



Universidad de Cienfuegos
“ Carlos Rafael Rodríguez Rodríguez ”
Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente

**Control operacional de algunos factores
agroindustriales que afectan la cogeneración
en ingenios azucareros**

Autor: M. Sc. Ing. Felix González Pérez.

Tutor: Dr. Ing. Juan Antonio Castellanos Alvarez.

Cienfuegos 2002

SÍNTESIS

Cualquier intento de mejoramiento de la eficiencia energética de una fábrica de azúcar requiere que se atiendan dos aspectos básicos; el primero en la manera en que los equipos se operan, y el segundo es la instalación en la fábrica de un equipo de rendimiento energético apropiado, para lo cual se necesita remodelar la industria y disponer de recursos para eso, ambos aspectos son tratados y evaluados en el trabajo. Se realizaron cuatro diseños de experimentos, del tipo factorial completo 2^5 , para la obtención de los modelos de consumo de vapor de escape en proceso (VE), el contenido de sacarosa en el bagazo (PolB), Brix del jugo mezclado (BxM), Bagazo disponible (BD), humedad del bagazo (HB), y el calor específico de combustión inferior (CECI) y superior (CECS) del bagazo, que permiten caracterizar energéticamente el ingenio azucarero en función de los factores agroindustriales, los cuales constituyen aportes científicos del autor.

El análisis de sensibilidad de cada modelo muestra cómo se comporta con respecto a cada uno de los factores agroindustriales e indica hacia dónde dirigir los esfuerzos. El nomograma confeccionado permite determinar la cantidad adecuada de agua de imbibición a utilizar a partir de la relación precio del azúcar/ precio del combustible, lográndose un balance de las pérdidas de azúcar en el bagazo con el consumo de vapor en proceso, reduciéndose el consumo de combustible y de agua. Este nomograma también constituye un aporte científico del autor.

Se validan los procedimientos propuestos en dos ingenios azucareros de la provincia de Cienfuegos, que cumplen con las condiciones establecidas para la obtención de los modelos (el 66 % de los ingenios azucareros cubanos cumplen con estas condiciones). La valoración económica demuestra, que al aplicar los procedimientos propuestos por el autor para los CAI “14 de Julio” y “Pepito Tey” unido a la remodelación del esquema térmico de este último hay un efecto económico considerable y la inversión para la remodelación se recupera en 2,9 zafas (261 días efectivos de molida).

Se reducen las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x y el consumo de agua, que por sus costos externos ambientales representan para el CAI “14 de Julio” 212763,02 \$/zafa y para el CAI “Pepito Tey” 1391910,26 \$/zafa.

Palabras Clave: eficiencia energética, fábrica de azúcar

Índice

Introducción	1
Capítulo I. Revisión Bibliográfica sobre la cogeneración y el control de la operación en ingenios de azúcar de caña.	6
1.1.- Consideraciones básicas sobre la cogeneración.	6
1.2.- Tipo de instalación y la presión de trabajo a utilizar.	7
1.3.- Principales factores agroindustriales que afectan la cogeneración en un ingenio azucarero durante la operación.	9
1.3.1.- Composición básica de la caña de azúcar.	10
1.3.2.- Principales factores agroindustriales que afectan la cogeneración en un ingenio azucarero.	10
1.4.- La industria azucarera cubana.	17
1.4.1.- La industria azucarera cubana actual.	17
1.4.2.- Perspectivas a corto plazo.	19
1.4.3.- Necesidad de remodelación energética y del proceso en la fabricación de azúcar.	19
1.5.- La cogeneración en la industria azucarera mundial de azúcar de caña.	21
1.6.- La cogeneración y el medio ambiente.	24
1.7.- Conclusiones parciales del capítulo	26
Capítulo II. Obtención de los modelos que relacionan los indicadores fundamentales del balance con los factores agroindustriales.	28
2.1. Introducción.	28
2.2. Datos experimentales	29
2.3. Diseño de experimentos.	29
2.4. Procesamiento de los datos experimentales.	30
2.4.1. Matriz experimental codificada. Modelos de regresión.	30
2.5. Obtención de los modelos.	32
2.5.1. Dependencia del consumo de vapor de escape en proceso y la pérdida de azúcar en el bagazo de los factores agroindustriales.	32
2.5.2. Dependencia de la humedad del bagazo y el bagazo disponible de los factores agroindustriales.	38
2.5.3. Dependencia del Brix del jugo mezclado y el calor específico de combustión inferior del bagazo de los factores agroindustriales.	43
2.5.4. Dependencia del calor específico de combustión superior del bagazo de los factores agroindustriales.	49
2.6. Confección del nomograma y determinación de la cantidad de agua de imbibición a utilizar.	52
2.7. Análisis de sensibilidad de los modelos.	52
2.7.1. Consumo de vapor de escape en un esquema de evaporación de quintuple efecto con extracciones(VE1)	52
2.7.2. Consumo de vapor de escape en un esquema de evaporación de cuádruple efecto sin extracciones(VE2)	54

2.7.3. Bagazo disponible (BD).	54
2.7.4. Contenido de sacarosa en el bagazo (PoIB).	54
2.7.5. Humedad del bagazo (HB).	55
2.7.6. Brix del jugo mezclado (BxM).	55
2.7.7. Calor específico de combustión inferior del bagazo (CECI).	55
2.7.8. Calor específico de combustión superior del bagazo(CECS)	55
2.8. Conclusiones parciales del capítulo.	56
Capítulo III. Validación de los modelos matemáticos propuestos por el autor y estudio de casos en dos ingenios azucareros de la provincia de Cienfuegos.	57
3.1. Validación de los modelos matemáticos propuestos por el autor.	57
3.1.1. Descripción del Esquema Térmico del CAI “Pepito Tey”.	57
3.1.2. Descripción del Esquema Térmico del CAI “14 de Julio”.	58
3.2. Aplicación de los modelos y el nomograma propuestos por el autor y evaluación económica.	66
3.2.1. CAI “14 de Julio”.	66
3.2.2. CAI “Pepito Tey”.	67
3.3. Remodelación del Esquema Térmico del CAI “Pepito Tey”.	68
3.3.1. Análisis económico de la remodelación.	72
3.4. Evaluación ambiental de los casos estudiados.	73
3.5. Conclusiones parciales del capítulo.	76
Conclusiones	77
Recomendaciones	79
Bibliografía	80
Anexos	

Introducción

La Resolución Económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba expone, con suma claridad, que la eficiencia es el objetivo central de la política económica en la fase de recuperación de la economía cubana y deberá enfatizarse en la eficiencia energética como parte de la eficiencia económica.⁽¹⁷⁴⁾

La máxima dirección del Partido Comunista de Cuba (PCC) y el Gobierno han insistido sistemáticamente sobre la necesidad del ahorro, y se han tomado medidas y acciones contempladas en programas, planes, etc. que intensifiquen el ahorro de energía y el uso eficiente de estos recursos^(52,174) donde se señala:

La eficiencia es, por lo tanto, el objetivo central de la Política Económica pues constituye una de las mayores potencialidades con que cuenta el país. “En Cuba la eficiencia comienza con el ahorro energético”.⁽⁵²⁾

La agroindustria azucarera es el segundo productor de electricidad en Cuba que se realiza sobre todo con biomasa cañera; de ahí la importancia que tiene optimizar el proceso de producción de energía eléctrica y calor a partir del bagazo, para disminuir los consumos específicos de calor en el proceso de fabricación de azúcar, incrementar los niveles de generación de energía eléctrica con bagazo y lograr niveles considerables de bagazo sobrante que permita usarlo en la industria de derivados y asegurar ventajas económicas para la empresa y el país.

En todas las actividades económicas de la sociedad las formas más utilizadas, por su magnitud y aplicación, son las energías térmicas y eléctricas, ambas, producto de procesos de transformación de fuentes de energía primaria, algunas renovables y otras no renovables.

Tradicionalmente el usuario de energía térmica transforma la energía primaria en el mismo lugar de la utilización final, mientras que la energía eléctrica es generada en sitios seleccionados exprofeso y transmitida al lugar del usuario final. En ambos casos, generación térmica y eléctrica, los procesos de transformación a partir de la energía primaria producen pérdidas o energía no aprovechada de magnitudes variables, dependiendo del tipo de proceso de transformación.

Aunque el término cogeneración puede aplicarse a la generación simultánea de dos o más formas de energía útil a partir de una fuente energética común, su conocimiento más generalizado es cuando el término se aplica a la generación simultánea de energía térmica y eléctrica, la primera en forma de vapor o calor para usarse en diferentes procesos.

El principio básico de la cogeneración es el aprovechamiento de la energía residual resultante de todo proceso termodinámico de conversión y utilización de energía y que en estos procesos separados es disipada al ambiente, como procesos de generación separados se pueden llegar a eficiencias globales entre el (50 – 65 %), mientras que con un esquema de cogeneración se pueden lograr eficiencias entre el (60 – 90 %).⁽⁴¹⁾

Cualquier intento de administrar la energía en una fábrica azucarera está constituido por dos aspectos básicos: en primer lugar un funcionamiento de la fábrica consciente del uso racional de la energía, es decir, controlar los parámetros operacionales, y en segundo lugar la instalación de equipos de rendimiento apropiado.

El índice de generación de energía eléctrica promedio en Cuba está entre (20 – 23) kW-h/t.c.m; con un control riguroso de la operación y las tecnologías de cogeneración actuales puede obtenerse hasta 41 kW-h/t.c.m, si se desea aumentar el índice de generación de energía eléctrica por encima de 41 kW-h/t.c.m, es necesario una

remodelación. Las disponibilidades de combustible existentes propiciarían generar hasta 100 kW-h/t.c.m modificando los procesos de generación de vapor y electricidad para calderas de alta presión-temperatura y turbinas de extracción-condensación manteniendo los consumos actuales de vapor en proceso.⁽⁴¹⁾

Si se reduce el consumo de vapor de proceso, el índice de generación de energía eléctrica en zafra pudiera elevarse hasta 140 kW-h/t.c.m y de extenderse la operación de las plantas a período de no zafra consumiendo los excedentes de bagazo pudieran producirse además 160 kW-h/t.c.m, con mejoras del proceso de producción azucarera, y sus consecuentes disminuciones de los consumos de vapor, instalando generadores de biomasa con turbinas de gas y ciclos combinados (GB/TGCC) que consuman paja de caña además de bagazo, pudieran generarse hasta 200 kW-h/t.c.m en tiempo de zafra y 400 kW-h/t.c.m en no zafra.⁽⁴¹⁾

La modelación de procesos en la industria azucarera de remolacha ha sido bien ilustrada por Beyer para la estructura de consumo de la energía térmica en el proceso, por Radovich para el estudio de configuraciones de evaporadores a múltiple efecto, citados por Benítez⁽²⁰⁾, Urbaniec (citado por Benítez⁽²⁰⁾) y Zagrodzki⁽²²²⁾, quienes ilustran los procedimientos y estudios energéticos de este tipo de fábricas para lograr una mayor economía en el consumo de calor, sin entrar en estructuras matemáticas complejas. Han sido muchos autores^(37,76,77,122,127,164,199,202) que han planteado métodos para los balances de masa y energía en los ingenios azucareros.

Existen varios Softwares para diagnosticar el estado industrial o el estudio de nuevas variantes de explotación para diferentes configuraciones del esquema tecnológico como AGE, Energía (UCLV), Optimo (MINAZ Villa Clara), SOOCA, EVACAL y otros. El Sistema Termoazúcar elaborado por investigadores del ISPJAE y la Universidad de Cienfuegos es un programa de simulación concebido para realizar evaluación de los Sistemas Termoenergéticos en fábricas de azúcar de caña, estructurado en módulos según el orden de cálculo, de forma secuencial. Benítez⁽²⁰⁾ propone una metodología de análisis termoeconómico tomando como base el método exergético.

El balance energético, y como resultado, la cogeneración de energía eléctrica y el sobrante de bagazo se ven comprometidos por el comportamiento de un grupo de factores agroindustriales que por lo general no son controlados en la operación. Los materias extrañas entradas a fábrica y su influencia en el rendimiento industrial han sido estudiadas minuciosamente por Casanova⁽³⁸⁾, Barreto⁽¹⁵⁾, Larrahondo⁽¹³¹⁾ pero no desde el punto de vista energético, Beatón⁽¹⁸⁾ establece una dependencia del calor específico de combustión del bagazo del método de cosecha de la caña, pero no tiene en cuenta la variación en la composición de las materias extrañas, ni como influyen esta en el consumo de vapor en proceso, la Pol en bagazo, Brix del jugo mezclado, bagazo disponible, la humedad y el calor específico de combustión superior e inferior del bagazo.

El contenido de fibra en caña ejerce una marcada influencia en el balance entre la energía disponible y las necesidades del proceso, la relación fibra/meollo tratada por Barroso⁽¹⁶⁾, Beatón⁽¹⁷⁾, Castellanos⁽³⁹⁾, Rubio⁽¹⁹²⁾, Sarría⁽¹⁹⁴⁾ y Vila⁽²¹⁷⁾ influye en las pérdidas por incombustión mecánica y afecta la eficiencia del generador de vapor. El uso del agua de imbibición estudiada con profundidad por Honig⁽¹¹⁷⁾, Hugot⁽¹¹⁸⁾, Jenkins⁽¹²²⁾ y más recientemente Cabrera⁽²⁸⁾, Castellanos⁽³⁹⁾, Gil⁽⁹²⁾, Lima⁽¹³⁶⁾, Nurse⁽¹⁵⁵⁾, Noel⁽¹⁷⁹⁾ y Romero⁽¹⁸⁷⁾, concuerdan en utilizar una cantidad de agua de imbibición igual a dos veces la fibra en caña, incluso hay referencias^(34,117,173) que hablan de valores superiores, pero con el uso de mejoras tecnológicas en el área de fabricación que contrarresten el incremento del consumo de vapor en proceso; criterios

obtenidos hace más de seis décadas aún cuando la relación precio del azúcar / precio del combustible ha disminuido grandemente.

El calor específico de combustión es la propiedad más importante de los combustibles y para el bagazo depende principalmente de la humedad, el contenido de azúcar y el contenido de ceniza y este se ve influenciado por el método de cosecha. Para determinar su valor Hugot⁽¹¹⁸⁾, Sarría⁽¹⁹⁴⁾, Upadhiaya⁽²⁰⁶⁾ que además se refiere a las fórmulas de Parr, Hessey, Van der Horst, Sudáfrica y Australia a partir de determinar la composición del bagazo. La composición en masa del bagazo están influenciados por algunos factores agroindustriales como la cantidad de agua de imbibición, el contenido de fibra en caña, la cantidad y composición de las materias extrañas, la preparación de la caña, la clase de imbibición utilizada y del proceso de molida lo cual permite elaborar un modelo de pronóstico a partir de estos factores agroindustriales lo cual es novedoso y de mucha utilidad.

Es a partir de estas consideraciones que se desarrolla el presente trabajo donde el problema científico consiste en: ¿Cómo influyen algunos factores agroindustriales y el consumo de agua hasta ahora no debidamente esclarecidos en los métodos de cálculo de los balances energéticos, a fin de reducir la incertidumbre de los mismos y disminuir las incoherencias entre la información que brindan estos sobre la disponibilidad de bagazo y lo que ocurre físicamente en las fábricas de azúcar? La precisión en el estudio de estos factores tiene un impacto sobre los estudios de cogeneración y remodelación de los ingenios azucareros.

El trabajo tiene como objeto de estudio la modelación de algunos factores agroindustriales que afectan la cogeneración y la remodelación en ingenios azucareros. Hipótesis.

Los factores agroindustriales (molida, cantidad y composición de las materias extrañas entradas a fábrica, cantidad y temperatura del agua de imbibición, el contenido de fibra en caña, y el esquema de calentamiento- evaporación- cocción) guardan una estrecha relación con el balance térmico, por lo que estableciendo y controlando los valores adecuados de estos factores, les permite mejorar su eficiencia energética, evaluar su remodelación si la necesitan y autoabastecerse de energía eléctrica y entregar una cantidad considerable al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), con sobrantes de bagazo además para otros usos.

Objetivos Fundamentales.

1. Obtener los modelos matemáticos que establezcan la dependencia de algunos factores agroindustriales (Molida, Cantidad y Temperatura del agua de imbibición, cantidad de materias Extrañas entradas a fábrica y su composición, contenido de fibra en caña) en el consumo vapor de escape en proceso, Contenido de sacarosa (Pol) y humedad del bagazo, brix del jugo mezclado, bagazo disponible y el calor específico de combustión superior e inferior del combustible, utilizando los métodos estadísticos, que permitan controlar la operación de ingenios azucareros.

2. Determinar para las condiciones económicas actuales (precio del azúcar/ precio del bagazo como combustible y para otros usos) la cantidad adecuada de agua de imbibición a utilizar, que permita obtener el punto de balance entre la pérdida de azúcar en el bagazo y la disminución del consumo de vapor en proceso, a través de un nomograma, para reducir el consumo de combustible y de agua en la industria azucarera .

3. Validar la utilidad de los procedimientos obtenidos, a partir de la aplicación práctica en los ingenios azucareros “Pepito Tey” y “14 de Julio” de la provincia de Cienfuegos comparándolo con los resultados obtenidos por el Sistema de Simulación Termoazúcar,

para utilizarlos en los restantes ingenios azucareros que cumplen con las restricciones impuestas.

4. Aplicar los modelos obtenidos integrados con el proceso de remodelación a un caso de estudio, de manera que permita evaluarlo económica y ambientalmente.

Para lograr estos objetivos se plantea el desarrollo de las siguientes Tareas de

Investigación:

1. Revisión Bibliográfica sobre los sistemas de cogeneración, factores agroindustriales que influyen en el balance energético integral y métodos de balance utilizados en la industria azucarera.

2. Realizar la planificación de la Investigación y los diseños de experimentos apropiados a cada objetivo específico.

3. Obtención de los modelos matemáticos que posibiliten el cálculo de los principales indicadores energéticos en función de los factores agroindustriales fundamentales controlados.

4. Obtener un gráfico donde se pueda determinar con relativa facilidad la cantidad de agua de imbibición en función de los precios del azúcar y el bagazo como combustible y para otros usos según las características particulares del ingenio azucarero.

5. Hacer un estudio de caso que permita validar los procedimientos obtenidos en dos ingenios azucareros de la provincia de Cienfuegos que se correspondan con los Sistemas Termoenergéticos Azucareros (STA) más generales encontrados en la industria azucarera (cuádruple efecto sin extracciones (CAI "Pepito Tey") y quintuple efecto con extracciones (CAI "14 de Julio").

El Autor Defiende:

1. Los estudios experimentales durante nueve zafras que permiten establecer los valores de los factores agroindustriales analizados.

La obtención de los modelos matemáticos en función de los factores agroindustriales que permitan determinar:

Consumo de vapor de escape en proceso para los esquemas de evaporación más generales encontrados en la industria azucarera.

Contenido de sacarosa (PolB) y humedad del bagazo (HB) para el esquema de imbibición más utilizado en la industria azucarera (imbibición compuesta cuádruple).

Brix del jugo mezclado.

Bagazo disponible.

Calor específico de combustión superior e inferior del bagazo.

Método para determinar la cantidad de agua de imbibición a utilizar en función de la relación precio del azúcar / precio del bagazo como combustible y otros usos.

Determinación del régimen de explotación adecuado de un ingenio azucarero en función de los diferentes factores agroindustriales.

Método teórico experimental para evaluar la influencia de los diferentes factores agroindustriales sobre el consumo de vapor, consumo de agua y disponibilidad de bagazo en ingenios azucareros.

Aplicación del método teórico experimental que posibilita la determinación de los diferentes índices de consumo energético con mayor nivel de confiabilidad.

La metodología aplicada para la determinación del esquema de remodelación de ingenios azucareros.

La reducción de la contaminación ambiental debido a la disminución de los niveles de emisión de CO₂, SO_x y NO_x a la atmósfera y el consumo de agua en el proceso.

Novedad científica.

Los modelos matemáticos que permiten calcular los principales indicadores energéticos del STA en función de los factores agroindustriales fundamentales controlados. (ocho modelos).

Método gráfico para determinar la cantidad de agua de imbibición a utilizar en función de la relación precio azúcar/ precio del bagazo como combustible y otros usos.

El uso de los modelos obtenidos integrados con el proceso de remodelación por etapas y variantes, como aporte metodológico para el mejoramiento energético y operacional de ingenios azucareros, con la consiguiente reducción de los costos operacionales.

Capítulo I . Revisión Bibliográfica sobre la Cogeneración y el control de la operación en ingenios de azúcar de caña.

1.1- Consideraciones básicas sobre la Cogeneración.

La palabra cogeneración, es un término que sirve para definir una serie de procedimientos empleados por los industriales desde hace muchos años para cubrir simultáneamente sus necesidades de energía térmica, mecánica y eléctrica. Su importancia fue disminuyendo, a medida que se extendían las redes de distribución de energía eléctrica y bajaban los costos de la energía primaria.^(2,8,9,28,31,54,66,78,97,124,177,185,186,196)

Hoy día han resurgido estos procedimientos, como consecuencia del encarecimiento de la energía producida en las centrales generadoras y, principalmente, en las térmicas convencionales.⁽⁵⁴⁾

Los sistemas de cogeneración se desarrollan intensamente en el mundo entero, dado por las posibilidades que estos presentan de entregar los excedentes de energía eléctrica para el uso público.^(26,42,45,63,113,128,134,137,148,151,153,155,161,203,221)

La cogeneración representa uno de los procedimientos más perfectos de la energética moderna, ya que se obtiene una gran ventaja económica por el ahorro del combustible que produce su empleo.^(2,49,54,177,185,195) Este ahorro se deriva del hecho de que en estos sistemas es posible aprovechar con mayor eficiencia la energía de alta calidad que está acumulada en un combustible, mediante el uso de una máquina térmica que funcione entre una temperatura lo más cercana posible a la temperatura de combustión y la temperatura que requieren los procesos. Según la asociación Cogen Europe, la eficiencia de una planta de cogeneración puede llegar a ser de un 90 % , mientras las convencionales de fuel es del (30 – 40) %, y las del ciclo combinado del 55 %.⁽⁴⁴⁾

En el caso de las fábricas de azúcar, el vapor se emplea principalmente para las necesidades de calentamiento y evaporación-cocción del jugo, pero como este vapor se genera a presiones más altas que las requeridas para el proceso, produce un considerable sobrante de energía que puede ser utilizada por un turbogenerador que produzca un escape total o parcial de vapor a las líneas de proceso y la energía eléctrica producida puede ser utilizada tanto para el consumo interno como para el externo.

La industria azucarera es privilegiada ya que la materia prima (caña de azúcar) lo aporta casi todo: parte del agua, combustible (bagazo integral) y sacarosa. La mayor parte del bagazo se quema en las calderas de las fábricas de azúcar para producir el vapor necesario en el proceso azucarero y en la generación de electricidad. La producción de electricidad que puede ser obtenida a partir de la combustión del bagazo de la caña de azúcar, es una forma de energía renovable atractiva y prometedora, debido a que medioambientalmente está basada en un recurso combustible renovable que no desprende dióxido de carbono neto hacia la atmósfera,

comercialmente resulta económica a los precios actuales en comparación con otros combustibles y técnicamente es factible su empleo, además se están desarrollando nuevas técnicas, de las cuales se espera que incrementen significativamente la eficiencia.^(128,194,203)

Los parámetros básicos ingenieriles para optimizar la cogeneración en fábricas de azúcar son conocidos:

Vapor de alta presión y temperatura para incrementar la energía entregada.

Equipos contemporáneos para generar vapor y electricidad.

Satisfacer la cogeneración necesaria con una alta eficiencia.

En algunas fábricas se usan generadores de vapor que son ideales para este propósito y pueden utilizar otros materiales de biomasa, adaptables a quemar carbón que se utiliza como combustible suplementario seleccionado en la mayoría de las regiones cuando el bagazo no está disponible.⁽¹⁶⁰⁾

En la actualidad los sistemas de cogeneración en las fábricas de azúcar, producen alrededor de 20 kW-h/tcm durante el período de zafra. Algunos autores plantean que con turbinas de contrapresión solo se pueden producir 50 kW-h/tcm⁽³⁰⁾, ya que producir mayores cantidades de energía eléctrica implica pasar por la turbina una cantidad de vapor mayor que la demanda del proceso.^(2,150,157) Si se utilizan turbogeneradores de mayor potencia, el índice de consumo de vapor por kW-h generado se reduce considerablemente y se pudieran lograr más de 50 kW-h/tcm. Con las turbinas de extracción – condensación se pueden producir entre (80 –120) kW-h/tcm, siendo mayor mientras más se incremente la eficiencia en el uso del vapor en el proceso, este valor pudiera llegar hasta 240 kW-h/tcm si se genera todo el año, en el caso de las turbinas de gas se podrían obtener generando todo el año 460 kW-h/tcm.^(2,128,132,133,134,157)

1.2.- Tipo de instalación y la presión de trabajo a utilizar.

Con un carácter más universal se reporta por Tatarka⁽⁸⁾, Harmon⁽¹¹¹⁾ y Jutglar⁽¹²⁴⁾, como criterio de comparación de alternativas y selección del sistema de cogeneración, a la relación calor/potencia o potencia/calor como otros prefieren llamar. Este indicador (R) caracteriza a la relación que existe entre la potencia eléctrica generada (E) y el calor útil producido (Q) o viceversa.

Garret- Price⁽⁹¹⁾ recomienda calcular la relación potencia / calor para el período de un año, de la siguiente forma:

$$R = E / Q \quad (\text{kW-h}/10^6 \text{ kJ})$$

E: Potencia eléctrica anual consumida (kW-h/año).

Q: Calor útil producido en igual periodo.

$$Q = m (h_o - h_I)$$

m = Flujo másico de vapor (kg/h).

h_o = Entalpía del vapor a la salida de la caldera (kJ/kg).

h_I = Entalpía del agua de alimentación de la caldera (kJ/kg).

Cuando se repone agua puede calcularse como:

$$h_I = x h_v + (1 - x) h_w$$

x = Porcentaje del condensado retornado.

h_v = Entalpía del condensado (kJ/kg).

h_w = Entalpía del agua de reposición (kJ/kg).

Según estos propios autores la relación potencia / calor de la instalación de cogeneración que se seleccione debe ajustarse a la que presente el sistema en cuestión, para lograr el mejor aprovechamiento de la energía o de lo contrario se tendrán faltantes o excedentes eléctricos para satisfacer al 100 % las necesidades térmicas. Es decir

deberán compararse la razón potencia / calor requerida con la de las diferentes configuraciones que se analicen para seleccionar la mejor desde el punto de vista térmico.

Garret – Price ⁽⁹¹⁾ ofrece el rango en que esta relación oscila:

Tipo de máquina	R(kW-h/10 ⁶ kJ)	Eficiencia eléctrica en % para:	
		100 % de carga	50 % de carga
Turbinas de vapor	33,17 ÷ 71,08	14 ÷ 28	12 ÷ 25
Turbinas de gas ciclo indirecto	132,69 ÷ 213,25	19 ÷ 22	-
Ciclos combinados con turbinas de gas y vapor	165,86 ÷ 303,30	34 ÷ 40	25 ÷ 30

Tabla 1.1. Relación potencia / calor para diferentes sistemas de cogeneración.

Plantea Payne ⁽¹⁶¹⁾ que dadas las condiciones de presión y temperatura que requiere la producción azucarera actual las turbinas de condensación con extracciones intermedias reguladas son las máquinas para cogenerar, pudiéndose extraer el vapor a presión entre los (65 y 140) kPa para satisfacer las demandas de calor del proceso.

El mismo autor recomienda que las fabricas de azúcar deberán decidir que presión de vapor directo utilizar, tomando en cuenta esos elementos, además de los costos de inversión y mantenimiento y su repercusión en el incremento de generación de electricidad, también señala que con un equipamiento de alta eficiencia en el rango de los 6000 kPa de presión, un incremento de 500 kPa puede representar un 2 % de incremento de electricidad.

Lima ⁽¹³⁶⁾ al referirse al asunto de la presión adecuada para la cogeneración con una utilización eficiente de la energía y la producción económica de electricidad en exceso en un ingenio azucarero, da como condición necesaria la operación de calderas a presión y temperatura mucho más alta que las normalmente encontradas en la actualidad, tales como:

Presión atm	Temperatura °C
32	400
42	400
60	400
84	482

Tabla 1.2. Parámetros conjugados del vapor propuestos para los sistemas de cogeneración.

Nurse ⁽¹⁵⁵⁾ ofrece soluciones de esquemas y formas de administración de la energía en fábricas de azúcar que permiten incrementar los niveles de exportación de energía eléctrica en tiempo de zafra y no zafra con el empleo de otros combustibles auxiliares y el reemplazo de las calderas existentes por unidades de alta presión que operan a presiones entre (42÷63) atm abs (600÷900) psia y entre (282÷443) °C, hace referencia a una fábrica que opera a 88 atm abs y 440 °C.

Christodoulou ⁽⁴⁷⁾ se refiere al uso de generadores de vapor con parámetros del vapor directo de 75 atm ,500°C y 100 atm, 530°C.

Ogden ^(156,157) propone en este sentido soluciones que se deriva de sus experimentos en Hawaii, Isla Reunión, entre las que está el empleo de turbinas de condensación con extracciones intermedias reguladas y producción de vapor a alta presión como una alternativa viable, tanto para fábricas de azúcar con destilerías de alcohol o sin ellas, considerando alta presión a los valores que oscilan entre (4÷8) MPa lo que es típico en este tipo de turbinas, presión media al vapor que utilizan hoy en día las máquinas de moler (1,5÷2,0) MPa y baja presión al vapor de escape de los turbogeneradores y máquinas de moler actuales que están en el orden de los (0,2÷0,3) MPa. Estas soluciones incrementan la producción de energía eléctrica desde los 20 kW-h/t.c.m de la actualidad hasta un aproximado de (70÷120) kW-h/t.c.m. , de los cuales entre (50 ÷100) kw-h/t.c.m quedan disponibles para exportar, lo que evidentemente quedará entre las utilidades junto al azúcar producida.

La Oficina de Energía y Medio Ambiente de la Agencia para el Desarrollo de los Estados Unidos ⁽²¹¹⁾ realizó estudios sobre el potencial de cogeneración del bagazo en diez fábricas de azúcar de El

Salvador donde se evalúa el efecto de sustituir los sistemas actuales, con turbinas de contrapresión con presiones entre (1,8÷2,7) MPa [200÷300] psig, por sistemas con calderas de alta presión (4÷6,2) MPa [600÷900] psig y turbogeneradores de extracción condensación con dos extracciones intermedias reguladas con presiones entre (1,38÷2,07) MPa [200 ÷300] psig para el suministro a turbinas de tándem y la segunda extracción a presiones entre (0,103÷0,138) MPa [15÷20] psig, según el caso, para vapor de proceso; también se define la estrategia para producir electricidad una vez concluida la zafra y propiciar mayor economía al proyecto. Este estudio con sus propuestas hace atractiva la cogeneración en El Salvador.

Las nuevas tecnologías de cogeneración que se han desarrollado en el mundo son factibles de utilizar en la industria azucarera y de hecho se usan en lugares como Hawaii, Isla Reunión ,etc. con buenos resultados, logrando no sólo autoabastecerse, sino también entregar excedentes a la red pública, lo que proporciona ventajas económicas y sociales para la industria y el país. ⁽⁵⁴⁾

1.3.- Principales factores agroindustriales que afectan la cogeneración en un ingenio azucarero durante la operación.

Varios autores ^{20,30,39,96,100,135,136,153,187,198} plantean que la mayoría de las industrias usan al menos 30 % más energía que la mínima requerida , la industria azucarera no es una excepción, los requerimientos de energía total para una fábrica de azúcar moderna puede ser abastecida con sólo el 9 % de fibra seca en caña , pero la mayoría de las fábricas usan mucho más para satisfacer sus requerimientos de energía para molerla y procesar sus jugos, si operan con máxima eficiencia , el exceso de fibra seca puede ser de (5-7) % caña , que puede ser utilizada para generar energía eléctrica excedente o como materia prima para otros usos. ⁽¹⁹⁸⁾

Cualquier intento de mejoramiento de la eficiencia energética de una fábrica de azúcar requiere que se atiendan dos aspectos básicos; el primer aspecto es la instalación en la fábrica de un equipo de rendimiento energético apropiado para lo cual se necesita remodelar la industria y disponer de recursos para eso, y en segundo lugar la manera en que los equipos se operan ⁽¹³⁸⁾, en el segundo aspecto se tienen las mayores posibilidades, el autor considera en primer lugar ver todo lo que se logra con una correcta operación y luego si es necesario remodelar.

Los criterios de operación que determinan la eficiencia energética pueden fácilmente ser identificados y actuados, pero no todos los criterios relativos a la energía están dentro del control de los operadores de la fábrica, y algunos de ellos tienen otras influencias de mayor importancia que las consideraciones de eficiencia energética.

Existen dos caminos, uno es el riguroso monitoreo de los niveles de energía entrando a fábrica para lo cual se requiere la medición de numerosos flujos másicos, y determinar la energía con los gastos asociados y requerimientos de fuerza humana, y el otro el monitoreo del consumo de energía en varias etapas de producción con una visión de hacer aprovechable las pérdidas de energía y reducir el consumo de energía total, minimizando el gasto de energía en áreas donde la misma está bajo control de los operadores de la fábrica. Por lo tanto, solo se miden los componentes controlables del cálculo de la eficiencia algo que es menos trabajoso y la mayoría de los cuales son parte de la rutina normal del control de la fábrica.

1.3.1.- Composición básica de la caña de azúcar.

La composición de la caña de azúcar ejerce gran influencia en el balance energético y se puede señalar como de mayor importancia el contenido de fibra, agua y la cantidad de impurezas en el jugo.

