficiente de transferencia de calor de los evaporadores en Kcal / m<sup>2</sup> h ° C

Vasos	pre	1°	2°	3°	4°	5°
Coef.TC Termoaz.	2167.3	1854	1124.2	1066.2	802.96	509.4
Coef.TC Recomend.	3000	2000	1400	1000	700-750	400-450

Anexo 43 : CTC para los calentadores webre en Kcal / m<sup>2</sup> h ° C

Propuestas	Webre 1	Webre 2	Webre JC
1	895	935	798
2	664.8	861.6	880
3	-	935.2	870.34
Cond. Actuales	751	766	741
Valor de diseño	1070	1070	1070

Anexo 44: Resultados del diseño teórico de un intercambiador con vapor de jugo de los tachos.

Parámetro	Valor de diseño
Presión del vapor de los tachos (bar)	170
Temperatura del vapor ° C	56, 6
Temperatura de entrada del jugo ° C	35
Temperatura de salida del jugo ° C	50
Δ t (k)	12,65
Coeficiente de transferencia (U) (w/m <sup>2</sup> k)	900
Número de tubos	539
Diámetro del equipo (m)	1,4
Velocidad del jugo en los tubos (m/s)	1,68
Caída de presión del jugo (bar)	1,23
Diámetro de la tubería de vapor (m)	0,80
Vapor de jugo que condensará (t/h)	5,8
Ahorro de agua al condensador (t/h)	106
Ahorro potencia bomba de inyección (kW)	10
Ahorro de vapor de escape (t/h)	2,0
Rendimiento exergético esperado (%)	89

Anexo 45 : CTC para los evaporadores en cada variante en Kcal. / m<sup>2</sup> h ° C

Variantes	pre	vaso 1	Vaso 2	Vaso 3	Vaso 4	Vaso 5	Vaso 6
1	2770	2165	1371 1532	838 1149	615 777	385 380	
2		3084 1765	2636 835	716	568.7	397	
3		2458	1639	1283	903	679	400
Cond. Actuales	2167.3	1854	1124	1066	802	509	
Valor de diseño	3000	2000	1400	1000	700-750	400-450	

Anexo 46: Razones de evaporación para cada variante y cada vaso en kg/h m<sup>2</sup>

Variantes	Pre	vaso1	Vaso 2	Vaso 3	Vaso 4	Vaso 5	Vaso 6
1	28.56	29.4	18.34 9.42	23.6 17.4	12.4 17.4	10.4 17.95	

2		18.33 47	22.19 49.2	7.25	10.7	11.36	
3		27.6	24.8	14.65	19.85	16.33	18.9
Cnd. Act.	17.28	25.9	15.2	21.9	16.6	16.92	
Recomend		26	25	23	21	16	

#### Anexo 47:

*Propuesta de utilización de variedades de caña energética como materia prima al terminar la zafra para la generación de energía eléctrica durante todo el año en centrales azucareros.*

#### RESUMEN

La necesidad de incrementar el aprovechamiento energético del bagazo con termoeléctricas anexas a fábricas de azúcar que generen más de 7000 horas anuales con tecnologías modernas de cogeneración y garantizar su factibilidad económica fue el origen de este resultado, en el que se propone el procesamiento de caña energética como materia prima al terminar la zafra en fábricas de azúcar, para obtener el bagazo necesario en la generación de energía y utilizar el jugo para otras producciones no azucareras. El mismo parte del conocimiento de fábricas en el mundo que generan más de 100 kWh/tc con plantas modernas, pero para asegurar su recuperación económica utilizan combustibles fósiles para generar después de la zafra; como en Cuba y otros países azucareros no existen grandes reservas de combustibles fósiles, se necesita la búsqueda de un combustible alternativo para generar al terminar la zafra. Sin embargo se conoce de la existencia de variedades de caña energética obtenidas por cruzamientos, generalmente F1 y que producen el doble del bagazo que las cañas azucareras.

#### *Descripción*

El presente procedimiento para la operación de centrales azucareros durante todo el año se incluye dentro de la industria química de producción de alimentos y específicamente se refiere a la nueva utilización de variedades de caña no azucareras como nueva materia prima para procesar después de la zafra en centrales azucareros que entregan energía eléctrica al sistema eléctrico nacional (SEN).

Los países de mayor desarrollo en el uso de la cogeneración con bagazo como Reunión y Hawai utilizan un combustible fósil al terminar la zafra y generan valores entre 90 y 160 kWh/tc, de los que el 60 % como promedio es a partir de bagazo, pero en el caso de Cuba la tecnología instalada y las condiciones de operación permiten que la generación actual esté en el orden de los 25 kWh/tc. Países como Brasil, China, Australia y Cuba no han podido desarrollar el uso de la cogeneración en la industria azucarera, debido a políticas regulatorias, falta de financiamiento e insuficiente base de conocimiento para el uso de estas tecnologías, a todas estas causas se debe sumar una muy importante y que está referida, a que estas tecnologías por los altos valores de inversiones que requieren no se pagarían si solo trabajan durante zafra corta (150 días), por lo que su instalación requiere disponer de un combustible alternativo para explotar la tecnología por 300 días (7000 h) o más anuales.

En el caso de Cuba se ha estado trabajando en la búsqueda de diferentes soluciones para incrementar el potencial energético aprovechable de la caña de azúcar y para ello se han hecho estudios para el aprovechamiento de los residuos agrícolas de la cosecha (RAC), el uso de estos RAC, residuos forestales, la prolongación de la zafra azucarera y el uso de petróleo han sido variantes analizadas para la generación de energía eléctrica fuera de zafra, sin que se haya podido alcanzar una solución factible para generar todo el año. Sin embargo, existe en el banco de germoplasmas del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA) un elevado número de variedades denominadas energéticas, las que tienen la virtud adicional de convertir mucho mejor la energía solar en biomasa y que de ser usadas como materia prima al terminar la

zafra permitiría producir bagazo todo el año y generar siempre con un combustible renovable, pero las posibilidades de su uso como materia prima al terminar la zafra no han sido estudiadas.

La nueva materia prima son variedades también de la familia gramínea, llamadas Variedades energéticas de caña de azúcar, son aquellos individuos, preferentemente F1, originados de cruzamientos entre *Sacharum Officinarum* y *Sacharum Spontaneum* que no tienen suficiente sacarosa para producir azúcar, pero que utilizan con eficiencia la energía solar y poseen alta producción de biomasa, tanto en tallos como en caña integral, y que, además presentan un grupo de características botánicas favorables que las hace aptas para crecer vigorosas en suelos de media fertilidad, en condiciones de secano, produciendo el doble de materia seca ( MS ) por área que las variedades productoras de azúcar y cinco o más veces MS que los bosque energéticos más precoces ( Tabla 1 ). Son resistentes a plagas, enfermedades y condiciones adversas; poseen el doble de la fibra que las variedades tradicionales, con aceptable contenido de sólidos solubles y más baja humedad.

Tabla 1: Materia seca ( MS ) por hectárea y por año.

CULTIVO	t de MS /ha/a
Caña tradicional	30 a 52
Maíz ( PC )	8,5
Arroz ( PC )	4 a 15
Yuca ( PC )	8 a 32
Eucalipto, ciclo 7 años.	12
Pino	10 a 20
Caña energética	60 a 90

PC: Planta completa. Fuente: ICIDCA 1986

La existencia de estas variedades de cañas son reportadas en Cuba por el INICA desde hace algunos años, pero su uso como materia prima para el período posterior a terminar la zafra, para generar energía eléctrica todo el año no tiene precedentes en el mundo y tiene su fundamento en la necesidad de operar las plantas de cogeneración anexas a centrales azucareros durante más de 7000 horas (300 días) por año, si se quiere lograr la recuperación de la inversión en la tecnología, ya que las tecnologías actuales para elevar la generación de energía eléctrica con bagazo tienen precios tales, que operándolas solo durante el período de zafra no aportarían flujos de efectivo lo suficientemente grandes como para recuperar la inversión en un período atractivo.

Estas variedades tienen la ventaja de que producen el doble del bagazo que la caña azucarera y pueden producir entre 100 mil y 120 mil arrobas por caballería; ante estos datos y considerando los niveles actuales de rendimiento agrícola de las variedades azucareras, hay que decir que la nueva materia prima que se propone puede producir 828 toneladas de bagazo por caballería, en tanto las variedades azucareras actuales de mejores rendimientos podrían aportar como máximo 239 toneladas de bagazo por caballería; este elemento permite interpretar que la nueva materia prima que se propone permite producir mayor cantidad de combustible biológico para generar energía que la caña tradicional, por lo que se necesita mucho menor cantidad de área cañera para producirlo.

El jugo de esta nueva materia prima no posee un contenido azucarero que lo haga apto para producir azúcar, pero si posee sólidos suficientes para producir alimento animal, alcohol u otros productos por fermentación, lo cual se presenta como un procedimiento aparte y como resultado integral de todo el trabajo realizado para la propuesta de la caña energética como materia prima; específicamente se propone un procedimiento aparte para producir alcohol usando como sustrato el jugo de caña energética mezclado con miel final.

#### Características técnicas de la fábrica.

El nuevo uso de estas variedades como materia prima a procesar después de la zafra, se recomienda de manera especial para aquellas fábricas de azúcar que puedan invertir en nuevas tecnologías para la cogeneración usando bagazo como combustible, específicamente es totalmente necesaria si se desea invertir en incrementar la presión del vapor a valores de 4.8 Mpa o más y utilizar turbina de extracción condensación para la generación de energía eléctrica o para aquellas que encuentren una solución tecnológica para la gasificación del bagazo; esto no significa

que fábricas que generen vapor de presiones más bajas y que generen energía eléctrica con turbinas de contrapresión no puedan usar esta materia prima, pues si existen las condiciones y es necesario para la fábrica, la provincia o el país, es totalmente posible procesar esta nueva materia prima al terminar la zafra en cualquier fábrica de azúcar.

Desde otro punto de vista es necesario que la fábrica que procese caña energética para generar energía eléctrica después de la zafra cuente con la posibilidad de utilizar el jugo que se produce para otras producciones, de manera particular es posible producir alcohol o alimento animal por vía fermentativa, utilizando este jugo como sustrato; lo que además evita la emisión al medio ambiente de un producto con elevada carga orgánica.

Forma de operación del ciclo anual de la fábrica.

La utilización de esta nueva materia prima convierte a la industria azucarera en una industria de producción continua con ciclo anual, en aquellos países que no lo pueden hacer por sus condiciones climáticas, pero el ciclo de operación de la fábrica podrá dividirse de la siguiente forma.

- Zafra azucarera. Se desarrollará en el período de tiempo que normalmente se realiza según las condiciones climáticas de cada región o país. En este período se procesará la caña azucarera.
- Zafra energética en molienda. Se desarrollará al terminar la zafra azucarera y en la misma se procesará caña energética como materia prima.
- Zafra energética sin molienda. Se desarrollará al terminar la zafra energética en molienda o en aquellos días en que la operación del TANDEM deba interrumpirse por problemas ajenos a la fábrica, el más frecuente que puede presentarse es la imposibilidad de abastecer de caña el central por alta humedad de los campos cañeros, los que podrían aparecer con frecuencia durante la primavera; en última instancia esta etapa debe impedir las salidas frecuentes del generador del sistema y alargar el período de tiempo para reparar el equipamiento del TANDEM y del área de generación energética.

Procedimiento de operación de la fábrica durante la zafra azucarera.

La duración de la zafra azucarera dependerá de las políticas de producción azucarera del país o fábrica en cuestión, en el caso de Cuba tendrá una duración con un amplio rango entre 90 y 150 días de zafra. En cualquier caso debe tratarse de que la duración de esta campaña sea lo más larga posible, de manera tal que se aproveche la instalación de cogeneración instalada al máximo posible, ya que cuando se está produciendo azúcar, la eficiencia térmica del proceso se incrementa de manera considerable y puede llegar a ser entre 60 y 70 %.

El proceso azucarero es ampliamente conocido y por tanto no es necesario repetir la forma en que se debe conducir, pues existen muchos documentos escritos que lo explican; sin embargo es de significar, que las fábricas de azúcar que desean obtener ganancias por las ventas de electricidad derivadas de la explotación de este tipo de plantas de cogeneración más modernas, deben extremar todas las medidas de ahorro de energía y de elevación de la eficiencia energética de cada equipo o área de proceso e implementar tecnologías conocidas y divulgadas para el mejoramiento continuo de la calidad y la eficiencia energética integral del proceso.

Como un elemento conocido, pero que debe ser de extrema vigilancia en las fábricas que apuestan por la cogeneración con nuevas tecnologías, debe crearse un sistema eficiente de recolección y procesamiento de residuos agrícolas de la cosecha (RAC), los cuales deben ser almacenados en forma de biomasa para la generación de electricidad durante la zafra energética sin molienda, este sistema debe recuperar y procesar la máxima cantidad posible de RAC, de forma tal que se garantice la generación de electricidad el máximo período posible en caso de falta de abasto de caña por problemas climáticos o de la infraestructura de suministro; por lo que en este período se debe asegurar el combustible para la operación total de la producción de azúcar y derivados y de la generación de energía, al mismo tiempo debe crearse una reserva de biomasa que permita la operación ininterrumpida del generador eléctrico por un período entre 15 días y un mes como mínimo.

Procedimiento de operación de la fábrica durante la zafra energética en molienda.

Esta zafra energética en molienda tendrá una duración que dependerá en gran medida de la duración de la zafra azucarera, el tiempo perdido durante la misma y de la cantidad de los RAC que se puedan recuperar; en general es recomendable que la misma tenga una duración de entre 90 y 130 días. La operación de centrales azucareros en este período es el elemento más novedoso dentro de todo el procedimiento general y el mismo garantiza la recuperación económica de las inversiones en plantas modernas de cogeneración, ya que en el mundo estas plantas se operan durante más de 7000 horas anuales, pero usando combustibles fósiles al terminar las zafra; por lo que el nuevo uso de estas variedades como materia prima, no solo garantiza resultados económicos importantes con una solución no reportada para países que no poseen combustibles fósiles, sino también que garantiza una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero al utilizar un combustible renovable todo el año, algo también novedoso; en el caso de Cuba, el uso de esta alternativa, produce una descontaminación de las emisiones al medio ambiente de más de 3000 t de CO<sub>2</sub> por cada GWh de energía que se genere, si se compara con una termoeléctrica que genera con crudo cubano, dado en lo fundamental por el CO<sub>2</sub> que las plantas de cañas absorben de la atmósfera.

Durante esta zafra, la caña energética se cosechará de forma mecanizada, con más de 12 meses e integralmente, garantizando un elevado suministro de biomasa a la fábrica; la caña llegará al TANDEM troceada y se alimentará a la estera recibidora con la tecnología existente en la fábrica. Posteriormente será sometida al sistema tradicional de preparación de caña instalado, el que puede contar con niveladores, uno o más juegos de cuchillas picadoras, desfibradoras y desmenuzadora o molino desmenuzador donde estén instalados, deben buscarse valores del índice de preparación similares a los que se logran en caña azucarera para esa fábrica.

La caña preparada será separada de su jugo utilizando para ello el TANDEM de molinos existente, en el que se trabajará con las aberturas, setting, según las características de la instalación, de igual forma se procederá con la presión sobre los molinos y la cantidad de agua de imbibición. En todo caso, se debe trabajar por procesar la mayor cantidad posible de caña, que permita producir la mayor cantidad de bagazo, se recomienda procesar entre el 60 % y el 75 % de la capacidad nominal del TANDEM para caña azucarera, se debe trabajar además por extraer la máxima cantidad posible de jugo, el que debe tener un Bx entre 10 y 14 % y cuya extracción no debe afectar la humedad del bagazo, que debe ser de 50 % como máximo, para obtener un combustible de mayor calidad.

El jugo extraído en el TANDEM, será procesado en los intercambiadores de calor del central y almacenados a la temperatura señalada y el tiempo que se indica en los procedimientos de fermentación de jugos de caña energética para producir alcohol y biomasa de levadura, o según cualquier otro procedimiento para utilizar el jugo de caña energética para otras producciones. Nótese que el resto de los equipos del central no se utilizan, por lo que estos pueden estar inmersos en los trabajos de reparación para la próxima zafra azucarera.

Por su parte el bagazo será alimentado al o los generadores de vapor de la fábrica, utilizando para ello la tecnología de que se dispone, el bagazo será combustionado en la caldera donde se generará vapor de agua a la presión y temperatura indicado en cada fábrica; como quiera que la molienda de caña energética que se logre debe ser la mayor posible, la molienda horaria debe proveer bagazo para operar los generadores por un período superior a una hora, lo que implica la necesidad de tener un eficiente sistema de almacenamiento y retroalimentación de bagazo. El vapor salido de la caldera se alimentará a los equipos que lo necesiten, de manera particular en el caso de las turbinas de extracción condensación, todo el vapor se pasará por la turbina, de la que se realizarán las extracciones en la magnitud y a las presiones necesarias, el resto del vapor será llevado a través de los alabes hasta el condensador de la turbina, tratando de generar la mayor cantidad posible de energía eléctrica. En este sentido, en tanto las

extracciones sean de mayor magnitud, menor será la cantidad de energía eléctrica que se pueda generar, pero mayor será la eficiencia térmica del ciclo.

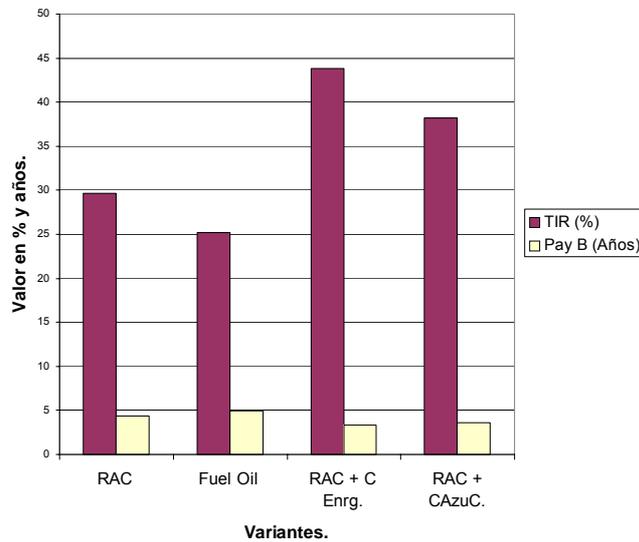
Es necesario enfatizar, que tanto en la zafra azucarera, como en los dos tipos de zafra energética, se hace necesario cubrir toda la demanda de calor de la producción de azúcar y de derivados. Por su parte el generador de energía eléctrica estará sincronizado con la Red de distribución, a la que entregará todo el excedente de energía eléctrica que se genere por encima de la demanda de la fábrica.

Procedimiento de operación de la fábrica durante la zafra energética sin molienda.

La operación del área energética solamente será la característica principal de este período, el que su duración dependerá de las dos anteriores y debe oscilar entre 60 y 120 días. Es necesario destacar, que tanto el mayor aprovechamiento de la capacidad del TANDEM que se pueda hacer en la zafra energética en molienda como la mayor cantidad de RAC que se recupere en zafra azucarera, será beneficioso en sentido general, ya que esto permitirá alargar la etapa energética sin molienda y por tanto dejar más tiempo para la reparación y mantenimiento del TANDEM.

Esta etapa del ciclo anual de la fábrica será diferente de las dos anteriores ya que, en primer lugar, no se utilizará el TANDEM ni el resto de las áreas del central al no procesarse ninguna materia prima durante la misma y en segundo lugar, el combustible que se utilizará en el área de generación de energía será la biomasa almacenada durante la zafra azucarera y la energética en molienda. Será común en este período las formas de operar el área energética y la necesidad de cubrir la demanda de calor de todas las producciones, incluyendo las fábricas de producción de derivado anexas; para lo cual se necesita de un eficiente sistema de retroalimentación de la biomasa al área de generación de vapor desde el almacén de biomas.

**Anexo 48: Comparación TIR y Recuperación entre variantes de combustibles para después de zafra.**



**Anexo 49: Matriz del diseño experimental realizado para caña azucarera y energética.**

Diseño experimental factorial completo  $2^k$  (k) con dos niveles y tres factores para el TANDEM procesando caña energética. Número de experimentos ( $2^3 = 8$ ) Con una réplica.

Experimento	X1	X2	X3	X1	X2	X3	Hdad
1	-1	-1	-1	8333.3	25	3600	48.64
2	1	-1	-1	12500	25	3600	51.23
3	-1	1	-1	8333.3	35	3600	48.55
4	1	1	-1	12500	35	3600	51.23
5	-1	-1	1	8333.3	25	4000	47.8
6	1	-1	1	12500	25	4000	50.5
7	-1	1	1	8333.3	35	4000	47.81
8	1	1	1	12500	35	4000	50.5
9	-1	-1	-1	8333.3	25	3600	48.53
10	1	-1	-1	12500	25	3600	51.33
11	-1	1	-1	8333.3	35	3600	48.57
12	1	1	-1	12500	35	3600	51.39
13	-1	-1	1	8333.3	25	4000	47.8
14	1	-1	1	12500	25	4000	50.5
15	-1	1	1	8333.3	35	4000	47.87
16	1	1	1	12500	35	4000	50.58

				X1 – Molida horaria. ( @/h )
-1	8333.3	25	3600	X2 – Agua % caña. ( % )
1	12500	35	4000	X3 – Presión molinos. ( lbs/pul <sup>2</sup> )

Diseño experimental factorial completo  $2^k$  (k) con dos niveles y tres factores para el TANDEM procesando caña azucarera. Número de experimentos ( $2^3 = 8$ ) Con una réplica.

experimento	X1	X2	X3	X1	X2	X3	Hdad	
1	-1	-1	-1	14999.4	20	3600	50	
2	1	-1	-1	19999.2	20	3600	52.28	
3	-1	1	-1	14999.4	32	3600	50.18	
4	1	1	-1	19999.2	32	3600	52.3	
5	-1	-1	1	14999.4	20	4000	49.9	
6	1	-1	1	19999.2	20	4000	51.5	
7	-1	1	1	14999.4	32	4000	49.5	
8	1	1	1	19999.4	32	4000	51.6	
9	-1	-1	-1	14999.4	20	3600	50.5	
10	1	-1	-1	19999.2	20	3600	52	
11	-1	1	-1	14999.4	32	3600	49.8	
12	1	1	-1	19999.2	32	3600	52.08	
13	-1	-1	1	14999.4	20	4000	49.1	
14	1	-1	1	19999.2	20	4000	51.2	
15	-1	1	1	14999.4	32	4000	49.12	
16	1	1	1	19999.4	32	4000	51.35	
				X1 – Molida horaria. ( @/h )				
-1	14999.4	20	3600	X2 – Agua % caña. ( % )				
1	19999.2	32	4000	X3 – Presión molinos. ( lbs/pul <sup>2</sup> )				

**Anexo 50: Datos medidos y calculados en las calderas procesando caña energética y azucarera.**

Datos calculados para el modelo de la eficiencia de la caldera con bagazo de caña azucarera.