La composición básica de la caña de azúcar como materia prima varía según el clima, suelo, método de cultivo, abonos, riego, las condiciones meteorológicas, la variedad, edad, madurez, técnica de cosecha, la duración del ciclo de aprovisionamiento, por lo que éstos son valores promedios. Según Purchase⁽¹⁷³⁾ es 70,3 % de agua, 14,4 % fibra, 13,6 sacarosa, el resto otras sustancias; Roque⁽¹⁸⁹⁾ da una composición de 70 % agua, 14 % fibra en caña, 15 % sacarosa y un 1 % ceniza, en⁽¹⁰⁾ se dan como valores de referencia general (73-76) % agua, (8-15) % sacarosa y (11-16) % fibra. El autor^(96,97,98) utiliza los promedios de las últimas nueve zafras determinados por el laboratorio en un ingenio azucarero de la provincia de Cienfuegos, que son los siguientes, 69,69 % agua, 12,43 % sacarosa, 14,37 % fibra en base a la caña limpia, los cuales se modificaron por los factores anteriormente expuestos en base a la caña que llega al tándem. En Colombia⁽⁶⁾ la pol en caña se comporta entre (12,27-15,32) %, en México⁽¹³⁾ en la zafra 1999-2000 la pol en caña como promedio fue de 13,53 %, en Brasil⁽¹⁷⁾ 14,2 %, en Ecuador⁽⁸⁰⁾ 11,66 %, en la zafra de 1995 en un ingenio australiano (Invictamill) la pol en caña fue de 15,12 %⁽⁵⁾, los promedios históricos de algunos productores destacados de azúcar de caña son: ⁽¹⁷³⁾ Australia (14,4), Brasil (13,2), Cuba (12,6), E.E.U.U. (12,5), Sudáfrica (12,7), México (12,1) y como promedio (13,1).

1.3.2.- Los principales factores agroindustriales que afectan la cogeneración en un ingenio azucarero durante la operación son los siguientes: ^(70,71,74,75,76)

Inestabilidad de la molida.

Cantidad de materias extrañas entradas a fábrica.

Recuperación del condensado a la mayor temperatura.

Aislamiento térmico.

Cantidad y temperatura del agua de imbibición.

Humedad y preparación del bagazo.

Eficiencia en la generación del vapor.

Eficiencia del área de fabricación.

Contenido de fibra en la caña.

Mayor uso del vapor de las extracciones.

A continuación se analizará el comportamiento de algunos de estos factores, que con un control estricto durante la operación y sin necesidad de realizar grandes inversiones influyen directamente en el balance térmico integral, es decir, hay que ver la cogeneración en ingenios azucareros desde dos puntos de vista, el primero lograr incrementos apreciables en la generación de energía eléctrica y en segundo lugar lograr sobrantes de bagazo significativos, para generar energía eléctrica en otras fábricas o

para otros usos cuando la tecnología de cogeneración utilizada no permita producir más energía eléctrica.

Independientemente de las limitaciones tecnológicas de la época, los ingenios fueron diseñados con baja eficiencia en las calderas y altos consumos de vapor en proceso para evitar altos inventarios de bagazo sobrante, que se convirtiera en un problema para el ingenio. De ahí que era preferible un balance energético ajustado para quemar leña ó fuel-oil cuando fallara el bagazo, que tener demasiado sobrante.^(110,153)

La posición hoy sobre este particular ha cambiado por varias razones:

No consumir petróleo en la producción de crudos en unos, refino en otros y leña en los terceros.

Tributar bagazo a las plantas de derivados.

En los tiempos que se han presentado las inestabilidades en el suministro de caña, poder contar con bagazo sobrante para enfrentar las frecuentes paradas y poder liquidar con rapidez los inventarios de las casas de calderas.

Acumular el mismo durante la zafra para luego utilizarlo en la producción de energía eléctrica al finalizar la misma con la utilización de turbogeneradores de extracción-condensación.

Pero, para lograr incrementos notables en las cantidades de bagazo sobrante que las obtenidas en la actualidad se hace necesario:

Incrementar la eficiencia de las calderas.

Disminuir el consumo de vapor en proceso.

El efecto combinado de ambos factores puede representar mas del 35 % como bagazo sobrante del total disponible en la molida.⁽¹⁵³⁾

Se ha comprobado que una fábrica que responda a una concepción de alta eficiencia requiere de un ciclo energético óptimo y de estabilidad de la operación para su éxito.

Con pequeñas inversiones es posible obtener en la industria azucarera sobranes de bagazo de entre el (40-50) % y que el bagazo disponible de la molida posibilita generar de (30-50) kW-h/tc molida.^(30,39)

Es absolutamente necesario tener una operación azucarera eficiente antes de intentar generar exceso de energía eléctrica para la venta.⁽¹³⁶⁾

Los métodos para incrementar la eficiencia en la generación de vapor han sido sumamente estudiados por Barroso⁽¹⁶⁾, Beatón⁽¹⁸⁾, Borroto⁽²³⁾, Rubio⁽¹⁹²⁾, Sarría⁽¹⁹⁴⁾ entre otros, pero, no influye directamente en los modelos propuestos por el autor.

La inestabilidad de la molida es el factor más importante que influye de forma directa en el déficit de bagazo, ya que uno de los momentos que más se consume bagazo en los centrales es en las arrancadas, además cuando se trabaja fuera de la norma potencial horaria de molida ocurren picos en la demanda de vapor en proceso lo que provoca pasar grandes cantidades de vapor por la válvula reductora de vapor directo a vapor de escape o expulsar vapor de escape a la atmósfera, ambas extremadamente perjudiciales. La inestabilidad en la molida puede provocar sobreconsumos de combustible de hasta un 30 % del bagazo disponible.

Las paradas imprevistas en la molida provocan baches en el suministro de bagazo a las calderas, afectando la estabilidad de la generación de electricidad y de la operación en sentido general.

Hay que tener en cuenta que la cantidad de materias extrañas entradas a fábrica juegan un papel importante en el descenso del rendimiento del azúcar producida con relación a la caña molida, debido a que son materias que no poseen sacarosa y por lo tanto lejos de aportar azúcar, lo que hacen es extraer determinado porcentaje de este producto durante la molida en los tándem. Por otra parte las materias extrañas reducen capacidad de molida y el bagazo disponible, por lo que afectan el balance térmico integral.

Según el Dr. Casanova Cabezas ⁽³⁸⁾ en su trabajo doctoral, los valores de materias extrañas en la caña son variables y dependen de:

Sistemas de corte y alza.

Eficiencia del cortacogollos.

Condiciones atmosféricas en el momento de la cosecha.

Variedad de la caña.

Edad de la cepa.

Eficiencia de la quema, si es caña quemada.

Efectos perjudiciales de las materias extrañas. ^(27,138,213)

Reducción de la capacidad de molida.

Extracción de sacarosa.

Pureza de los jugos.

Incrementa los costos de mantenimiento.

Cantidad y pureza de las mieles finales.

Pérdidas indeterminadas.

Pérdidas en cachaza.

Capacidad de los equipos.

En este mismo trabajo aparecen las referencias de distintos valores promedios de materias extrañas en distintas áreas del mundo.

Autor	ME % caña	Area
Niestrath	20	Louisiana, USA
Danbert	10	Louisiana, USA
Stewart	10,59	Louisiana, USA
Le Blanc	5,19 – 7,37	Louisiana, USA
Séller	15,43	Louisiana, USA
López Hernández	10	Tucumán, Argentina
Payne y Rodees	35	Hawai
Mayoral y Vargas	7 – 9,4	Puerto Rico
Betancourt	4,19	Cuba
Deacon	5	Trinidad
Clayton y Whittemore	13	Florida, USA
Faijul	7,5	Cuba
Azzi	2,02 – 4,52	Brasil
Humbert	9 – 12	México
Castro y Balderi	10,9	Florida, USA

Tabla 1.3 Promedios de materias extrañas en distintas áreas del mundo.

En cuanto a la composición de las materias extrañas ⁽³⁸⁾ en bases empíricas en más de 20 fábricas de azúcar en Cuba coinciden que los tallos verdes constituyen el mayor componente de las materias extrañas (6,35 – 10,26 %) en base al peso de la muestra, las hojas verdes y secas (1,56 – 4,05) % y la tierra (0,12 – 0,25) % y por el incremento de cada % de materias extrañas entradas a fábrica provoca una caída del rendimiento industrial entre (0,2 – 0,4) puntos.

Composición de la caña entregada por centros de acopio.

	Caña larga corte manual (verde)	Caña verde cortada por combinada	Caña quemada cortada por combinada
Tallo verde	2,9	5,7	6,5

Hoja verde	1	2,2	3,5
Hoja seca	0,2	0,2	0,5
Total	4,1	8,1	10,5

Tabla 1.4. Composición de la caña entregada por centros de acopio.

El papel del tallo verde se hace evidente al caracterizar su jugo comparándolo con el jugo de caña entera, posee entre (60 – 65) % menos de pureza, entre (5 – 6) veces más contenido de reductores, entre (1,5 – 2) veces más coloides, el doble de sustancias nitrogenadas y el triple de cenizas.

	Pureza	Reductores	Coloides	Sust. Nitrog.	Ceniza % mat. Seca
Tallo verde	15,3	2,108	0,253	1,015	9,43
Caña entera	86,51	0,301	0,146	0,585	3,54

Tabla 1.5 Comparación del jugo de tallo verde con el jugo de caña entera.

En el caso de las cañas quemadas puede incrementarse hasta el 3 % las materias extrañas por la quema deficiente.

Allan ⁽⁴⁾ en Iraq concluyó que por cada % de materias extrañas se produce un incremento de la fibra en caña de 0,32 y 0,22 % para períodos de lluvia y seca respectivamente y una pérdida de azúcar de 0,24 y 0,21 kg/t.c.m por cada % de incremento de materias extrañas entradas a fábrica.

Estructura vegetativa en función del rendimiento agrícola ⁽³⁸⁾.

Rendimiento Agrícola (miles a / caballería)	Caña Limpia (%)	Materias Extrañas (%)	Hoja Seca (%)	Hoja Verde (%)	Tallo Verde (%)	CL/M E
30 – 50	78	22	7	8	7	3,5
51 – 70	79	21	7	8	6	3,7
71 – 85	80	20	6	8	6	4
+ 85	82	18	5	7	6	4,4
Promedio	80	20	6	8	6	4

Tabla 1.6. Estructura vegetativa en función del rendimiento agrícola ⁽³⁸⁾.

Cruz ⁽⁵⁵⁾ da valores de materias extrañas en el rango de (2,77-5,14) % para los ingenios de menos entradas de materias extrañas en Cuba y de (10 – 13,33) % para los ingenios de mayor entradas de materias extrañas en 20 ingenios azucareros cubanos en la zafra de 1998.

Como se puede apreciar las distintas referencias de la cantidad de materias extrañas entradas a fábrica concuerdan poco debido fundamentalmente a los factores analizados anteriormente.

Cantidad y temperatura del agua de imbibición.

Aún cuando el bagazo se someta a presiones considerables y repetidas, no cede jamás todo el jugo que contiene. Tiende hacia una humedad mínima, 45 % en general, 40 % en los casos más favorables ⁽¹¹⁸⁾, pero conserva siempre una fracción importante del jugo, que representa aproximadamente, la mitad de su peso.

Para extraer la mayor cantidad posible del azúcar contenida en ese jugo debe recurrirse a un artificio: si no es posible disminuir la humedad se hará lo posible por reemplazar el jugo que la constituye, por agua, este artificio lo constituye la “imbibición “. Cuando se trabaja a la presión seca, el límite de extracción se obtiene muy rápidamente, después de la desmenuzadora y el primer molino la humedad del bagazo se ha reducido ya a

cerca del 60 %. Después del segundo molino la humedad se aproxima a 50. Del tercero en lo adelante no baja más allá de 45 %: puede considerarse que se ha obtenido por simple presión la máxima extracción posible. Si en este momento se agrega agua, uniformemente, ésta se distribuye dentro del bagazo y diluye el jugo que contiene. El molino siguiente volvería a llevar al bagazo a la humedad límite, es decir, alrededor de 45 %. Sin embargo, esta humedad ya no estará constituida por jugo absoluto sino por jugo diluido, en esta forma se habrá extraído azúcar. La operación puede repetirse. Siendo tan débil la diferencia entre las humedades del bagazo, es conveniente iniciar la imbibición desde la salida del primer molino : el incremento será tanto más rápido cuando el jugo contenido en el bagazo sea más fácilmente diluido y extraído. En esta forma la cantidad de jugo extraído es, aproximadamente, igual a la cantidad de jugo que se hubiera extraído sin adición de agua, aumentada de la cantidad de agua agregada y la cantidad de azúcar extraída es muy superior a la que se hubiera obtenido sin adición de agua porque la cantidad de jugo que permanece en el bagazo, que , de acuerdo con lo que se acaba de decir es, aproximadamente, la misma, está formada ahora de jugo diluido en lugar de estar formada por jugo absoluto.

Clases imbibición:

Imbibición simple.

Imbibición compuesta.

La imbibición es simple cuando se agrega agua al bagazo después de cada molino. Este sistema de agua de imbibición consume mucha agua, que es necesario evaporar más tarde, el jugo diluido obtenido del último molino es casi agua, debe tomarse, entonces, para enviarlo al molino penúltimo. En este caso se le llama imbibición compuesta, la que en este caso es doble.

La imbibición compuesta consiste en aplicar agua antes del último molino, retornando al jugo obtenido de éste, al penúltimo; el jugo del penúltimo al precedente, y así sucesivamente. El jugo obtenido del primer molino de presión húmeda va a la fabricación junto con el jugo de presión seca. (Ver anexo 1.1)

Un incremento en la cantidad de agua de imbibición utilizada trae consigo ventajas desde el punto de vista de extracción de azúcar, disminuyendo la pol en bagazo pero también conlleva a un descenso gradual del Brix del jugo mezclado lo que a su vez provoca considerables incrementos del vapor necesario para evaporar esa agua. Con la imbibición, la extracción aumenta rápidamente al principio y lentamente después, también aumenta el consumo de vapor. Si la fábrica consume combustible comprado o si obtiene alguna utilidad del bagazo, existe evidentemente una cantidad de agua que corresponde a un beneficio máximo, esta cantidad depende de la relación: precio del azúcar / precio del combustible y deberá calcularse en cada caso.

En diciembre de 1977 el azúcar crudo se cotizó a 12,33 centavos la libra, luego comenzó el declive, en febrero de 1978 cayó hasta 9,67 centavos, hasta marzo de 1993 permaneció por debajo de 10 centavos.⁽¹¹⁶⁾ El comportamiento de los precios del azúcar desde el año 1993 hasta el 2001 se puede observar en el gráfico mostrado en el (anexo 1.2).^(46,56)

En el año 1900 el petróleo se cotizó a 8,65 USD/t (1,29 USD/barril), en 1970 12,97 USD/t (1,80 USD/barril), a partir de 1970 y hasta la actualidad el comportamiento de los precios del petróleo ha tenido una tendencia hacia el aumento e inestablemente, lo que puede observarse en el (anexo 1.3).^(71,95,205)

En Hugot⁽¹¹⁸⁾ se muestra que se llega con más frecuencia a la imbibición óptima si los valores de relación agua de imbibición / fibra en caña ($\lambda = 2$) pero este valor aparece publicado en el año 1963.

En el desarrollo de algunas pruebas llevadas a cabo en la fábrica experimental en Louisiana en el año 1943 se comprobó que la extracción alcanza valores máximos cuando la imbibición es del 60 % con respecto al peso de la caña ($\lambda = 4$ a 5).⁽¹¹⁸⁾ Aunque no se habla del incremento en el consumo de vapor para evaporar esa agua, además el precio del azúcar era mucho más alto y el combustible mucho más barato que en la actualidad, Rhojraj⁽¹⁸¹⁾ en la India en 1986 también habla de usar una cantidad de agua de imbibición de 200 % en peso de la fibra en caña que equivale entre (28-30) % del peso de la caña.

En la literatura se reportan valores del contenido de azúcar en el bagazo alrededor de 2 %, en la zafra de 1995 en un ingenio australiano se reporta un valor de 0,94 % lo cual es fabuloso, con una imbibición de 203 % respecto a la fibra y 27 % caña.⁽⁵⁾ En la zafra 1999-2000, en 61 Ingenios azucareros mexicanos se reportó como promedio de pol en bagazo 0,73 %⁽⁴³⁾, Gil⁽⁹²⁾ reporta valores de pol en bagazo entre (2,56 – 3,57) % para 70 °C de temperatura del agua de imbibición y 200 % agua de imbibición con respecto a la fibra ($\lambda = 2$, relación cantidad de agua de imbibición /fibra en caña) en dos ingenios de la provincia de Las Tunas, en Ecuador⁽⁸⁰⁾ 3,09 %, según la “Australian Academy of Technological Sciences and Engineering”⁽³⁴⁾ valores entre (2 – 4) %. Algunos promedios históricos de pol en bagazo de productores destacados de azúcar de caña⁽¹⁷⁰⁾ son: Australia (1,5), Brasil (2,1), Cuba (2,1), E.E.U.U. (2,1), Sudáfrica (1,8), México (2,7) y como promedio (1,9).

En cuanto a la temperatura del agua de imbibición las experiencias hechas al respecto concuerdan poco, pero pueden anotarse los siguientes puntos:

Un ligero aumento de la extracción a favor del agua caliente, algunas veces difícil de cuantificar y frecuentemente desechable.

Los molinos toman con mayor dificultad el bagazo imbibido con agua caliente.

La imbibición con agua caliente tiene la gran ventaja de economizar agua fría y dar un excelente uso a las aguas de retorno de los últimos cuerpos del múltiple efecto.

Por mucho tiempo se creyó que la imbibición con agua caliente tenía la desventaja de aumentar la proporción de ceras que pasaba al jugo mezclado, sin embargo, Honig en el 8^{vo} Congreso International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT) da los resultados de experimentos en Java, los que no concluyen que la imbibición con agua caliente a (85 – 95) °C extraiga más cera que a 28 ° C. La proporción varía de (30 – 45) % en ambos casos, pero no se afecta notablemente con la temperatura del agua de imbibición.⁽¹¹⁸⁾

La temperatura conveniente del agua de imbibición es entre (80 – 85) ° C.^(117,118)

Influencia del uso de la imbibición en la humedad del bagazo.

Por diversas experiencias se conoce que la humedad del bagazo final aumenta con la intensidad de la imbibición. En Australia (ISJ, 1955) se encontró en un caso que la humedad aumentó del 47,4 al 50 % cuando λ pasó de 2 a 2,85; el último molino no remueve completamente del bagazo el exceso de agua agregada.^(118,122)

Mientras mayor sea la temperatura del agua de imbibición, con mayor temperatura llegará el jugo a los calentadores primarios, por lo que la temperatura a alcanzar por este en este intercambiador se obtendrá con menores consumos de vapor de escape.

Humedad y preparación del bagazo .

El contenido de humedad del bagazo varía en el rango del (48–55) % de su peso total⁽¹⁹⁴⁾, lo común es un 50 % de humedad, mientras que con un buen trabajo en los molinos y mayor preparación de la caña su contenido será del 40 %. Algunas fábricas de Hawai y Formosa tienen humedad del orden del 38 %, estas cifras son excepcionales.⁽¹¹⁸⁾ En Australia en la zafra de 1995 se reporta una humedad en el bagazo de 50.44 %⁽⁵⁾ y en

sentido general en ese país se comporta entre (45-53) %, Ecuador⁽⁸⁰⁾ 50,91 % en la zafra 1998 – 1999, en Cuba se toma con frecuencia 50 %.

Es criterio generalizado⁽¹⁹⁴⁾, y cita otros autores, Llorens, Rubio que la humedad disminuye la temperatura total del horno con lo cual se reduce la velocidad de combustión, Cundy⁽⁶²⁾ precisa que su contenido es el que más negativamente influye sobre las características de la combustión del bagazo y hay que prestarle especial interés cuando se organiza la combustión en suspensión total puesto que es requisito indispensable una rápida velocidad de reacción para la operación adecuada del quemador y Dixon confirma que la estabilidad de la zona de combustión es susceptible a las variaciones de la humedad del bagazo.

A medida que aumenta el grado de preparación de la caña en el tándem, se alcanza mayor rendimiento en la extracción de azúcar, pero el bagazo integral se hace más fino, es decir disminuye la relación fibra/meollo, provocando que este sea más fácilmente arrastrado por el flujo de gases, lográndose sólo una combustión parcial dentro el horno, aumentando las pérdidas de calor por incombustión mecánica volátil, afectando la eficiencia del generador de vapor.^(16,17,39,192,217)

El calor específico de combustión es la propiedad más importante de los combustibles y para el caso del bagazo depende principalmente de la humedad, el contenido de azúcar, el contenido de ceniza y en cuarto grado de la variedad de caña. Su valor puede ser calculado por las siguientes ecuaciones: Rubio⁽¹⁹²⁾, Sarría⁽¹⁹⁴⁾ se refieren a las ecuaciones para determinar el calor específico de combustión superior e inferior de Hugot⁽¹¹⁸⁾

$$CECS = 19255 - 31,39*S - 192,55*W, \text{ kJ/kg}$$

$$CECI = 17790 - 31,39*S - 203*W, \text{ kJ/kg}$$

Además Hugot propone una fórmula simplificada para calcular el calor específico inferior del bagazo que es muy utilizada en la actualidad.

$$CECI = 17799,3 - 20305,98*W, \text{ kJ/kg}$$

Upadhiaya⁽²⁰⁶⁾ propone las siguientes fórmulas :

$$CECS = 19268*[1-(W+A)/100], \text{ kJ/kg}$$

$$CECI = 17802*[1-(W+A)/100], \text{ kJ/kg}$$

Y en su trabajo menciona otros autores y las fórmulas propuestas por ellos.

Fórmula de Parr.

$$CECS = 19042*\text{Fibra \% bagazo} + 16927*S, \text{ kJ/kg}$$

Para las siguientes condiciones:

Gases de escape a temperatura de 260 °C.

Exceso de aire 100 %.

Contenido de ceniza en el bagazo 1 %.

Pérdidas de calor por radiación 10 %.

Fórmula de Van der Horst.

$$CECS = 19050 - 42 *S - 190 * W, \text{ kJ/kg}$$

$$CECI = 17800 - 42 *S - 201 * W, \text{ kJ/kg}$$

Fórmula de Hessey.

$$CECS = 19410 - 51,6*S - 194*W, \text{ kJ/kg}$$

$$CECI = 18111 - 51,5*S - 205*W, \text{ kJ/kg}$$

Las fórmulas de Hessey las obtuvo para las condiciones de Queensland usando la fórmula de Van der Horst:

El valor calórico superior de fibra seca, lavada, libre de cenizas es 19959 kJ/kg.

El valor calórico superior de sólidos solubles en el bagazo es 16545 kJ/kg.

El contenido de ceniza en el bagazo seco es 2,7 %.

Según Southern African Sugar Technologists Laboratory Manual ⁽¹¹⁾ puede determinarse:

$$\text{CECS} = 19605 - 196,05 * W - 196,05 * A - 31,14 * \text{Brix} , \text{ kJ/kg}$$

$$\text{CECI} = 18309 - 207,6 W - 196,05 * A - 31,14 * \text{Brix} , \text{ kJ/kg}$$

Consideraciones:

La ceniza es considerada como una variable independiente.

El término sólidos solubles (Brix) es preferible a la pol en bagazo como término en la ecuación por dos razones:

El Brix es más fácil de obtener en el análisis de laboratorio que la pol en bagazo.

El coeficiente de Brix es menos sensible que la pol en bagazo a las variaciones de la pureza del jugo residual.

Lo que ocurre que en los laboratorios de los ingenios azucareros cubanos se determina la pol en bagazo y no el brix en el bagazo.

Fórmula de Australia.

$$\text{CECS} = 19574 - 38,177 * S - 195,74 * (W + A) , \text{ kJ/kg}$$

$A = A' (1 - 0,01 * W)$, donde A' es el % de ceniza en fibra seca.

CECS, CECI – Calor específico de combustión superior e inferior del bagazo, respectivamente.

S – Contenido de azúcar (%) en bagazo.

W – Humedad (%) en bagazo.

Brix – Contenido de sólidos solubles % en bagazo.

Para cálculos del MINAZ se puede utilizar $\text{CECI} = 7660 \text{ kJ/kg. (194)}$

Al incrementar 1 % la humedad del bagazo puede representar una disminución del calor de combustión del orden del 2 %.

El contenido de fibra en la caña ejerce una marcada influencia en el balance entre la energía disponible y las necesidades del proceso. Un bajo contenido de fibra en la caña procesada, no sólo significa menos combustible disponible, sino a causa del aumento de proporción del jugo, una mayor tarea de evaporación y por tanto una mayor demanda de vapor.

Se reportan valores de fibra en caña en el rango (12 – 16) % , en la zafra de 1995 en una fábrica australiana ⁽⁵⁾ se reportó un contenido de fibra en caña de 13.30 % , Guzmán ⁽¹¹⁰⁾ reporta 13,5 % en el CAI “5 de Septiembre” de la provincia de Cienfuegos, en Ecuador ⁽⁸⁰⁾ 14,48 % , en México en la zafra 1999-2000 ⁽¹²⁾ se reportó un promedio de fibra en caña de 13,53 % . Algunos promedios históricos de fibra en caña de productores destacados de azúcar de caña ⁽¹⁷³⁾ son: Australia (14,1), Brasil (14,2), Cuba (13,7), E.E.U.U. (12,3), Sudáfrica (15,2), México (14,2) y como promedio (13,9).

Mientras mayor uso se haga de las extracciones, es decir, los vapores secundarios en los calentadores en varias etapas y en los tachos, obtenido en los evaporadores en lugar de vapor de escape, menor será el consumo de vapor de escape para las necesidades tecnológicas.

En el trabajo se utilizan los esquemas de calentamiento- evaporación – cocción mas generales encontrados en la industria azucarera cubana, cuádruple efecto sin extracciones y quíntuple efecto con extracciones.

1.4.- La industria azucarera cubana.

1.4.1.- La industria azucarera cubana actual.

En la industria azucarera hay instalados 339 turbogeneradores con una potencia total de 818 MW

de los que hay 641 MW sincronizados al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) en 82 Ingenios.⁽¹⁴⁸⁾ El índice de generación promedio obtenido en los últimos años está entre (18-23) kW-h/tcm, y pudo obtenerse 41 kW-h/tcm sin cambios de tecnología.^(41,61) En 1991 la industria azucarera cubana generó el 9,6 % de la energía eléctrica generada en el país y cubrió el 56,6 % del consumo de energía eléctrica de todo el sector azucarero.⁽⁶³⁾

El autoabastecimiento de energía eléctrica entre los años 1989 – 2000 es del (60 al 70) % .

Todavía existe cierto grado de dependencia de las provincias al SEN en tiempo zafra los cuales se muestran en el (anexo 1.4) y el grado de autoabastecimiento de energía eléctrica del MINAZ nacional en los últimos 12 años se muestran en el (anexo 1.5). El consumo de portadores energéticos, los índices de generación y consumo de energía eléctrica, los índices de consumo de portadores energéticos por tonelada de caña molida y por tonelada de azúcar producida en el MINAZ en los años 1986-1995 aparecen en los (anexos 1.6,1.7,1.8 y1.9).

Existen más de 860 calderas instaladas de las que más del 52 % tienen 45 años o más de explotación con una eficiencia promedio del 65 %. El 59 % de las calderas trabajan a 1,08 MPa (11 atm), 31 % a 1,76 MPa (18 atm), y el resto a 2,74 MPa (28 atm).

Generalmente abastecen turbinas de contrapresión con potencias de hasta 5000 kW.⁽⁴¹⁾

El proceso demanda unos 500 kg/tcm de vapor como promedio.⁽¹⁴⁸⁾

Según se reporta en la literatura el índice de consumo de vapor en la industria azucarera actual oscila entre 300-500 kg/tcm, aunque existen fábricas que presentan índices muy inferiores a estos valores. Este consumo en las fábricas de azúcar puede variar entre el (40-70) % de la caña molida. En nuestro país se estima una cifra promedio del 55 % de la caña molida.^(39,137,150) Este índice pudiera mejorarse utilizando al máximo las extracciones en el área de evaporación y el empleo de nuevas tecnologías.

De acuerdo a la norma potencial de molida los ingenios pueden agruparse de la siguiente manera:

Norma potencial de molida	Cantidad de ingenios	% del total
Hasta 200000 @/día	30	19
200000 – 380000 @/día	74	47
400000 – 580000 @/día	26	17
600000 – 800000 @/día	17	11
Mas de 900000 @/día	9	6

Tabla 1.7. Grupos de ingenios de acuerdo a la norma potencial de molida.

Las disponibilidades de combustible existentes permitirían generar hasta 100 kW-h/t.c.m. si se mantuvieran los consumos actuales de vapor del proceso azucarero y modificando los procesos de generación de vapor y electricidad para calderas de alta presión – temperatura y turbinas de extracción – condensación (AP/TVEC).⁽⁶¹⁾

De reducirse los índices de consumo de vapor en el proceso, el índice de generación en zafra pudiera elevarse hasta 140 kW-h/t.c.m. y de extenderse la operación de las plantas cogeneradoras de la industria azucarera al período de no zafra consumiendo los excedentes de bagazo pudieran producirse además 160 kW-h/t.c.m.⁽⁶¹⁾

Si con mejoras del proceso de producción azucarera, y sus consecuentes disminuciones de los consumos de vapor, se instalaran generadores de biomasa con turbinas de gas y ciclos combinados (GB/TGCC) que consumen paja de caña además de bagazo, pudieran

generarse 200 kW-h/tc molida en tiempo de zafra y 400 kW-h/tc molida en tiempo de no zafra.⁽⁶¹⁾

1.4.2.- Perspectivas a corto plazo (año 2002).

Este programa incluye un total de 130 ingenios que en el período que se analiza tienen más perspectivas de hacer zafra por su potencial cañero, por las características y estado técnico de su equipamiento actual y su capacidad de molida. Esta selección lleva implícito obtener mayor eficiencia energética del sistema.

De los 130 ingenios azucareros de mayores perspectivas de hacer zafra por niveles de presión se distribuyen como sigue:⁽¹⁴⁸⁾

Nivel de presión	Cantidad de ingenios	% del total
hasta 11 atm.	25	19,23
hasta 18 atm.	76	58,46
hasta 28 atm.	22	16,92
Más de 28 atm.	7	5,38

Tabla 1.8. Clasificación de los ingenios azucareros de acuerdo a los niveles de presión. En estos ingenios quedarán 290 turbogeneradores, con una capacidad de generación total de 1106 MW, reducir el índice de consumo de energía eléctrica de 32 kW-h/tcm a menos de 28 kW-h/tcm en período de zafra, e incrementar el índice de generación hasta 27 kW-h/tcm logrando un autoabastecimiento del 93 % en zafra.⁽¹⁴⁸⁾

Elevar la eficiencia energética de forma que se alcancen altos sobrantes de bagazo para destinarlo a la producción de energía, sustituir fuel-oil o a la producción de derivados con indicadores económicos ventajosos.

Revalorización de la tonelada de bagazo en distintas producciones.⁽¹⁴⁸⁾

Energía eléctrica 13,3 – 21,3 USD (según precio: 50 – 80 USD/MW-h)

Tableros 30,7 USD (precio de venta 400 USD/m³)

Furfural 50 USD (precio de venta 1000 USD/ton)

Producción de Papel 21,98 USD

Estos valores nos dan una idea hacia donde dirigir los esfuerzos de acuerdo con el mercado.

1.4.3.- Necesidad de remodelación energética y del proceso en la producción de azúcar.

La vida útil estimada de una instalación de generación energética en un central azucarero es de 15 años aproximadamente, pero la edad promedio de estas instalaciones en Cuba oscila alrededor de 25 años. La estrategia que se sigue es priorizar las instalaciones más urgidas de remodelación energética y acometer, simultáneamente, inversiones de modernización productiva como la electrificación del tándem, la automatización de los procesos, el empleo de nuevas tecnologías en el proceso de fabricación, etc.

Un ingenio convencional importa parte de sus necesidades energéticas produciendo una pequeña cantidad o nada, de exceso de bagazo, siendo incapaz de generar más electricidad que la empleada en su propio proceso fabril. El mismo ingenio azucarero puede, con la ayuda de tecnologías conocidas, incrementar su rendimiento energético. El proceso de remodelación energética de un ingenio azucarero hay que dividirlo en tres etapas.^(97,98,153)

En la primera etapa se busca lograr que el ingenio no compre energía de una fuente externa.

En la segunda etapa se espera obtener bagazo en exceso y/o realizar cogeneración para exportar.

Finalizada la tercera etapa el ingenio debe estar en condiciones de vender cantidades significativas de electricidad.

Primera Etapa: El objetivo de esta etapa es eliminar la dependencia de fuentes externas de suministro de energía sin que esto signifique la introducción de grandes cambios en la planta.

La primera consideración a tener en cuenta es lograr una conversión tan eficiente como sea posible de la energía del bagazo en vapor. Para esto se deben mejorar las calderas, estas deben quemar el bagazo en forma eficiente y operar a una presión mínima de 21 atm a 350°C .

Si el ingenio cuenta con calderas que generan vapor a una presión de 15 atm a 250°C o menor, las posibilidades de introducir mejoras en todo el sistema son limitadas.

Si fuera el caso de que el ingenio requiera instalar nuevas calderas, es preferible comenzar directamente por la etapa 2 ó 3 . Si las calderas fueran a reemplazarse, es conveniente trabajar con presiones mayores considerando la eficiencia global.

Cuando se plantea incrementar la eficiencia de una caldera, deben fijarse metas del orden de (80 – 85) %.

Las turbinas de vapor deben ser capaces de operar a 21 atm a 350°C. Es recomendable si se buscan calderas eficientes alcanzar temperaturas de vapor de 350°C a esta presión, de igual forma es necesario sustituir las viejas turbinas de vapor por otras a múltiples etapas cuando el vapor así lo permite.

Reducir el consumo de vapor en el proceso y por lo tanto incrementar la economía del bagazo, realizando extracciones de los evaporadores para calentamiento de jugo y tachos al vacío.

El vapor de escape utilizado en el proceso debe ser siempre un poco mayor que el vapor utilizado en los motores primarios para evitar pérdidas por venteos a la atmósfera.

Buen aislamiento de las líneas de vapor, recuperación del calor de las purgas de las calderas y condensados de evaporadores.

Segunda Etapa: (Exceso de bagazo)

Deben usarse la mayor cantidad posible de accionamientos eléctricos.

Una turbina grande será más eficiente que una gran cantidad de turbinas pequeñas.

Si se presenta la situación de cambiar calderas o construir nuevas, es recomendable que las nuevas unidades operen a una presión de 42 atm (450 °C) o mayores. En este caso si contamos con una cantidad considerable de exceso bagazo, que permita la instalación de un turbogenerador, será una buena elección una turbina de extracción – condensación.