D Vapor Ton	T Vapor °C	P Vapor Lbs/pul <sup>2</sup>	T Agua Alim °C	Exe. Aire %	Humedad %	Eficiencia %
29	257	161	38	2.02898551	0.532	72.6840808
29	257	170	37	1.96261682	0.515	73.4582661
25	249	166	36	2.64150943	0.52	70.5353242
29	257	163	35	2.87671233	0.495	69.5302074
29	259	150	33	2.16494845	0.48	74.1354299
28	257	161	32	2.16494845	0.53	73.588975
32	273	180	32	1.85840708	0.505	74.2012768
32	241	173	31	2.00956938	0.53	72.9486878
27	261	177	31	2.06896552	0.545	72.4776666
36	241	175	30	2.32044199	0.495	71.9818206
35	257	145	29	1.97183099	0.485	73.8591187
32	257	132	29	2.1875	0.54	71.7179546
30	263	136	29	2.72727273	0.53	69.6824971
37	258	175	36	1.88340807	0.49	75.0418301
40	260	164	35	2.00956938	0.485	72.5779677
37	264	171	36	2.12121212	0.5	73.5120384
36	257	168	35	2.47058824	0.495	71.4417689
29	265	176	37	2.14285714	0.53	71.665688
38	271	180	33	2.02898551	0.53	72.9701172
27	261	177	31	2.06896552	0.545	72.4776666
32	257	132	29	1.88340807	0.495	75.0391167
37	263	175	34	2.29508197	0.525	70.2768526
36	261	173	33	2.22222222	0.53	70.8289459

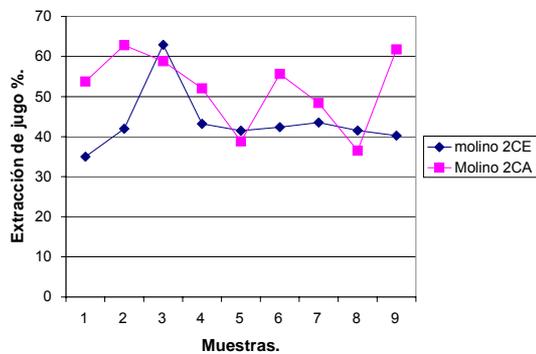
32	273	180	32	1.85840708	0.505	74.2012768
32	273	180	32	1.85840708	0.505	74.2012768
36	241	175	30	2.32044199	0.495	71.9818206
30	263	136	29	2.72727273	0.53	69.6824971
29	257	161	38	2.02898551	0.532	72.6840808
29	257	163	35	2.87671233	0.495	69.5302074
28	257	161	32	2.16494845	0.53	73.588975
32	273	180	32	1.85840708	0.505	74.2012768
45				1.54411765	0.507	75.3852519

Datos calculados para el modelo de la eficiencia de la caldera con bagazo de caña energética.

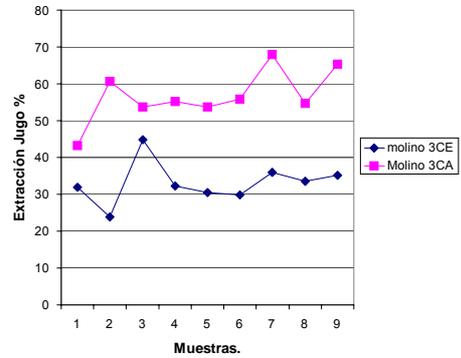
D Vapor Ton	T Vapor °C	P Vapor lbs/pul <sup>2</sup>	T Agua Alim °C	Exe. Aire %	Humedad %	Eficiencia %
29	257	161	38	2.02898551	0.507	73.2844016
29	257	170	37	1.96261682	0.512	73.5265132
25	249	166	36	2.64150943	0.53	70.2769711
29	257	163	35	2.87671233	0.535	68.5142966
29	259	150	33	2.16494845	0.509	73.5276841
28	257	161	32	2.16494845	0.54	73.3331321
32	273	180	32	1.85840708	0.56	72.8764457
32	241	173	31	2.00956938	0.48	74.0315562
27	261	177	31	2.06896552	0.495	73.682387
36	241	175	30	2.32044199	0.53	71.1624756
35	257	145	29	1.97183099	0.515	73.2333628
32	257	132	29	2.1875	0.54	71.7179546
30	263	136	29	2.72727273	0.5	70.4370161
37	241	175	30	2.32044199	0.535	70.9117078
29	265	171	33	1.85	0.49	76.5813888
31	260	168	38	2.01	0.515	73.0079258
33	251	169	35	2.12	0.55	71.4397183
35	249	172	34	2.3	0.485	72.493549
36	270	174	3	1.88	0.53	72.9168003
32	273	180	38	1.86005314	0.507	74.147477
27	271	177	39	2.27	0.555	70.5976626
29	255	147	33	2.25	0.509	72.8940162
28	273	168	36	2.45	0.495	72.3185657
29	269	175	33	2	0.53	74.731369

29	255	167	32	1.98	0.535	72.8326419
29	257	172	37	2.14	0.517	72.1874808
28	263	161	36	2.28	0.545	72.3403846
27	275	182	34	1.98	0.523	73.7387316
31	261	168	35	2.53	0.512	71.2592723
28	271	170	34	1.98	0.532	74.9068037
25	249	176	33	2.64150943	0.49	71.2301267

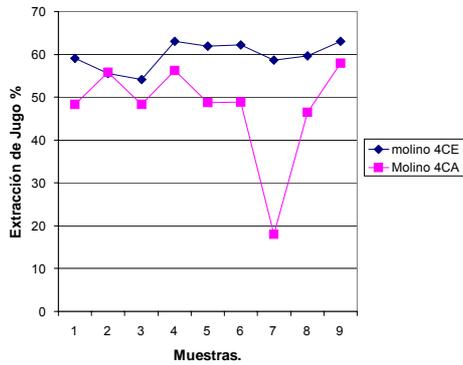
**Anexo 51: Extracción de jugo Calculada del molino 2 procesando los dos tipos de variedades.**



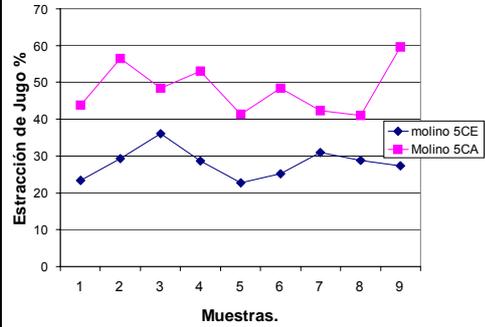
**Anexo 52: Extracción de jugo del molino 3 procesando los dos tipos de variedades.**



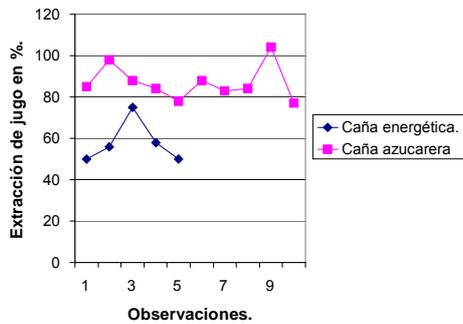
**Anexo 53: Extracción de Jugo del molino 4 procesando los dos tipos de variedades.**



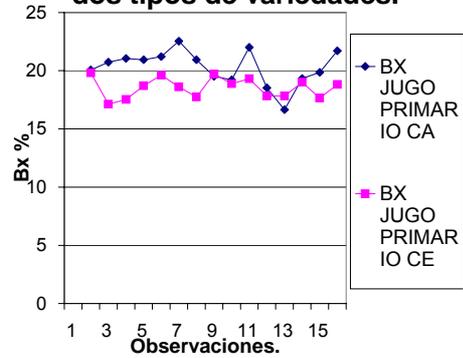
**Anexo 54: Extracción de Jugo del Molino 5 procesando los dos tipos de variedades.**



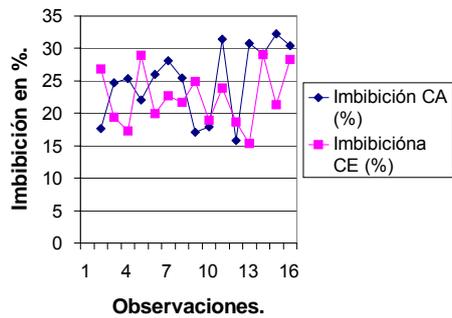
**Anexo 55: Cantidad de jugo extraído % de la caña procesada.**



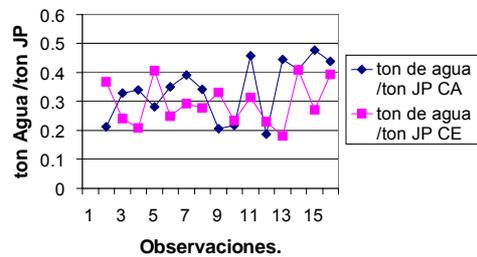
**Anexo 56: Bx del jugo primario procesando los dos tipos de variedades.**



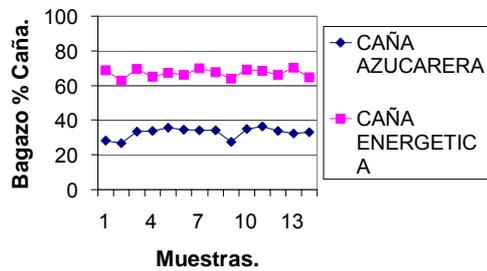
**Anexo 57: % de Imbibición estimado según el Bx de los jugos.**



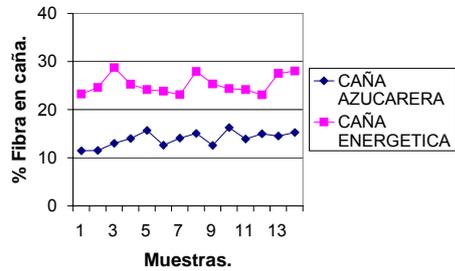
**Anexo 58: Cantidad de agua por tonelada de Jugo Primario añadida, procesando los dos tipos de variedades.**



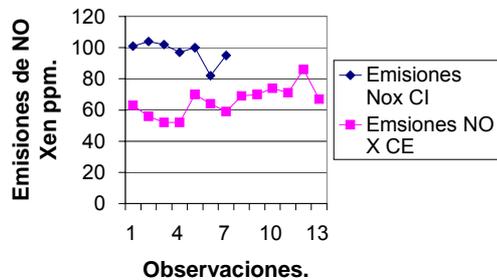
**Anexo 59: Bagazo %Caña para los dos tipos de variedades.**



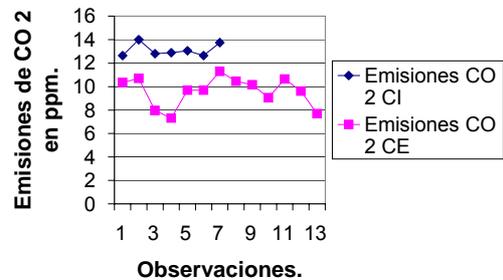
**Anexo 60: Comportamiento de la fibra en caña para los dos tipos de variedades.**



**Anexo 61: Emisiones de NO X procesando las dos variedades de caña.**



**Anexo 62: Emisiones de CO 2 procesando los dos tipos de variedades.**



Anexo 63: Resultados de la regresión lineal con el SPSS para la obtención del modelo de humedad del TANDEM utilizando un diseño experimental factorial.

\*\*\*\* MULTIPLE REGRESSION CAÑA AZUCARERA\*\*\*\*

Listwise Deletion of Missing Data

Equation Number 1 Dependent Variable.. HDAD

Block Number 1. Method: Enter

X1 X12 X13 X2 X23 X3

Variable(s) Entered on Step Number

- 1.. X3
- 2.. X2
- 3.. X1
- 4.. X12
- 5.. X23
- 6.. X13

Multiple R .99896  
 R Square .99791  
 Adjusted R Square .99652  
 Standard Error .07424

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	6	23.72440	3.95407
Residual	9	.04960	.00551

F = 717.41968 Signif F = .0000

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
X1	3.85117E-04	1.4487E-04	.789820	2.658	.0261
X12	-5.00775E-07	1.2374E-06	-.051104	-.405	.6951
X13	1.99781E-08	3.7121E-08	.166128	.538	.6035
X2	.034630	.062711	.170457	.552	.5942
X23	-6.25935E-06	1.5467E-05	-.120242	-.405	.6951
X3	-.002574	7.6960E-04	-.422394	-3.345	.0086
Cont.	50.020889	2.982141		16.773	.0000

\*\*\*\* MULTIPLE REGRESSION CAÑA ENERGETICA \*\*\*\*

Listwise Deletion of Missing Data

Equation Number 1 Dependent Variable.. HDAD

Block Number 1. Method: Enter

X1 X12 X13 X2 X23 X3

Variable(s) Entered on Step Number

- 1.. X3
- 2.. X2
- 3.. X1
- 4.. X12
- 5.. X13
- 6.. X23

Multiple R .99953  
 R Square .99906  
 Adjusted R Square .99844  
 Standard Error .05755

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	6	31.74124	5.29021
Residual	9	.02981	.00331

F = 1597.37828 Signif F = .0000

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
X1	6.82195E-04	1.3777E-04	1.008590	4.952	.0008
X12	6.59995E-07	1.3811E-06	.038416	.478	.6441
X13	-1.34999E-08	3.4529E-08	-.078528	-.391	.7049

X2	-.040375	.056605	-.143260	-.713	.4938
X23	9.37500E-06	1.4387E-05	.132726	.652	.5309
X3	-.002050	5.6642E-04	-.290957	-3.619	.0056
Cont.	50.706318	2.198155		23.068	.0000

Anexo 64. Resultados de la regresión lineal con el SPSS para obtener el modelo de eficiencia de la caldera para caña energética y azucarera.

\*\*\*\* MULTIPLE REGRESSION EFICIENCIA CALDERA  
CAÑA AZUCARERA\*\*\*\*

Equation Number 1 Dependent Variable.. EFICICAL

Variable(s) Entered on Step Number  
3.. TONVAP

Multiple R	.94944
R Square	.90144
Adjusted R Square	.89049
Standard Error	.54669

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	73.80408	24.60136
Residual	27	8.06943	.29887

F = 82.31522 Signif F = .0000

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
EXAIRE	-5.130410	.340443	-.941466	-15.070	.0000
HDBAGASO	-30.128382	5.702678	-.357826	-5.283	.0000
TONVAP	-.101963	.029723	-.239010	-3.430	.0020
(Constant)	102.428159	3.654134		28.031	.0000

----- Variables not in the Equation -----

Variable	Beta In	Partial	Min Toler	T	Sig T
PRESVAPO	-.073778	-.220137	.736781	-1.151	.2603
TEMPAGUA	-.080969	-.256287	.744633	-1.352	.1880
TEMVAP	-.030029	-.090678	.751989	-.464	.6463

\*\*\*\* MULTIPLE REGRESSION EFICIENCIA CALDERA  
CAÑA ENERGÉTICA\*\*\*\*

Equation Number 1 Dependent Variable.. EFICICAL

Variable(s) Entered on Step Number  
3.. TONVAP

Multiple R	.92725
------------	--------

R Square .85979  
 Adjusted R Square .84421  
 Standard Error .63665

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	67.10777	22.36926
Residual	27	10.94362	.40532

F = 55.18921 Signif F = .0000

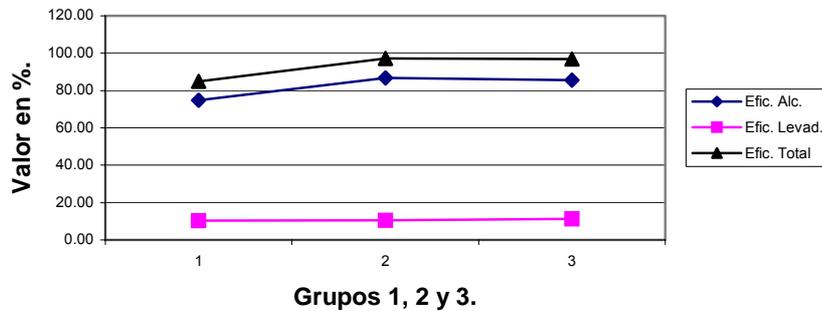
----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
EXAIRE	-5.314213	.438945	-.897788	-12.107	.0000
HDBAGASO	-26.947158	5.518772	-.353284	-4.883	.0000
TONVAP	-.117073	.037929	-.229078	-3.087	.0046
(Constant)	101.749188	3.289987		30.927	.0000

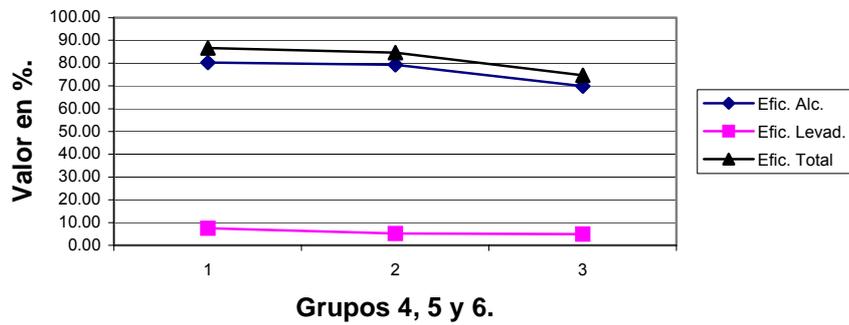
----- Variables not in the Equation -----

Variable	Beta In	Partial	Min Toler	T	Sig T
PRESVAPO	-.057437	-.146722	.865644	-.756	.4563
TEMPAGUA	-.024101	-.056522	.749013	-.289	.7751
TEMVAP	.075127	.168856	.708313	.874	.39048

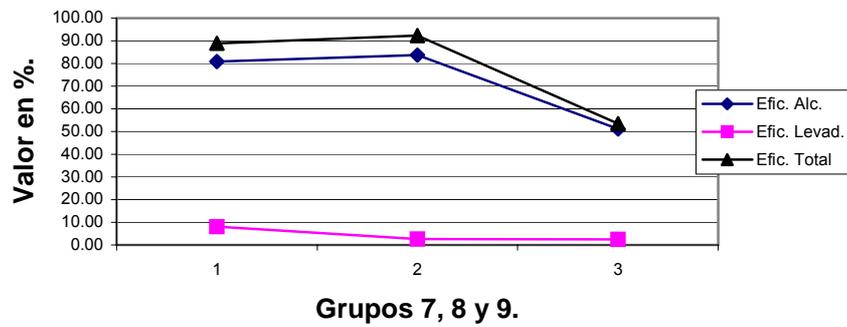
**Anexo 65: Eficiencias en las pruebas de fermentación de los primeros grupos.**



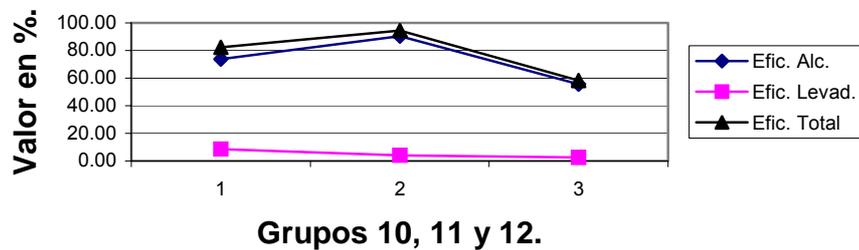
**Anexo 66: Eficiencias promedio durante la segunda fase experimental.**



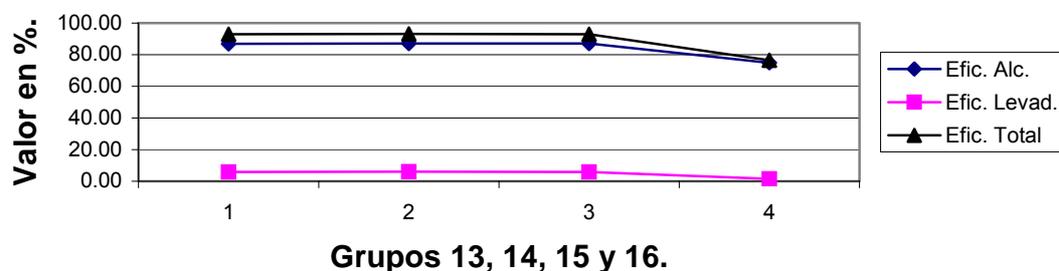
**Anexo 67: Eficiencias promedio de los grupos durante la segunda fase experimental.**



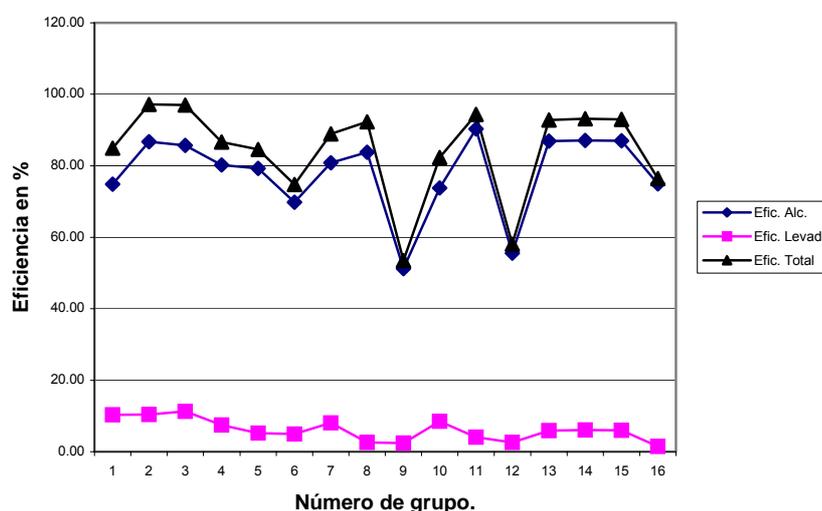
**Anexo 68: Eficiencias promedio durante la tercera fase experimental entre los grupos.**



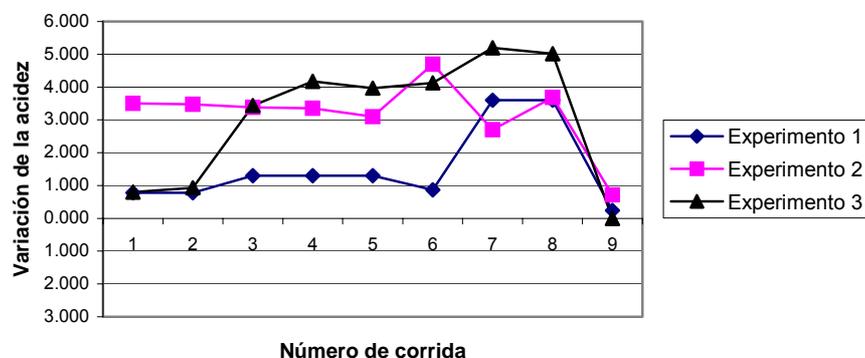
## Anexo 69: Eficiencias promedios de la fermentación entre los grupos durante la última fase experimental.



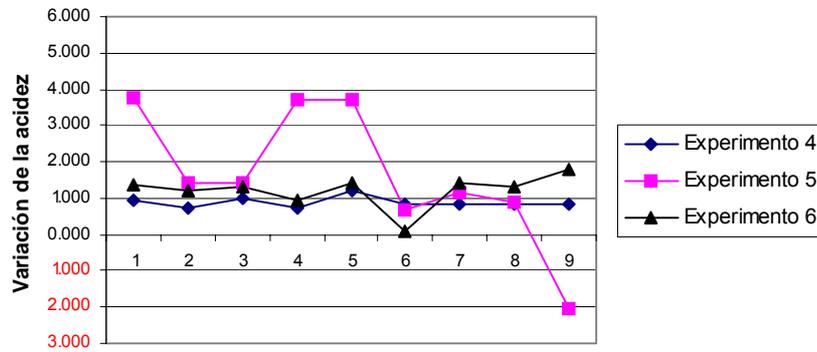
Anexo 70: Comportamiento de las eficiencias de la fermentación en todos los grupos de prueba.