De esta forma, es posible obtener la máxima eficiencia para la conversión de vapor en electricidad con suficiente vapor de baja presión (1,5 atm) disponible para el proceso.

Una planta con estas características puede exportar del (15 – 20) % del total de la energía producida.

Es importante realizar una planificación adecuada en la instalación de motores eléctricos en la planta usando aquellos acordes a la capacidad requerida para su aplicación y no mayores.

Tercera Etapa: (Cogeneración en cantidades significativas de energía).

En esta etapa la energía debe conservarse en la forma más eficiente que sea posible (Primera Ley de la Termodinámica), y la conversión de la energía contenida en el vapor en energía mecánica o eléctrica (Trabajo), debe responder a las condiciones establecidas en la Segunda Ley de la Termodinámica : Alta presión – Alta temperatura para el vapor vivo y Baja presión – Baja temperatura para el vapor de escape. Las calderas deben ser altamente eficientes, produciendo vapor a una presión de 60 kg/cm² (500°C), con una eficiencia en la combustión del bagazo de 85 % o más. Todo el vapor generado debe conducirse directamente a la central eléctrica con turbinas de Extracción – Condensación. Una planta moderna de este tipo tiene un índice de generación total de 150 kW-h/tcm.

El accionamiento de molinos será por motores eléctricos.

La evaporación deberá contar con equipamiento de alta tecnología, como son los evaporadores de placas o evaporadores de película descendente, en la estación de tachos, tachos al vacío continuos para todas las masas cocidas.

Se automatizará el proceso.

Se deben usar las extracciones de los últimos vasos evaporadores para calentamiento como medida de minimizar el consumo de energía.

Un ingenio de estas características consume (30–40) kWh-h/t.c.m. y podrá exportar (110–120) kWh-h/t.c.m. logrando ingresos significativos.

Debido a la escasez de recursos energéticos, es recomendable que todos los ingenios azucareros tomen las medidas adecuadas para convertirse en exportadores netos de energía eléctrica, realizando minuciosamente los análisis económicos de las inversiones requeridas, por lo tanto es recomendable que la remodelación energética sea realizada en etapas.

1.5- La cogeneración en la industria azucarera mundial de azúcar de caña.

La caña de azúcar crece en 60 países, la mayoría de los cuales se consideran subdesarrollados. En el mundo se producen anualmente unos 69 millones de toneladas métricas de azúcar a partir de unos 621 millones de toneladas métricas de caña. Las fábricas de azúcar se autoabastecen de energía al utilizar el bagazo como combustible para producir vapor y la energía que necesitan para procesar el azúcar. Con algunas excepciones el objetivo de los operadores de las fábricas se restringe a mantener un balance entre la cantidad de bagazo disponible y la cantidad de vapor y electricidad necesarios para el proceso del azúcar.⁽¹³⁶⁾

Sin embargo existe mundialmente un excedente global de bagazo que se estima en 6 millones de toneladas, la mayor parte de las cuales se desecha.

Como promedio la fábrica típica consume 550 kg de vapor y genera menos de 20 kW-h/tcm de energía eléctrica. El consumo de vapor en una fábrica moderna bien diseñada puede ser tan bajo como 350 kg/t.c.m. y puede producir más de 50 kW-h/tcm de energía eléctrica excedente. Con estos índices en todo el mundo se podrían lograr 50 TW-h de energía eléctrica a exportar a partir del bagazo en la industria azucarera.⁽¹³⁴⁾

El desarrollo de este potencial de energía debe ser particularmente beneficioso para países subdesarrollados. Con su rápido incremento de población, es esencial que estos países encuentren fuentes de energía adicionales para su desarrollo mediante una base industrial capaz también de dar empleos y que puedan ayudar a elevar el nivel de vida estándar de la población. La energía de la caña como una fuente renovable de energía puede desempeñar un papel importante en proveer los requerimientos adicionales de energía.

En Hawai durante muchos años ha sido perfeccionada y usada la tecnología para la maximización de la obtención de la electricidad a partir de bagazo. La clave para la

producción de electricidad en una fábrica de azúcar es el uso de vapor generado a altas presiones y temperaturas junto con el uso de turbogeneradores de extracción-condensación.

La industria azucarera de Hawai en la actualidad produce un promedio de 91.5 kW-h/t.c.m, de la cual 69 kW-h/t.c.m se produce a partir de bagazo. Individualmente algunas fábricas producen más de 160 kW-h/t.c.m. En Hawai, Maui y Kauai las fábricas de azúcar producen 52 %, 30 % y 33 % de las necesidades eléctricas de la red pública respectivamente, contribuyendo de manera significativa a las necesidades de la red pública.^(1,128), pero Hawai no es ya el único en la producción de excedentes sustanciales de energía de la caña. En Isla Mauricio la industria azucarera contribuye en más del 20 % de la energía usada en la red pública general y en la Isla Reunión una fábrica de azúcar produce el 11 % total de la energía pública. La exportación de energía a partir de la caña de azúcar también ha comenzado en Costa Rica y Tailandia. La mayoría de estos países utilizan un bajo número de generadores de vapor de presiones de 4.5 MPa y más, bajos % de coeficientes de exceso de aire y módulos de eficiencia. Utilizando en la mayoría de los casos turbinas de extracción - condensación.

Una encuesta reciente hecha acerca de las fábricas de azúcar en el mundo por Winrock International indican que los principales impedimentos que se le presentan a la generación de potencia exportable asumiendo que exista una red regional o pública son:⁽¹¹³⁾

Altas inversiones de capital para las calderas y generadores apropiados.

Zafra cortas.

Leyes en contra de la exportación de electricidad por cogeneración.

Bajos precios de compra de la electricidad.

Baja eficiencia térmica en las fábricas que conlleva al déficit de bagazo.

El uso de combustibles económicamente apropiados para la generación en el período de no zafra es una consideración importante. En algunas áreas el carbón es el combustible alternativo preferido por su precio favorable, pero no está realmente disponible en la mayoría de las fábricas. El uso del carbón requiere de calderas equipadas con una parrilla viajera, condición que generalmente falta en las calderas bagaceras.

En las fábricas de azúcar típicas, han sido usadas tradicionalmente calderas de baja presión y generadores de contrapresión, como el equipamiento estándar para generar potencia y mantener el balance interno entre la producción de bagazo, vapor y electricidad.

La electricidad generada a partir de la caña de azúcar puede sustituir al petróleo como fuente de electricidad en muchos países de Asia y América Latina donde ésta se cultiva y puede sustituir gran parte de la electricidad que se consume en países donde es predominante la producción de caña de azúcar (Mauricio, Islas Reunión, Isla Fiji, Cuba), donde la producción per cápita es de alrededor de 500 kg o más.⁽¹³³⁾

A pesar de que el potencial para la exportación de electricidad a partir de la caña de azúcar es grande, la mayoría de las fábricas de azúcar del mundo sólo generan suficiente electricidad para abastecer sus necesidades propias, por lo tanto la cantidad de electricidad exportada mundialmente a partir del bagazo, es menos que 1 TW-h anual, valor que se queda muy por debajo de lo posible.

La mayoría de las fábricas que no se ocupan de maximizar su generación de electricidad para exportar tienen sus capacidades de generación justas para lograr dos objetivos básicos:

Satisfacer la demanda de vapor y electricidad para el procesamiento de la caña de azúcar.

Para consumir todo el bagazo producido, lo cual (y no es una coincidencia) se corresponde con la cantidad de vapor generado al quemar todo el bagazo producido. Los requerimientos de electricidad para las fábricas de azúcar son típicamente del rango de (15-29) kW-h/t.c.m. y por lo tanto, las fábricas que no exportan electricidad, solo tienen la capacidad suficiente para satisfacer los requerimientos de electricidad justos y esto lo hacen generalmente con unidades ineficientes.

Por el contrario, las fábricas de azúcar que se esfuerzan por maximizar la producción de electricidad y la exportación de ésta, operan con grandes y eficientes sistemas de cogeneración, mientras que las fábricas con ineficientes sistemas de cogeneración tienen típicamente 6 generadores de vapor como promedio operando a una presión de (1-3) MPa y capacidades en los turbogeneradores para producir de 5 a 20 kW-h/t.c.m., las fábricas con grandes sistemas de cogeneración tienen 1 ó 2 grandes generadores de vapor operando a 5 MPa y capacidades en los turbogeneradores promediando los 90 kW-h/t.c.m.

En México existen cerca de 300 permisos para autoabastecimiento industrial con una potencia nominal de 3300 MW, aunque varios de ellos no trabajan u otros son servicios de emergencia. La capacidad total instalada es de 2700 MW, el 60 % es de plantas termoeléctricas. En la actualidad el programa nacional de modernización energético reglamentará mecanismos para que la industria genere como mínimo 10 TW-h anuales para el 2000.

Se puede plantear que en sentido general se han modificado conceptos en la mayoría de los países del mundo que favorecen y estimulan la cogeneración por lo cual a partir de la mitad de la década del 80 y los primeros años de los 90 se ha logrado un incremento sustancial de la potencia instalada para cogenerar, lo más importante es las prioridades que dan la mayoría de los países a la energía eléctrica obtenida por cogeneración y especialmente las que utilizan recursos energéticos renovables, las cuales se compran a precios diferenciados, ya que las compañías de distribución de electricidad tienen en cuenta costos evitados y las ventajas medioambientales de dichas plantas. ⁽¹⁵⁴⁾

En Brasil la producción de energía eléctrica por cogeneración en la industria azucarera está entre (11,71 – 15,62) kW-h/t.c.m., valores estos extremadamente bajos. ⁽¹⁷⁾

En algunos países aunque la energía eléctrica obtenida no proviene totalmente de la industria azucarera es importante señalar el aporte que representa la energía eléctrica obtenida por cogeneración en el balance energético de esos países.

En España la cogeneración comenzó a desarrollarse a partir de 1986, la potencia instalada antes de 1986 eran 750 MW, a finales de 1996 2231 MW, un 6 % de la potencia eléctrica instalada actualmente procede de las plantas de cogeneración, está por debajo de la media europea y muy por debajo de algunos países como Holanda, Dinamarca o Finlandia donde se supera el 30 %. Se prevén para el año 2010, porcentajes del orden del (15 - 20) %, lo que supondría una potencia instalada de (4-7) GW. ⁽¹⁵¹⁾

En Italia debido a las emisiones de CO₂ y la importancia de la electricidad, se han hecho modificaciones institucionales que estimulan la cogeneración mediante fuentes renovables o aquellas con elevado índice de eficiencia, para lo cual las empresas exportadoras de esta energía se les tiene en cuenta en los precios, los costos evitados y el interés específico nacional.

En 1991 los industriales italianos produjeron 29,5 TW-h, 10.8 % por encima de la producción del

año 1990 y aproximadamente el 13,3 % de la producción nacional.

El mantenimiento de las unidades, sistemas y gestión de transporte, distribución y venta se confían a ENEL, al igual que España ENEL tiene en cuenta los costos evitados y estimula el uso de las fuentes renovables, mediante un precio o impuesto adicional que paga el consumidor final.⁽⁴⁵⁾

1.6.-La cogeneración y el medio ambiente.

La situación ambiental en el mundo es uno de los problemas de más importancia a resolver, esto ha dejado de ser una preocupación de grupos minoritarios, generalmente dirigían sus acciones a resolver situaciones concretas y se han convertido en un problema que exige soluciones coordinadas a nivel mundial por parte de los gobiernos y los distintos agentes sociales.^(2,43)

La causa fundamental que influye en el deterioro del medio ambiente es el elevado consumo de energía que se produce en el planeta. El desarrollo industrial, la carencia de combustible y la pobreza de las poblaciones han traído graves consecuencias como son el envenenamiento de los mares y ríos, la contaminación del aire, el debilitamiento y perforación de la capa de ozono, ha saturado la atmósfera de gases que alteran las condiciones climáticas con efectos que ya empezamos a padecer, numerosas especies se extinguen y los bosques desaparecen.⁽⁴³⁾

En los últimos años se ha comenzado a trabajar intensamente, en la búsqueda de soluciones a los principales problemas y en la organización de las estructuras necesarias, tanto a nivel político como técnico, que permita llevar a cabo el trabajo necesario para frenar el deterioro creciente del medio ambiente.⁽⁸⁴⁾

La generación de energía es desafortunadamente una de las causas que constituyen de manera importante a aumentar los principales problemas, como el efecto invernadero y las lluvias ácidas.

Los sistemas de cogeneración son una de las grandes opciones para enfrentar el cambio climático, Roqueta (44) señala que para producir un kW eléctrico, la contaminación y la eficiencia van paralelas, según aumenta la eficiencia de la planta de cogeneración, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero.

La energía renovable es la mejor opción de 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.^(22,84)

El balance energético mundial en noviembre del año 2000 por fuentes de energía muestra el siguiente comportamiento: Petróleo (36,8 %), carbón (23,7 %), gas (20,1 %), es decir, 80,6 % los combustibles fósiles, energía nuclear (6,6 %) y las energías renovables (12,8 %). (Ver anexo 1.10)

Los combustibles fósiles todavía generan el 64 % de la producción mundial de energía eléctrica, el 17 % la energía nuclear y el 19 % las energías renovables.⁽¹⁸⁰⁾

La biomasa en todas sus formas representa el 12,4 % de la energía mundial equivalente a 25 millones de barriles – día , es la mayor fuente de energía en países en vía de desarrollo (75 % de la población mundial y un estimado del 90 % para el 2050), abasteciendo el 35 % de toda la energía.^(180,191)

Una cualidad importante que se atribuye a la biomasa está referida a las emisiones de CO₂, ya que las emisiones producto de la combustión de la biomasa son muchas veces inferiores a la demanda de la planta que dio origen a esa biomasa. Sin embargo las emisiones de combustibles fósiles no pertenecen al ciclo atmosférico, sino al geológico.⁽⁸⁴⁾ En el caso del bagazo, se puede decir, que las emisiones resultantes de

su combustión son fundamentalmente partículas y bajas cantidades de óxido de azufre y nitrógeno.

Debemos tener en cuenta que la dispersión de los contaminantes emitidos por los sistemas de cogeneración con motores diésel, calderas de combustóleo o carbón, es más nociva para el medio ambiente que las de grandes centrales generadoras, que cuentan con chimeneas muy altas y con equipos anticontaminantes.⁽⁵⁴⁾ Sin embargo los esquemas de cogeneración pueden utilizar todas las tecnologías que minimicen los efectos contaminantes al medio ambiente, además la disminución del consumo de energía primaria que se logra en las plantas de Cogeneración, constituyen en sí una forma de minimizar los efectos medioambientales de la generación de energía eléctrica. En un sistema de cogeneración que utilice gas se emiten 0,1 lb/100 kW-h de sulfuros, 0,4 lb/100 kW-h de NO_x y 0,05 lb/100 kW-h de partículas, en el caso de la cogeneración con el empleo de combustóleo o carbón se emiten 2 lb/100 kW-h de SO_x, 0,8 lb/100 kW-h NO_x y 0,15 lb/100 kW-h de partículas. En el caso de los motores de combustión interna o diesel se emiten 0,3 lb/100 kW-h de SO_x, 2,1 lb/100 kW-h de NO_x, y 0,1 lb/100 kW-h de partículas. Como se puede observar la cogeneración con gas supera al resto de los combustibles desde el punto de vista de las emisiones al medio ambiente.⁽⁷⁹⁾

Es reconocido por diversos autores que para una zafra de 8×10^6 tm de azúcar se consumen aproximadamente 21×10^6 tm de bagazo, con 50 % de humedad, lo que equivale a $3,7 \times 10^6$ tep.

A continuación puede apreciarse la generación de CO₂ y SO_x comparando bagazo y petróleo.⁽¹⁷⁸⁾

Combustible	Consumo (tm)	Generación de CO ₂ (tm)	Generación de SO _x (tm)
Petróleo	$3,7 \times 10^6$	$10,7 \times 10^6$	$1,85 \times 10^6$
Bagazo	21×10^6	$18,5 \times 10^6$	-

Tabla 1.9. Nivel de emisiones de CO₂ y SO_x del bagazo y el petróleo.

Como se aprecia la cantidad de bagazo consumida es mucho mayor que la de petróleo, lo cual está dado por el hecho de que el calor específico de combustión del bagazo es aproximadamente seis veces inferior al del petróleo equivalente, la generación de CO₂ cuando se quema bagazo es muy superior a la cantidad que se emitiría si se utilizara el hidrocarburo. Esta comparación puede ser engañosa, ya que mientras el petróleo hace un aporte neto de este gas, el bagazo como biomasa combustible, mantiene un equilibrio, ya que durante su crecimiento la planta de caña de azúcar absorbe una cantidad similar a la que aporta cuando se quema en los hornos, por lo que la ventaja, desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, en especial en la contribución al calentamiento global producido por el efecto invernadero, es evidente.

En lo referente a la generación de SO_x, la comparación es muy favorable para el bagazo, dada la muy escasa presencia de azufre en su composición elemental.

El NO_x aumenta cuando las temperaturas sobrepasan los 1300 °C, esta temperatura no se alcanza en los hornos que existen en la industria azucarera cubana. Solo las diseñadas para la combustión en pila, bajo determinadas condiciones de operación, pueden lograr temperaturas de ese orden. Los hornos tradicionales en la generación de vapor a nivel nacional, en la actualidad, es inferior al 40 %.

La caldera RETAL, reconocida por su baja temperatura en el hogar, lo que la hace muy ventajosa para evitar la contaminación atmosférica por emisiones de NO_x .

Un aspecto negativo a tener en cuenta cuando se utiliza el bagazo como combustible es la emisión de partículas sólidas.

En Cuba, utilizar las amplias disponibilidades de energía renovable, constituyen la mejor forma de generar energía eléctrica sin grandes consecuencias ambientales. En este sentido la industria azucarera posee el potencial mayor, bagazo, el que al utilizarse para cogenerar permite obtener los siguientes índices de emisiones 18,6 lb/100 kW-h de CO_2 , no emite sulfuros y 0,036 lb/100 kW-h de NO_x . Las grandes cantidades de CO_2 que se emiten son absorbidas por las plantas durante el crecimiento.⁽⁷⁹⁾

Como se puede observar, al utilizar el bagazo u otra biomasa en comparación con los combustibles fósiles, se generan cantidades pequeñas de contaminantes. 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_x en un 90 % y el CO_2 un 60 %.⁽²⁾

Frecuentemente, se dice que una de las desventajas de utilizar la biomasa para la producción de energía, es que esto puede contribuir a la deforestación ya que trae nuevos intensivos para la tala de bosques. Sin embargo el uso del bagazo no ocasiona este inconveniente ya que la caña se produce en ciclos anuales en áreas normalmente deforestadas.

Hoy en el mundo se trata de lograr un compromiso entre el incremento de la producción de energéticos y la cantidad de contaminantes generados, esto tiene que ver con lo que se ha llamado "Desarrollo sostenible", que no es más que mejorar el nivel de vida de las generaciones actuales, sin comprometer el de las generaciones futuras.

La cogeneración ofrece ventajas incuestionables en las emisiones al medio ambiente, al disminuir el consumo de energía primaria; si la cogeneración se logra con el uso de biomasa, existen ventajas adicionales al disminuir la emisión resultante de CO_2 , SO_x y NO_x . En este sentido el uso del bagazo constituye una opción favorable al obtenerse de producciones cañeras, que anualmente se renuevan.

1.7.- Conclusiones Parciales del capítulo.

1.- Para poder auto abastecerse de energía eléctrica se necesita un índice de generación alrededor de (25-30) kW-h/t.c.m., la media en Cuba se encuentra entre (18-23) en los últimos años, lo que determina que dentro de un 30 - 40 % de la energía que se consume sea del SEN, con el potencial que brinda la industria azucarera se puede lograr un 100 % de auto abastecimiento y exportar una cantidad considerable al SEN sin necesidad de grandes inversiones.

2.- No se dispone en la actualidad de modelos matemáticos que relacionen los factores agroindustriales con los principales indicadores termoenergéticos de los ingenios de azúcar de caña, que permitan elaborar un pronóstico de cómo se comportarán los mismos.

3.- La molienda, las materias extrañas entradas a fábrica, la cantidad y temperatura del agua de imbibición a utilizar, la humedad y preparación del bagazo, el contenido de fibra en caña y el esquema de calentamiento- evaporación- cocción donde se incluye el uso de las extracciones, son los factores más importantes a considerar en la obtención de los modelos.

4.- Los criterios que se siguen en el uso del agua de imbibición en la industria azucarera actual son los mismos que se usaban hace más de seis décadas, cuando la relación

precio del azúcar/precio del combustible era mucho mayor y favorecía al uso de mayor cantidad de agua de imbibición.

5.- Los Softwares que existen necesitan un volumen de información extremadamente grande y tienen un elevado nivel de complejidad, además hay incertidumbre en algunos elementos de la información suministrada por ellos.

6.- No existe un procedimiento establecido de remodelación de ingenios azucareros.

7.- La cogeneración utilizando bagazo como combustible ofrece ventajas incuestionables al medio ambiente, al disminuir las emisiones resultantes de CO₂, NO_x y SO_x.

Capítulo II. Obtención de los modelos que relacionan los indicadores fundamentales del balance con los factores agroindustriales.

2.1.- Introducción.

En este capítulo se explica el procedimiento para realizar la investigación experimental, muestra el diseño estadístico experimental seleccionado, las variables independientes, sus niveles, los cuales se determinaron a partir de un análisis estadístico de nueve zafras en un ingenio azucarero de la provincia de Cienfuegos, tomando en cuenta, además, referencias a nivel nacional e internacional.

Un aspecto importante de este capítulo es el procesamiento de los datos y la obtención de los modelos matemáticos para determinar el consumo de vapor de escape en proceso para los esquemas de evaporación más comunes en la industria azucarera cubana (pre-evaporador con cuádruple efecto sin extracciones y pre-evaporador con quíntuple efecto con extracciones), el contenido de sacarosa en el bagazo (Pol en bagazo), humedad del bagazo, bagazo disponible, brix del jugo mezclado y el calor específico de combustión superior e inferior del bagazo.

Se realiza un análisis de sensibilidad de cada modelo en función de las variables independientes y se desarrolla un método gráfico para determinar la cantidad adecuada de agua de imbibición a utilizar para la relación precio del azúcar/ precio del combustible deseado.

Han sido muchos los autores^(37,76,77,89,122,127,167,172,199,202) que han planteado métodos para los balances de masa y energía en los ingenios azucareros. La limitación fundamental de estos trabajos estriba en la necesidad de considerar múltiples alternativas, para lo cual es necesario una gran cantidad de cálculos, esto obligó a los autores a realizar numerosas suposiciones para simplificar estos cálculos, induciendo imprecisiones y limitaciones que posteriormente se reflejan en los análisis.

Los primeros trabajos vinculados con la simulación de los procesos azucareros puede enmarcarse entre los años 1967-1969, aunque el surgimiento más acabado de los sistemas de simulación fue entre 1969-1975.⁽¹⁵²⁾

Los trabajos de modelación de procesos en la industria azucarera de remolacha de Beyer, para la estructura de consumo de energía térmica en el proceso, Radovi para el estudio de configuraciones de evaporadores a múltiple efecto, citados por Benítez⁽²⁰⁾, Urbaniec y Zagrodzki⁽²²²⁾ ilustran los procedimientos y estudios energéticos de este tipo de fábrica para lograr una mayor economía en el consumo de calor, sin entrar en estructuras de consumo complejas.

Los soportes computacionales de simulación ha estado orientada en el ámbito mundial hacia tecnologías de amplia difusión y no hacia la industria azucarera, los softwares existentes para la industria azucarera poseen restricciones impuestas, que los limitan en su rango de aplicación para diagnosticar el estado industrial o el estudio de nuevas variantes de explotación para diferentes configuraciones del esquema tecnológico. El Sistema de Simulación Termoazúcar escapa a esta limitante, pero necesita un volumen de información extremadamente grande, además de la complejidad en el

manejo del mismo, es necesario confeccionar un diagrama de flujo- información (DFI) para su uso que tiene un nivel de complejidad elevado lo que hace que a técnicos y operadores de esta rama les sea difícil su uso.

Benítez ⁽²⁰⁾ propone una metodología de análisis termoeconómico tomando como base el método exergético, término este que no es dominado por los industriales, además la exergía se hace compleja al definir su estado de referencia para el cálculo de la componente química, lo que ocurre cuando en el proceso objeto de análisis se desarrollan reacciones químicas.

Existen varios Softwares que realizan el balance térmico de ingenios azucareros entre los cuales podemos mencionar los más utilizados Energía, AGE, Optimo, SOOCA, el Sistema de Simulación Termoazúcar y otros, los cuales determinan en el caso de los tres primeros el balance térmico integral con los indicadores fundamentales del balance sin trabajar el área de tándem y purificación asumiendo una cantidad de jugo mezclado lo cual introduce un error, no permiten hacer cuadros de las cuentas de Brix, Pol y Pureza lo que impide conciliar los datos del laboratorio con los que se utilizan en el balance, utilizan una cantidad de datos de laboratorio y mediciones en el proceso muy grande, además que en la mayoría de los casos se hace engorroso el trabajo con ellos, El sistema de Simulación Termoazúcar si incluye el área de tándem y purificación y es un sistema que los resultados obtenidos con su aplicación han sido validados y se hace referencia en varias tesis doctorales, pero necesita de la confección de un Diagrama de Flujos de Información a partir del Diagrama de Flujo de Proceso que es muy complejo y trabajoso y el que va a utilizarlo necesita de adiestrarse en el manejo del mismo, lo cual ha limitado su utilización para los que dirigen y operan el proceso azucarero en nuestros ingenios, utilizando otros de menos complejidad.

Por esta razón se buscan los modelos de pronóstico que aún sin necesidad de estar ejecutándose el proceso y conociendo las características de la materia prima, del área de extracción del jugo donde se incluye la clase de imbibición y el esquema de evaporación, permita una evaluación de cómo se comportará el ingenio energéticamente.

En el caso de la cantidad de agua de imbibición, para distintos precios del azúcar crudo y del bagazo para usarlo como combustible y otros usos, se ofrece un gráfico donde se puede determinar la cantidad adecuada a utilizar.

2.2.-Datos experimentales.

Para obtener los valores de las variables independientes se realizó el análisis estadístico de los datos obtenidos durante nueve zafras, con mediciones diarias, decenal, y por zafra, estableciéndose los niveles (superior, medio, e inferior) de cada variable, se tuvieron en cuenta reportes a nivel nacional e internacional.

Para la validación de los procedimientos propuestos por el autor se utilizaron los valores medios de las mediciones.

Los datos tomados en el laboratorio fueron verificados a través de los lazos de control del Sistema de Simulación Termoazúcar, los instrumentos utilizados incluyendo los del laboratorio de los CAI estudiados fueron verificados y certificados por la Oficina Territorial de Normalización de Cienfuegos.

2.3.-Diseño de experimentos.

Los diseños de experimentos constituyen una vía para minimizar los gastos de investigación. Los diseños de experimentos solos, o combinados con el análisis de regresión múltiple, permiten obtener rápida información de instalaciones industriales en plena explotación y ratifican el criterio de que también de los procesos productivos se puede obtener información.⁽¹⁰³⁾

A través de la aplicación de diseños experimentales se puede cuantificar el efecto de la variación de la calidad de la materia prima y los portadores energéticos en los parámetros que caracterizan las etapas tecnológicas.⁽¹⁰³⁾

Las diferentes etapas del proceso de producción de azúcar crudo pueden ser simuladas mediante modelos de regresión donde se represente el efecto de las variables de entrada sobre las variables de salida.⁽¹⁰⁴⁾

Diseñar un experimento significa plantear éste de modo tal que nos permita agrupar la información necesaria bajo las condiciones de investigación, lo cual implica una adecuada programación para obtener resultados confiables.

Los problemas físicos y/o químicos donde se controla un número no muy grande de variables es aconsejable tratarlos mediante un diseño estadístico factorial.

Es necesario seleccionar como variables independientes, aquellas que mejor controlen el proceso, aunque en la práctica no siempre sea posible.⁽¹⁶³⁾

Se seleccionó el diseño experimental factorial completo 2^k donde se utilizan tres niveles para cada variable (superior, medio, inferior) y k representa el número de factores o variables independientes que se controlarán, que en este caso son cinco ($k = 5$) : cantidad de agua de imbibición (CH2O), temperatura del agua de imbibición (T), molida (Mol), materias extrañas entradas a fábrica (ME) y contenido de fibra en caña (F). Para la ejecución del modelo experimental 2^5 y un centro (valores medios de las variables independientes) se realizarán 33 corridas experimentales, el orden de aparición de los experimentos es aleatorio, garantizando la protección contra el efecto de las variables fantasmas.

2.4.- Procesamiento de los datos experimentales.

2.4.1.- Matriz experimental codificada. Modelos de regresión múltiples.

La codificación de las variables independientes permite sustituir los valores reales de los factores por sus equivalentes sencillos, facilitándose el trabajo y el procesamiento de los datos experimentales.

Los códigos para los tres niveles de las variables independientes serán: nivel superior (+1), nivel medio o centro (0) y el nivel inferior (-1).

La matriz experimental codificada para la investigación aparece en cada uno de los diseños experimentales realizados.

El modelo de regresión múltiple que se aplicará en todos los casos viene dado por la expresión:

$$y = C_0 + C_1 \cdot CH2O + C_2 \cdot T + C_3 \cdot ME + C_4 \cdot Mol + C_5 \cdot F + C_{12} \cdot CH2O \cdot T \\ + C_{13} \cdot CH2O \cdot ME + C_{14} \cdot CH2O \cdot Mol + C_{15} \cdot CH2O \cdot F + C_{23} \cdot T \cdot ME \\ + C_{24} \cdot T \cdot Mol + C_{25} \cdot T \cdot F + C_{34} \cdot ME \cdot Mol + C_{35} \cdot ME \cdot F + C_{45} \cdot Mol \cdot F$$

(2.1)

Donde el valor de la variable codificada (CH2O, T, ME, Mol, F) puede determinarse por la siguiente expresión:

$$V_{cod} = \frac{V - (N_s + N_i) / 2}{(N_s - N_i) / 2}$$

(2.2)

donde: V: valor de la variable independiente a utilizar.

N_s : nivel superior de la variable independiente.

N_i : nivel inferior de la variable independiente.

Para obtener la relación de las distintas variables analizadas con los factores agroindustriales se hicieron varios diseños de experimentos utilizando el paquete estadístico STATGRAPHICS.

Sumario de los diseños.

Clase de diseño : Residuos

Nombre del diseño: Factorial 2^5 Base del diseño.

Número de factores experimentales: 5

Número de variables dependientes : 2

Número de corridas experimentales : 33

Aleatorio: si

Número de bloques : 1

Número de centros por bloque : 1

Factores	Valor inferior	Valor superior	Valor medio	Continuos
Cantidad de agua de imbibición % caña.(CH ₂ O)	-1	+1	0	Si
Temperatura del agua de imbibición. (T (°C))	-1	+1	0	Si
Materias Extrañas % caña(ME).	-1	+1	0	Si
Molida (Mol (a/día))	-1	+1	0	Si
Fibra % caña(F).	-1	+1	0	Si

Tabla 2.1. Valores que toman las variables independientes en los diseños de experimentos.

Los niveles de las variables independientes o factores agroindustriales utilizados para los modelos se establecieron teniendo en cuenta las condiciones reales de explotación y tomando en consideración las condiciones posibles a lograrse.

Cantidad de agua de imbibición: (10-30) % caña.

Temperatura del agua de imbibición: (60-90) °C.

Materias extrañas entradas a fábrica: (3-12) % caña.

Molida diaria: (167500 – 380000) @/día.

Fibra en caña: (12 – 16) % caña.

Se utilizaron dos esquemas básicos de evaporación – calentamiento – cocción, cuádruple efecto sin extracciones y quintuple efecto con extracciones que son los más comunes en los ingenios azucareros cubanos.⁽³⁹⁾

Para el nivel de molida diaria utilizado en los diseños de experimentos se corresponde con 104 de los 156 centrales azucareros que están en ese rango de molida⁽¹⁴⁸⁾, lo que representa las dos terceras partes de los ingenios azucareros cubanos (66,7 %).

En el área de extracción de jugo se utilizó la variante de un juego de cuchillas, una desmenuzadora, cinco juegos de molinos y clase de imbibición compuesta cuádruple que es la más utilizada.

La matriz de correlación muestra la dimensión de la entremezcla de los efectos. Un diseño perfectamente ortogonal mostrará una matriz diagonal con 1 en la diagonal y 0 fuera de la diagonal, cualquier término no cero fuera de la diagonal implica que los estimados de los factores correspondientes a esta fila y columna deberán ser correlacionados. En este caso, no existe entremezcla de ninguno de los factores. Esto significa que se dará estimados limpios de todos estos factores.

La tabla ANOVA de análisis de varianza distribuye la variabilidad de la variable dependiente en partes separadas de cada uno de los factores o efectos. Esto entonces prueba el significado estadístico de cada factor comparando la media cuadrática contra un estimado del error experimental. Se da el número de efectos con P-valor menor que

0,05, indicando que ellos son significativamente diferente de cero al 95 % de nivel de confiabilidad.

El R-cuadrado indica el ajuste del modelo en la variabilidad de la variable dependiente.

El R- cuadrado ajustado estadístico es mas apropiado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes.

El Error Estándar de Estimación muestra la desviación estándar de los residuos.

El Error Medio Absoluto es el valor promedio de los residuos.

La Prueba Durbin – Watson (DW) Estadística prueba los residuos para determinar si existe

cualquier correlación significativa basada en el orden en el cual ellos aparecen en el fichero de datos. Desde que el valor DW es mayor que 1,4 , no es probable cualquier intercorrelación significativa en los residuos.

2.5. Obtención de los modelos.

2.5.1. Dependencia del consumo de vapor de escape en proceso(VE1) para un esquema de evaporación de quintuple efecto con extracciones en el primer y tercer vaso, (VE2) para un esquema de cuádruple efecto sin extracciones y la pérdida de azúcar en el bagazo(PoIB) de los factores agroindustriales.

Nº	CH2O	T	ME	Mol	F	VE1 (t/h)	VE2 (t/h)	PoIB (%)
1	+	+	+	+	+	51,74	53,75	1,76
2	-	+	+	+	+	47,22	48,10	2,21
3	+	-	+	+	+	52,60	55,66	1,76
4	-	-	+	+	+	47,54	49,54	2,21
5	+	+	-	+	+	51,91	55,26	2,01
6	-	+	-	+	+	47,38	50,41	2,51
7	+	-	-	+	+	52,85	57,15	2,01
8	-	-	-	+	+	47,70	51,04	2,51
9	+	+	+	-	+	46,90	45,84	1,76
10	-	+	+	-	+	43,29	42,04	2,21
11	+	-	+	-	+	47,70	47,44	1,76
12	-	-	+	-	+	43,56	42,58	2,21
13	+	+	-	-	+	47,09	47,18	2,01
14	-	+	-	-	+	43,44	43,28	2,51
15	+	-	-	-	+	47,85	48,72	2,01
16	-	-	-	-	+	43,62	43,79	2,51
17	+	+	+	+	-	52,67	55,41	1,79
18	-	+	+	+	-	48,14	50,54	2,22
19	+	-	+	+	-	53,62	57,32	1,79
20	-	-	+	+	-	48,47	51,18	2,22
21	+	+	-	+	-	52,81	56,9	2,04
22	-	+	-	+	-	48,28	52,1	2,52
23	+	-	-	+	-	53,76	58,79	2,04
24	-	-	-	+	-	48,60	52,69	2,52
25	+	+	+	-	-	47,70	47,31	1,79
26	-	+	+	-	-	44,02	43,30	2,22
27	+	-	+	-	-	48,48	48,85	1,79
28	-	-	+	-	-	44,30	43,86	2,22
29	+	+	-	-	-	47,81	48,51	2,04
30	-	+	-	-	-	44,17	44,61	2,52
31	+	-	-	-	-	48,58	50,04	2,04

32	-	-	-	-	-	44,42	45,12	2,52
33	0	0	0	0	0	47,54	49,38	2,16

Tabla2.2. Diseño de experimentos para el consumo de vapor de escape en proceso VE1, VE2 y el contenido de sacarosa que permanece en el bagazo (PolB).

Coefficientes de regresión para	VE1	VE2	PolB
Constante	48,05	49,5699	2,13333
A: CH ₂ O (Cantidad de agua imbibición % caña)	2,18475	2,53051	- 0,2325
B: T (Temperatura °C)	- 0,283503	- 0,632931	0,0
C: ME (Materias Extrañas %caña)	- 0,0728156	- 0,744194	- 0,1375
D: Mol (Molida @/día)	2,26152	3,82226	0,0
E: F (fibra % caña)	- 0,420484	- 0,803694	- 0,01
AB	- 0,142009	- 0,229056	0,0
AC	- 0,00594688	0,0588062	0,0125
AD	0,229578	0,323756	0,0
AE	- 0,00464063	0,0448062	- 0,005
BC	- 0,00215938	- 0,0621313	0,0
BD	- 0,0280719	- 0,113431	0,0
BE	0,00490937	- 0,0576313	0,0
CD	- 0,00810938	- 0,117694	0,0
CE	- 0,00837813	- 0,0601180	0,0
DE	- 0,0428031	- 0,132444	0,0

Tabla 2.3. Coeficientes de regresión para el consumo de vapor de escape en proceso VE1, VE2 y Pol en bagazo (PolB).

El modelo del consumo de vapor de escape para el esquema de quintuple efecto con extracciones es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 VE1 = & 48,053 + 2,18475 \cdot CH_2O - 0,283503 \cdot T - 0,0728156 \cdot ME + 2,26152 \cdot Mol \\
 & - 0,420484 \cdot F - 0,142009 \cdot CH_2O \cdot T - 0,00594688 \cdot CH_2O \cdot ME \\
 & + 0,229578 \cdot CH_2O \cdot Mol - 0,00464063 \cdot CH_2O \cdot F - 0,00215938 \cdot T \cdot ME \quad ; [t/h] \\
 & - 0,0280719 \cdot T \cdot Mol + 0,00490937 \cdot T \cdot F - 0,00810938 \cdot ME \cdot Mol \\
 & - 0,00837813 \cdot ME \cdot F - 0,0428031 \cdot Mol \cdot F
 \end{aligned}$$

(2.3)

Donde el valor de las variables son especificadas en sus unidades originales.

El siguiente gráfico muestra la influencia de los distintos factores y sus interacciones en el consumo de vapor de escape, se puede apreciar que los términos de mayor influencia por ese orden son la molida, cantidad de agua de imbibición, contenido de fibra en caña, la temperatura del agua de imbibición, las interacciones cantidad de agua de imbibición – molida, cantidad de agua de imbibición – temperatura del agua de imbibición y las materias extrañas entradas a fábrica, el resto de las interacciones su influencia puede ser desechada.

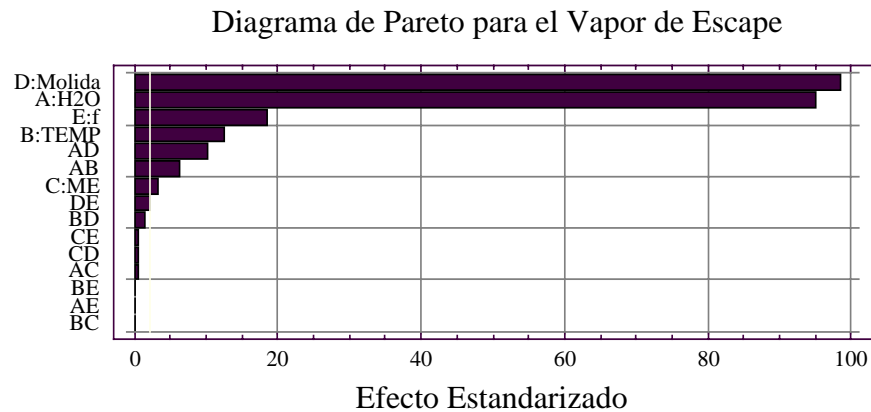


Fig.2.1. Efecto de los diferentes factores y sus interacciones en el consumo de vapor de escape en proceso para un esquema de cuádruple efecto sin extracciones (VE1).

La influencia de cada factor en el consumo de vapor de escape para el esquema de quíntuple efecto con extracciones se muestra en el siguiente gráfico.

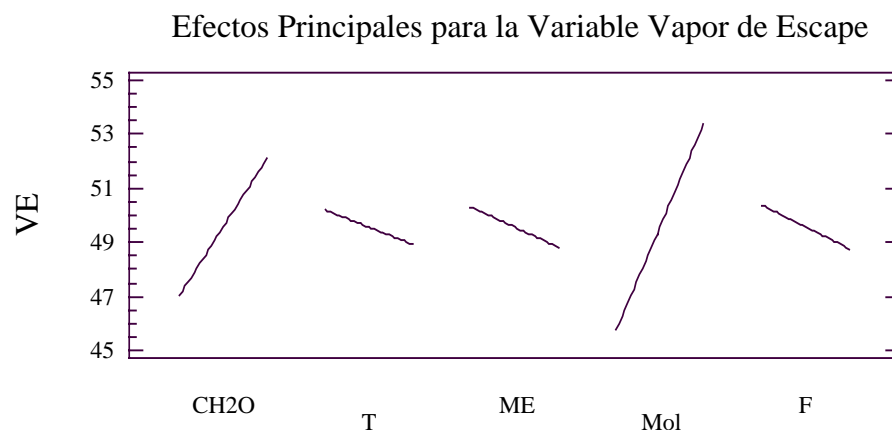


Fig.2.2. Influencia de los factores agroindustriales en el consumo vapor de escape en proceso para un esquema de cuádruple efecto sin extracciones (VE1).

El nivel de molida y la cantidad de agua de imbibición son los factores que mayor influencia tienen en el consumo de vapor de escape, con una influencia directa, es decir, con incrementos en estos dos factores hay un incremento brusco del consumo de vapor de escape, debido a la mayor producción de jugo al aumentar la molida y la presencia de mayor cantidad de agua en el jugo mezclado por el incremento de la cantidad de agua de imbibición utilizada, con mayor influencia para el nivel de molida; los incrementos del contenido de fibra en caña, temperatura del agua de imbibición y materias extrañas entradas a fábrica provocan una disminución en el consumo de vapor de escape en proceso provocado por una menor cantidad de jugo producido al aumentar el contenido de fibra y las materias extrañas en la caña procesada, y la temperatura del agua de imbibición a medida que aumenta, aumenta la temperatura del jugo mezclado y disminuye el consumo de vapor para su calentamiento, con un grado de significación por el orden en que aparecen.

A continuación se dan los resultados de la prueba P.

Factores e interacciones	P-valor
A:H2O	0,0000
B:T	0,0000
C:ME	0,0057
D:Mol	0,0000
E:F	0,0000
AB	0,0000
AC	0,7994
AD	0,0000
AE	0,8427
BC	0,9264
BD	0,2396
BE	0,8337
CD	0,7291
CE	0,7205
DE	0,0805

Tabla 2.4. Resultados de la prueba del análisis de varianza para el consumo de vapor de escape en proceso para un esquema de cuádruple efecto sin extracciones (VE1).

En este caso hay siete efectos que tienen P-valor menor que 0,05 y el término independiente.

El modelo de regresión descartando los términos cuyos coeficientes no son significativos es el siguiente:

$$VE1 = 48,053 + 2,18475 \cdot CH2O - 0,283503 \cdot T - 0,0728156 \cdot ME + 2,26152 \cdot Mol - 0,420484 \cdot F - 0,142009 \cdot CH2O \cdot T + 0,229578 \cdot CH2O \cdot Mol$$

[t/h] (2.4)

R – cuadrado = 99,912

R – cuadrado (ajustado por d.f.) = 99,834

Error Estándar de Est. = 0,130

Error medio absoluto = 0,036

Durbin – Watson estadístico = 1,919

La matriz de correlación muestra un diseño perfectamente ortogonal con uno en la diagonal y ceros fuera de diagonal, que demuestra que no hay entremezcla de cualquiera de los factores dándose estimados limpios de estos factores. (Ver anexo 2.1)

El modelo del consumo de vapor de escape para el esquema de cuádruple efecto sin extracciones es el siguiente:

$$VE2 = 49,5699 + 2,53051 \cdot CH2O - 0,632931 \cdot T - 0,744194 \cdot ME + 3,8226 \cdot Mol - 0,803694 \cdot F - 0,229056 \cdot CH2O \cdot T + 0,0588062 \cdot CH2O \cdot ME + 0,32375 \cdot CH2O \cdot Mol - 0,062131 \cdot T \cdot ME - 0,11343 \cdot T \cdot Mol - 0,057631 \cdot T \cdot F - 0,117694 \cdot ME \cdot Mol - 0,0601188 \cdot ME \cdot F - 0,132444 \cdot Mol \cdot F$$

(2.5)

;

En cuanto al comportamiento del diagrama de Pareto para determinar la influencia de los efectos principales, los resultados de la prueba P, y la matriz de correlación muestran unos comportamientos similares al caso anterior.

El modelo de regresión descartando los términos cuyos coeficientes no son significativos es el siguiente:

$$VE2 = 49,5699 + 2,53051 \cdot CH2O - 0,632931 \cdot T - 0,744194 \cdot ME + 3,8226 \cdot Mol \quad [t/h] \\ - 0,803694 \cdot F - 0,229056 \cdot CH2O \cdot T + 0,323756 \cdot CH2O \cdot Mol \quad (2.6)$$

R – cuadrado = 99,644

R – cuadrado (ajustado por d.f.) = 99,331

Error Estándar de Est. = 0,392

Error medio absoluto = 0,159

Durbin – Watson estadístico = 1,855

Estos modelos permiten hacer pronósticos del comportamiento del consumo de vapor en proceso para cualquier composición de la caña existente, para una cantidad y temperatura dadas del agua de imbibición, además determinar el efecto que tiene la cantidad y composición de las materias extrañas desde el punto de vista energético, lo cual es un aporte de esta tesis.

El modelo de Pol en Bagazo es el siguiente:

$$PolB = 2,13333 - 0,2325 \cdot CH2O - 0,1375 \cdot ME - 0,01 \cdot F + 0,0125 \cdot CH2O \cdot ME \\ - 0,005 \cdot CH2O \cdot F \quad ;$$

[%] (2.7)

Del diagrama de Pareto que muestra la influencia de los distintos factores y sus interacciones en la Pol en bagazo, se puede apreciar que los términos de mayor influencia por ese orden son la cantidad de agua de imbibición, las materias extrañas entradas a fábrica aunque su efecto es casi la mitad que el de la cantidad de agua de imbibición, y en mucha menor cuantía pero a considerar, la interacción cantidad de agua de imbibición – materias extrañas entradas a fábrica, el contenido de fibra en caña, y la interacción cantidad de agua de imbibición – contenido de fibra en caña.

Diagrama de Pareto Estandarizado para la Pol en Bagazo

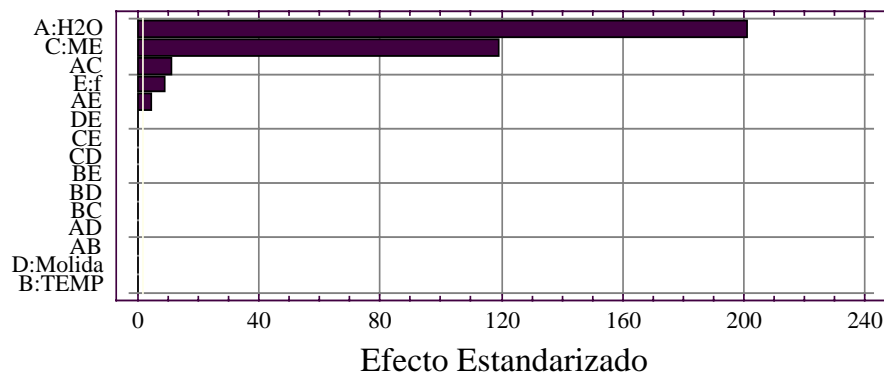


Fig.2.3. Efecto de los diferentes factores y sus interacciones en el contenido de sacarosa en el bagazo (PolB).

La influencia de cada factor en la Pol en bagazo se dan a continuación:.

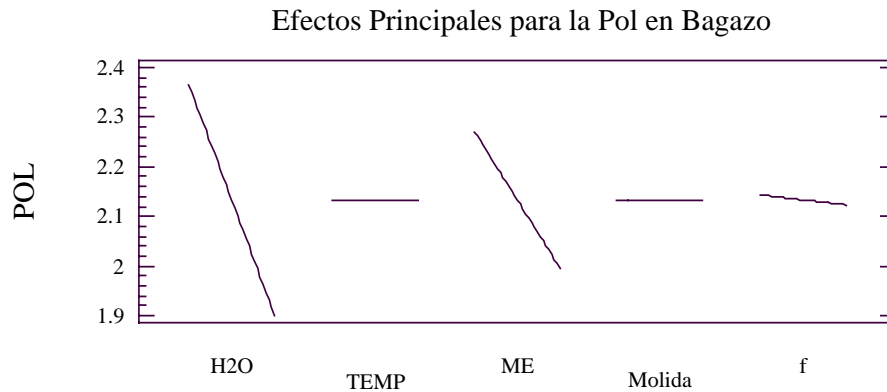


Fig.2.4. Influencia de los factores agroindustriales en el contenido de sacarosa en el bagazo (PolB).

La cantidad de agua de imbibición adicionada y las materias extrañas entradas a fábrica son los factores que mayor influencia tienen en la Pol que permanece en el bagazo a la salida de los molinos, como se puede observar con los incrementos en estos dos factores hay una disminución de la Pol en bagazo, con mayor influencia en la cantidad de agua de imbibición (1,67 veces el efecto de las materias extrañas entradas a fábrica), a medida que aumenta la cantidad de agua de imbibición utilizada se sustituye por esta agua una mayor cantidad de jugo presente en el bagazo; cuando aumenta la cantidad de materias extrañas entradas a fábrica y el contenido de fibra en caña disminuyen la Pol en bagazo debido a que hay un mayor contenido de fibra e insolubles no fibra en el bagazo, no siendo así en la cantidad total de sacarosa presente en el bagazo, los otros dos factores, la temperatura del agua de imbibición en los niveles que se usa y la molida, no tienen influencia alguna.

Se demostró que la temperatura del agua de imbibición, en los niveles que se usa (hasta 85 °C), y como han planteado algunos autores no influye en la extracción de sacarosa; su efecto es considerable para temperaturas superiores que sea capaz de romper la estructura de las células del bagazo y diluir la sacarosa, pero el bagazo imbibido con agua a temperaturas superiores es difícil de tomar por los molinos.

A continuación se dan los resultados de la prueba P.

Factores e interacciones	P-valor
A:H2O	0,0000
B:T	1,0000
C:ME	0,0000
D:Mol	1,0000
E:F	0,0000
AB	1,0000
AC	0,0000
AD	1,0000
AE	0,0005
BC	1,0000
BD	1,0000
BE	1,0000
CD	1,0000
CE	1,0000

DE	1,0000
----	--------

Tabla 2.5. Resultados de la prueba P del análisis de varianza para el contenido de sacarosa en el bagazo (PolB).

En este caso hay cinco efectos que tienen P-valor menor que 0,05 y el término independiente.

El modelo de regresión descartando los términos cuyos coeficientes no son significativos es el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{PolB} = & 2,13333 - 0,2325 \cdot \text{CH2O} - 0,1375 \cdot \text{ME} - 0,01 \cdot \text{F} + 0,0125 \cdot \text{CH2O} \\ & \cdot \text{ME} - 0,005 \cdot \text{CH2O} \cdot \text{F} \end{aligned} \quad (2.8)$$

; [%]

R – cuadrado = 99,969

R – cuadrado (ajustado por d.f.) = 99,941

Error Estándar de Est. = 0,0066

Error medio absoluto = 0,0016

Durbin – Watson estadístico = 2,063

La Pol en el bagazo es uno de los indicadores de eficiencia industrial más importantes que se utilizan en la industria azucarera, el MINAZ lo planifica para cada ingenio antes de comenzar la zafra, este indicador está en función de la cantidad de agua de imbibición a utilizar que a su vez depende de los precios del azúcar y del combustible a utilizar y de la composición de la caña (fundamentalmente materias extrañas entradas a fábrica y en un menor grado el contenido de fibra en caña). El modelo permite planificar este indicador de eficiencia industrial y constituye un aporte de la tesis.

2.5.2. Dependencia de la humedad del bagazo (HB) y el bagazo disponible (BD) de los factores agroindustriales.

Nº	CH2O	T	ME	Mol	F	HB (%)	BD(t/h)
1	-	+	-	+	+	41,87	31,77
2	+	-	+	-	+	43,62	30,45
3	-	-	-	-	-	49,34	22,67
4	+	+	+	+	-	49,99	34,12
5	+	-	-	-	-	54,80	25,41
6	-	+	+	-	+	38,06	27,71
7	+	-	-	+	+	47,48	35,16
8	+	+	-	+	+	47,48	35,16
9	+	-	+	+	-	49,99	34,12
10	+	+	-	-	+	47,48	28,35
11	-	+	+	+	-	44,47	30,73
12	-	-	+	+	+	38,06	34,37
13	+	+	-	-	-	54,80	25,41
14	-	-	-	+	+	41,87	31,77
15	-	-	-	+	-	49,34	28,12
16	+	-	+	+	+	43,62	37,76
17	-	+	+	-	-	44,47	24,77
18	+	+	+	-	+	43,62	30,45
19	-	+	-	+	-	49,34	28,12
20	+	+	-	+	-	54,80	31,51
21	+	+	+	-	-	49,99	27,51

22	+	-	-	+	-	54,80	31,51
23	+	-	+	-	-	49,99	27,51
24	+	-	-	-	+	47,48	28,35
25	-	+	-	-	-	49,34	22,67
26	-	-	+	-	-	44,47	24,77
27	-	-	-	-	+	41,87	25,61
28	0	0	0	0	0	45,80	29,1
29	-	-	+	-	+	38,06	27,71
30	-	+	+	+	+	38,06	34,37
31	-	-	+	+	-	44,47	30,73
32	+	+	+	+	+	43,62	37,76
33	-	+	-	-	+	41,87	25,61

Tabla2.6. Diseño de experimentos para la humedad del bagazo (HB) y el bagazo disponible (BD).

Coefficientes de regresión para	HB	BD
Constante	45,8885	29,7313
A: CH2O (Cantidad de agua imbibición % caña)	3,08125	1,53218
B: T (Temperatura °C)	- 0,3125	- 0,0000125
C: ME (Materias Extrañas %caña)	- 1,85625	1,17576
D: Mol (Molida a/día)	0,3125	3,19142
E: F (fibra % caña)	- 3,13375	1,64602
AB	0,3125	- 0,0000125
AC	- 0,31125	0,000175
AD	- 0,3125	0,164212
AE	- 0,28875	0,0001125
BC	0,3125	0,0000125
BD	0,3125	- 0,00005
BE	0,3125	- 0,00005
CD	- 0,3125	0,126275
CE	- 0,06125	- 0,002125
DE	- 0,3125	0,176638

Tabla 2.7. Coeficientes de regresión para la humedad del bagazo (HB) y el bagazo disponible (BD).

El modelo de Humedad del Bagazo es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{HB} = & 45,8885 + 3,08125 \cdot \text{CH2O} - 0,3125 \cdot \text{T} - 1,85625 \cdot \text{ME} + 0,3125 \cdot \text{Mol} \\
 & - 3,13375 \cdot \text{F} + 0,3125 \cdot \text{CH2O} \cdot \text{T} - 0,31125 \cdot \text{CH2O} \cdot \text{ME} - 0,3125 \cdot \text{CH2O} \cdot \text{Mol} \\
 & - 0,28875 \cdot \text{CH2O} \cdot \text{F} + 0,3125 \cdot \text{T} \cdot \text{ME} + 0,3125 \cdot \text{T} \cdot \text{Mol} \\
 & + 0,3125 \cdot \text{T} \cdot \text{F} - 0,3125 \cdot \text{ME} \cdot \text{Mol} - 0,06125 \cdot \text{ME} \cdot \text{F} \\
 & + 0,3125 \cdot \text{Mol} \cdot \text{F} \quad ; [\%]
 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Del diagrama de Pareto que muestra la influencia de los distintos factores y sus interacciones en la humedad en el bagazo, se puede apreciar que los términos de mayor

influencia, por ese orden, son el contenido de fibra en caña, la cantidad de agua de imbibición y las materias extrañas entradas a fábrica por ese orden.

Diagrama de Pareto Estandarizado para la Humedad del Bagazo

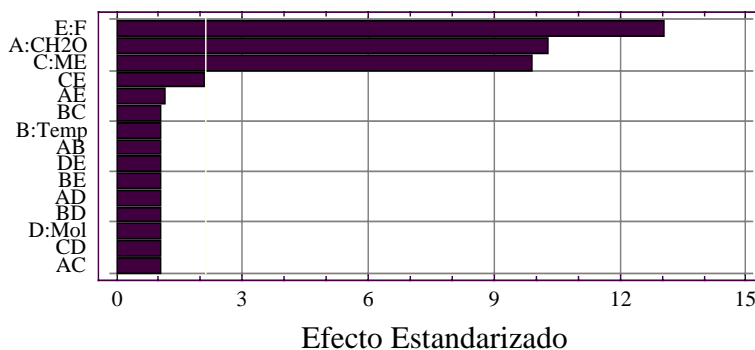


Fig.2.5. Efecto de los diferentes factores y sus interacciones en la humedad del bagazo (HB).

La influencia de cada factor en la humedad en el bagazo se ofrece a continuación:

Efectos Principales para la Humedad del Bagazo

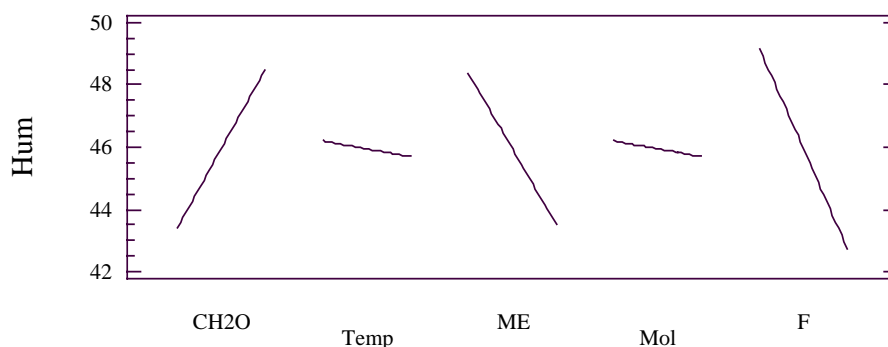


Fig.2.6. Influencia de los factores agroindustriales en la humedad del bagazo (HB).

El contenido de fibra en caña, la cantidad de agua de imbibición y las materias extrañas entradas a fábrica son los factores que mayor influencia tienen en la humedad del bagazo, el incremento de la cantidad de agua de imbibición utilizada provoca que haya un incremento de la humedad del bagazo, debido a que toda el agua agregada al bagazo no es removida por los molinos para la misma presión aplicada a los mismos, los contenidos de fibra en caña y de materias extrañas entradas a fábrica hacen que el % de humedad presente en el bagazo sea menor debido al incremento de la fibra en el bagazo y de insolubles en el bagazo provenientes de las materias extrañas.

A continuación se muestran los resultados de la prueba P.

Factores e interacciones	P-valor
A:H2O	0,0000
B:T	0,3159
C:ME	0,0000
D:Mol	0,3159
E:F	0,0000

AB	0,3159
AC	0,3177
AD	0,3159
AE	0,3530
BC	0,3159
BD	0,3159
BE	0,3159
CD	0,3159
CE	0,8419
DE	0,3159

Tabla 2.8. Resultados de la prueba P del análisis de varianza para la humedad del bagazo (HB).

En este caso hay tres efectos que tienen P-valor menor que 0,05 y el término independiente.

El modelo de regresión descartando los términos cuyos coeficientes no son significativos es el siguiente:

$$HB = 45,8885 + 3,08125 \cdot CH2O - 1,85625 \cdot ME - 3,13375 \cdot F \quad ; \quad (2.10)$$

[%]

R – cuadrado = 93,8751

R – cuadrado (ajustado por d.f.) = 88,4707

Error Estándar de Est. = 1,71051

Error medio absoluto = 0,6881

Durbin – Watson estadístico = 2,3848

La humedad es la propiedad más importante del bagazo como combustible, cuando aumenta el 1 % la humedad del bagazo disminuye el 2 % el calor específico de combustión y se puede determinar por este modelo conociendo la composición de la caña y la cantidad de agua de imbibición a utilizar sin necesidad de esperar por los análisis de laboratorio, procedimiento no reportado en la literatura, por lo que constituye un aporte de la tesis.

El modelo para el Bagazo Disponible es el siguiente:

$$BD = 29,7313 + 1,53218 \cdot CH2O - 0,0000125 \cdot T + 1,17576 \cdot ME + 3,19142 \cdot Mol + 1,64602 \cdot F - 0,0000125 \cdot CH2O \cdot T + 0,000175 \cdot CH2O \cdot ME + 0,164212 \cdot CH2O \cdot Mol + 0,0001125 \cdot CH2O \cdot F + 0,0000125 \cdot T \cdot ME - 0,00005 \cdot T \cdot Mol - 0,00005 \cdot T \cdot F + 0,126275 \cdot ME \cdot Mol - 0,002125 \cdot ME \cdot F + 0,176638 \cdot Mol \cdot F$$

; [t/h]

Del diagrama de Pareto que muestra la influencia de los distintos factores y sus interacciones en el bagazo disponible, se puede apreciar que el término de mayor influencia es el nivel de molida, después con un nivel de significación aproximadamente de la mitad del de nivel de molida aparecen el contenido de fibra en caña, la cantidad de agua de imbibición y las materias extrañas y finalmente con un efecto mucho menor aparecen las interacciones nivel de molida – contenido de fibra en caña, cantidad de agua de imbibición – nivel de molida y nivel de molida – materias extrañas entradas a fábrica, el resto de las interacciones y la temperatura del agua de imbibición ni siquiera aparecen representados en el diagrama.

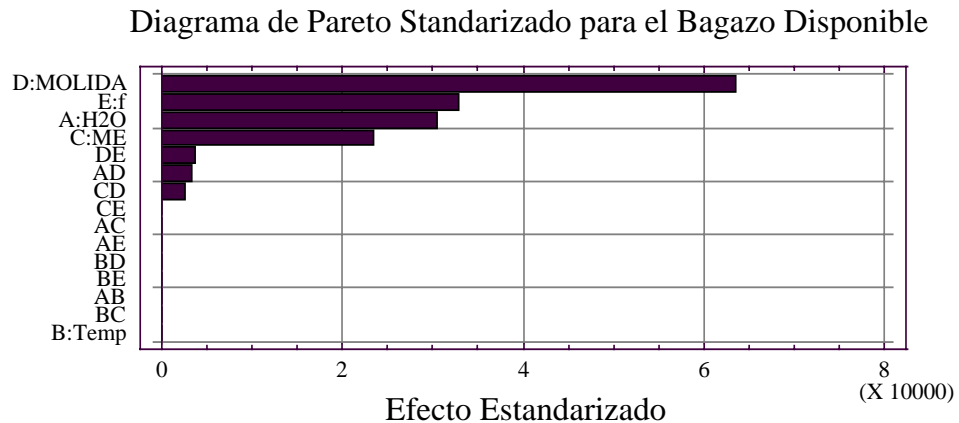


Fig.2.7. Efecto de los diferentes factores y sus interacciones en el bagazo disponible (BD).

La influencia de cada factor en la humedad en el bagazo se dan a continuación:

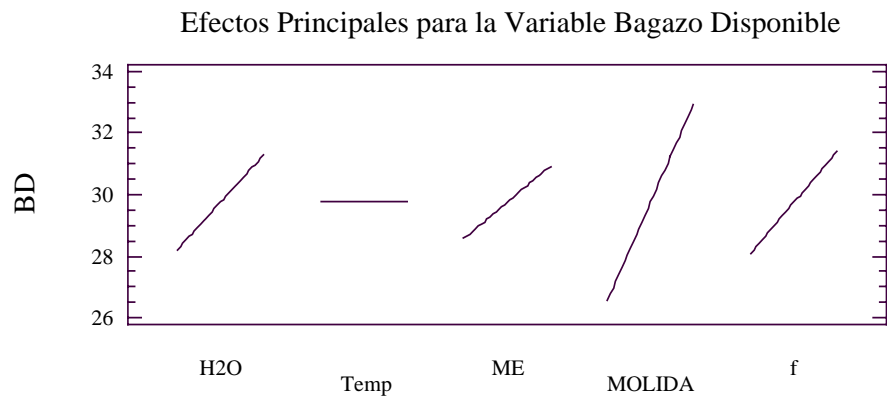


Fig.2.8. Influencia de los factores agroindustriales en el bagazo disponible (BD).

El nivel de molida es factor de mayor influencia en el bagazo disponible con aumentos significativos del mismo frente a incrementos del nivel de molida, el contenido de fibra en caña, la cantidad de agua de imbibición y las materias extrañas entradas a fábrica, que son los otros factores que influyen directamente en el bagazo disponible en ese orden, y con una significación menor que el nivel de molida. El incremento de la cantidad de agua de imbibición utilizada provoca que haya un incremento aparente del bagazo disponible porque, aunque en peso se dispone de una mayor cantidad de bagazo, es cierto que el mismo tiene un mayor contenido de agua y por lo tanto un valor calórico inferior mucho menor, debido a que toda el agua agregada al bagazo no es removida por los molinos para la misma presión aplicada a los mismos, al aumentar el contenido de fibra en caña provoca incrementos del bagazo disponible producto al incremento de la fibra en el bagazo y el bagazo % caña, las materias extrañas aumentan la fibra en el bagazo y los insolubles no fibra en el bagazo lo que da un a mayor cantidad de bagazo disponible, aunque esto no es cierto porque los insolubles no fibra no son combustibles, la temperatura del agua de imbibición no ejerce ninguna influencia sobre el bagazo disponible.

A continuación se dan los resultados de la prueba P.

Factores e interacciones	P-valor
A:H2O	0,0000
B:T	0,9996
C:ME	0,0000
D:Mol	0,0000
E:F	0,0000
AB	0,9996
AC	0,9950
AD	0,0000
AE	0,9968
BC	0,9996
BD	0,9986
BE	0,9986
CD	0,0003
CE	0,9394
DE	0,0000

Tabla 2.9. Resultados de la prueba P del análisis de varianza para el bagazo disponible (BD).

En este caso hay siete efectos que tienen P-valor menor que 0,05 y el término independiente.

El modelo de regresión descartando los términos cuyos coeficientes no son significativos es el siguiente:

$$BD = 29,7313 + 1,53218 \cdot CH_2O + 1,17576 \cdot ME + 3,19142 \cdot Mol + 1,64602 \cdot F + 0,164212 \cdot CH_2O \cdot Mol + 0,126275 \cdot ME \cdot Mol + 0,176638 \cdot Mol \cdot F ; [t/h] \quad (2.12)$$

R – cuadrado = 99,923

R – cuadrado (ajustado por d.f.) = 99,855

Error Estándar de Est. = 0,156

Error medio absoluto = 0,038

Durbin – Watson estadístico = 2,063

Por esta ecuación podemos determinar qué parte del bagazo disponible no es combustible, debido a la presencia en el bagazo de insolubles no fibra provenientes de las materias extrañas entradas a fábrica y de la humedad del bagazo producto de la utilización de una mayor cantidad de agua de imbibición, que no puede hacerse con los softwares existentes para esos fines, resolviéndose la contradicción entre la información dada por estos de la disponibilidad de bagazo y lo que ocurre físicamente en los ingenios azucareros. Esto constituye un aporte de esta tesis.

2.5.3. Dependencia del Brix del jugo mezclado (BxM) y el calor específico de combustión inferior del bagazo (CECI) de los factores agroindustriales.