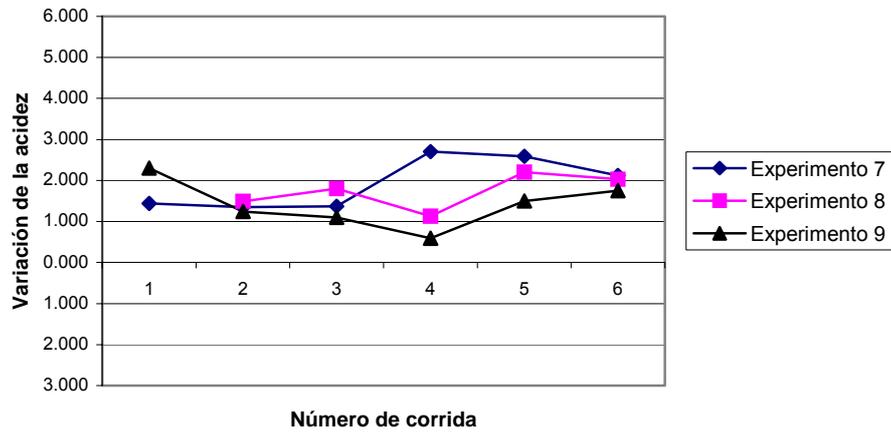
Anexo 71: Variación de la acidez durante los 3 primeros grupos de fermentación de jugo de caña energética.



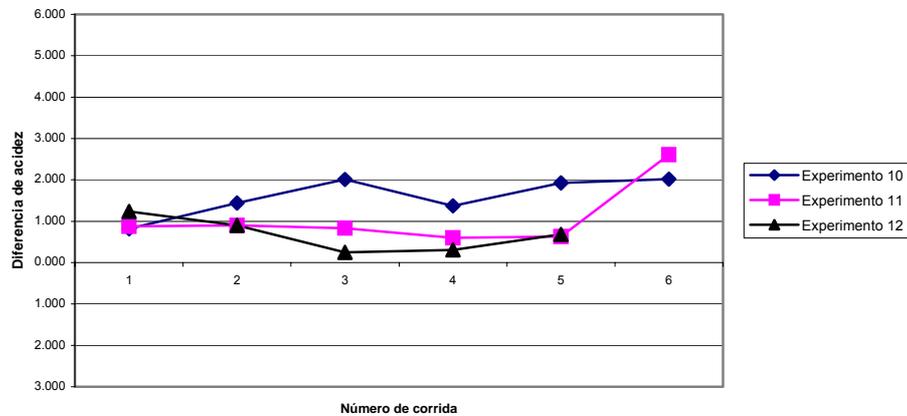
**Anexo 72: Variación de la acidez durante la segunda fase experimental para la fermentación de jugos de caña energética**



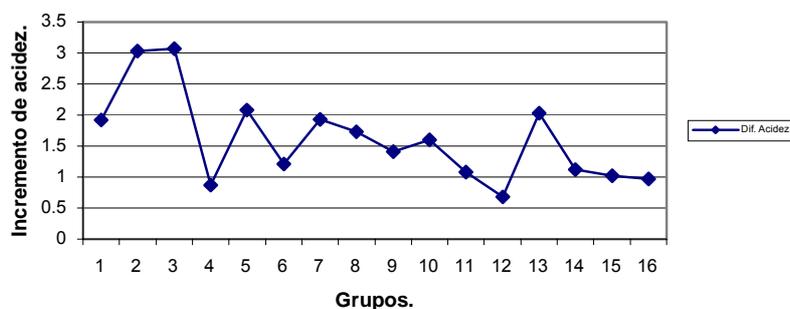
**Anexo 73: Diferencia de acidez en la tercera fase experimental para fermentar jugos de caña energética**



**Anexo 74: Diferencia de acidez tercera fase experimental para fermentar jugos de caña energética**



**Anexo 75: Incremento promedio de la acidez en los grupos de prueba realizados.**



## Anexo 76: PROCEDIMIENTO DE FERMENTACION DE JUGOS DE CAÑA ENERGETICA PARA PRODUCIR ETANOL Y BIOMASA DE LEVADURA

### Introducción:

El presente procedimiento pertenece a la rama química y dentro de esta a nuevos substrato para la industria fermentativa para producir etanol y biomasa de levadura.

El nuevo substrato es el jugo de cañas energéticas que comparado con el jugo caña azucarera difiere significativamente en que: son más ácidos, contiene menos sacarosa y sólidos solubles y bajo contenido del mismo en este tipo de gramínea.

La caña como tal tiene el doble o más de bagazo comparada con la tradicional azucarera.

Aunque el nuevo substrato es ácido natural como lo da la planta, su biota es muy activa y formadora de ácidos orgánicos también, lo cual le confiere a estos microorganismos las características de formadores y resistentes a los ácidos. Por otra parte, durante la fermentación alcohólica sin tratamiento previo, la formación de espuma es muy alta, mayor que los jugos y mieles finales de cañas azucareras.

### Procedimiento:

El jugo de caña energética es extraído en una estación de molinos o tandem normal de los centrales azucareros, utilizando el mínimo de molinos posibles, aplicando o no agua de imbibición, pasado por los coladores normales de estas instalaciones y SIN ALCALIZACIÓN es enviado a los calentadores normales de estos centrales con los cabezales pintados previamente con pintura epoxi termoácidorresistente, o de acero inoxidable totalmente de los tipos AISI 304, 304L, 316 ó 316L; es decir calidad alimenticia. Los calentadores de los centrales son normalmente de cabezal de acero y tubos de cobre, por lo que la pintura epoxi termoácidorresistente tiene la función de evitar la corrosión por el medio ácido del par galvánico Cu-Fe.

Los jugos son calentados a  $85^{\circ} - 90^{\circ}$  y enviado a un tanque de retención aislado térmicamente de acero inoxidable o de acero al carbono igualmente pintados con epoxi, con una capacidad que acumule no menos de 1 hora de molida de la caña energética y mantenido un mínimo de 20 minutos a ese rango de temperatura, con el objetivo de pasteurizarlo para atenuar la biota y coagular las proteínas estabilizadoras de la espuma. Con este tratamiento térmico se controla evitando el aumento de la acidez durante la fermentación, debido a la actividad de dicha biota; disminuye a normal la formación de espuma y se invierte parte o totalmente la sacarosa, que induce a una fermentación más rápida al requerirse menor invertasa a biosintetizar por la levadura, aumentando la capacidad de los Fermentadores al reducirse en no menos del 10%, los ciclos en horas de las fermentaciones alcohólicas, comparado con la Miel Final sola.

Este jugo aun caliente se pasa a través de los coladores normales de jugo clarificado que tiene 10000 perforaciones/pg<sup>2</sup>, para lo cual la temperatura no debe descender por debajo de  $60^{\circ}$  C, y queda listo para usarse en las Destilerías de alcohol previo enfriamiento a  $28^{\circ} - 32^{\circ}$  C, en intercambiadores de calor de placa inoxidables o los normales del central previamente pintados como se indicó para los usos para calentar. Puede apreciarse que **NO SE CLARIFICAN**, pues no es necesario. Al final su color es verde oscuro. Desde que se enfríe a  $28 - 32^{\circ}$  C no debe pasar más de 6 horas, ya que aunque su pH es menor 5 lo que lo protege de contaminaciones; siempre existe el riesgo de la contaminación ambiental.

El circuito por donde se circule ya enfriado, debe ser limpiado con vapor a no menos de  $1 \text{ kg/cm}^2$  de presión durante 20 minutos, cada 7:30 Hr y dejar 10 minutos para que se enfríe y reiniciar su circulación. El objetivo es desinfectar y evitar contaminaciones, y evidentemente deben ser de acero inoxidable, tanques, tuberías y válvulas.

El jugo a  $28-32^{\circ}\text{C}$  puede tener 2 destinos en las Destilerías: Pre-fermentación o Fermentación.

En la Prefermentación es donde se propaga la levadura y los requerimientos de microcomponentes son altos. Los jugos de cañas energética tienen en déficit la biotina, el inositol y el potasio para esta etapa; lo cual suple añadiendo entre un 20 a un 30% w/w de Miel Final, o 35 a 45% w/w de Miel B. Como en Prefermentación se trabaja entre 60 y 80 g/l de azúcar fermentable, alrededor de 14% Brix, cuando se hace solo con Miel Final, tomando la fracción Miel Final a emplear se tiene:  
 $14,00 (30 / 100) = 5,20\%$  Brix aporta la Miel

La fracción Miel Final física será:  $5,20 (100/85) = 6,12\%$

La Miel Final física normalmente tiene en el entorno de 50% de azúcares Fermentables, por lo que su aporte será:  
 $6,12 (50 / 100) = 3,06\%$  o lo que es lo mismo 30,6 g/l de azúcar fermentable.

Continuando los balances y fijando a modo de ejemplo 70 g/l de azúcar fermentable en fermentación, se tiene:  
 $70,0 - 30,6 = 39,4 \text{ g/l}$  de azúcar fermentable que tiene que aportar el jugo pasteurizado y enfriado.

Los jugos de caña energética a medida que va pasando el tiempo después del mes de abril, va disminuyendo su contenido de sólidos solubles y por ende de azúcares fermentables, en un amplio rango de 30 a 130 g/l de esta última, el primero en el período de máximas lluvias. Si a esto se agrega la imbibición, se aumenta la dilución y baja la concentración. Es decir, que para su uso en pre-fermentación habrá momentos en que habrá que diluir con agua hasta 39,4 g/l que debe garantizar de azúcar fermentables, y otros en que habrá que subir la dosis de Miel Final para suplir el déficit de azúcar fermentable porque simplemente no llega a ese valor. El Brix en Pre-fermentación será variable también de 14% hacia abajo, para suministrar esos 70 g/l.

A forma de ilustración, tomemos un jugo 50 g/l de azúcar fermentable, que tiene 9% de Brix. Hay que diluir con agua hasta 39,4 g/l, por lo que:

$50 / 39,4 = 1,27$  es el factor de dilución, que a los efectos prácticos a 100 litros de jugo se le añadirá 27 litros de agua, con lo que se ajusta. Ahora bien, el nuevo Brix será:

$9,00 / 1,27 = 7,09\%$  Brix

A este nuevo Brix se le suma el que le corresponde de aporte de la Miel final antes calculado, o sea:

$7,09 + 5,20 = 12,29\%$  Brix en Pre-fermentación. Similar procedimiento de cálculo se hace para balancear cuando se use Miel "B".

Todo lo anterior es totalmente válido para producción de biomasa de levadura torula, es decir: 30% w/w de Miel Final + jugo de caña energética + agua, hasta que se ajuste una concentración de 20 a 25 g/l de azúcares fermentables, para tecnología de baja concentración, como es la francesa de la firma Speichim instaladas en Cuba.

Cuando el jugo pasteurizado y enfriado se destine a Fermentación es mucho más sencillo, ya que solo hay que garantizar de 120 a 150 g/l de azúcares fermentables, por lo que a lo que traiga el mismo simplemente se le completa con Miel Final, Miel B o Miel Rica Invertida. El valor 120 g/l se emplea generalmente cuando no hay Sistema de Enfriamiento en Fermentación.

Ilustrando con un ejemplo, considerando que se dispone del mismo jugo anterior y de Miel "B", se tiene sin enfriamiento:

$120 - 50 = 70 \text{ g/l}$  de azúcar fermentable que aporta la Miel "B"

La Miel "B" normalmente tiene un 85% Brix con 54% pureza, alrededor de 10% de reductores y no más de 2% de infermentables, en fin en el entorno de 56% de azúcar Fermentable; lo cual desde luego, varía de un lugar a otro. Esto equivale a 560 g/l que hay que diluir, por lo que:

Factor de dilución =  $560 / 70$

Equivale a :  $85 / 8 = 10,63$  Brix que aporta la miel B y representa:

$10,63 + 9,00 = 19,63\%$  Brix de corrida para Fermentación.

Con ello se garantiza 120 g/l de azúcares fermentables.