Nº	CH2O	T	ME	Mol	F	BxM (°Bx)	CECI (kJ/kg)
1	+	+	+	-	-	13,28	7585,84
2	+	+	-	+	+	14,46	8088,47

3	-	+	-	-	+	17,51	9211,60
4	+	+	+	+	+	13,19	8879,89
5	-	+	+	-	+	16,06	9994,45
6	0	0	0	0	0	15,39	8424,80
7	-	-	+	-	-	16,05	8692,91
8	+	+	-	+	-	14,56	6601,57
9	+	+	-	-	+	14,46	8088,47
10	-	-	+	+	-	16,05	8692,91
11	+	+	-	-	-	14,56	6601,57
12	-	+	+	+	-	16,05	8692,91
13	+	-	+	-	+	13,19	8879,89
14	-	-	-	+	-	17,50	7694,88
15	-	-	-	-	-	17,50	7694,88
16	+	-	-	-	-	14,56	6601,57
17	-	+	+	+	+	16,06	9994,45
18	-	+	-	-	-	17,50	7694,88
19	+	-	+	+	+	13,19	8879,89
20	+	-	+	+	-	13,28	7585,84
21	-	+	-	+	-	17,50	7694,88
22	+	+	+	-	+	13,19	8879,89
23	+	-	+	-	-	13,28	7585,84
24	+	+	+	+	-	13,28	7585,84
25	-	+	-	+	+	17,51	9211,60
26	+	-	-	+	-	14,56	6601,57
27	+	-	-	-	+	14,46	8088,47
28	+	-	-	+	+	14,46	8088,47
29	-	-	+	-	+	16,06	9994,45
30	-	-	-	-	+	17,51	9211,60
31	-	-	+	+	+	16,06	9994,45
32	-	+	+	-	-	16,05	8692,91
33	-	-	-	+	+	17,51	9211,60

Tabla2.10. Diseño de experimentos para el Brix del jugo mezclado (BxM) y el calor específico de combustión inferior del bagazo (CECI).

Coeficientes de regresión para	BxM	CECI
Constante	15,3282	8346,25
A: CH ₂ O (Cantidad de agua imbibición % caña)	- 1,45375	- 554,665
B: T (Temperatura °C)	0,0	0,09375
C: ME (Materias Extrañas %caña)	- 0,68125	444,666
D: Mol (Molida a/día)	0,0	- 0,09375
E: F (fibra % caña)	- 0,02125	699,996
AB	0,0	0,09375
AC	0,04375	- 0,5525
AD	0,0	- 0,9375

AE	- 0,02625	- 4,5705
BC	0,0	0,09375
BD	0,0	- 0,09375
BE	0,0	0,09375
CD	0,0	- 0,09375
CE	0,00125	- 50,91
DE	0,0	- 0,09375

Tabla 2.11. Coeficientes de regresión para el Brix del jugo mezclado (BxM) y el calor específico de combustión inferior del bagazo (CECI).

El modelo del Brix del Jugo Mezclado es el siguiente:

$$BxM = 15,3282 - 1,45375 \cdot CH2O - 0,68125 \cdot ME - 0,02125 \cdot F + 0,04375 \cdot CH2O \cdot ME - 0,02625 \cdot CH2O \cdot F + 0,00125 \cdot ME \cdot F, [^{\circ} Bx] \quad (2.13)$$

Del diagrama de Pareto que muestra la influencia de los distintos factores y sus interacciones en el Brix del jugo mezclado, se aprecia que el término de mayor influencia es la cantidad de agua de imbibición, después con un nivel de significación menor aparecen las materias extrañas entradas a fábrica y finalmente, con un efecto mucho menor, aparecen el contenido de fibra en caña y el resto de las interacciones.

Diagrama de Pareto Estandarizado para la Variable Brix del Jugo Mezclado

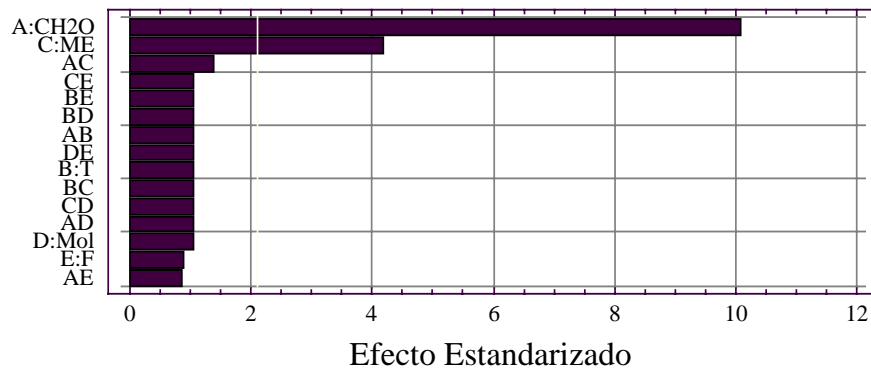


Fig.2.9. Efecto de los diferentes factores y sus interacciones en el brix del jugo mezclado (BxM).

La influencia de cada factor en el Brix del jugo mezclado se dan a continuación:

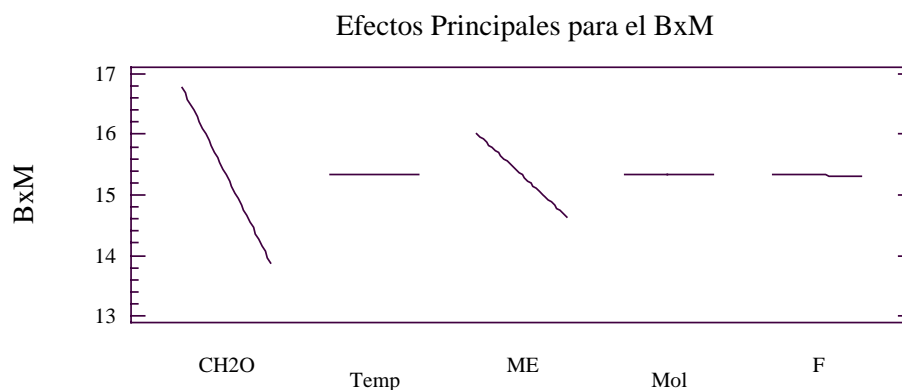


Fig.2.10. Influencia de los factores agroindustriales en el Brix del jugo mezclado (BxM).

Entre los efectos principales en el Brix de jugo mezclado el de mayor influencia es la cantidad de agua de imbibición utilizada, es evidente que el Brix del jugo mezclado disminuya con el aumento de la cantidad de agua adicionada y las materias extrañas debido a la presencia predominante de tallos verdes cuyo jugo tiene aproximadamente seis veces menos pureza que el de caña limpia, con mayor significación para el primero como puede verse en el diagrama de Pareto correspondiente, la fibra en caña tiene una influencia muy débil que puede despreciarse y la temperatura del agua de imbibición y la molido no tienen influencia alguna.

A continuación se dan los resultados de la prueba P.

Factores e interacciones	P-valor
A:H2O	0,0000
B:T	1,0000
C:ME	0,0000
D:Mol	1,0000
E:F	0,0000
AB	1,0000
AC	0,0000
AD	1,0000
AE	0,0000
BC	1,0000
BD	1,0000
BE	1,0000
CD	1,0000
CE	0,6503
DE	1,0000

Tabla 2.12. Resultados de la prueba P del análisis de varianza para el Brix del jugo mezclado (BxM).

En este caso hay cinco efectos que tienen P-valor menor que 0,05 y el término independiente.

El modelo de regresión descartando los términos cuyos coeficientes no son significativos es el siguiente:

$$BxM = 15,3282 - 1,45375 \cdot CH_2O - 0,68125 \cdot ME - 0,02125 \cdot F + 0,04375 \cdot CH_2O \cdot ME - 0,02625 \cdot CH_2O \cdot F \quad (2.14)$$

[°Bx]

R – cuadrado = 99,995
 R – cuadrado (ajustado por d.f.) = 99,991
 Error Estándar de Est. = 0,015
 Error medio absoluto = 0,0037
 Durbin – Watson estadístico = 2,075

El Brix del jugo mezclado caracteriza el proceso de calentamiento, clarificación y evaporación, es común escuchar entre azucareros trabajar con un brix del jugo mezclado superior a 15 °Bx, por lo tanto, el modelo le permite pronosticar para la composición de de la caña , de las materias extrañas entradas a fábrica y la cantidad de agua de imbibición a utilizar cual es el brix del jugo mezclado y tomar decisiones antes de ejecutar el proceso y durante su ejecución. Lo que constituye un aporte del autor. El modelo del Calor Específico de Combustión Inferior del Bagazo es el siguiente:

$$CECI = 8346,25 - 554,665 \cdot CH_2O + 0,09375 \cdot T + 444,666 \cdot ME - 0,09375 \cdot Mol + 699,996 \cdot F + 0,09375 \cdot CH_2O \cdot T - 0,5525 \cdot CH_2O \cdot ME - 0,09375 \cdot CH_2O \cdot Mol - 4,5705 \cdot CH_2O \cdot F + 0,09375 \cdot T \cdot ME - 0,09375 \cdot T \cdot Mol + 0,09375 \cdot T \cdot F - 0,09375 \cdot ME \cdot Mol - 50,91 \cdot ME \cdot F - 0,09375 \cdot Mol \cdot F \quad (2.15)$$

; [kJ/kg]

Del diagrama de Pareto que muestra la influencia de los distintos factores y sus interacciones en el calor específico de combustión inferior, se puede apreciar que los términos de mayor influencia son en primer lugar el contenido de fibra en caña, en segundo lugar la cantidad de agua de imbibición, en tercer lugar las materias extrañas entradas a fábrica y luego con un efecto mucho menor aparece la interacción materias extrañas - contenido de fibra en caña.

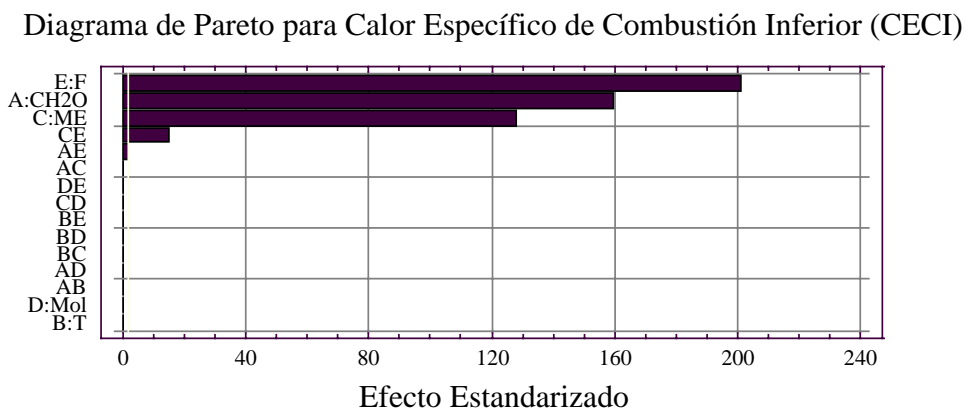


Fig.2.11. Efecto de los diferentes factores y sus interacciones en el calor específico de combustión inferior del bagazo (CECI).

La influencia de cada factor en el calor específico de combustión inferior se dan a continuación:

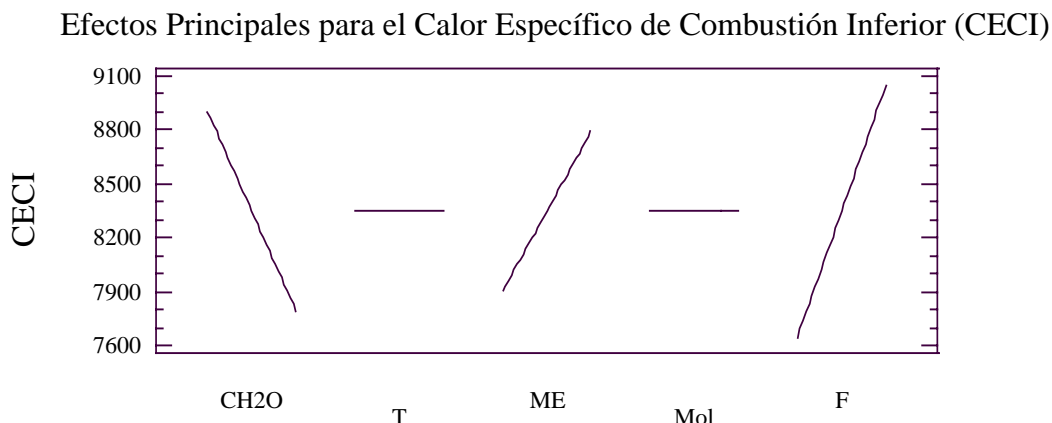


Fig.2.12. Influencia de los factores agroindustriales en el Calor específico de combustión inferior del bagazo (CECI).

Entre los efectos principales sobre el calor específico de combustión inferior del bagazo, el de mayor influencia es contenido de fibra en caña que influye de forma directa, a medida que aumenta el contenido de fibra en caña aumenta el contenido de fibra en bagazo y por lo tanto aumenta la cantidad de material combustible, con incrementos en la cantidad de agua de imbibición utilizada disminuye el calor específico de combustión inferior del bagazo provocado por el incremento del contenido de humedad del bagazo, a pesar que la composición en base seca del bagazo sea la misma, pues parte del calor que se libera en el proceso de combustión se utiliza para evaporar esa agua disuelta en el bagazo. Y por último, con el aumento del contenido de materias extrañas entradas a fábrica, dependiendo de la composición de esas materias extrañas, hay un incremento de la fibra presente en el bagazo y por lo tanto un incremento del calor específico de combustión inferior. En ocasiones cuando en la composición de las materias extrañas hay una cantidad considerable de tierra se produce un incremento del bagazo disponible, pero este incremento es aparente ya que aumenta los insolubles no fibra en el bagazo y en realidad puede quemarse una cantidad inferior de bagazo, resultando por consiguiente los niveles de bagazo disponible que nos dan los Softwares de cálculo de balance térmico de ingenios azucareros totalmente engañosos. Esto resuelve aquellos casos en que los resultados de los cálculos difieren de lo que realmente ocurre en la “casa de bagazo” de los ingenios azucareros. A continuación se dan los resultados de la prueba P.

Factores e interacciones	P-valor
A:H2O	0,0000
B:T	0,9789
C:ME	0,0000
D:Mol	0,9789
E:F	0,0000
AB	0,9789
AC	0,8761
AD	0,9789
AE	0,2080
BC	0,9789
BD	0,9789

BE	0,9789
CD	0,9789
CE	0,0000
DE	0,9789

Tabla 2.13. Resultados de la prueba P del análisis de varianza para el calor específico de combustión inferior del bagazo (CECI).

En este caso hay cuatro efectos que tienen P-valor menor que 0,05 y el término independiente.

El modelo de regresión descartando los términos cuyos coeficientes no son significativos es el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{CECI} = & 8346,25 - 554,665 \cdot \text{CH}_2\text{O} + 444,666 \cdot \text{ME} + 699,996 \cdot \text{F} & (2.16) \\ & - 50,91 \cdot \text{ME} \cdot \text{F} & ; [\text{kJ/kg}] \end{aligned}$$

R – cuadrado = 99,979

R – cuadrado (ajustado por d.f.) = 99,961

Error Estándar de Est. = 19,753

Error medio absoluto = 5,205

Durbin – Watson estadístico = 2,057

2.5.4. Dependencia del calor específico de combustión superior del bagazo (CECS) de los factores agroindustriales.

Nº	CH ₂ O	T	ME	Mol	F	CECS (kJ/kg)
1	-	-	-	+	+	11114,1
2	+	-	+	-	-	9573,2
3	+	-	-	+	+	10049,6
4	+	+	-	+	+	10049,6
5	-	+	+	-	-	10622,6
6	+	+	-	-	-	8639,2
7	+	+	+	-	-	9573,2
8	-	-	+	-	+	11857,2
9	-	-	+	+	-	10622,6
10	-	+	+	+	-	10622,6
11	o	o	o	o	o	10368,4
12	+	+	+	+	-	9573,2
13	-	-	-	+	-	9675,5
14	-	+	-	+	-	9675,5
15	-	+	-	-	-	9675,5
16	+	+	+	+	+	10800,7
17	+	-	-	+	-	8639,2
18	-	+	+	+	+	11857,2
19	+	-	+	+	-	9573,2
20	-	+	-	+	+	11114,1
21	-	+	+	-	+	11857,2
22	-	-	-	-	-	9675,5
23	+	-	-	-	+	10049,6
24	+	+	-	-	+	10049,6

25	-	-	-	-	+	11114,1
26	-	-	+	-	-	10622,6
27	-	-	+	+	+	11857,2
28	-	+	-	-	+	11114,1
29	+	-	+	-	+	10800,7
30	+	-	-	-	-	8639,2
31	+	+	+	-	+	10800,7
32	+	-	+	+	+	10800,7
33	+	+	-	+	-	8639,2

Tabla 2.14. Diseño de experimentos para el Calor específico de combustión superior del bagazo (CECS).

Coeficientes de regresión para	CECS
Constante	10293,8
A: CH ₂ O (Cantidad de agua imbibición % caña)	- 525,837
B: T (Temperatura °C)	0,0
C: ME (Materias Extrañas %caña)	421,912
D: Mol (Molida a/día)	0,0
E: F (fibra % caña)	663,887
AB	0,0
AC	- 0,6375
AD	0,0
AE	- 4,4125
BC	0,0
BD	0,0
BE	0,0
CD	0,0
CE	- 48,3625
DE	0,0

Tabla 2.15. Coeficientes de regresión para el calor específico de combustión superior del bagazo (CECS).

El modelo del Calor Específico de Combustión Superior del Bagazo es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{CECS} = & 10293,8 - 525,837 \cdot \text{CH}_2\text{O} + 421,912 \cdot \text{ME} + 663,887 \cdot \text{F} - 0,6375 \quad (2.17) \\
 & \cdot \text{CH}_2\text{O} \cdot \text{ME} - 4,4125 \cdot \text{CH}_2\text{O} \cdot \text{F} - 48,3625 \cdot \text{ME} \cdot \text{F} \quad ; \\
 & [\text{kJ/kg}]
 \end{aligned}$$

Del diagrama de Pareto que muestra la influencia de los distintos factores y sus interacciones en el calor específico de combustión superior (CECS), se puede apreciar que el comportamiento es similar que para el CECI.

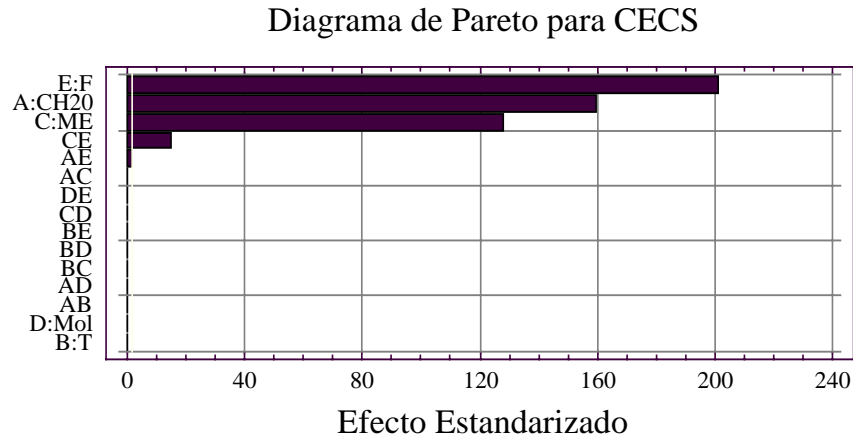


Fig.2.13. Efecto de los diferentes factores y sus interacciones en el calor específico de combustión superior del bagazo (CECS).

La influencia de cada factor en el calor específico de combustión superior se dan a continuación:

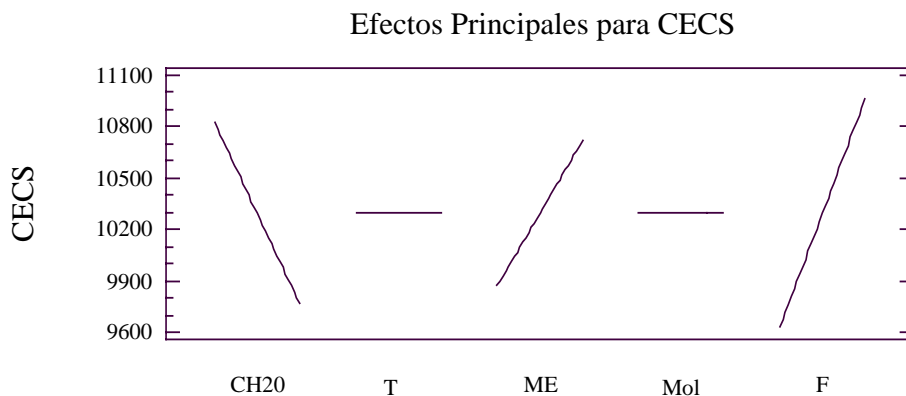


Fig.2.14. Influencia de los factores agroindustriales en el Calor específico de combustión superior del bagazo (CECS).

El comportamiento del CECS es semejante al del CECl.
A continuación se dan los resultados de la prueba P.

Factores e interacciones	P-valor
A:H2O	0,0000
B:T	1,0000
C:ME	0,0000
D:Mol	1,0000
E:F	0,0000

AB	1,0000
AC	0,8495
AD	1,0000
AE	0,1999
BC	1,0000
BD	1,0000
BE	1,0000
CD	1,0000
CE	0,0000
DE	1,0000

Tabla 2.16. Resultados de la prueba P del análisis de varianza para el Calor específico de combustión superior del bagazo (CECS).

En este caso hay cuatro efectos que tienen P-valor menor que 0,05 y el término independiente.

El modelo de regresión descartando los términos cuyos coeficientes no son significativos es el siguiente:

$$\text{CECS} = 10293,8 - 525,837 \cdot \text{CH}_2\text{O} + 421,912 \cdot \text{ME} + 663,887 \cdot \text{F} - 18,3625 \cdot \text{ME} \cdot \text{F} \quad (2.18)$$

; [kJ/kg]

R – cuadrado = 99,979

R – cuadrado (ajustado por d.f.) = 99,961

Error Estándar de Est. = 18,716

Error medio absoluto = 4,817

Durbin – Watson estadístico = 2,039

Los modelos para determinar el calor específico de combustión inferior y superior están en función de la composición de la caña (cantidad y composición de las materias extrañas entradas a fábrica, contenido de fibra en caña) y de la cantidad de agua de imbibición a utilizar lo que unido a otros modelos ofrece con adecuada precisión como se puede comportar la relación disponibilidad /demanda de bagazo, aún, antes de ejecutar el proceso con un comportamiento similar a las ecuaciones dadas por otros autores a partir de la composición del bagazo. En eso radica lo novedoso de estos modelos.

Debido que para obtener estos modelos, en el diseño de experimento las variables que representan los factores agroindustriales toman valores entre -1 y 1 para el rango utilizado para las mismas, es decir son números adimensionales, para utilizar estos modelos hay que determinar el valor de estas variables, incluso pueden tomar valores que estén fuera de ese rango, y se determinan de la siguiente manera:

$$\text{CH}_2\text{O} = (\text{Ag.imb} - 20) / 10 \quad (2.19)$$

, Ag.imb es la cantidad de agua de imbibición utilizada en % de la caña molida.

$$T = (\text{Temp.ag.imb} - 75) / 15 \quad (2.20)$$

, Temp. ag. imb es la temperatura del agua de imbibición en °C.

$$\text{ME} = (\text{Mat.ext.} - 7,5) / 4,5 \quad (2.21)$$

, Mat.ext. es el contenido de materias extrañas % caña entradas a fábrica.

$$\text{Mol} = (\text{Molida} - 216750) / 23250 \quad (2.22)$$

, Molida es la molida diaria en @/día.

$$F = (\text{Fibra} - 14) / 2 \quad (2.23)$$

, Fibra es la fibra % caña.

2.6. Elaboración del nomograma y determinación de la cantidad de agua de imbibición a utilizar.

La mayoría de los autores coinciden en usar una cantidad de agua de imbibición cercana a dos veces el contenido de fibra en caña, lo que para una caña de 15 % fibra, se corresponde con 30 % caña. Además se plantea por algunos autores que la influencia de la temperatura del agua de imbibición en la extracción de sacarosa hasta 85 °C y quedó demostrado en este trabajo es despreciable. Su efecto es considerable para temperaturas superiores para que sea capaz de romper la estructura de las células del bagazo y diluir la sacarosa, pero el bagazo imbibido con agua a temperaturas superiores es difícil de tomar por los molinos.

La cantidad adecuada de agua de imbibición a utilizar se determina por la relación precio del azúcar/precio del combustible, se tomaron diferentes precios del azúcar crudo y del bagazo incluyendo el combustible convencional por si fuese necesario utilizarlo, y se evaluó la disminución de las pérdidas de azúcar y el incremento en el consumo de vapor de escape que se producen con el incremento de la cantidad de agua de imbibición desde (10 – 35) % caña tomando como referencia los valores correspondientes para el 10 % de agua de imbibición (Ver anexo 2.2), donde las curvas de PA son las curvas de las pérdidas de azúcar en el bagazo para diferentes precios del azúcar (110- 660) USD/t que se corresponden con los precios de (5-30) centavos la libra y PC variación en los gastos de combustible para los precios del bagazo (5,75-50) USD/t según su uso, provocado por la variación en el consumo de vapor en proceso. Estos criterios de cantidad de agua de imbibición fueron emitidos hace más de 60 años y hoy prevalecen a pesar que los precios del azúcar se han deprimido grandemente y que al precio del combustible le ha ocurrido todo lo contrario, además, en aquellos momentos las fábricas de azúcar estaban diseñadas para quemar todo el bagazo que se obtenía del proceso de molienda de la caña, pues se convertía en un problema adicional para los dueños de estas fábricas ¿qué hacer con este bagazo?, la industria de derivados se desarrolla y no se piensa de la misma manera, por lo tanto el punto donde se igualan las pérdidas de azúcar (\$/h) con el consumo de combustible (\$/h) hoy se ha desplazado hacia la izquierda en el gráfico, es decir, hacia la zona de uso de menor cantidad de agua de imbibición. A pesar de lo sencillo de este cálculo no se reportan resultados en este sentido, por lo que puede considerarse el mismo como una contribución a los estudios para la reducción de los altos índices de consumo de agua en la industria azucarera cubana actual y reducir los consumos de energía eléctrica por bombeo.

Del gráfico se puede determinar, para un precio del azúcar y un precio del bagazo para sus diferentes usos la cantidad de agua de imbibición que económicamente es factible utilizar. El ejemplo para diferentes combinaciones de precios del azúcar crudo y precios del bagazo para diferentes usos aparecen en la siguiente tabla.

Precio del azúcar 5 centavos / libra (110 USD/t)							
Precios del bagazo para diferentes usos. (\$/t)	5,75	13,30	16,50	21,30	22,70	30,70	50,00
Cantidad de agua de imbibición a utilizar (% caña)	13,7	11,3	11	10,7	10,5	10,3	10
Precio del azúcar 9 centavos / libra (198 USD/t)							
Cantidad de agua de imbibición a utilizar (% caña)	16,5	13,3	12,6	12,2	12	11	10,5
Precio del azúcar 13 centavos / libra (286 USD/t)							
Cantidad de agua de imbibición a utilizar (% caña)	18	14,4	13,6	12,9	12,7	12	11
Precio del azúcar 30 centavos / libra (660 USD/t precio establecido para el CAME)							
Cantidad de agua de imbibición	22,5	18	15,9	15,6	15,2	14,4	12,6

a utilizar (% caña)							
----------------------	--	--	--	--	--	--	--

Tabla 2.17. Resultados de la cantidad de agua de imbibición a utilizar en función de los precios del azúcar y el bagazo como combustible y para otros usos.

Como se puede apreciar en la tabla ni siquiera para los precios diferenciados que pagaba la antigua URSS se justifica los niveles de agua de imbibición que se utilizan en la industria azucarera, solamente en el caso de que obligatoriamente haya que quemar todo el bagazo que se produce.

2.7. Análisis de sensibilidad de los modelos obtenidos.

2.7.1. Consumo de vapor de escape en un esquema de evaporación de quintuple efecto con extracciones (VE1). (Ver anexos del 2.3 al 2.7)

$VE1 = f (CH_2O, T, ME, Mol, F)$

El consumo de vapor de escape en procesos es una función de todos los factores agroindustriales analizados. Cuando aumenta la cantidad de agua de imbibición de (10 – 30) % caña, el consumo de vapor de escape aumenta 4,37 t/h; disminuye 0,57 t/h cuando la temperatura aumenta de (60–90) °C, este efecto sólo es casi despreciable en el modelo; disminuye 0,146 t/h con incrementos de la materias de (3 – 12) % caña, este efecto sólo es despreciable; cuando aumenta la razón de molienda en el rango analizado el consumo de vapor de escape aumenta en 4,52 t/h y por último con incrementos en la fibra en caña en el rango analizado disminuye el consumo de vapor en procesos 0,84 t/h debido a una disminución en la cantidad de jugos producidos y por lo tanto una menor tarea de evaporación, por lo que, el consumo de vapor de escape en procesos depende fundamentalmente de tres factores: la cantidad de agua de imbibición utilizada, la razón de molienda y la fibra en caña lo cual simplificaría grandemente el trabajo con el modelo para cálculos aproximados.

2.7.2. Consumo de vapor de escape en un esquema de evaporación de cuádruple sin extracciones (VE2).

$VE2 = f (CH_2O, T, ME, Mol, F)$

El comportamiento es similar al anterior. (Ver anexos 2.8 – 2.12)

2.7.3. Bagazo disponible (BD).(Ver anexos 2.13 – 2.16)

Con incrementos de la cantidad de agua de imbibición en el rango analizado (10 – 30) % caña el bagazo disponible aumenta en 3,06 t/h gracias al incremento de la humedad del bagazo, por lo tanto esto es totalmente engañoso; aumenta en 2,35 t/h con incrementos en las materias extrañas de (3 – 12) % caña con los valores promedios de materias extrañas de 20 fábricas azucareras típicas cubanas; con incrementos en el nivel de molienda en el rango analizado el bagazo disponible aumenta en 6,38 t/h; y por último con incrementos en la fibra en caña en el rango analizado aumenta el bagazo disponible en 3,3 t/h, por lo visto los cuatro factores son significativamente importantes.

Con este modelo además de determinar el bagazo disponible, es factible determinar el incremento de la disponibilidad de bagazo por el aumento de la humedad del mismo, lo cual crea una falsa expectativa sobre el balance energético, esto no puede hacerse con los softwares existentes.

2.7.4. Contenido de sacarosa en el bagazo (PolB). (Ver anexos del 2.17 – 2.19)

$PolB = f (CH_2O, ME, F)$

El contenido de sacarosa que permanece en el bagazo disminuye 0,466 % con respecto al peso del bagazo cuando la cantidad de agua de imbibición utilizada aumenta en el

rango utilizado; disminuye 0,274 % cuando aumenta las materias extrañas de (3 –12) % caña, este efecto también es totalmente engañoso, pues parece que tiene un efecto favorable en la extracción y lo que ocurre es que las materias extrañas pasan al bagazo casi en su totalidad y por lo tanto disminuyen el % de Pol en el bagazo, pero las pérdidas de azúcar totales aumentan, las materias extrañas son una de las causas fundamentales de la caída del rendimiento industrial, con el incremento de la fibra en caña en el rango analizado permanece casi invariable la Pol en bagazo (2,143 – 2,123) %.

2.7.5. Humedad del bagazo (HB). (Ver anexos del 2.20 – 2.22)

$$HB = f (CH_2O, ME, F)$$

La humedad del bagazo aumenta 6,15 % con respecto al peso del bagazo cuando aumenta la cantidad de agua de imbibición utilizada en el rango analizado; disminuye 3,71 % cuando aumentan las materias extrañas en el rango analizado, aquí ocurre similar a lo que ocurre en el modelo de Pol en bagazo, disminuye la humedad del bagazo a expensas de la mayor composición de elementos de las materias extrañas en el bagazo (Fibra, insolubles no fibra) y disminuye 6,3 % cuando aumenta la fibra en caña en el rango analizado para la misma cantidad de agua de imbibición a utilizar.

2.7.6. Brix del jugo mezclado (BxM). (Ver anexos del 2.23 – 2.25)

$$BxM = f (CH_2O, ME, F)$$

El Brix del jugo mezclado disminuye de (16,78 a 13,87) °Bx (2,91 °Bx) cuando aumenta la cantidad de agua de imbibición a utilizar en el rango analizado, lo que hace que sea necesario una mayor tarea de evaporación, con frecuencia los azucareros plantean no trabajar con jugos con un brix inferior a 15 debido al desbalance energético que esto les ocasiona, por esta vía pueden obtenerlo sin necesidad de determinarlo en el laboratorio y evitar grandes pérdidas energéticas; las materias extrañas entradas a fábrica en el rango analizado disminuye el brix del jugo mezclado 1,36 °Bx y la fibra en caña prácticamente no influye en el Brix del jugo mezclado (15,349 a 15,307) °Bx cuando aumenta de (12 –16) % caña, por lo tanto puede plantearse que el Brix del jugo mezclado es una función de la cantidad de agua de imbibición utilizada (principalmente) y de las materias extrañas entradas a fábrica.

2.7.7. Calor específico de combustión inferior (CECI). (Ver anexos del 2.26 – 2.28)

$$CECI = f (CH_2O, ME, F)$$

Cuando la cantidad de agua de imbibición aumenta de (10-30) % caña el CECI disminuye 1109,32 kJ/kg (10,65 %); Con respecto a las materias extrañas con la composición utilizada el CECI aumenta 889,32 kJ/kg (11,25 %) y con respecto a la fibra en caña el CECI aumenta 1400 kJ/kg (18,3 %), por lo tanto los tres factores influyen significativamente en el calor específico de combustión inferior.

2.7.8. Calor específico de combustión superior (CECS). (Ver anexos del 2.29 – 2.31)

$$CECS = f (CH_2O, ME, F)$$

El comportamiento del calor específico de combustión superior con respecto a la cantidad de agua de imbibición disminuye 1051,68 kJ/kg (12,46 %); con respecto a las materias extrañas con la composición utilizada el CECS aumenta 843,82 kJ/kg (8,55 %) y con respecto a la fibra el CECS aumenta 1327,78 kJ/kg (13,79 %), es decir, el comportamiento es similar al calor específico de combustión inferior.

2.8. Conclusiones Parciales del Capítulo.

- 1.- El procesamiento de los datos experimentales, obtenidos durante nueve zafras, teniendo en cuenta las condiciones reales de explotación y tomando en consideración las condiciones posibles a lograrse, utilizando el paquete estadístico STATGRAPHICS posibilita la obtención de los modelos matemáticos de control de la operación en función de los factores agroindustriales seleccionados.
- 2.- Se realizan en total cuatro diseños de experimentos del tipo factorial completo 2^5 , con 33 corridas experimentales incluyendo un centro, el orden de los experimentos ha sido aleatorio, la matriz experimental muestra una distribución perfectamente ortogonal.
- 3.- Hay correspondencia en el comportamiento de los modelos obtenidos con los modelos físicos estudiados.
- 4.- Los modelos de consumo de vapor de escape en proceso permiten hacer pronóstico para molidas entre (167500-380000) @/día, cualquier composición de la caña a moler, para una cantidad y temperatura del agua de imbibición a utilizar, además determina el efecto que tienen las materias extrañas desde el punto de vista energético lo que es novedoso.
- 5.- El modelo de Pol en bagazo permite planificar este indicador a los ingenios azucareros en función de los precios del azúcar, de los precios del combustible a utilizar y de la composición de la caña, que hoy no se tienen en cuenta.
- 6.- Con los modelos de humedad del bagazo y de bagazo disponible se puede calcular con certeza cual es el bagazo disponible durante la molida y determina que parte de este no es combustible por el efecto de la humedad y de los insolubles no fibra que proceden de las materias extrañas, que no se puede hacer con los softwares existentes.
- 7.- El Brix del jugo mezclado caracteriza el proceso de calentamiento, clarificación y evaporación, los modelos permiten determinarlo para la composición de materias extrañas entradas a fábrica y la cantidad de agua de imbibición a utilizar, y tomar decisiones antes de ejecutar el proceso.
- 8.- Las fórmulas de calor específico de combustión inferior y superior, están en función de la composición de la caña y no en función de la composición del bagazo como en las fórmulas propuestas por otros autores, por lo tanto, se puede pronosticar como se puede comportar la relación disponibilidad /demanda de bagazo, antes de ejecutar el proceso y hacer los ajustes necesarios.
- 9.- Los modelos propuestos por el autor se pueden utilizar con relativa facilidad, por lo que están al alcance de los técnicos de la operación.
- 10.- El gráfico que establece la relación de las pérdidas de azúcar y el consumo de combustible con la cantidad de agua de imbibición % caña adicionada, permite determinar la cantidad adecuada de agua de imbibición a utilizar para los precios actuales reduciendo los consumos de vapor en proceso, el consumo de agua en la industria azucarera y el consumo de energía eléctrica por bombeo.
- 11.- De todos los factores agroindustriales estudiados hay tres que aparecen en todos los modelos, la cantidad de agua de imbibición, las materias extrañas entradas a fábrica y el contenido de fibra en caña; las materias extrañas entradas a fábrica deben reducirse lo mínimo posible, la fibra en caña, hay que planificar en el ingenio azucarero cuando se muele una caña de mayor o menor contenido de fibra en dependencia de si el objetivo es tener mayor rendimiento industrial o sobrante de bagazo y la cantidad de agua de imbibición a utilizar debe ser la adecuada, por lo tanto hay que tener un mayor control sobre ellos.

Capítulo III. Validación de los resultados y estudio de casos, en dos ingenios azucareros de la provincia de Cienfuegos.

3.1. Validación de los modelos matemáticos propuestos por el autor.

Para realizar la validación de los modelos se escogieron dos complejos agroindustriales, el CAI “Pepito Tey” y el CAI “14 de Julio”, cuyas características son similares a las tomadas para la obtención de los modelos, y que se utilizaron para la simulación con el Sistema Termoazúcar, con el que se calcularon más de 3400 variantes para la obtención de los modelos y su validación. Estos dos ingenios azucareros pertenecen a grupo de 104 de un total de 156 que tienen molidas entre (167500 – 380000) @/día. Se utilizó el mismo principio de aleatoriedad que el utilizado para la obtención de los modelos, lo cual proporciona protección contra el efecto de las variables fantasmas.

3.1.1. Descripción del esquema térmico actual del CAI “Pepito Tey.”

El CAI “Pepito Tey” tiene una norma potencial de molida de 215000 @/día, en el área de extracción de jugos dispone de un juego de cuchillas, una desmenuzadora y cinco juegos de molinos de tres masas, todos movidos por turbinas de vapor Skoda, la clase de imbibición que utiliza es compuesta cuádruple, el esquema de evaporación de cuádruple efecto sin extracciones y cinco tachos alimentados con vapor de escape y vapor vegetal del pre-evaporador ya que este último no es capaz de satisfacer la demanda de vapor de tachos. (Ver anexo 3.1)

El vapor directo a 1,38 MPa (200 psig) y 280 °C es generado por cuatro calderas EVELMA cuyas características son las siguientes:

Nº Caldera	Capacidad (t/h)	Pr. vapor (MPa)	Tempde vapor (°C)	Superficie calórica (m ²)
1	20	1,38 (200psig)	240	740,88
2	20	1,38 (200psig)	240	740,88
3	25	1,72 (250 psig)	310	740,88
4	25	1,72 (250 psig)	310	740,88

Tabla 3.1. Características fundamentales de los generadores de vapor del CAI “Pepito Tey.”

Los consumidores de vapor directo son:

Turbina SKODA de 400HP (298,24 kW) y 4400rpm (nominal) que mueve las cuchillas.

Turbina SKODA de 400HP (298,24 kW) y 4400rpm (nominal) que mueve la desmenuzadora.

Turbina SKODA de 600HP (447 kW) y 5900rpm (nominal) que mueve los molinos 1 y 2.

Turbina SKODA de 1150 HP (857,9 kW) y 4200 rpm que mueve los molinos 3,4 y 5.

Turbogenerador Alemán VEB –1500 kW 3600 rpm .

Cuatro máquinas de vapor que mueven bombas reciprocantes cuyas características fundamentales son las siguientes:

Nº máquina.	Diámetro del pistón (m)	Recorrido del pistón (m)	r.p.m
1	0,353	0,405	32
2	0,301	0,305	170
3	0,191	0,29	80

4	0,266	0,27	41
---	-------	------	----

Tabla 3.2. Características fundamentales de las máquinas de vapor.

Consumidores de vapor de escape:

Calentadores de jugo secundario (dos trabajando y uno de reserva), de 96,43 m² de superficie de transferencia.

Calentador de jugo claro, de 96,43 m² de superficie de transferencia.

Pre- evaporador de 1005 m² (10800 pcsc).

Cuádruple efecto 2605 m² de (28000pcsc).

Tachos (uno si es necesario).

Consumidores de vapor del Pre-evaporador.

Calentadores primarios (dos trabajando y uno de reserva), de 96,43 m² de superficie de transferencia.

Tachos (cuatro).

3.1.2. Descripción del esquema térmico del CAI “ 14 de Julio. ”

El CAI “14 de Julio” tiene una norma potencial de molida de 300000 @/día, en el área de extracción de jugos está compuesta por dos juegos de cuchillas, una desmenuzadora y cinco juegos de molinos de tres masas, todos movidos por motores eléctricos, la clase de imbibición que utiliza es compuesta cuádruple, el esquema de evaporación es de quintuple efecto con extracciones y cinco tachos alimentados con vapor del pre - evaporador.(Ver anexo 3.2)

El vapor directo a 1,72 MPa (250 psig) y 320 °C es generado por cuatro calderas EVELMA cuyas características son las siguientes:

Nº Caldera	Capacidad (t/h)	Pr. vapor (MPa)	Temp.de vapor (°C)	Superficie calórica (m ²)
1	25	1,72 (250psig)	320	740,88
2	25	1,72 (250psig)	320	740,88
3	20	1,72 (250 psig)	320	740,88
4	20	1,72 (250 psig)	320	740,88

Tabla 3.3. Características fundamentales de los generadores de vapor del CAI “14 de Julio ”.

Los consumidores de vapor directo son:

Turbogenerador T4-3600T3 de la antigua URSS de 4000 kW y 3600 rpm (nominal).

Turbogenerador T2,5-3600T3 de la antigua URSS de 2500 kW y 3600 rpm (nominal).

Consumidores de vapor de escape:

Calentador de jugo claro, de 96,43 m² de superficie de transferencia.

Pre- evaporador de 1115 m² (10800 pcsc).

Quíntuple efecto 3158.7 m² de (34000pcsc).

Consumidores de vapor del Pre-evaporador y extracciones del múltiple efecto..

Tachos (cinco tachos que utilizan el vapor procedente del preevaporador.).

Calentador líquido – líquido.

Calentadores primarios (dos trabajando y uno de reserva), de 96,43 m² de superficie de transferencia. alimentado con vapor de la extracción del tercer vaso del múltiple efecto. Calentadores secundarios, de 96,43 m² de superficie de transferencia. alimentado con vapor de la extracción del primer vaso del múltiple efecto.

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos por el sistema de simulación termoazúcar, el resultado obtenido por los modelos propuestos y el error que se comete al calcularlo por estos modelos.

VE1: consumo de vapor de escape para el esquema de cuádruple efecto sin extracciones (CAI “Pepito Tey”).

VE2 : consumo de vapor de escape para el esquema de quíntuple efecto con extracciones en el primer y tercer vaso y condensado del quinto vaso al calentador líquido-líquido (CAI “14 de Julio”).

Nº	CH2 O	T	ME	Mo l	F	VE1(Ter.)	VE1(Ec.)	Dif.(%)	VE2(Ter.)	VE2(Ec.)	Dif.(%)
1	+	+	+	+	+	53,75	53,83	0,161	51,74	51,80	0,134
2	-	+	+	+	+	48,10	48,58	0,988	47,22	47,27	0,100
3	+	-	+	+	+	55,66	55,56	0,171	52,60	52,66	0,123
4	-	-	+	+	+	49,54	49,39	0,302	47,54	47,55	0,017
5	+	+	-	+	+	55,26	55,33	0,125	51,91	51,96	0,092
6	-	+	-	+	+	50,41	50,08	0,66	47,38	47,41	0,063
7	+	-	-	+	+	57,15	57,05	0,174	52,86	52,81	0,090
8	-	-	-	+	+	51,04	50,88	0,304	47,70	47,69	0,013
9	+	+	+	-	+	45,84	45,54	0,647	46,90	46,83	0,143
10	-	+	+	-	+	42,04	41,59	1,08	43,29	43,20	0,208
11	+	-	+	-	+	47,44	47,27	0,356	47,70	47,68	0,036
12	-	-	+	-	+	42,58	42,40	0,423	43,56	43,49	0,177
13	+	+	-	-	+	47,18	47,03	0,312	47,09	46,97	0,24
14	-	+	-	-	+	43,28	43,08	0,468	43,44	43,35	0,212
15	+	-	-	-	+	48,72	48,76	0,083	47,85	47,83	0,059
16	-	-	-	-	+	43,79	43,89	0,216	43,62	43,63	0,03
17	+	+	+	+	-	55,41	55,44	0,062	52,67	52,65	0,036
18	-	+	+	+	-	50,54	50,19	0,684	48,14	48,11	0,079
19	+	-	+	+	-	57,32	57,17	0,256	53,62	53,50	0,225
20	-	-	+	+	-	51,18	51	0,348	48,47	48,39	0,158
21	+	+	-	+	-	56,90	56,93	0,054	52,81	52,80	0,024
22	-	+	-	+	-	52,06	51,68	0,718	48,28	48,25	0,061
23	+	-	-	+	-	58,79	58,66	0,225	53,76	53,65	0,205
24	-	-	-	+	-	52,69	52,49	0,379	48,60	48,54	0,135
25	+	+	+	-	-	47,31	47,09	0,473	47,70	47,67	0,075
26	-	+	+	-	-	43,30	43,20	0,24	44,02	44,04	0,048
27	+	-	+	-	-	48,85	48,88	0,052	48,48	48,52	0,091
28	-	-	+	-	-	43,86	44	0,327	44,30	44,33	0,062
29	+	+	-	-	-	48,51	48,64	0,267	47,81	47,81	0,003
30	-	+	-	-	-	44,61	44,68	0,167	44,17	44,19	0,048
31	+	-	-	-	-	50,04	50,36	0,643	48,58	48,67	0,177
32	-	-	-	-	-	45,12	45,49	0,818	44,42	44,19	0,521

Tabla 3.4. Consumo de vapor de escape en proceso para el esquema de evaporación de cuádruple efecto sin extracciones (VE1, CAI “Pepito Tey”) y de quintuple efecto con extracciones (VE2, CAI “14 de Julio”) en función de los principales factores agroindustriales.

En este caso, la diferencia entre el valor calculado por los modelos, los correspondientes al laboratorio y el calculado por el Sistema de Simulación Termoazúcar no llegan al 1 %.

Para la humedad del bagazo (HB) y el bagazo disponible (BD) se obtuvieron los siguientes resultados:

Nº	CH2 O	T	ME	Mol	F	HB(Ter.)	HB(Ec.)	Dif.(%)	BD(Ter.)	BD(Ec.)	Dif.(%)
1	-	+	-	+	+	41,87	41,53	0,81	31,77	31,75	0,07
2	+	-	+	-	+	43,62	43,98	0,82	30,45	30,43	0,06
3	-	-	-	-	-	49,34	47,80	3,12	22,67	22,65	0,079
4	+	+	+	+	-	49,99	50,24	0,51	34,12	34,10	0,064
5	+	-	-	-	-	54,80	53,96	1,53	25,41	25,39	0,069
6	-	+	+	-	+	38,06	37,82	0,63	27,71	27,69	0,068
7	+	-	-	+	+	47,48	47,69	0,445	35,16	35,14	0,05
8	+	+	-	+	+	47,48	47,69	0,445	35,16	35,14	0,05
9	+	-	+	+	-	49,99	50,24	0,51	34,12	34,10	0,064
10	+	+	-	-	+	47,48	47,69	0,445	28,35	28,33	0,076
11	-	+	+	+	-	44,47	44,08	0,86	30,73	30,71	0,071
12	-	-	+	+	+	38,06	37,82	0,63	34,37	34,35	0,05
13	+	+	-	-	-	54,80	53,96	1,53	25,41	25,39	0,069
14	-	-	-	+	+	41,87	41,53	0,81	31,77	31,75	0,07
15	-	-	-	+	-	49,34	47,80	3,12	28,12	28,10	0,062
16	+	-	+	+	+	43,62	43,98	0,82	37,76	37,74	0,04
17	-	+	+	-	-	44,47	44,08	0,86	24,77	24,75	0,089
18	+	+	+	-	+	43,62	43,98	0,82	30,45	30,43	0,06
19	-	+	-	+	-	49,34	47,80	3,12	28,12	28,10	0,062
20	+	+	-	+	-	54,80	53,96	1,53	31,51	31,49	0,056
21	+	+	+	-	-	49,99	50,24	0,51	27,51	27,49	0,078
22	+	-	-	+	-	54,80	53,96	1,53	31,51	31,49	0,056
23	+	-	+	-	-	49,99	50,24	0,51	27,51	27,49	0,078
24	+	-	-	-	+	47,48	47,69	0,445	28,35	28,33	0,076
25	-	+	-	-	-	49,34	47,80	3,12	22,67	22,65	0,079
26	-	-	+	-	-	44,47	44,08	0,86	24,77	24,75	0,089
27	-	-	-	-	+	41,87	41,53	0,81	25,61	25,59	0,086
28	-	+	-	-	+	41,87	41,53	0,81	25,61	25,59	0,086
29	-	-	+	-	+	38,06	37,82	0,63	27,71	27,69	0,068
30	-	+	+	+	+	38,06	37,82	0,63	34,37	34,35	0,05
31	-	-	+	+	-	44,47	44,08	0,86	30,73	30,71	0,071
32	+	+	+	+	+	43,62	43,98	0,82	37,76	37,74	0,04

Tabla 3.5. Humedad del bagazo (HB) y el bagazo disponible (BD) en función de los principales factores agroindustriales.

Para todos los valores calculados de la humedad del bagazo (HB) la diferencia no llega al 2 %, excepto en el caso donde coinciden el mínimo de molienda, el mínimo de materias extrañas y el mínimo de fibra en caña, evento poco probable que ocurra, no obstante la diferencia es del 3,12 %, está dentro del rango de confiabilidad.

En el caso del bagazo disponible (BD) no existen diferencias significativas.

Con relación al Brix del jugo mezclado (BxM) y el contenido de sacarosa que permanece en el bagazo (PolB) se obtuvieron los siguientes resultados:

Nº	CH2 O	T	ME	Mol	F	BxM(Ter)	BxM(Ec.)	Dif.(%)	PolB (Ter.)	PolB (Ec.)	Dif.(%)
1	+	+	+	-	-	13,28	13,28	0	1,79	1,79	0
2	+	+	-	+	+	14,46	14,46	0	2,01	2,01	0
3	-	+	-	-	+	17,51	17,51	0	2,51	2,51	0
4	+	+	+	+	+	13,19	13,19	0,004	1,76	1,76	0
5	-	+	+	-	+	16,06	16,06	0	2,21	2,21	0
6	-	-	+	-	-	16,05	16,05	0	2,22	2,22	0
7	+	+	-	+	-	14,56	14,56	0	2,04	2,04	0
8	+	+	-	-	+	14,46	14,46	0	2,01	2,01	0
9	-	-	+	+	-	16,05	16,05	0	2,22	2,22	0
10	+	+	-	-	-	14,56	14,56	0	2,04	2,04	0
11	-	+	+	+	-	16,05	16,05	0	2,22	2,22	0
12	+	-	+	-	+	13,19	13,19	0,004	1,76	1,76	0
13	-	-	-	+	-	17,50	17,50	0	2,52	2,52	0
14	-	-	-	-	-	17,50	17,50	0	2,52	2,52	0
15	+	-	-	-	-	14,56	14,56	0	2,04	2,04	0
16	-	+	+	+	+	16,06	16,06	0	2,21	2,21	0
17	-	+	-	-	-	17,50	17,50	0	2,52	2,52	0
18	+	-	+	+	+	13,19	13,19	0,004	1,76	1,76	0
19	+	-	+	+	-	13,28	13,28	0	1,79	1,79	0
20	-	+	-	+	-	17,50	17,50	0	2,52	2,52	0
21	+	+	+	-	+	13,19	13,19	0,004	1,76	1,76	0
22	+	-	+	-	-	13,28	13,28	0	1,79	1,79	0
23	+	+	+	+	-	13,28	13,28	0	1,79	1,79	0
24	-	+	-	+	+	17,51	17,51	0	2,51	2,51	0
25	+	-	-	+	-	14,56	14,56	0	2,04	2,04	0
26	+	-	-	-	+	14,46	14,46	0	2,01	2,01	0
27	+	-	-	+	+	14,46	14,46	0	2,01	2,01	0
28	-	-	+	-	+	16,06	16,06	0	2,21	2,21	0
29	-	-	-	-	+	17,51	17,51	0	2,51	2,51	0
30	-	-	+	+	+	16,06	16,06	0	2,21	2,21	0
31	-	+	+	-	-	16,05	16,05	0	2,22	2,22	0
32	-	-	-	+	+	17,51	17,51	0	2,51	2,51	0

Tabla 3.6. Brix del jugo mezclado (BxM) y la pérdida de azúcar en el bagazo (PolB) en función de los principales factores agroindustriales.

No existen diferencias entre el Brix del jugo mezclado calculado por las ecuaciones propuestas por el autor y el Sistema de Simulación Termoazúcar (que se corresponden con las mediciones realizadas en el laboratorio).

En el caso del contenido de sacarosa que permanece en el bagazo ocurre similar al brix del jugo mezclado.

Para el calor específico de combustión inferior y superior los resultados son los siguientes:

Nº	CH2 O	T	ME	Mo l	F	CECI(Hug.)	CECI(Ec.)	Dif.(%)	CECS(Hug)	CECS(Ec)	Dif.(%)
1	+	+	+	-	-	7585,84	7587,16	0,017	9573,2	9544,35	0,301
2	+	+	-	+	+	8088,47	8097,8	0,11	10049,6	10028,3	0,212
3	-	+	-	-	+	9211,60	9207,15	0,048	11114,1	11079,97	0,307
4	+	+	+	+	+	8879,89	8885,3	0,06	10800,7	10835,4	0,321
5	-	+	+	-	+	9994,45	9994,66	0,002	11857,2	11887,07	0,251
6	-	-	+	-	-	8692,91	8696,5	0,041	10622,6	10596	0,250
7	+	+	-	+	-	6601,57	6596	0,084	8639,2	8663,8	0,283
8	+	+	-	-	+	8088,47	8097,8	0,11	10049,6	10028,3	0,212
9	-	-	+	+	-	8692,91	8696,5	0,041	10622,6	10596	0,250
10	+	+	-	-	-	6601,57	6596	0,084	8639,2	8663,8	0,283
11	-	+	+	+	-	8692,91	8696,5	0,041	10622,6	10596	0,250
12	+	-	+	-	+	8879,89	8885,3	0,06	10800,7	10835,4	0,320
13	-	-	-	+	-	7694,88	7705,3	0,13	9675,5	9715,48	0,411
14	-	-	-	-	-	7694,88	7705,3	0,13	9675,5	9715,48	0,411
15	+	-	-	-	-	6601,57	6596	0,084	8639,2	8663,8	0,283
16	-	+	+	+	+	9994,45	9994,66	0,002	11857,2	11887,07	0,251
17	-	+	-	-	-	7694,88	7705,3	0,13	9675,5	9715,48	0,411
18	+	-	+	+	+	8879,89	8885,3	0,06	10800,7	10835,4	0,321
19	+	-	+	+	-	7585,84	7587,16	0,017	9573,2	9544,35	0,301
20	-	+	-	+	-	7694,88	7705,3	0,13	9675,5	9715,48	0,411
21	+	+	+	-	+	8879,89	8885,3	0,06	10800,7	10835,4	0,321
22	+	-	+	-	-	7585,84	7587,16	0,017	9573,2	9544,35	0,301
23	+	+	+	+	-	7585,84	7587,16	0,017	9573,2	9544,35	0,301
24	-	+	-	+	+	9211,60	9207,15	0,048	11114,1	11079,97	0,307
25	+	-	-	+	-	6601,57	6596	0,084	8639,2	8663,8	0,283
26	+	-	-	-	+	8088,47	8097,8	0,11	10049,6	10028,3	0,212
27	+	-	-	+	+	8088,47	8097,8	0,11	10049,6	10028,3	0,212
28	-	-	+	-	+	9994,45	9994,66	0,002	11857,2	11887,07	0,251
29	-	-	-	-	+	9211,60	9207,15	0,048	11114,1	11079,97	0,307
30	-	-	+	+	+	9994,45	9994,66	0,002	11857,2	11887,07	0,251
31	-	+	+	-	-	8692,91	8696,5	0,041	10622,6	10596	0,250
32	-	-	-	+	+	9211,60	9207,15	0,048	11114,1	11079,97	0,307

Tabla 3.7. Calor específico de combustión superior (CECS) e inferior (CECI) del bagazo en función de los principales factores agroindustriales.

En cuanto al calor específico de combustión inferior la diferencia no rebasa el 0,15 % y para el superior no alcanza el 0,4 %, comparado con los valores calculados por las fórmulas de Hugot ⁽¹¹⁸⁾ citadas por Rubio ⁽¹⁹²⁾ y Sarría ⁽¹⁹⁴⁾ en sus respectivas Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas) que son las más utilizadas y de mejores resultados.

Además el autor determina estos valores por las fórmulas propuestas por otros autores y determina la diferencia entre estos valores y los calculados por las fórmulas propuestas (se tomaron los nueve valores diferentes de CECS y CECI en el rango tomado para los diseños de experimento), cuyos resultados aparecen a continuación.

Para el calor específico de combustión superior.

N ^o	CH2 O	T	ME	Mol	F	W	S	A	BxBa g	F.Ba g.	F. Parr	F. Van der Horst
1	-	+	+	+	+	38,06	2,21	1,858	2,52	59,36	11677,42	11726
2	-	+	-	+	+	41,87	2,51	1,744	2,80	56,10	11107,43	10989
3	+	+	+	-	+	43,62	1,76	1,691	2,01	54,02	10584,4	10688
4	-	+	+	+	-	44,47	2,22	1,666	2,52	52,59	10389,97	10507
5	0	0	0	0	0	45,80	2,16	1,626	2,41	51,87	10242,03	10257
6	+	-	-	+	+	47,48	2,01	1,576	2,24	50,69	9992,62	9944
7	-	+	-	+	-	49,34	2,52	1,52	2,80	48,30	9821,86	9570
8	+	+	+	+	-	49,99	1,79	1,5	2,03	47,36	9321,28	9477
9	+	-	-	+	-	54,80	2,04	1,36	2,26	43,10	8552,4	8552

(Continuación.)

N ^o	F. Hessey	F. Sudáfrica	F. Australia	F. Upadhiaya	F Hugot	F. Propuesta
1	11912,3	11700,6	11676	11576,6	11857,2	11887,07
2	11157,7	10967,3	10941,2	10864,5	11114,1	11080
3	10856,9	10659,1	10637,6	10537,4	10800,7	10835,4
4	10668,3	10481,6	10458,6	10378,5	10622,6	10596
5	10413,3	10232,06	10208,3	10130	10368,4	10293,8
6	10095,2	9917,9	9895,1	9816	10049,6	10028,3
7	9708	9546,7	9522,5	9468,3	9675,5	9715,5
8	9619,6	9447,1	9427	9346,9	9573,24	9544,4
9	8673,5	8525,3	8504,2	8447,9	8639,22	8663,8

Tabla 3.8. Calor específico de combustión superior (CECS) del bagazo para las fórmulas propuestas por distintos autores y la fórmula propuesta por el autor.

Para el calor específico de combustión inferior.

N ^o	CH2	T	ME	Mol	F	W	S	A	BxBa	F.Ba	F. Van	F.
----------------	-----	---	----	-----	---	---	---	---	------	------	--------	----

	O								g	g.	Horst	Hessey
1	-	+	+	+	+	38,06	2,21	1,858	2,52	59,36	10057,12	10194,89
2	-	+	-	+	+	41,87	2,51	1,744	2,80	56,10	9278,71	9398,39
3	+	+	+	-	+	43,62	1,76	1,691	2,01	54,02	8958,46	9078,26
4	-	+	+	+	-	44,47	2,22	1,666	2,52	52,59	8768,29	8880,32
5	0	0	0	0	0	45,80	2,16	1,626	2,41	51,87	8503,48	8610,76
6	+	-	-	+	+	47,48	2,01	1,576	2,24	50,69	8172,1	8274,09
7	-	+	-	+	-	49,34	2,52	1,52	2,80	48,30	7776,82	7866,52
8	+	+	+	+	-	49,99	1,79	1,5	2,03	47,36	7676,83	7770,87
9	+	-	-	+	-	54,80	2,04	1,36	2,26	43,10	6699,52	6771,94

(Continuación.)

Nº	F. Rápida Hugot.	F. Sudáfrica	F. Upadhiaya	F. Hugot	F. Propuesta
1	10065	9965	10696	9994,45	9994,66
2	9291,78	9165	10018	9211,60	9207,15
3	8936,4	8827	9706	8879,9	8879,9
4	8763,8	8634	9555	8692,9	8696,5
5	8493,76	8362	9318	8424,8	8346,25
6	8152,6	8018	9019	8088,5	8097,8
7	7774,9	7615	8688	7694,88	7705,3
8	7642,9	7504	8572	7585,84	7587,16
9	6666,2	6498	7716	6601,57	6596

Tabla 3.9. Calor específico de combustión inferior (CECI) del bagazo para las fórmulas propuestas por distintos autores y la fórmula propuesta por el autor.

La siguiente tabla muestra la diferencia entre los valores calculados de CECS por la fórmula propuesta por el autor y las fórmulas propuestas por otros autores.

Nº	F. Parr	F.V. Horst	F. Hessey	F. Sudáfrica	F. Australia	F. Upadhiaya	F. Hugot
1	1,76	1,35	0,212	1,57	1,77	2,61	0,25
2	0,247	0,82	0,696	1,017	1,25	1,94	0,3
3	2,31	1,36	0,198	1,627	1,82	2,75	0,32
4	1,94	0,84	0,677	1,08	1,29	2,05	0,25
5	0,5	0,357	1,14	0,6	0,83	1,59	0,72
6	0,356	0,84	0,66	1,10	1,33	2,11	0,21
7	1,09	1,49	0,08	1,73	1,99	2,54	0,41
8	2,33	0,71	0,78	1,01	1,23	2,07	0,3
9	1,28	0,94	0,112	1,6	1,84	2,49	0,28

Tabla 3.10. Diferencia en % entre los valores del CECS calculados por la fórmula propuesta por el autor y las fórmulas propuestas por los demás autores.

La diferencia entre los valores calculados de CECI por la fórmula propuesta por el autor y las fórmulas propuestas por otros autores se muestran a continuación:

Nº	F.V. Horst	F. Hessey	F. Sudáfrica	F.Ráp.Hugot	F. Upadhiaya	F. Hugot
----	------------	-----------	--------------	-------------	--------------	----------

1	0,62	1,96	0,296	0,698	6,5	0,02
2	0,77	2,03	0,45	0,91	8,09	0,048
3	0,87	2,18	0,595	0,63	8,5	0
4	0,82	2,07	0,72	0,768	9,02	0,05
5	1,84	3,07	0,188	1,73	9,6	0,94
6	0,91	2,13	0,985	0,67	10,2	0,115
7	0,92	2,05	1,17	0,89	11,4	0,135
8	1,16	2,36	1,09	0,73	11,5	0,017
9	1,54	2,6	1,48	1,05	14,4	0,084

Tabla 3.11. Diferencia en % entre los valores del CECI calculados por la fórmula propuesta por el autor y las fórmulas propuestas por los demás autores.

Para el calor específico de combustión superior e inferior no existen diferencias apreciables en los valores calculados por las fórmulas propuestas por el autor con respecto a los valores calculados por las fórmulas propuestas por otros autores todas por debajo del 2 %, excepto con respecto a las fórmulas propuestas por Upadhiaya que para el CECS la diferencia está entre (1,59 – 2,75) % y para el CECI la diferencia está entre (6,5-14,4) %, dado fundamentalmente porque en sus ecuaciones no aparece el término asociado a la Pol en bagazo, término este que su efecto es considerable.

A continuación aparecen los gráficos donde se puede observar el comportamiento del CECS y el CECI calculado por las ecuaciones dadas por el autor y por otros autores.

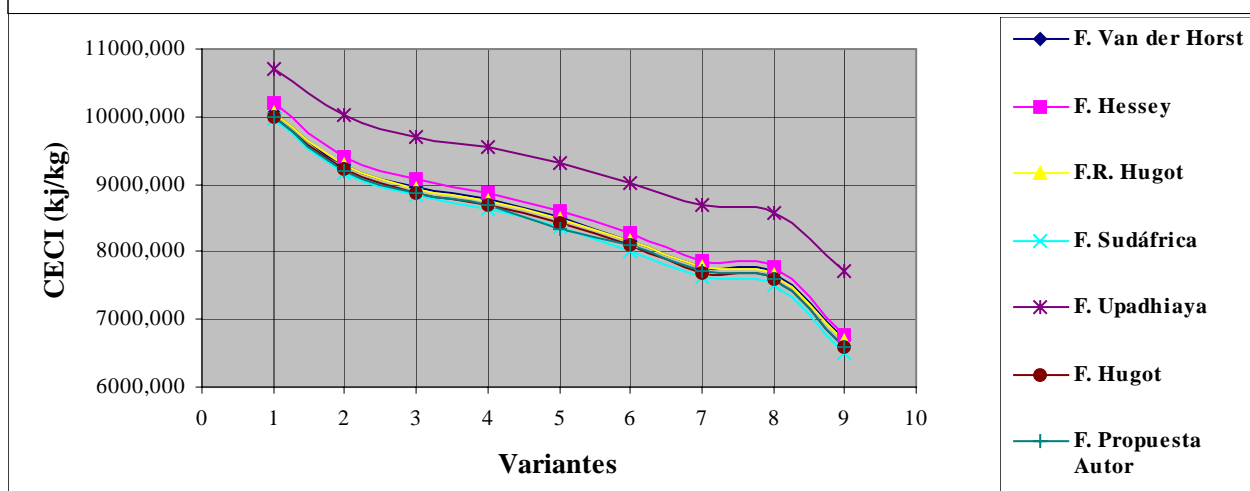
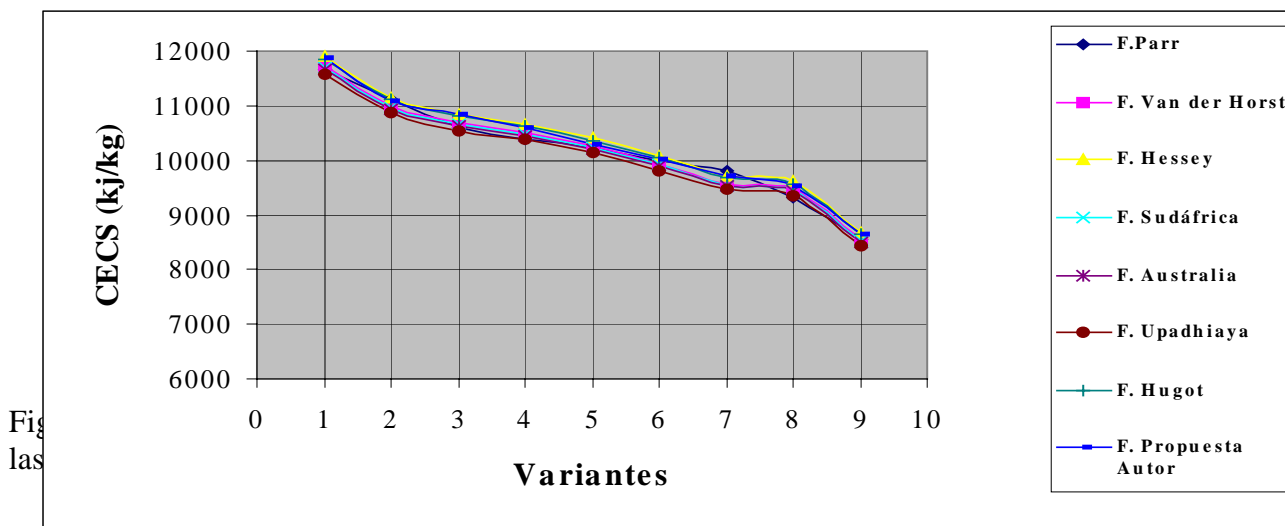


Fig. 3.2. Relación del calor específico de combustión inferior del bagazo calculado por las ecuaciones dadas por el autor y por otros autores.

3.2. Aplicación de los modelos y el nomograma propuesto por el autor y análisis económico.

3.2.1. CAI “ 14 de Julio”.

Para aplicar el procedimiento se utilizaron los precios del azúcar del día 3 de diciembre de 2001 16,58 centavos USD/kg (7,64 centavos USD/lb) y los precios del bagazo como combustible y para otros usos que aparecen en el capítulo I.