Es de señalar que si la temperatura máxima en fermentación excede  $38^{\circ}$  C, hay que considerar entonces bajar a 100 - 110 g/l; cuidando el índice de miel y los costos, lo cual hay que analizarlo económicamente pues a menos azúcares fermentables

menos % de alcohólicos y más consumo de combustible para la misma producción de alcohol a 100<sup>0</sup> G.L.; es decir que hay que valorar que resulta más rentable.

Anexo 77. Resultados obtenidos durante la prueba industrial con caña energética en el 2002.

Resultados agrícolas.

Cosecha	Área (cab.)	Producción (arobas)	Rendimiento (@ / cab.)
Dic. 2001	1,02	51 002	50 002
Abr. 2002	1,64	92 846	56 613
Total	2,66	143 848	54 078

Resultados del transporte.

Indicadores	UM	Caña azucarera	Caña energética
Densidad de caña	T / m <sup>3</sup>	0,32	0,23
Peso por carro	T	23,8	17,1
Fibra en caña	%	13,86	25,52

Bagazo en caña	%	34,27	67,14
Bagazo por carro	T	8,16	11,48

Relación de capacidad de carga ( caña energética / azucarera).....72 %  
 Relación transporte bagazo ( Caña energética / azucarera) .....141 %  
 Incremento del transporte.....28 %  
 Incremento de bagazo transportado por carro.....41 %

Resultados obtenidos en el TANDEM.

Concepto	UM	Caña Azucarera	Caña Energética	Ener / azuc (%)
Molida horaria	T	188,64	102,6	54,4
Índice preparación	-	56,04	50,18	69,5
Densidad volumétrica	lb / pie <sup>3</sup>	18,05	8,78	48,7
Potencia consumida por cuchillas picadoras	KW	354,2	249,4	70,4
Potencia consumida en molinos cinco y seis	KW	493,15	426,07	86,4
Bagazo en caña	%	34,27	67,14	196
Pol en bagazo	%	3.04	2.57	-
Humedad en bagazo	%	52,65	53,05	-

Resultados en el área de calderas.

Medición	No	1	2	3	4	5	6	7	Prom
E.C.Integral	%	76.4	77.9	76.5	75.4	75.8	76.0	76.1	75.1
E.C. Energética	%	73.3	73.6	70.9	69.2	73.6	74.1	74.2	73.5
Diferencia de E.E	%	3.1	4.3	5.7	6.2	2.2	1.9	1.9	1.6

Análisis inmediato, elemental y poder calórico de las muestras de bagazo de caña azucarera cosechada normalmente e integralmente y de bagazo de caña energética.

Muestra	% W	%Vv (lh)	%Cf (lh)	%A (lh)	%C (lhc)	%H (lhc)	%O* (lhc)	%N (lhc)	%S (lhc)	PCS (kJ/kg)
<b>Bagazo de caña de azúcar normal</b>										
Experimento 1	45.9	85.4	11.9	2.5	46,26	5,90	46,69	1,15	0.0	18589
Experimento 2	46.3	84.9	12.3	2.8	46,54	5,88	46,44	1,14	0.0	18644
Experimento 3	46.8	84.7	12.7	3.2	46,66	5,87	46,34	1,14	0.0	18667
Valores medios	46.3	85.0	12.3	2.8	46,48	5,88	46,49	1,14	0.0	18633
<b>Bagazo de caña de azúcar integral</b>										
Experimento 1	59.5	86.5	10.7	2.8	45,63	5,97	47,24	1,16	0.0	18468
Experimento 2	60.5	87.8	10.1	2.1	44,89	6,04	47,89	1,18	0.0	18324
Experimento 3	55.7	86.9	10.7	2.4	45,40	5,99	47,44	1,17	0.0	18423
Valores medios	58.6	87.1	10.5	2.4	45,29	6,00	47,54	1,17	0.0	18401
<b>Bagazo de caña de azúcar energética</b>										
Experimento 1	47.8	88.5	9.1	2.4	44,49	6,08	48,24	1,19	0.0	18247
Experimento 2	49.5	87.9	9.6	2.5	44,83	6,04	47,94	1,18	0.0	18313
Experimento 3	48.9	87.5	9.7	2.8	45,06	6,02	47,74	1,17	0.0	18357
Valores medios	48.7	88.0	9.5	2.5	44,78	6,05	47,99	1,18	0.0	18302

W: humedad, Vv: volátiles; Cf: Carbono fijo; A: Cenizas;  
lh: libre de humedad; lhc: libre de humedad y cenizas; \* Determinado por diferencia.

Resultados en la fermentación alcohólica:

Período	Brix de Corrida	Brix Final	Caída Brix	Temp.	pH	Acidez	% Alc.	% Red Resid.	Ciclo En Hr.
8 Ferment. Antes	17.06	6.41	10.65	39	4.46	3.88	4.51	1.17	21.000
4 Ferment. Prueba	15.07	6.49	8.58	39	3.88	4.65	4.55	1.05	18.750
8 Ferment. Después	16.55	6.49	10.06	39	4.20	3.73	4.64	1.18	19.250

Calidad del aguardiente producido

Parámetros	UM	Norma	Miel	Jugo prueba
Acidez	Gr. HAc/HI alcohol	Mínimo 10	9 – 13	27
Alcoholes superiores	ppm	Máximo 350	280 - 300	203

Anexo 78: Datos para el diagnóstico de emisiones de gases.

Características de los combustibles utilizados.

Características	Crudo	Bagazo	Paja
Valor calórico bruto(HHV)(MJ/Kg)	40.66	9.637	11.94
Valor calórico neto (LHV)(MJ /Kg)	38.37	7.46	-
Densidad ( g /cm <sup>3</sup> )	1	-	-
Composición ( % peso )			
Humedad	-	50	15
Residuo	-	2.0	12.63
Fracción combustible	-	48	72.37
Cenizas	0.32	1.69	-
Carbono	80.14	24	42.1
Azufre	6.65	0.1	0.06
Nitrógeno	0.5	0.15	0.65
Oxígeno	0.5	20.65	37.8
Hidrógeno	9.89	3.10	6.3
Vanadio ( ppm )	94	-	-
Niquel ( ppm )	28	-	-

Datos necesarios para buscar t-Km de los equipos.

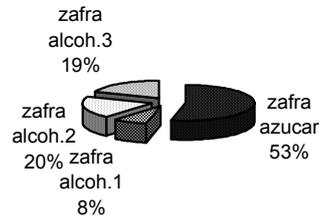
Parámetros	Camiones	Tractores	Total
Corte manual @	2817100	7775502	10592602
Corte mecanizado @	13379422	8421037	21800459
Parámetro	Alzadoras	Combinadas	
Indice consumo Gln/1000@	1.3	3.73	
Consumo (l)	51225.8	302494.5	

Datos utilizados para la Cadena de la CTE Mariel

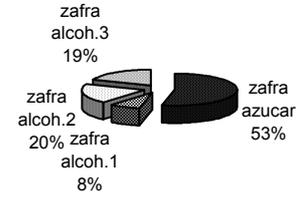
Parámetros	CTE
Potencia Neta (Mw)	90
Generación Neta (Gw-h)	176.9
Potencia mín(Mw)	40
BHRT(kcal/Kw-h)	2995
CRMHRT(Kcal/Kwh)	2772
Eficiencia	29.95
Valor calórico neto (Mj/kg)	38.18
Consumo específico( g/ kwh)	314.79

Anexo 79: Comportamiento de las emisiones por generación y por períodos de operación en la CT.

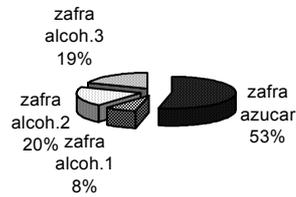
**Emisiones de SOx**



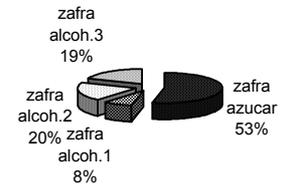
**Emisiones de partículas**



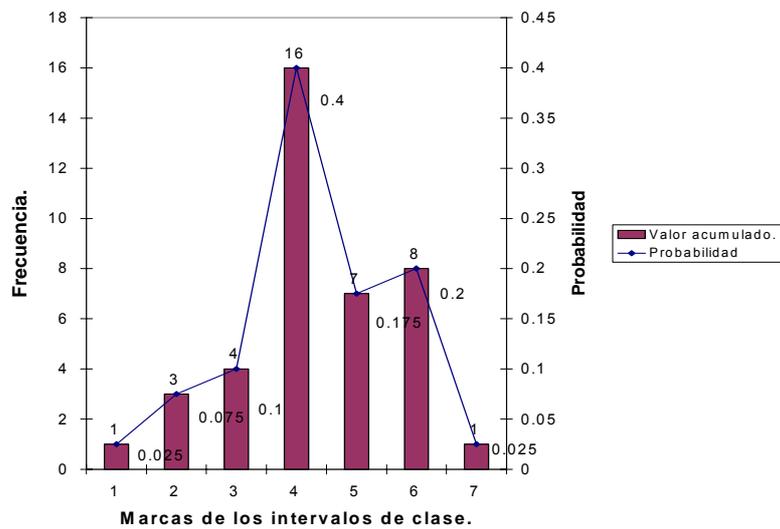
**Emisiones de SOx**



**Emisiones de partículas**



**Anexo 80: Distribución de Frecuencia y Probabilidades de los valores esperados del VAN.**



**Anexo 10:**

**TIEMPO PERDIDO POR PROBLEMAS ENERGÉTICOS DE LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS Y PORCIENTO QUE REPRESENTA DEL TIEMPO PERDIDO REPORTADO.**

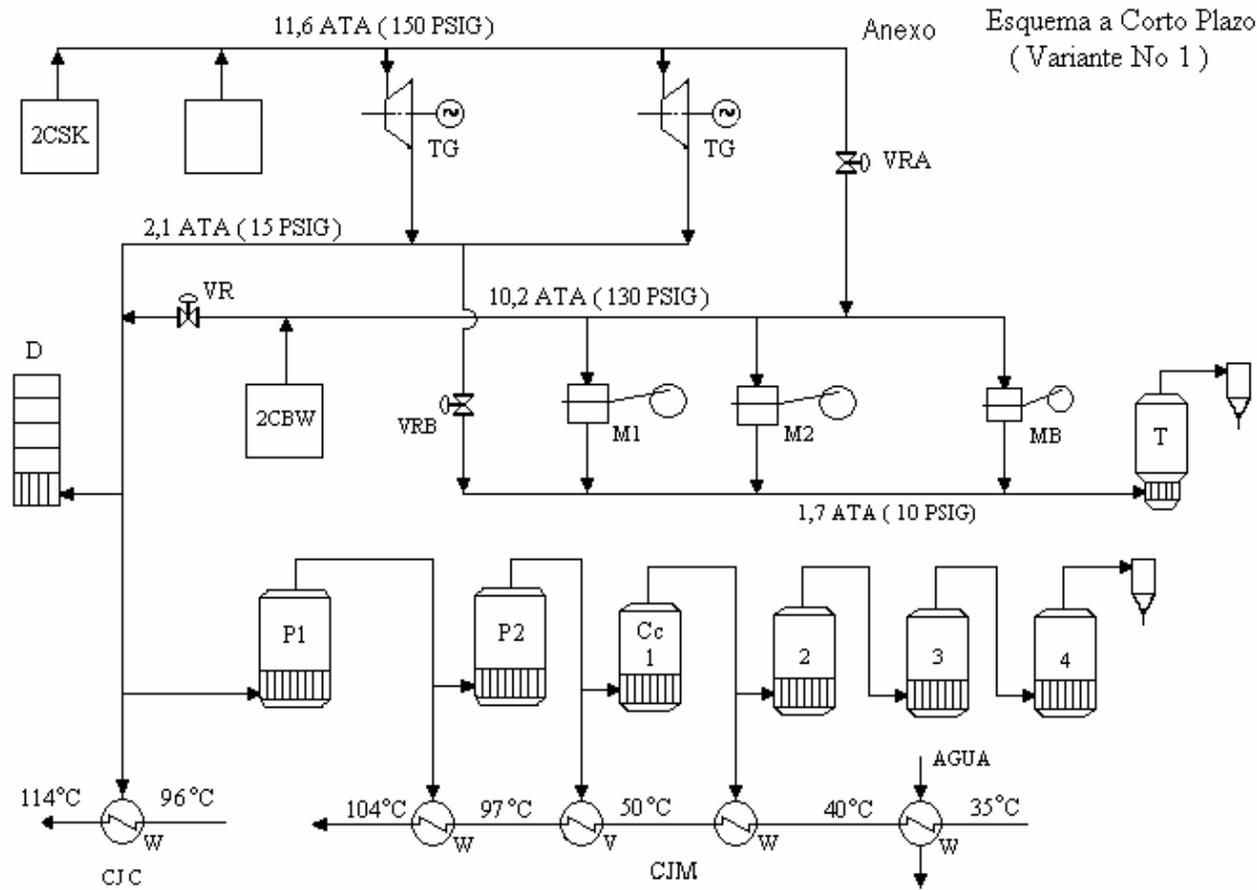
AÑOS	PARADAS		REDUCCIONES DE MOLIDA		TOTAL		PORCIENTO DE TIEMPO PERDIDO RESPECTO A :		
	No	HORAS	No	HORAS	No	HORAS	TIEMPO DISPONIBLE	TIEMPO PERDIDO INDUSTRIAL	TIEMPO PERDIDO TOTAL
1987	21	15.6	-----	-----	21	15.6	0.5	4.67	2.3
1988	17	14.53	-----	-----	17	14.53	0.49	5.0	4.43
1989	10	34.6	-----	-----	10	34.60	0.97	6.51	4.77
1990	3	23.33	-----	-----	3	23.33	0.75	7.01	4.90
1991	14	30.09	-----	-----	14	30.09	0.83	7.25	4.8
1992	116	64.83	3	1.92	119	66.75	1.8	8.39	4.98
1993	179	96.38	-----	-----	179	96.38	-----	14.57	-----
1994	211	95.26	13	10.13	224	105.39	3.8	14.41	9
1995	69	59.03	-----	-----	69	59.03	2.96	9.82	6.19
1996	196	96.12	43	54.32	239	150.44	6.96	40.28	23.52