Utilizando el gráfico del (anexo 2.2) podemos determinar para estos precios que la máxima cantidad de agua de imbibición a utilizar está entre (15,4 - 10,4) % caña.

Antes de utilizar el procedimiento en el CAI “14 de Julio” se utilizó como promedio 29,52 % caña de agua de imbibición y valores puntuales que llegaron hasta 32,5 % caña, 10,03 % caña de materias extrañas, sin embargo, en Cuba se reportan valores para algunos ingenios entre (2,77-5,14) % caña, y se utilizó el agua de imbibición a 65 °C de temperatura, existiendo las condiciones para usarla a 85°C.

Molida: 300000 @/día	Pol en el bagazo : 1,81 %
Consumo de vapor de escape: 62,3 t/h	Humedad del bagazo: 47.78 %
Brix del jugo mezclado : 13,59 °Bx	CECI : 8068,11 kJ/kg
Bagazo disponible : 44,1 t/h	Indice de generación de vapor: 2,036 kgv/kgbag.

Tabla 3.12. Resultados fundamentales de la aplicación de los modelos para las condiciones de operación existentes.

Para las nuevas condiciones de operación establecidas por los modelos, 15,4 % caña de agua de imbibición, 5 % caña de materias extrañas, y temperatura del agua de imbibición de 85 °C, para la misma fibra en caña y razón de molida, los resultados son los siguientes:

Molida: 300000 @/día	Pol en el bagazo : 2,33 %
Consumo de vapor de escape: 57,60 t/h	Humedad del bagazo: 45,38 %
Brix del jugo mezclado : 16,45 °Bx	CECI : 8379,35 kJ/kg
Bagazo disponible : 39,19 t/h	Indice de generación de vapor: 2,114 kgv/kgbag.

Tabla 3.13. Resultados fundamentales de la aplicación de los modelos para las condiciones de operación establecidas.

Se incrementan las pérdidas de azúcar en el bagazo en 0,1016 t/h y disminuye el consumo de vapor en proceso 4,7 t/h , para el tiempo efectivo de molida en la zafra pasada que fue 2227,8 horas se perdieron en la zafra 226,34 t de azúcar, que con el

precio del azúcar actual representan 34381,04 USD, pero, se ahorran 4078,87 toneladas de bagazo, que según el destino que se le de al bagazo representan:

Si hay que utilizar combustible adicional : (precio del combustible convencional 130 USD/t) representan 101971,75 USD.

Para generar energía eléctrica: (50-80) USD/MW-h, (13,3-21,3) USD/t de bagazo : lo que representan entre (54248,97 – 86879,93) USD en dependencia del precio a que se venda la energía eléctrica.

Para producir papel: (21,98 USD/t) representan un ingreso 89653,56 USD.

Para tableros :(30,7 USD/ t) representan 125221,31 USD

Para producir Furfural : (50 USD/t) que representan 203943.50 USD.

Este es un ingenio azucarero que fue remodelado energéticamente y muestra buenos resultados, como por ejemplo, el índice de generación de energía eléctrica es de 33,45 kW-h/t.c.m , el índice de consumo de energía eléctrica fue de 22,47 kW-h/t.c.m , con un índice de entrega al SEN de 10,98 kW-h/t.c.m, uno de los mejores del país.

El índice de consumo de vapor era 433 kg/t.c.m y controlando la operación se reduce hasta 400 kg/t.c.m.

El consumo de agua se reduce de 42,45 t/h a 21,57 t/h, y el consumo de energía eléctrica se reduce en 6574,77 kW-h en la zafra.

El efecto económico total por el control de los parámetros de operación para una zafra puede representar entre (67919,45 – 68116,69) USD si se utiliza un combustible adicional; si el bagazo ahorrado se utiliza para generar energía eléctrica para la venta (20196,67 – 53024,87) USD; si se vende a papeleras (55601– 55798,5) USD; si se destina a la producción de tableros entre (91169 – 91366,25) USD; y para producir furfural (169891,20 - 170088,44) USD.

Con el uso del nomograma, conociendo los precios actuales del azúcar y del bagazo como combustible y para otros usos, se puede determinar la cantidad óptima de agua de imbibición a utilizar, reduciendo los consumos de vapor de escape en proceso, el consumo de agua y el consumo de energía eléctrica por bombeo.

3.2.2. CAI “ Pepito Tey”.

Antes de utilizar el procedimiento de control operacional, en el CAI “Pepito Tey” se utilizó como promedio 30 % caña de agua de imbibición, 5,3 % caña de materias extrañas, y temperatura del agua de imbibición de 65 °C, los resultados aparecen a continuación:

Molida: 215000 @/día	Pol en el bagazo : 1,90 %
Consumo de vapor de escape: 49,93 t/h	Humedad del bagazo: 48,02 %
Brix del jugo mezclado : 13,95 °Bx	CECI : 7990,56 kJ/kg
Bagazo disponible : 31,48 t/h	Indice de generación de vapor: 2,453 kgv/kgbag.

Tabla 3.14. Resultados fundamentales de la aplicación de los modelos para las condiciones de operación existentes.

Para las nuevas condiciones de operación establecidas por los modelos 15,4 % caña de agua de imbibición, temperatura del agua de imbibición de 85 °C, los resultados son los siguientes:

Molida: 215000 @/día	Pol en el bagazo : 2,26 %
Consumo de vapor de escape: 47,57 t/h	Humedad del bagazo: 43,52 %
Brix del jugo mezclado : 16,096 °Bx	CECI : 8290,1 kJ/kg

Bagazo disponible : 29,24 t/h	Indice de generación de vapor: 2,546 kgv/kgbag.
-------------------------------	---

Tabla 3.15. Resultados fundamentales de la aplicación de los modelos para las condiciones de operación establecidas.

En los resultados se observan incrementos de las pérdidas de azúcar en el bagazo en 0,06268 t/h y disminución del consumo de vapor en proceso de 2,36 t/h , para el tiempo efectivo de molida en la zafra pasada, que fue 1340 horas se perdieron 83,99 t de azúcar, que con el precio del azúcar actual representan 13924,53 USD, pero, se ahorran 1242,1 toneladas de bagazo por la disminución del consumo de vapor en proceso, que según el destino que se le de al bagazo representan:

Si hay que utilizar combustible adicional : (precio del combustible convencional 130 USD/t) representan 30756,70 USD.

Para generar energía eléctrica: (50-80) USD/MW-h, (13,30-21,30) USD/t de bagazo : lo que representan entre (16519,93 – 26456,73) USD en dependencia del precio a que se venda la energía eléctrica.

Para producir papel: (21,98 USD/t) representan un ingreso 27301,36 USD.

Para tableros :(30,7 USD/ t) representan 38132,47 USD

Para producir Furfural : (50 USD/t) que representan 62105 USD.

El índice de consumo de vapor era 485 kg/t.c.m y controlando la operación se reduce hasta 461 kg/t.c.m, estos índices son muy elevados.

El consumo de agua se reduce de 30,9 t/h a 15,86 t/h, es decir, se ahorran en una zafra 20153,6 t de agua y el consumo de energía eléctrica por bombeo del agua de imbibición se reduce en 2957 kW-h .

El efecto económico total por el control de los parámetros de operación para una zafra puede representar entre (16980,02 – 17068,73) USD si se utiliza un combustible adicional; si el bagazo ahorrado se utiliza para generar energía eléctrica para la venta (2743,25 – 12768,76) USD; si se vende a papeleras (13524,68– 13613,39) USD; si se destina a la producción de tableros entre (24355,79 – 24444,45) USD; y para producir furfural (48328,32 – 48417,03) USD por lo que ofrece una vía hacia donde dirigir los esfuerzos.

Este es un ingenio azucarero con muy malos resultados en el control y uso racional de la energía, como por ejemplo, el índice de generación de energía eléctrica es de 10 kW-h/t.c.m , el índice de consumo de energía eléctrica fue de 17,78 kW-h/t.c.m , con un índice de consumo del SEN de 7,78 kW-h/t.c.m, por lo que se considera de los peores resultados del país, siendo necesario remodelar el esquema térmico.

3.3. Remodelación del esquema térmico del CAI “ Pepito Tey. ”

Hasta la zafra (92-93), la situación del CAI es totalmente inoperante termoenergéticamente, por las constantes arrancadas y paradas motivadas por la falta de combustible, se necesitaba de un combustible adicional (leña), baja presión de vapor, el turbogenerador solamente generaba 600 kW como promedio, baja temperatura del agua de alimentar calderas, se expulsaba gran cantidad de vapor de escape a la atmósfera, por lo que se decidió acometer la remodelación del esquema térmico a partir de los estudios, modelos y propuestas del autor.

El proceso remodelación hay que dividirlo en tres grandes etapas.

1. En la primera etapa se busca lograr que el ingenio no compre energía de una fuente externa.
2. En la segunda etapa se espera obtener bagazo en exceso y/o realizar cogeneración para exportar.

3. Finalizada la tercera etapa el ingenio debe estar en condiciones de vender cantidades significativas de electricidad.

La remodelación del esquema térmico se realiza en varias etapas, que se enmarcan dentro de las tres señaladas anteriormente, fundamentalmente por el volumen de trabajos a realizar, por el tiempo de reparaciones del ingenio y por los recursos disponibles, pensando siempre en un futuro trabajar con una sola línea de presión a 1,72 MPa y 310 °C.

Las condiciones de trabajo antes de la remodelación son: Dos líneas de presión, la línea de alta presión [1,24 MPa (180 psig) y 240 °C] y una línea de baja presión [1,034 MPa (150 psig) y 210 °C]. Los equipos consumidores de vapor directo de la línea de alta presión , un turbogenerador VEB alemán de 1500 kW y de la línea de baja presión una turbina Skoda que mueve las cuchillas, tres máquinas de vapor que mueven la desmenuzadora y cinco juegos de molinos, siete bombas con máquinas recíprocas, y una bomba de vacío. Consumen vapor de escape dos juegos de calentadores de jugo secundarios y uno de jugo claro, el pre-evaporador, el cuádruple efecto y dos tachos. Con vapor del pre-evaporador trabajan dos juegos de calentadores primarios y dos tachos. La válvula reductora # 1 que transforma el vapor directo de alta presión a baja presión y la # 2 que transforma el vapor directo de baja presión en vapor de escape. (Ver anexo 3.3)

Con los modelos obtenidos se estructura todo el sistema de cálculo y análisis para la conformación de las etapas que se discuten a continuación:

I Etapa. Se buscaron variantes de molida y se efectuó la remodelación de los generadores de vapor 3 y 4. Montaje de sobrecalentador con lo que se lograba que los parámetros del vapor de la línea de alta presión que alimenta al turbogenerador se elevaran a 1,38 MPa (200 psig) y 265 °C.

Como puede observarse en la tabla 3.16 para ningún régimen de molida se logra autoabastecimiento de combustible, sólo para el caso de 3220 t.c/día, lo que es prácticamente imposible lograr por el ingenio.

Resultados / Molida (t/día)	2472,5	2645,5	2760,5	3220
Generación de energía eléct.(kW)	900	900	900	900
Consumo de vapor de alta (t/h)	22,3	22,4	24,7	22,3
Consumo de vapor de baja “	37,7	39,2	41,5	45,4
Consumo de vapor de escape “	28,2	29,6	30,3	33,2
Vapor generado por alta “	40	40	39,7	37,3
Vapor generado por baja “	20	21,8	26,2	30,4
Vapor por reductora # 1 “	17,7	17,5	15	15
Vapor por reductora # 2 “	5	5,9	4,6	12,1
Vapor de escape a la atmósfera “	4,4	3,8	6,6	0,1
Sobrante de bagazo “	-	-	-	0,5
Déficit de bagazo “	4,7	3	3,9	-

Tabla3.16. Resultados más significativos obtenidos de los balances de la I Etapa de remodelación para diferentes variantes de molida.

Se determinó que lo más racional era moler a 2472,5 t/día y sin tener que realizar grandes inversiones (montaje de sobrecalentadores) se trabajara con 1,38 MPa y 265 °C en la línea de alta presión, en la cual está conectado el turbogenerador, y los demás motores primarios en la línea de baja presión 1,034 MPa y 210 °C para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Resultados/Gen.Eléctrica. kW	900	1000	1100	1200	1250
Consumo de vapor de alta t/h	17	18,9	20,8	22,7	23,7
Consumo de vapor de baja “	42,1	40,2	38,3	36,4	35,5
Vapor generado por alta “	20	20	38,8	40	40
Vapor generado por baja “	39,1	39,1	20,3	19,1	19,1
Vapor por reductora # 1 “	3	1,1	18	17,3	18,3
Vapor por reductora # 2 “	9,5	7,6	5,7	3,8	2,8
Vapor de escape a la atm. “	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Sobrante de bagazo “	0,9	0,9	0,6	0,6	-
Déficit de bagazo “	-	-	-	-	0,8

Tabla 3.17. Resultados más significativos obtenidos de los balances de la I Etapa de remodelación con incrementos de los parámetros del vapor .

II Etapa. Se pasa la turbina Skoda que mueve las cuchillas para la línea de alta presión (1,38 MPa y 265 °C) conjuntamente con el turbogenerador, el resto de los motores primarios en la línea de baja presión (1,034 MPa y 210 °C). Se cambió un tramo de tubería para 1,72 MPa, que aunque en estos momentos no los requería ya quedaba instalado definitivamente. Se sustituye la máquina de vapor que mueve la bomba de vacío por un motor eléctrico, y se trabaja con cinco de las siete bombas reciprocantes existentes.

III Etapa. Sustitución de la máquina de vapor que mueve la desmenuzadora por una turbina Skoda de 298,7 kW y 4300 rpm, trabajando en la línea de alta presión (1,38 MPa y 265 °C) conjuntamente con la turbina que mueve las cuchillas y el turbogenerador, los demás motores primarios por la línea de baja presión (1,034 MPa y 210 °C). Se sustituye además un tramo de tubería para 1,72 MPa. Al concluir estas etapas se logra utilizar el turbogenerador a plena capacidad (1500 kW) con sobrantes de bagazo significativos.

IV Etapa. Sustitución de las máquinas de vapor que mueve los molinos por turbinas Skoda de 447 y 856,7 kW. Todos los motores primarios conectados a la línea de alta presión (una sola línea de presión a 1,24 MPa y 280 °C), excepto las máquinas de vapor de las bombas (1,034 MPa y 210 °C) que son alimentadas con vapor de la válvula reductora # 1. Se montó un quinto tacho, se dejaron trabajando 4 bombas solamente.

V Etapa. Remodelación de los generadores de vapor 1 y 2 con lo cual se puede pasar a parámetros del vapor de 1,72 MPa y 310 °C. Los resultados más importantes de estas etapas aparecen en la siguiente tabla.

Resultados.	II Etapa	III Etapa	IV Etapa	V Etapa
Generación de electricidad kW	1500	1500	1500	1500
Consumo de vapor de alta t/h	32,8	37,8	55,7	48,3
Consumo de vapor de baja “	25,9	20,4	-	-
Vapor generado por alta “	40	40	40	49

Vapor generado por baja	“	18,7	18,8	16,3	-
Vapor por reductora #1	“	7,2	2,2	6,3	6,3
Vapor por reductora #2	“	0	0	3	-
Vapor de esc. a la atm.	“	3,2	2,9	0,5	-
Sobrante de bagazo	“	2,5	2,8	4,3	6,9

Tabla 3.18. Resultados de los balances para la II,III, IV y V Etapas.

VI Etapa. Sustitución del generador eléctrico de 1500 kW por uno de 3000 kW, ya que la turbina que está montada está diseñada para esa capacidad, sustitución de las máquinas de vapor que mueven las bombas de mieles y magma por motores eléctricos con lo que se puede trabajar con una sola línea de presión sin necesidad de pasar vapor por reductora de vapor directo de la línea de alta presión a la línea de baja presión e incrementando la molida hasta 240000 @ / día , de donde se tienen diferentes variantes de operación, que se muestran a continuación.

molida: 215000 @ / día (con 4 bombas accionadas por máquinas de vapor)					
Generación kW	3000	2700	2700	2400	2200
Demanda de vapor directo t / h	62,04	61,97	57,45	56,58	56,54
Demanda de directo a motores primarios t / h	60,89	57,45	57,45	53,99	51,7
Disponibilidad de escape t / h	59,67	56,30	56,30	52,91	50,66
Consumo de escape t / h	60,83	60,83	55,51	55,51	55,51
Bagazo disponible t / h	30,97	30,97	30,97	30,97	30,97
Sobrante de bagazo t / h			1,41	1,85	1,87
Déficit de bagazo t / h	1,03	0,99			
Vapor por reductora # 1 t / h	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72
Vapor por reductora # 2 t / h	1,15	4,52	0	2,59	4,84
Vapor a la atmósfera t / h	0	0	0,79	0	0

Tabla 3.19. Resultados de los balances para una molida de 215000 @ / día y bombas de mieles y magma accionadas por máquinas de vapor.

Molida: 215000 @ / día (utilizando 4 bombas con motores eléctricos)				
Generación kW	3000	2700	2400	2200
Demanda de vapor directo t / h	56,61	56,54	56,47	56,43
Demanda de directo a motores primarios t/h	55,17	51,73	48,27	45,98
Disponibilidad de escape t / h	54,06	50,69	47,3	45,06
Consumo de escape t / h	55,51	55,51	55,51	55,51
Bagazo disponible t / h	30,97	30,97	30,97	30,97
Sobrante de bagazo t / h	1,85	1,88	1,92	1,94
Déficit de bagazo t / h	-	-	-	-
Vapor por reductora # 2 t / h	1,44	4,81	8,2	10,45
Vapor a la atmósfera t / h	0	0	0	0

Tabla 3.20. Resultados de los balances para una molida de 215000 @ / día y bombas de mieles y magma accionadas por motores eléctricos.

Molida: 240000 @ / día (con 4 bombas accionadas por máquinas de vapor)					
Generación kW	3000	2700	2700	2400	2200
Demanda de vapor directo t / h	62,37	62,29	57,45	56,68	56,64
Demanda de directo a motores primarios t/h	60,89	57,45	57,45	53,99	51,7
Disponibilidad de escape t / h	59,67	56,30	56,30	52,91	50,66
Consumo de escape t / h	61,15	61,15	55,61	55,61	55,61
Bagazo disponible t / h	34,57	34,57	34,57	34,57	34,57
Sobrante de bagazo t / h	2,38	2,44	5,01	5,31	5,43
Déficit de bagazo t / h	-	-	-	-	-
Vapor por reductora # 1 t / h	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72
Vapor por reductora # 2 t / h	1,48	4,84	0	2,69	4,94
Vapor a la atmósfera t / h	0	0	0,69	0	0

Tabla 3.21. Resultados de los balances para una molida de 240000 @ / día y bombas de mieles y magma accionadas por máquinas de vapor.

Molida: 240000 @ / día (utilizando 4 bombas con motores eléctricos)				
Generación kW	3000	2700	2400	2200
Demanda de vapor directo t / h	56,71	56,65	56,57	56,52
Demanda de directo a motores primarios t/h	55,17	51,73	48,27	45,98
disponibilidad de escape t / h	54,06	50,69	47,3	45,06
consumo de escape t / h	55,61	55,61	55,61	55,61
bagazo disponible t / h	34,57	34,57	34,57	34,57
sobrante de bagazo t / h	5,39	5,43	5,47	5,49
déficit de bagazo t / h				
vapor por reductora # 2 t / h	1,54	4,92	8,3	10,54
vapor a la atmósfera t / h	0	0	0	0

Tabla 3.22. Resultados de los balances para una molida de 240000 @ / día y bombas de mieles y magma accionadas por motores eléctricos.

3.3.1. Análisis económico de la remodelación.

El autor propone realizar la remodelación del Esquema Térmico en tres etapas, en el caso estudiado se realiza en seis etapas que se incluyen en las tres etapas mencionadas, debido a los siguientes elementos: el volumen de trabajo a realizar, el tiempo de ejecución de las inversiones tiene que ajustarse al tiempo de reparación entre zafras y los recursos disponibles.

La reparación completa propuesta por el autor se considera como una pequeña inversión, por lo tanto, para la evaluación económica de la remodelación se realiza a una primera etapa que se corresponde con la remodelación ejecutada hasta el momento y una segunda etapa que es la remodelación completa sin cambios de tecnología, la adquisición de nuevas tecnologías pertenecen a la tercera etapa lo cual no es objetivo de este trabajo.

Para realizar el cálculo económico de la remodelación efectuada se utilizó el sistema STORM .

Se realizaron las siguientes inversiones para las primeras cuatro etapas de remodelación.:

Costo total de adquisición y montaje de tuberías. (\$ 17917,09)

Montaje de los sobrecalentadores en los generadores de vapor 3 y 4. (\$ 21999,60)

Montaje de un quinto tacho. (\$ 352300,00)

Tres turbinas Skoda y agregados. (\$ 676700,00)

Costo total de la inversión : \$ 1068916,70

Antes de comenzar la remodelación hay un déficit de bagazo de 4,66 t/h para una generación de energía eléctrica de 900 kW.

Con la remodelación de las cuatro primeras etapas (están ejecutadas) y se trabaja con ese esquema térmico, obteniéndose las siguientes mejoras energéticas :

Sobrante de bagazo : 4,27 t/h

Generación de energía eléctrica : 1500 kW

El índice de generación de energía eléctrica es de 14,56 kW-h/t.c.m

Bagazo ahorrado con la remodelación : 8,93 t/h

Para 90 días de molida efectivos se ahorran 3414,96 tcc/zafra * 130 USD/tcc = 443944,8 USD/zafra

Ahorro por la energía eléctrica.

Total que deja de pagarse al SEN : \$ 73600,00

Ahorro total que reporta = 517544,80 \$/zafra.

Tasa de descuento : 14 %

Tiempo de recuperación de la inversión: 2,06 zafras

Tasa de retorno: 48,4 %

VAN: \$ 2121251,00

Hasta el momento esta cuatro etapas están ejecutadas, la inversión tiene un VAN positivo, con una elevada tasa de retorno, lo que permite recuperar la inversión en dos zafras de 90 días (representan seis meses de trabajo del ingenio azucarero)

Para las dos últimas etapas propuestas.

Molida 240000 @/ día

Bagazo sobrante : 5,39 t/h

Generación de energía eléctrica : 3000 kW

El índice de generación de energía eléctrica es de 28,49 kW-h/t.c.m

Gastos remodelación del generador de vapor # 2 (18 atm y 310°C) \$ 741804,80

Sustitución del generador eléctrico de 1500 kW por uno de 3000kW \$ 190000,00

Costo total de la inversión \$ 2000721,50

Efecto económico por ahorro de combustible 438002,10 USD/zafra.

Valor de la energía que deja de pagarse y venta al SEN 188352,00 \$/zafra.

Tasa de descuento: 14 %.

VAN \$ 3162624,00

TIR 33,02 %.

Tiempo de recuperación de la inversión 2,9 zafras.

Estas dos últimas etapas que están por ejecutarse, es una inversión atractiva desde el punto de vista económico, se logra el autoabastecimiento de combustible y energía eléctrica , permite vender una cantidad considerable de energía eléctrica al S.E.N.

3.4. Evaluación ambiental de los casos estudiados.

Para evaluar el impacto ambiental de los procedimientos propuestos por el autor, en los casos estudiados, se tomaron en cuenta los siguientes elementos:

Reducción de las emisiones de CO₂, SO_x, NO_x al sustituir fuel-oil que utiliza el SEN por bagazo para generar energía eléctrica.

Ahorro de bagazo producto de la implantación de los procedimientos propuestos, que provoca que haya que utilizar menos bagazo como combustible y por lo tanto se reducen las emisiones de CO₂ y NO_x.

Disminución del consumo de agua en la industria al utilizar la cantidad adecuada de agua de imbibición..

Reducción del consumo de energía eléctrica debido a la disminución de la cantidad de agua a bombear.

Los valores de estos elementos para ambos casos aparecen en el epígrafe 3.2 y 3.3.

Para determinar las emisiones de CO₂, NO_x y SO_x cuando se utiliza energía eléctrica del SEN con fuel-oil como combustible se utilizaron las siguientes expresiones dadas por Borroto⁽²²⁾.

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= (44/12 * 0,88 * D_{\text{fuel-oil}}) * 1,12 && D_{\text{fuel-oil}}: \text{Consumo de fuel-oil para generar} \\ &&& \text{la energía eléctrica.} \\ \text{SO}_x &= (36/12 * 0,04 * D_{\text{fuel-oil}}) * 1,12 && 1,12 : \text{Coeficiente que tiene en cuenta las} \\ &&& \text{pérdidas en la red de transmisión y} \\ \text{NO}_x &= (0,13 \text{ Kg} / 10^6 \text{ kJ}) * 1,12 && \text{distribución de la energía eléctrica.} \end{aligned}$$

El SEN tiene un consumo específico de combustible en la actualidad de 260 kg/MW-h. El calor específico de combustión inferior del fuel-oil utilizado por el SEN es 10400 kJ/kg.

Para determinar la reducción de las emisiones de CO₂ y NO_x al dejar de combustionar una cantidad

de bagazo se utilizaron los índices de emisiones dados por Quintana⁽¹⁷⁸⁾ y que aparecen en el Capítulo I.

Los costos externos ambientales según Borroto son: ⁽²²⁾

Una tonelada de CO₂ \$ 31,61

Una tonelada de SO_x \$ 9101,5

Una tonelada de NO_x \$ 13952

Los resultados obtenidos se reportan en la tabla 3.23 donde se puede observar la mejora ambiental que implicaría la sustitución de fuel-oil del SEN por bagazo en los ingenios azucareros para generar energía eléctrica, el ahorro de bagazo y de agua producto de las mejoras implementadas en el control de la operación, de aquí se puede inferir que dejan de emitirse, aproximadamente, en el CAI "Pepito Tey" 3596,08 t de CO₂, 0,06888 t de SO_x y 6,991 t de NO_x que valorado por sus costos externos ambientales significan \$ 65027,79; también debido a la disminución de la cantidad de agua de imbibición a utilizar se ahorran 20153,6 m³ de agua.

Combinando el control de la operación con la remodelación efectuada hasta el momento (cuatro primeras etapas) dejan de emitirse 11299,87 t de CO₂, 18,80 t de SO_x y 20,79 t de NO_x que valorado por sus costos externos ambientales significan \$ 818455,72; y se ahorran 20153,6 m³ de agua.

Con la remodelación completa dejan de emitirse 14510,94 t de CO₂, 65,62 t de SO_x y 24,076 t de NO_x que valorado por sus costos externos ambientales significan \$ 1391910,26 y un ahorro de agua de 22494,3 m³.

De igual forma para el CAI "14 de Julio" se reducen las emisiones en 3599,48 t de CO₂, 0,1532 t de SO_x y 7,013 t de NO_x que representan \$ 212763,02 por sus costos externos ambientales y un ahorro de agua de 46516,5 m³.

Debido a:	Parám.	Procedimiento de control de la operación				Remodelación (CAI “Pepito Tey”)			
		CAI '14 de Julio”		CAI “Pepito Tey”		Cuatro etapas ejecut.		Rem. Completa.	
		Cantidad (t/h)	Costos Amb. (\$/zafra)	Cantidad (t/h)	Cost. Amb. (\$/zafra)	Cantidad (t/h)	Costos Amb. (\$/zafra)	Cantidad (t/h)	Costos Amb. (\$/zafra)
Ahorro de energía eléctrica en el bombeo de agua.	CO ₂	6,178	195,29	2,7784	87,82	2,7784	87,82	3,10	97,99
	SO _x	0,1532	1394,35	0,06888	626,91	0,06888	626,91	0,07688	699,72
	NO _x	0,0231	32,23	0,001164	16,236	0,001164	16,236	0,0013	18,14
Subtotal	-	-	1621,87	-	730,96	-	730,96	-	815,85
Energía eléctrica que se genera a partir del bagazo en vez de fuel –oil.	CO ₂	-	-	-	-	755,44	23879,46	2644,05	83578,42
	SO _x	-	-	-	-	18,73	170471,1	65,55	596603,33
	NO _x	-	-	-	-	0,283	3948,42	0,989	13798,53
Subtotal	-	-	-	-	-	-	198298,98	-	693980,28
Ahorro de bagazo	CO ₂	3593,3	113583,90	1094,23	34588,64	10541,65	333221,63	11863,78	375014,27
	SO _x	-	-	-	-	-	-	-	-
	NO _x	6,99	97557,25	2,129	29708,19	20,51	286204,15	23,086	322099,86
Subtotal	-	-	211141,15	-	64296,83	-	619425,78	-	697114,13
Ahorro de agua	-	46516,1	-	20153,6	-	20153,6	-	22494,3	-
Total	-	-	212763,02	-	65027,79	-	818455,72	-	1391910,26

Tabla 3.23. Evaluación ambiental de los casos estudiados.

Conclusiones Parciales del Capítulo.

- 1.- Para realizar la validación de los modelos propuestos se escogieron los ingenios “ Pepito Tey” (con un trabajo del autor durante nueve zafras) y “ 14 de Julio” con características y resultados diferentes, en ambos casos se encuentran en el rango analizado para la obtención de los modelos.(molidas desde (167500- 380000) @/día, en este rango hay 104 de los 156 ingenios azucareros cubanos).
- 2.- Los modelos de pronóstico para el cálculo del consumo de vapor de escape (VE1,VE2) para los esquemas de evaporación más comunes en la industria azucarera se obtiene una diferencia con respecto a los calculados por el Sistema de Simulación Termoazúcar inferior al 2 %, lo que los hace utilizable con un alto nivel de confiabilidad.
- 3.- Los modelos de humedad del bagazo (HB), Brix del jugo mezclado (BxM), Pol en bagazo (PolB) y bagazo disponible (BD), que dependen de la composición de la caña (materias extrañas entradas a fábrica, contenido de fibra en caña) y del proceso de extracción del jugo (preparación de la caña, esquema de imbibición utilizado y cantidad de agua de imbibición utilizada), prácticamente no difieren de los calculados por el Sistema de simulación Termoazúcar y de los tomados en el laboratorio, pero con las potencialidades del ahorro de tiempo y facilidad de uso que implican dichos modelos.
- 4.- El comportamiento de los modelos para calcular el calor específico de combustión superior e inferior propuestos por el autor y las ecuaciones propuestas por otros autores es similar, excepto con las fórmulas propuestas por Upadhiaya que no tiene en cuenta el término de pol en bagazo. En este caso se puede determinar el calor específico de combustión superior e inferior conociendo la composición de la caña y la cantidad de agua de imbibición a utilizar, fáciles de obtener y sin necesidad de ejecutarse el proceso, a diferencia de las demás ecuaciones que utilizan los resultados de los análisis de laboratorio del bagazo después de la molida.
- 5.- Al efectuar la tercera etapa de la remodelación el ingenio es capaz de autoabastecerse de combustible, no así de energía eléctrica, aunque el índice de generación de energía eléctrica se incrementa hasta 14,56 kW-h/t.c.m.
- 6.- Efectuada la cuarta etapa el índice de generación de energía eléctrica se mantiene igual ya que el turbogenerador está trabajando a plena capacidad, pero, el bagazo sobrante ahora es muy superior 4,7 t/h ; al evaluar la inversión hasta ese momento tiene un Valor Presente Neto (VAN) de \$ 2121251,00, TIR de 40,8 % y un tiempo de recuperación de la inversión de 2,5 zafras.
- 7.- Concluida la remodelación se pueden generar 3000 kW, lográndose un índice de generación de energía eléctrica de 28,49 kW-h/t.c.m, se autoabastece y puede entregar 10,7 kW-h/t.c.m al SEN; al evaluar la inversión el Valor Presente Neto (VAN) es \$ 3162624,00, TIR de 33,02 % y un tiempo de recuperación de la inversión de 2,9 zafras.
- 8.- Con el uso de los modelos y el nomograma propuesto en el CAI “14 de Julio” se logra un efecto económico de acuerdo al uso que se le de al bagazo entre (20196,67- 170088,44) \$/zafra por control de la operación y en el CAI “Pepito Tey” entre (2743,25- 48417,03) \$/zafra, que unido a la remodelación puede llegar hasta 736245,09 \$/zafra.
- 9.- Utilizando el procedimiento de control de la operación propuesto por el autor en el CAI “14 de Julio” se reducen las emisiones de CO₂ en 3599,48 t, NO_x en 7,013 t y SO_x en 0,1532 t que representan 212763,02 \$/zafra valorado por sus costos externos ambientales y un ahorro de agua de 46516,5 m³.
- 10.- En el caso del CAI “Pepito Tey” pueden reducirse las emisiones de CO₂ en 3596,08 t, NO_x en 6,991 t y SO_x en 0,06888 t que representan 65027,79 \$/zafra valorado por sus costos externos ambientales y combinado con la remodelación del esquema termico puede llegar hasta 1391910,26\$/zafra con un ahorro de agua de 46516,5m

Conclusiones generales.

El estudio realizado en este trabajo permite formular las conclusiones generales siguientes:

- 1.- Del consumo de energía eléctrica de la industria azucarera cubana, entre el (30-40) % es del Sistema Electroenergético Nacional (SEN).
- 2.- Se obtienen ocho modelos matemáticos mediante los cuales se puede calcular el consumo de vapor de escape en proceso, la pol, humedad y el calor específico de combustión inferior y superior del bagazo, el brix del jugo mezclado y el bagazo disponible, con los que se caracteriza energéticamente un ingenio azucarero en función de los parámetros agroindustriales, controlables y conocidos con relativa facilidad.

Los modelos matemáticos constituyen aportes científicos de esta tesis.

- 3.- El gnomograma que relaciona la variación de las pérdidas de azúcar en el bagazo y el consumo de vapor en función de la cantidad de agua de imbibición, permite determinar la cantidad óptima de agua de imbibición a utilizar en función de los precios del azúcar y del bagazo para diferentes usos.

Este gnomograma constituye un aporte científico del autor, los criterios que se siguen con el uso de la cantidad de agua de imbibición son de los años cuarenta, cuando la relación precios del azúcar / precios del combustible era otra muy diferente.