**Anexo 11: COSTO DE LAS ENERGÍAS AUTOPRODUCIDAS POR EL CAI DURANTE LA ZAFRA DE 1996.**

NATURALEZA	CENTRO PRODUCTOR	CANTIDAD HORARIA	CANTIDAD ANUAL	COSTO TOTAL (\$)	COSTO UNITARIO	VALOR CALÓRICO	ENERGÍA DISPONIBLE	UTILIZACIÓN
ENERGÍA ELÉCTRICA (MWh)	TURBO GENERADORES	2.54 MWh	4575 MWh	233834.49 \$	51.11 \$/MWh	-----	Toda	100 %
ENERGÍA CALÓRIFICA.	CALDERAS DE VAPOR	90 t/h	228000 t/zafra	583675.12 \$	2.56 \$/t vapor	2725 kj/kg	Toda	70 %

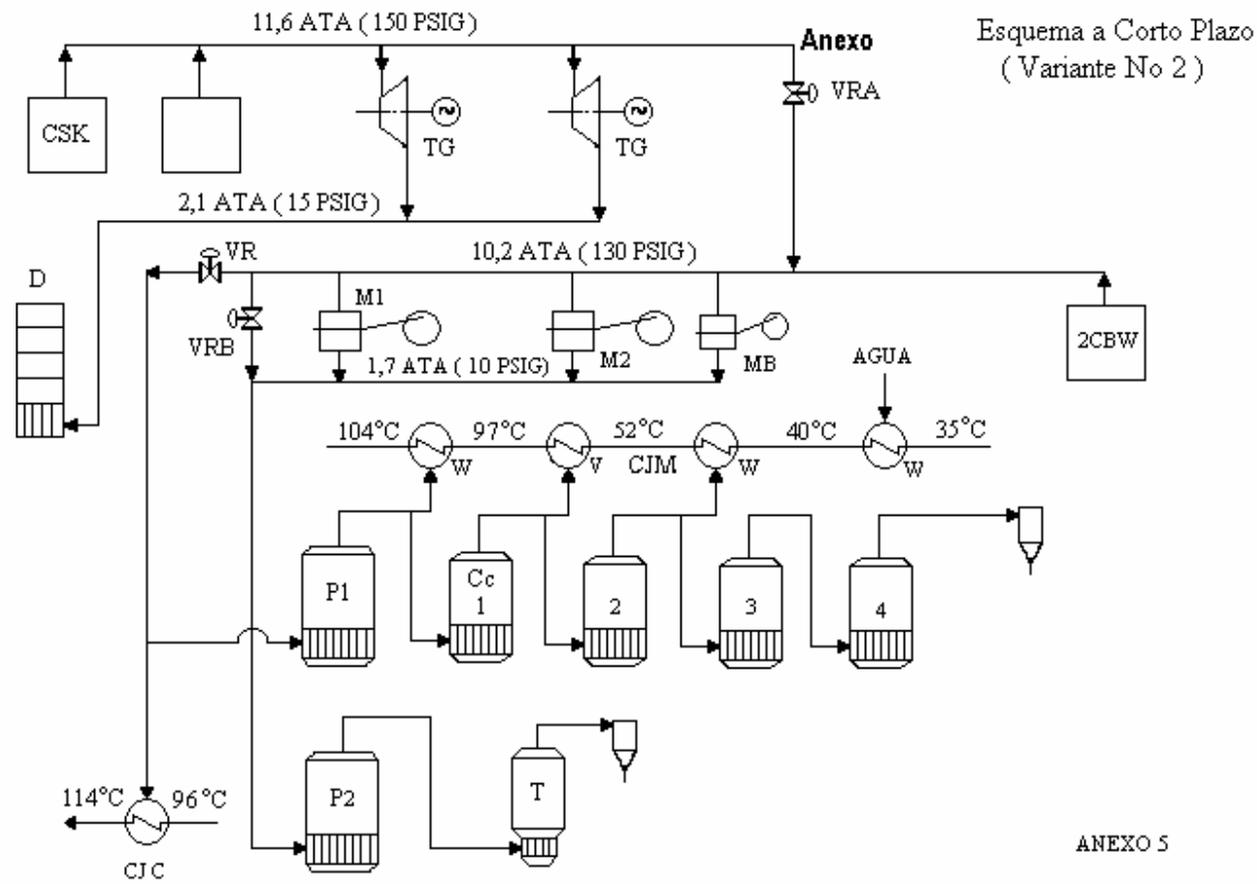
**COSTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA ADQUIRIDA POR EL CAI DEL SEN DURANTE LA ZAFRA DE 1996**

CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	CONSUMO DIARIO (MWh)	CONSUMO ANUAL (MWh)	PRECIO DE COMPRA (\$/kwh)	MONTO PAGADO (\$)	COSTO UNITARIO (\$/MWh)
ZAFRA	7	525	Madrugada 0.024 Día 0.074	187 000.00	251
REPARACIONES	2	220	Pico 0.1424		

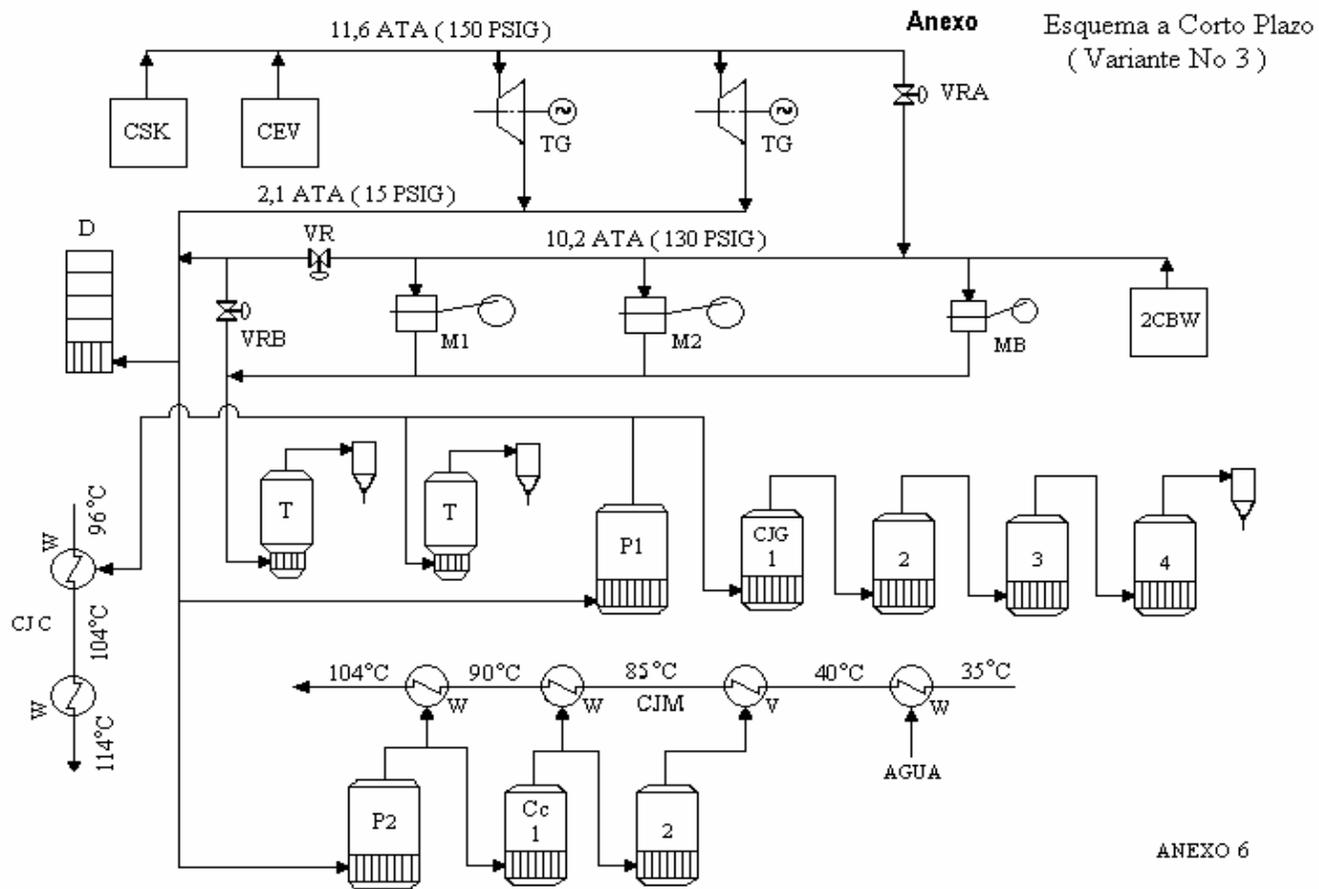


ANEXO 4

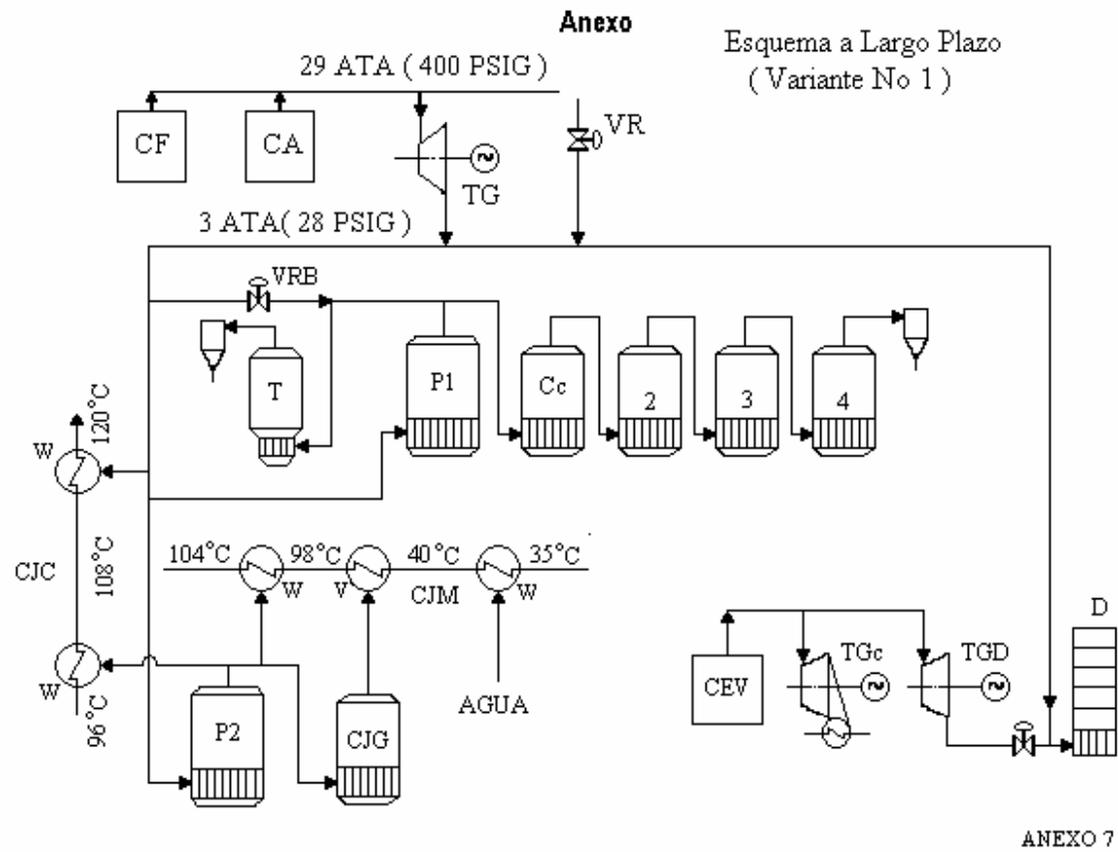
Anexo 16



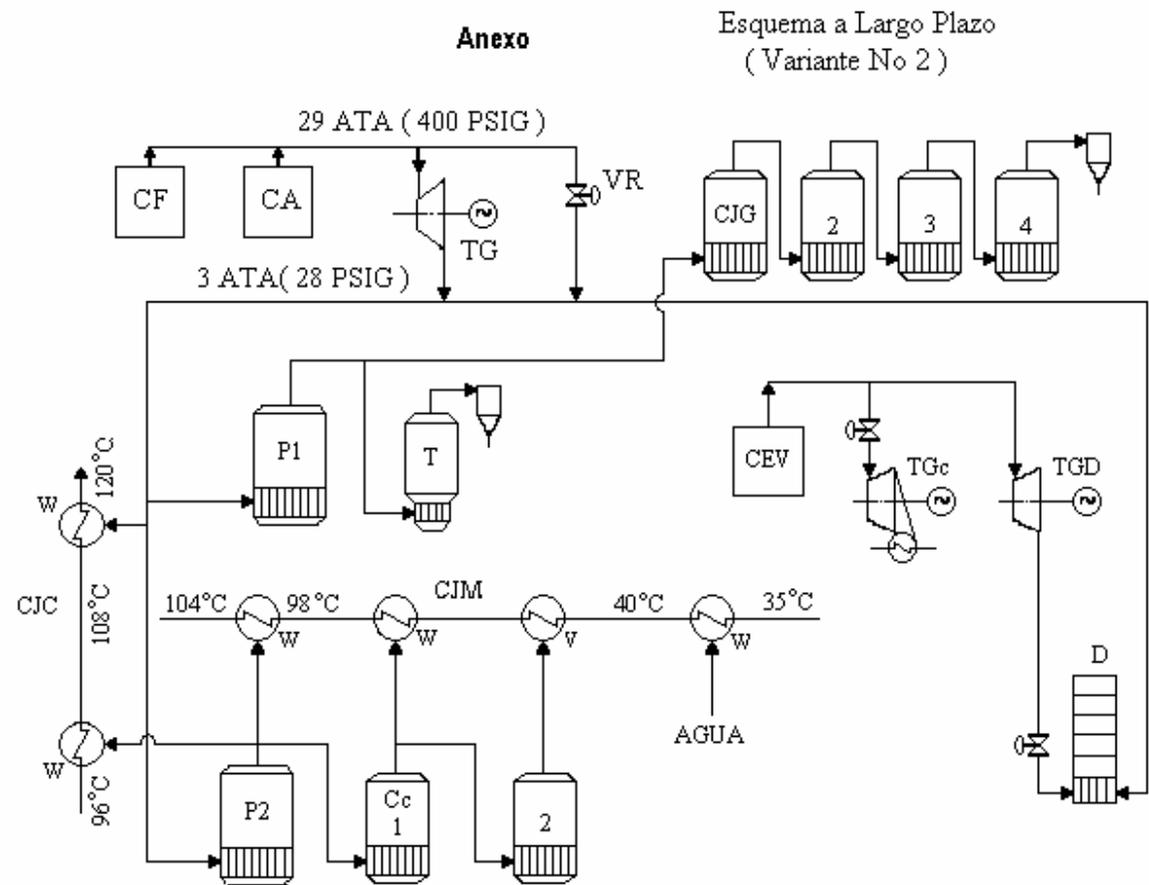
**Anexo 17**



**Anexo 18**



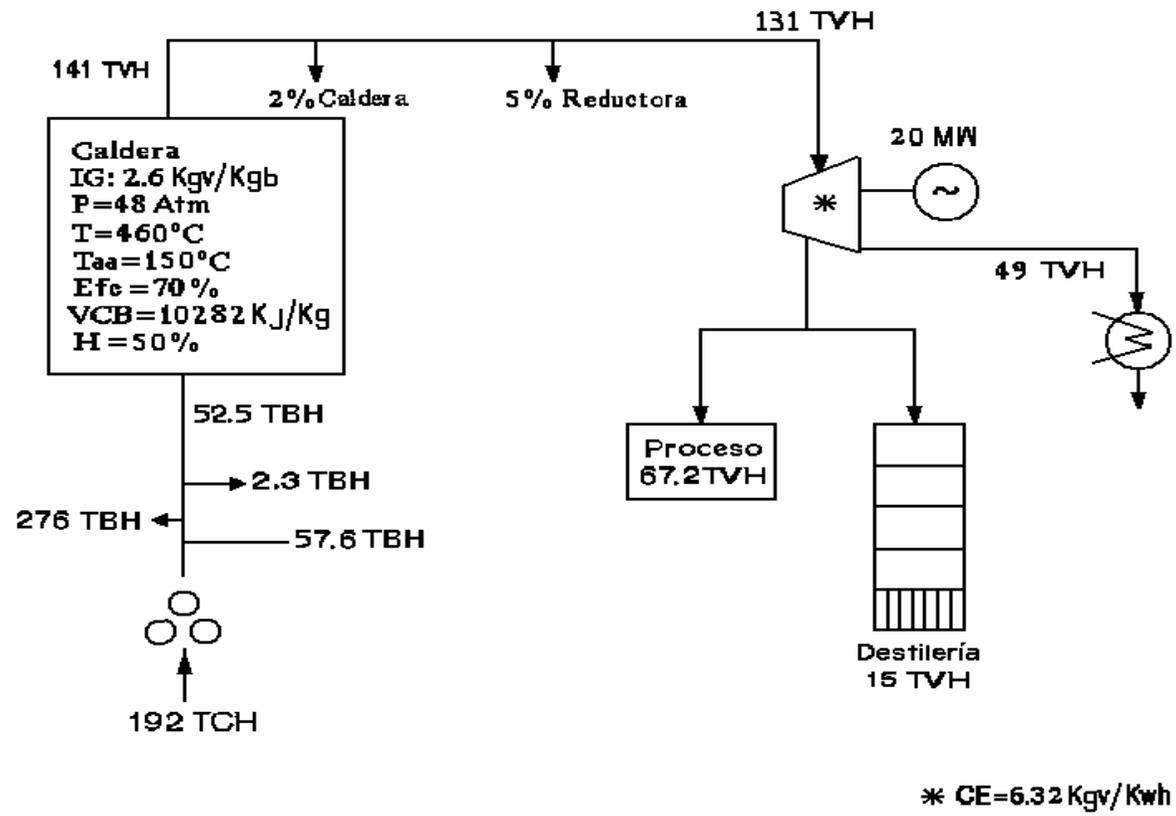
**Anexo 19**



ANEXO 8

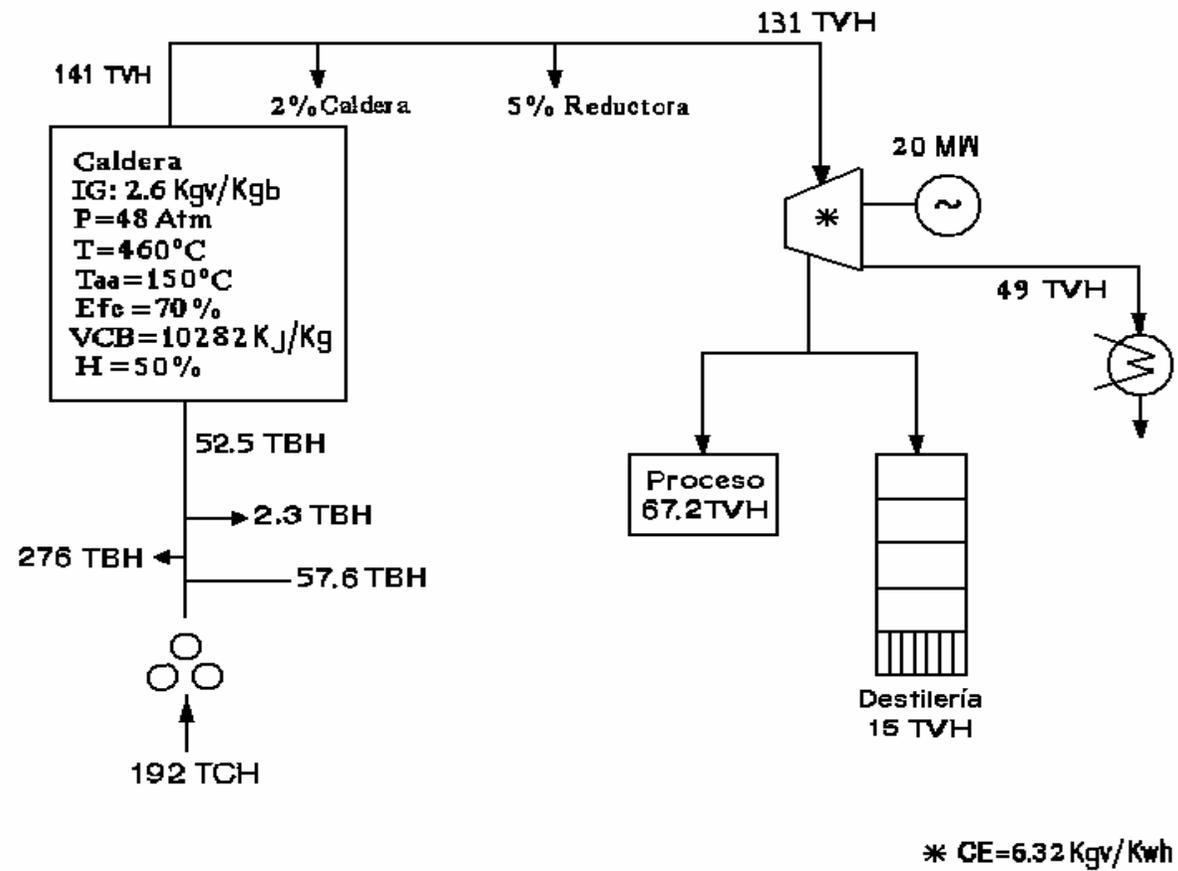
**Anexo 20**

# Anexo



Anexo 21

## Anexo



Anexo 22