- 4.- Los modelos matemáticos y el gnomograma permiten establecer las condiciones más favorables de la operación, para los precios del azúcar y del combustible actuales con efectos económicos importantes, se obtienen resultados no reportados.
- 5.- Los modelos matemáticos a diferencia de los softwares de cálculo de balance de ingenios azucareros, permite realizar los cálculos con relativa facilidad a los técnicos que dirigen el proceso azucarero, y pronosticar cómo será su comportamiento energético, aún cuando el proceso no se esté ejecutando y establecer los criterios de explotación adecuados. El MINAZ planifica una cantidad de agua de imbibición y una pol en bagazo a los ingenios azucareros antes de comenzar la zafra, sin tener en cuenta la composición de la caña, que además varía durante la zafra, ni los precios del azúcar y el combustible, estos procedimientos pueden ser utilizados para panificar estos indicadores.

- 6.- Los modelos fueron validados en dos ingenios azucareros de la provincia de Cienfuegos “Pepito Tey” y “14 de Julio” resultando con un alto nivel de confiabilidad.
- 7.- En el estudio de caso, el CAI “Pepito Tey” a pesar de lograr mejoras para las nuevas condiciones de operación establecidas, es necesario realizar una remodelación de su esquema térmico, lo cual es válido para los restantes 24 ingenios azucareros con estas características.
- 8.- La remodelación se realiza en varias etapas, lográndose incrementar el índice de generación de energía eléctrica desde 5,82 kW-h/t.c.m hasta 28,5 kW-h/t.c.m, con un sobrante de bagazo que permite el trabajo estable de la industria y entregar aproximadamente 12 kW-h/t.c.m al SEN, con un VAN de 3162624, el TIR 33,02 % y la inversión se recupera en 3,19 zafras.
- 9.- Con la aplicación de los procedimientos propuestos se reducen las emisiones de CO₂ y el consumo de agua en la industria, lo que medioambientalmente es muy favorable.

Recomendaciones.

- 1.- La cantidad de agua de imbibición y el contenido de sacarosa en el bagazo (PolB) deben planificarse en función de los precios del azúcar, de los precios del combustible y de la composición de la caña a moler y no antes de comenzar la zafra como se hace por el MINAZ, sin tener en cuenta estos factores, lo que provoca que se tomen estrategias de operación erróneas para cumplir estos indicadores.
- 2.- Utilizar los modelos matemáticos obtenidos en este trabajo para ingenios azucareros que cumplan con las condiciones establecidas, para hacer pronósticos antes de comenzar la zafra y establecer los criterios de operación adecuados, lo que se hace en la actualidad con los softwares existentes y los datos de zafras pasadas.
- 3.- Realizar la remodelación efectuada en el CAI “Pepito Tey” en los restantes 24 ingenios azucareros de ese tipo que hay en el país, cuyos esquemas permiten pocas mejoras desde el punto de vista energético.

Bibliografía.

- 1.- Ablitt, I. What Future For Condensing Turbines in Sugar Mills ? International Sugar Journal, 1993,
Vol. 95, N° 1130.
- 2.- Acosta, I. Análisis Bibliográfico para la Cogeneración/ I. Acosta, L. Santos Macías. Cienfuegos:
Universidad de Cienfuegos, 1995, 112 p.
- 3.- Acosta, R. Consideraciones sobre el Desarrollo Sustentable y su Relación con el Medio Ambiente
y la Energía en Cuba. Memorias Energía. Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable. (Acatlán - México), 1992, p. 111 –122

- México), 1992, p. 111 –122
- 4.- Allan, A. I. Exploitation of Trash on Pol Losses in Bagasse. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technology, 17, 1980, 838-849
 - 5.- Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar. Características Generales de las Fábricas Australianas. CENICANA, 1995.
 - 6.- Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de azúcar, http://www.cenicana.org/publicaciones/informe_anual/mercadeodetecnologia.pdf, 2001.
 - 7.- Australia. Laboratory Manual for Australian Sugar Mills. Boreau of Sugar Experiment Stations. Bisbane, 1984.
 - 8.- Autogeneración y Cogeneración de Energía. Dominick Tatarka, 1994, 155 p.
 - 9.- Avila Rodríguez, A. A., González Pérez (Tutor), F. Validación de los Modelos Matemáticos de Algunos Factores que Afectan la Cogeneración en un Ingenio Azucarero (CAI “ 14 de Julio”). Trabajo de Diploma. UCF. 2001.
 - 10.-Azúcar Principal Producto de Tamazula. www.tamazula.com/economia/agricultura/cana.
 - 11.-Bagasse Calorific Value. Southern African Sugar Technologists Laboratory Manual. Agosto, www.sugartech.co.za/extraccion/bagassecv.php3 ,2001.
 - 12.-Balance de Fibra % caña. Comité de Agroindustria Azucarera. México. . www.sagar.gob.mx/coazucar/menu6/final21.htm , mayo 2001.
 13. Balance de Pol en Porcentajes por Ingenios. Informe Final. Zafra 1999-2000. Comité de Agroindustria Azucarera. México. www.sagar.gob.mx/coazucar/menu6/final18.htm., mayo 2001.
 - 14.- Baquero Franco, J. La Cogeneración. La Aplicación en el Sector Agroindustrial. Alimentación, Equipo y Tecnología. , (5), Junio 1995, p. 125 – 129
 - 15.- Barreto, L. Efecto de Varios Porcentajes y Tipos de Trash en Rendimiento de Azúcar. International Sugar Journal, 1991, Vol. 93, N°1113.
 - 16.- Barroso Estébanez, J. A. Determinación de Algunos Factores Empíricos Utilizados en el Cálculo Térmico del Horno de las Calderas de bagazo en suspensión – Capa. Tesis Doctoral, Santiago de Cuba, 1988.
 - 17.- Beatón Silva, P. Campo de Temperatura de una Caldera Reto (CV–25–18). Ingeniería Energética, N° 3, 1988, p. 219 – 222

- 18.- Beatón Silva, P. Pruebas de Balance Térmico en Calderas para Bagazo. Santiago de Cuba, 1991.
- 19.- Benítez, A.J., Calvo, A. Ambiente de Referencia y Exergía: Definición para una Fábrica de Azúcar Crudo. Revista Centro Azúcar, Abril – Junio, 2000, p. 59 – 64
- 20.- Benítez Fundora, A. J. Método Termoeconómico Aplicado a Nuevas Soluciones Energéticas para la Industria Azucarera. Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Matanzas, 2000.
- 21.- Berberena González, V., Chávez Cárdenas, M. C., Ruíz Mesa. D., Núñez Rodríguez, G. Estudio de las Superficies de Respuesta de Procesos Químicos. Centro Azúcar, N° 1, Enero – Abril, 1994, p. 64 – 70
- 22.- Borroto Nordelo, A., Borroto Bermúdez, A.J. Los Sistemas Energéticos y sus Costos Ambientales. CEEMA, Universidad de Cienfuegos, 1997.
- 23- Borroto, A., Castellanos, J., Martínez, D. Posibilidades de Lograr la Autosuficiencia Energética de los Ingenios Azucareros Mexicanos. Segundo Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos, Cuba, 1998.
- 24.- Howell, R. Selección de Turbinas de Vapor para Cogeneración . Peter Brotherhood LTd. Revista International Sugar Journal, Vol. 98, N° 1167, 1996.
- 25.- Brazil C&T. www.mct.gov.br/clima/espan/comunic_old/coperal7.htm, 2000.
- 26.- Brown, M. La Cogeneración en la Nueva Europa. La dimensión Política. Cogeneración para la Energía y el Medio Ambiente, Madrid, Editorial ENAGAS, IDEA, 1992, 16 p.
- 27.- Burgos Gil, W., Valdés Barrón , E., García Giraldo, M., Leiva Avila, M. Las Materias Extrañas y el Contenido de no Azúcares Inorgánicos en los Jugos de Caña . Centro Azúcar, N° 2, Abril – Junio, 1989, p. 24 – 27
- 28.- Cabrera Gorrín, O. Análisis Termodinámico de Esquemas de Cogeneración en la Industria Azucarera/ Osmel Cabrera Gorrín, Juan Castellanos Alvarez, Universidad de Cienfuegos, 1994, 14 p.
- 29.- Cabrera Gorrín, O., Valdivia Rojas, M., Romero Romero, O. Análisis de la Cogeneración en la Industria Azucarera de la Provincia de Sancti Spiritus y Recomendaciones para Mejorarla. Revista Centro Azúcar, Mayo – Agosto, 1998, p. 66 - 69
- 30.- Cabrera Gorrín, O., Valdivia Rojas, M., Romero Romero, O. Diagnóstico y Factibilidad de la Cogeneración en la Industria Azucarera de la Provincia de Sancti Spiritus. Revista Centro Azúcar, Septiembre – Diciembre, 1998, p. 23 - 26

- 31.- Calvo González, A. La Cogeneración y la Industria Azucarera, Revista Centro Azúcar, Mayo - Agosto, 1994, p. 21 - 32.
- 32.- Campos Avella, J. C. Diplomado de Ahorro de Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad de Guadalajara, México, 1993.
- 33.- Capote Castillo, R. Análisis del Proceso de Purificación del Jugo de la Caña Mediante las Técnicas Básicas de Control de Calidad. Centro Azúcar, N° 2, Mayo – Agosto, 1990, p. 10 – 17
- 34.- Características Fundamentales del Bagazo. Australian Academy of Technological Sciences and Engineering. www.austech.unimelb.edu.au/tia/796html, 2000.
- 35.- Características Fundamentales del Programa de Simulación TERMOAZUCAR, Versión 3.1, Facultad de Mecánica, UCF, 1996.
- 36.- Carrillo, M. J., Alvarez, M., Ramírez, D., Cuellar, E., González, V., Pradkp, N. Automatización del Balance Termoenergético de Centrales Azucareros. Centro Azúcar, N° 3, Septiembre – Diciembre, 1994, p. 83 – 87
- 37.- Carrillo, M. J. La Modelación Matemática y el Balance Termoenergético. Centro Azúcar, Número Especial, 1985, p. 79 – 88
- 38.- Casanova Cabezas, E. Evaluación de los Factores Agroindustriales y la Determinación Cuantitativa de su Influencia en la Fábrica Azucarera. Tesis Presentada en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias. UCLV 1986.
- 39.- 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. Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Cienfuegos. 1996. 96p.
- 40.- Castellanos Alvarez, J. Indices Energéticos en Fábricas de Azúcar con Esquemas de Cogeneración. Serie Monotemática “Termoenergética Industrial”, Avances de Investigación, (1), 1989, p.1 - 9.
- 41.- Castillo Coto, A. L. Prospectiva Tecnológica para el Desarrollo Competitivo de la Industria Azucarera en la Provincia de Cienfuegos. Tesis en Opción al Grado Científico de Máster en Dirección de Empresas. ISPJAE. La Habana, 1997.
- 42.- Castro Díaz - Balart, F. Energía Nuclear y Desarrollo, La Habana, Editorial de Ciencias Sociales, 1995, 39 p.
- 43.- Castro Ruz, F. Conferencia en las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Mensaje de Fidel Castro. Río de Janeiro, Oficina de Publicaciones del Consejo de Estado, 1993, 53 p.

- 44.- Cataluña Busca en la Cogeneración una Alternativa Ambiental y Viable Frente al Cambio Climático. www.expansiondirecto.com/edicion/noticia/marzo/2001.
- 45.- Celozzi, M. El desarrollo Reciente de la Cogeneración en Italia. Cogeneración para la Energía y el Medio Ambiente, Madrid, Editorial ENAGAS, IDAE, 1992,383 p.
- 46.- Cerro , E. Hay que Poner a Tucumán de Pie. Centro Azucarero Regional de Tucumán. www.lagaceta.com.ar/images86/fin9.htm 2000.
- 47.- Christodoulou, P. A. Energy Economy Optimization in Separation Processes. Hellenic Sugar Industry, Thessaloniki, Greece. International Sugar Journal, 1996, Vol. 98, N° 1172S, p.419 – 430
- 48.- Cobas Ballano, A. Optimización del Régimen de Funcionamiento en Instalaciones de Cogeneración, Revista Energía, España, (3), Mayo - Junio 1995, p. 47 – 54
- 49.- Cogeneración. www.genermex.com/genermex_espanol/cog.htm, 2000.
- 50.- Cogeneración y Ahorro Energético. www.gva.es/impiva/servicios/publica/ediciones/ahorene.html, 2000.
- 51.-Cogeneration in the Indian Sugar Industria. En: <http://www.yahoo.com/Science/Energy/> Biomass,1998.
- 52.- Comité Central del PCC. “ Resolución Económica del V Congreso del PCC ”. Periódico Granma, La Habana, 7 de Noviembre, 1997.
- 53.- Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. Diseño de Sistemas de Cogeneración. CONAE. Secretaría de Energía. México. 1995.
- 54.- Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. Esquemas de Cogeneración. CONAE. Secretaría de Energía. México. 1995.
- 55.- Cruz Rodríguez, F. Azúcar que se Pierde en la Cosecha y Manipulación. Cuba Azúcar, Julio – Septiembre, 1998, p. 24 – 26
- 56.- Cruz Rodríguez, F. Situación de la Producción Mundial de Azúcar. Ingenio. Boletín Mensual de Información para la Industria del Azúcar y Derivados. Publicaciones Azucareras, año 1, N° 1. Junio 1999.
- 57.- 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, tutor, Universidad de Cienfuegos, 1994.
- 58.- Cuba. Comisión Nacional de Energía. Técnicas de Conservación Energética en la Industria, T-I, La Habana, Edición Revolucionaria, 1982, 508 p.
- 59.- Cuba. Comisión Nacional de Energía. Técnicas de Conservación Energética en la Industria. T-II. La Habana. Edición Revolucionaria, 1982, 583 p.

- 60.- Cuba. Ministerio del Azúcar. Situación Actual y Proyección del Programa de Desarrollo de la Fuente Nacional de Energía en la Agroindustria Azucarera. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 1995, 166 p.
- 61.- Cuba. Unión Nacional Eléctrica. Estudio de Factibilidad para la Instalación de una Central Eléctrica Cogeneradora en un Central Azucarero. Ministerio de la Industria Básica. La Habana, 1996.
- 62.- Cundy, A. Combustion of Vagase. Fuel, Vol. 62, Julio, 1983, p. 775-780.
- 63.- Curbelo Alonso, A., Garea Moreda B. Generación de electricidad a Partir del Bagazo en Cuba. División de Industria y Energía. Agencia de Ciencia y Tecnología. Cuba , 2001.
- 64.- De Armas Teyra, M. Desarrollo de la Bioenergética Azucarera y su Impacto Medioambiental. Cienfuegos. Delegación Provincial del Minaz, 1997.
- 65.- De Armas Teyra, M. Desarrollo y Caracterización de la Cogeneración de Energía Eléctrica en la Provincia de Cienfuegos. Apuntes sobre la Relación Técnico - Económica entre el SEN y la Industria Azucarera. Delegación Provincial del Minaz. Cienfuegos, 1996, 12 p.
- 66.- Del Portillo Vázquez, J. M. Producción Combinada de Calor y Energía Eléctrica en Centrales Azucareros. Revista Cuba Azúcar, Enero - Abril, 1979, p. 53 – 73
- 67.-Ecuador: Indicadores de la Agroindustria azucarera 1998-1999. www.sica.gov.ec/cadenas/azucar/docs/indicadores.htm, 2001.
- 68.- Eduardo Heise, C., Taufic Nahas, E. Estado del Arte de la Cogeneración en Brasil. Cuba Azúcar, Julio – Septiembre, 1998, p.47 – 48
- 69.- El Bassam, N. Biomass for Energy Import on Environment and Development. Federal Agricultural Research Centre. Germany, 1997.
- 70.- El Principio de la Eficiencia. www.gasnaturalban.com/cocostos.html_2k, 2001.
- 71.- Escalada de los Precios del Azúcar. Diario Estrategia. www.estrategia.cl/hist/200102/13/economi/ana.htm Febrero, 2001.
- 72.- España. Directorio de Turbina de Gas. Revista Energía, Madrid, XXIII (3), Mayo – Junio, 1997, p. 31 - 37
- 73.- España. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. Uso Eficiente de Energía en Calderas y Redes de Fluidos, IDEA, Madrid, 1988, p. 140 – 146
- 74.- Espinosa Pedraja, R., Carrillo Alfonso , M. J., Machado, S., Reymond, A. Algunas Consideraciones sobre los Consumos Energéticos en los Motores Primarios en los

- CAI de la Provincia de Villa Clara. Centro Azúcar, N° 2, Abril – Junio, 1989, p. 47 – 49
- 75.- Espinosa Pedraja, R. Algunas Vías para la Optimización de la Energía Térmica en Centrales Azucareros. Revista Centro Azúcar, Enero - Abril, 1979, p. 53 - 73
- 76.- Espinosa Pedraja, R. Balance Termoenergético de un Central Azucarero, Revista Centro Azúcar, Mayo – Agosto, 1979, p. 39 – 51
- 77.- Espinosa Pedraja, R. Balance Termoenergético en los Centrales Azucareros, Revista Centro Azúcar, N° 2, Mayo – Agosto, 1981, p. 73 – 85
- 78.- Espinosa Pedraja, R. Sistemas de Utilización del Calor. UCLV. Editorial Pueblo y Educación, 1987, 212 p.
- 79.- Fábregas Ríos, M.E. Análisis y Alternativas de la Cogeneración en un CAI con Destilería Anexa. Miriam E. Fábregas: Osvaldo Romero Romero. Trabajo de Diploma. UCLV, 1996.
- 80.- FENAZUCAR. Proyecto SICA, Banco Mundial. Indicadores de la Zafra 1998-1999. Ecuador. www.sica.gov.ec/cadenas/azucar/docs/indicadores.htm, 2000.
- 81.- Forgueiras Rodríguez, A. Características del Sistema para la Optimización de Centrales Azucareros (SOOCA). Centro Azúcar, N° 1, Enero – Diciembre, 1996, p. 54 – 58
- 82.- Fors, A. L. La Calidad de la Caña de Azúcar que Entra en Fábrica con Relación a la Cosecha Mecanizada. Sugar Journal, 3(1), 1983, p. 11 – 13
- 83.- Fraile, D. Sistemas de Recuperación de Calor en Cogeneración. Cómo Elegir el Sistema de Recuperación de una Planta de Cogeneración. Ingeniería Química. España, Marzo, 1996, p. 89 - 96
- 84.- Francisco, S. M. Energías Renovables, Industria y Medio Ambiente. Economía Industrial. El Reto Industrial del Medio Ambiente, Centro de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía, 1994.
- 85.- Franco Trigueros, S. Ahorro Energético en Plantas de Cogeneración. Revista Ingeniería Química. España, (3), Marzo, 1996, p. 115 – 119
- 86.- Franco Trigueros, S., Argemi, R. Tecnología y Desarrollo Actual de la Cogeneración para Pequeñas Empresas. Ingeniería Química, marzo, 1996, p. 93 – 100
- 87.- Gabra, M. Sugar Cane Residual Fuels a Viable Substitute for fossil Fuels in Tanzania Sugar Industry. Renewable Energy for Development : <http://www.yahoo.com/Sciences/Energy/Biomass>, 1995.

- 88.- García Aminaña, D. Cogeneración con Turbina de Gas: Reducción de Emisiones de Nox. Revista Ingeniería Química, España, (5), Mayo, 1990, p. 159 – 163
- 89.- García, F., Clark, J. Combinaciones de Evaporación de Alta Eficiencia y Producción de Bagazo y Energía Eléctrica. Cuba Azúcar, N° 4, 1969,p. 17 – 31
- 90.- García Rodríguez, A., Rubio González, A. Consideraciones Teóricas sobre la Combustión del Bagazo Integral. Centro Azúcar, N° 1, Enero – Abril, 1994, p. 49 – 57
- 91.- Garret Price, B. A. Cogeneration. Right for your Plant. Chemical Engineering, Abril, 1987, p. 51 – 57
- 92.- Gil Ortiz, J.M., Torres Rodríguez, N. Y Otros. El Detergente Industrial en el Agua de Imbibición para Disminuir el Pol y la Humedad del Bagazo en el Central Azucarero. Facultad Universitaria de Las Tunas, Cuba, 2000.
- 93.- González Pérez, F. Análisis de Factibilidad del Cambio de la Turbina que Mueve las Cuchillas de la Línea de Baja Presión para la Línea de alta Presión del CAI “Pepito Tey”. Informe Final de Investigación. Delegación Provincial del MINAZ. Cienfuegos, 1996.
- 94.- González Pérez, F. Análisis de Factibilidad del Montaje de un Turbogenerador Allis Chalmers de Baja Presión en el CAI “Pepito tey”. Informe Final de Investigación. Delegación Provincial del MINAZ. Cienfuegos, 1996.
- 95.- González Pérez, F. Desarrollo de las Fuentes Energéticas y su Impacto Social. Trabajo Presentado en el Examen de Mínimo Doctorado de Problemas Sociales de la Ciencia y la Tecnología. UCf,1999.
- 96.- González Pérez, F., Castellanos Alvarez, J.A., Otros. Diagnóstico Energético para Implantar la Tecnología de Gestión Total Eficiente de Energía en un Ingenio Azucarero de Cienfuegos. Revista Centro Azúcar, octubre-diciembre, 2001.
- 97.- González Pérez, F. Remodelación del Esquema Térmico del CAI “Pepito Tey”. Tesis en Opción al Grado Científico de Máster en Ciencias. UCf, 1997.
- 98.-González Pérez, F., Castellanos Alvarez, J.A., Puerta Fernández, F. Remodelación para la Cogeneración de un Ingenio Azucarero de la Provincia de Cienfuegos, Revista Centro Azúcar (2), abril-junio, 2000.
- 99.- González Pérez, F. Castellanos Alvarez, J.A., Puerta Fernández, F. Remodelación del Esquema Térmico del CAI “Pepito Tey”. Ponencia Presentada al XII Fórum Provincial de Ciencia y Técnica (Mención), Cienfuegos, 1998.

- 100.- González Pérez, F., Echevarría, R., Moya, A., Vázquez, M. Resultados de la Prueba de Necesidad para Implantar la Tecnología de Gestión Total Eficiente de Energía (TGTEE) en el CAI “Pepito Tey”, 2000.
- 101.- González Pérez, F. Sistema de Gestión Total Eficiente de Energía en el CAI “Pepito Tey”. www.ucf.edu.cu/publicaciones/anuario99/energia/felix/felix.html, 2001.
- 102.- González Pérez, F. Echevarría, R., Otros. Sistema de Gestión Total Eficiente de Energía en el CAI “Pepito Tey”. Ponencia Presentada al XIII Fórum Municipal de Ciencia y Técnica (Destacado), CAI “Pepito Tey”, 1999.
- 103.- González Suárez, E., Cardoso Pérez G., Berberena González V. El Diseño de Experimentos en el Análisis de Procesos en un País en Vías de Desarrollo . Centro Azúcar, N° 1, Enero – Abril, 1993, p. 77 – 82.
- 104.- González Suárez, E., Brito Rabelo, F., Cárdenas Martínez, A., Fernández Bernal, J. Modelación Matemática del Proceso Tecnológico en el CAI “Pepito Tey”. Centro Azúcar, N° 2, Mayo – Agosto, 1993, p. 77 – 81
- 105.- González Suárez, E., Cardoso Pérez, G. Posibilidades de la Modelación Matemática en la Estimación del Efecto de Diferentes Variedades de Caña en el Proceso Tecnológico. Centro Azúcar, N° 2, Mayo – Agosto, 1994, p. 76 – 84
- 106.- González Suárez, E. Prospectiva Tecnológica de la Industria Azucarera. Seminario de Perfeccionamiento de la Agroindustria de la Caña de Azúcar. República Dominicana, 1996.
- 107.- Gopinath, S. Cogeneration Expanding in the Indian Sugar Industry. International Cane Energy News/s.a/, 1997, p. 8- 9
- 108.- Guerrero García, J. La Cogeneración en el Marco del Plan de Ahorro y la Eficiencia Energética (PAEE). Madrid. Editorial ENAGAS. IDAE, 1992, 383 p.
- 109.- Guía de Consulta para el Sistema TERMOAZUCAR, Versión 3.1. Facultad de Mecánica. UCf, 1996.
- 110.- Guzmán Sosa, Y. Estudio para la producción Diversificada en el CAI “5 de Septiembre”. Tesis en Opción al Grado Científico de Máster en Ciencias Técnicas, Mayo, 2000.
- 111.- Harmont, R. The Key to Cogeneration and Combined Cycles. Revista Mechanical Engineering, Febrero, 1988, p. 32 – 39

- 112.- Hawaiian Renewable Energy Data Report – 1995. State of Hawaii Renewable Energy Savings. En : <http://yahoo.com/Sciences/Energy/Biomass>, 1995.
- 113.- Hernández Fonseca, J. La Cogeneración a Altas Presiones: Un Imperativo Económico a Nuestro Alcance. Primera Conferencia Internacional sobre Alta Eficiencia en la Industria Azucarera. Mantenimiento y Explotación. MINAZ, ICINAZ, ATAC, 1989.
- 114.- Hernández León, R. A., Obregón Lara J., Vera Menéndez A. y Romero Romero O. Cogeneración Continua Usando Bagazo como Combustible. International Sugar Journal, 1998, Vol. 100,Nº 1196S, p.423 - 427
- 115.- Hernández León, R. A. Notas del Curso de Cogeneración, Pamplona, España, 1992.
- 116.- Herrera Machado, J. Discurso Pronunciado en el II Seminario Internacional del Azúcar y Derivados de la Caña. Ciudad Habana, 1990, 397 p.
- 117.- Honig, P. Principios de la Tecnología Azucarera. Tomo III. Editorial Ciencia y Técnica. La Habana, 366pp.,1988
- 118.- Hugot, E. Manual para Ingenieros Azucareros, La Habana, Edición Revolucionaria, 1967, 803p.
- 119.- Instalaciones de Cogeneración Existentes en un País. Nuevas Tecnologías. www.galeon.com/cogeneracion/cogeplan.htm, 58k, 2000.
- 120.- Interconexión de los Centrales Azucareros con la Red Energética en Thailandia./USAID. E.E.U.U:Ed. USAID,1990.
- 121.- Jakeway, I. Alternativas de Biomasa Combustible para no Zafra en Ingenios Azucareros. Revista Seriada de la Estación Experimental de la Asociación de Cultivadores de la Caña de Azúcar de Hawai./s.a/(780), 1991.
- 122.- Jenkins, G. H. Introducción a la Tecnología del Azúcar de Caña. La Habana. Edición Revolucionaria, 1985, 581 p.
- 123.- Johnson, F. Cuba's Sweet Energy Future: Key Roles of Energy Efficiency & Cane Products. Department of Geography and Environmental Engineering, The Johns Hopkins University, Balitore, USA, 1997.
- 124.- Jutglar Banyeras, L. Cogeneración de Calor y Electricidad. España. Grupo Editorial CEAC, 1996, 220 p.
- 125.- Kaupp, A. Biomass News Group. En: <http://www.yahoo.com/Science/Energy/Biomass>, 1999.

- 126.- Kern, D. Procesos de Transferencia de Calor. La Habana. Edición Revolucionaria, 1979, 980 p.
- 127.- Kinoshita, C., Murata D. Metodología para Establecer un Inventario de Energía en la Industria Azucarera de Hawai. Seminario para la Racionalización de Energía en la Industria Azucarera, La Habana, 1980.
- 128.- Kinoshita, C. M. Potential for Cane Energy, International on Energy from Sugar Cane. Hawai, September 1991, p. 10 - 13
- 129.- Kreutzer, A. Centrales Eléctricas Avanzadas de Ciclo Combinado. Ingeniería Química (España), Marzo 1995, P. 73 - 83.
- 130.- Lamurse, J. P. Sugar Technology Review, (7), 1980, P. 197 - 253.
- 131.- Larrahondo, J.E., Briceño, C. O., Otros. Evaluation of Cane Trash. International Sugar journal, 1998, Vol. 100, N°1200.
- 132.- Larson, E. D. Biomass Gasifier Steam Injected Gas Turbine Cogeneration for the Cane Sugar Industry. Institute of Gas Technology. Chicago, 1991, 14p.
- 133.- Larson, E. D. Biomass Gasifier Steam Injected Gas Turbine Cogeneration. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power. USA, 1990, 112p.
- 134.- Larson, E. D. Summary Report on Visit to Cuba, 1994, 23p.
- 135.- Leal, D. U. Obtención del 30 % de Bagazo Sobrante Mediante la Reducción del Consumo de Vapor en la Fábrica de Azúcar Crudo. Primera Parte. Revista ATAC (La Habana), (2), 1987, P. 17 - 26.
- 136.- Lima, J.E. Cogeneración de Potencia y Energía Térmica en Ingenios Azucareros a Monosacáridos Lignina. Sugar y Azúcar, 1995, P. 90-105
- 137.-Lodos, J. Cordobés, M. La Caña de Azúcar. Fuente de Combustible Almacenable y Electricidad. Colección GEPLACEA, 1987.
- 138.- López, J. A. Factores que Deben Tenerse en Cuenta en la Elaboración de la Caña de Azúcar Cosechada Mecánicamente. Boletín de la Estación Experimental Agrícola de Tucumán, 1974: 18p.
- 139.- Lorena León, A. Cogeneración Eléctrica en el Viejo S.A. www.fao.org/docrep/t23635/t23635oj.htm, 2001.
- 140.- Mann, G. F. A Practical Approach to Energy Management in a Sugar Factory. South Africa. International Sugar Journal, 1989, Vol.91, N° 1081, p. 13 – 15
- 141.- Martínez Castellanos, E., González Gutiérrez, R., Fontes Hernández, A., Pérez Hernández, R. Automatización del Balance Termoenergético de Centrales Azucareros. Centro Azúcar, N° 2, Mayo – Agosto, 1991, p. 8 – 12

- 142.- Martínez Castellanos, E., González Gutiérrez, R., Fontes Hernández, A., Pérez Hernández, R. Evaluación de un Cuádruple Efecto del CAI “ Cándido González ”. Centro Azúcar, N° 1, Enero – Abril, 1990, p. 85 – 89
- 143.- Mercado Azucarero. Reporte Julio – Septiembre de 1998, p.21
- 144.- Mercado Azucarero. Boletín de la Revista Cubazúcar, N° 1, CNCA, La Habana, Cuba, 1999.
- 145.- Mazola Collazo, N. Manual del Sistema Internacional de Unidades. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 1991.--276p.
- 146.- México. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. Esquemas de Cogeneración. CONAE. Secretaría de Energía, 1995.
- 147.- MINAZ. Índice de Capacidades para Ingenios de Crudo en Cuba. Editorial Ciencia y Técnica. La Habana, 1972.
- 148.- MINAZ. Planeación Estratégica del Ministerio de la Industria Azucarera de Cuba. Proyección hasta el año 2002 y Pronóstico hasta el 2010. Consejo Científico Asesor, año 2000.
- 149.- MINAZ. Propuesta de Programa de Reposición Quinquenio 1998-2002. Area Industrial. Provincia de Cienfuegos. marzo, 1998.
- 150.- MINAZ. 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.
- 151.- Mitja I Sarvise, A. La Cogeneración: Estado Actual y Perspectivas de Futuro. Revista Energía. (España), XXIII (3) : Mayo - Junio 1997, P. 25 - 28.
- 152.- Motard, R., Lee, H., Berkeley,R. Chess, User Guide. Universidad de Houston, Houston, 1969.
- 153.- Nogueira P. , Zarpelón F. Conversión de un Ingenio Azucarero Convencional para el Empleo Altamente Eficiente de la Energía. International Sugar Journal, 1996, Vol.98, N° 1167.
154. Noriega Giral, L. E. Oportunidades para Empresas Europeas en los Programas de Cogeneración en México. Cogeneración para la Energía y el Medio Ambiente. Madrid. Editorial ENAGAS. IDAE, Octubre 1992,
- 155.- Nurse, P. B. Power Cogeneration in Sugar Factories. Internacional Sugar Journal, Vol. 90, (1076), 1988, P. 141 - 147.

- 156.- Ogden, J.M. et al. Gas Turbine Technologies in the Cane Sugar and Alcohol Industries. Center for Energy and Environmental studies. Princeton University. 1990.
- 157.- Ogden, J.M. et al. Steam Economy and Cogeneration in Cane Sugar Factories. International Sugar Journal, N°1099, Vol. 92, 1990, pp.131-140.
- 158.- Opciones para la Exportación Energética de Cinco Ingenios Azucareros en Costa Rica./USAID. E.E.U.U: Ed.USAID,1991.
- 159.-OPTIMOS. Programa para el Cálculo y Optimización de Sistemas Energéticos Azucareros. MINAZ Villa Clara, 1999.
- 160.- Organización Internacional del Azúcar (OIA). El Mercado Azucarero y Balance Mundial. International Sugar Journal, Vol.100, N°1192S, Abril, 1998.
- 161.- Payne, J. R. Cogeneration in the Cane Sugar Industry. Asterdam: ELSEVIER, 1991.
- 162.- Payne, J. R. Varit Operations in Cane Sugar Production .Asterdam: ELSEVIER,1991, P. 23 - 60.
- 163.- Pedraza Gárciga J., Machado Benavides, S. Marrero Alvarez, S. Castellanos Estupiñán J.E. Análisis de Alternativas de Desarrollo de un Central Azucarero. Parte I: Uso de la Modelación Topológica. Centro Azúcar, N° 1, Enero – Abril, 1993, p. 20 – 25.
- 164.- Pérez de Alejo, H., Jiénez, V. Cálculo de las Condiciones de Operación Optimas de un Evaporador de Múltiples Efectos. Cuba Azúcar, N° 4, 1981, p. 37 – 41
- 165.- Pérez de Alejo, H. Cómo Hacer uso Eficiente de la Energía en un Central Azucarero.—La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1995, 150p.
- 166.- Pérez de Alejo, H. Energía renovable en Cuba. Posibilidades y limitaciones, 1997.
- 167.- Pérez de Alejo, H. Manual de usuario del Sistema de Programas TERMOAZUCAR, ISPJAE-ISTC, 1989.
- 168.- Pérez de Alejo, H. Método para elevar la eficiencia energética en los centrales azucareros. 46 Congreso de la ATAC. Santiago de Cuba, Noviembre de 1992..
- 169.- Pérez Garay, L. Generadores de vapor. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 1986, P. 49 - 82.
- 170.- Philips, V.D., Liu Wei. Biomass Energy Opportunities on Former Sugarcane Plantations in Hawaii. En: <http://www.yahoo.com/Science/Energy/Biomass>, 1998

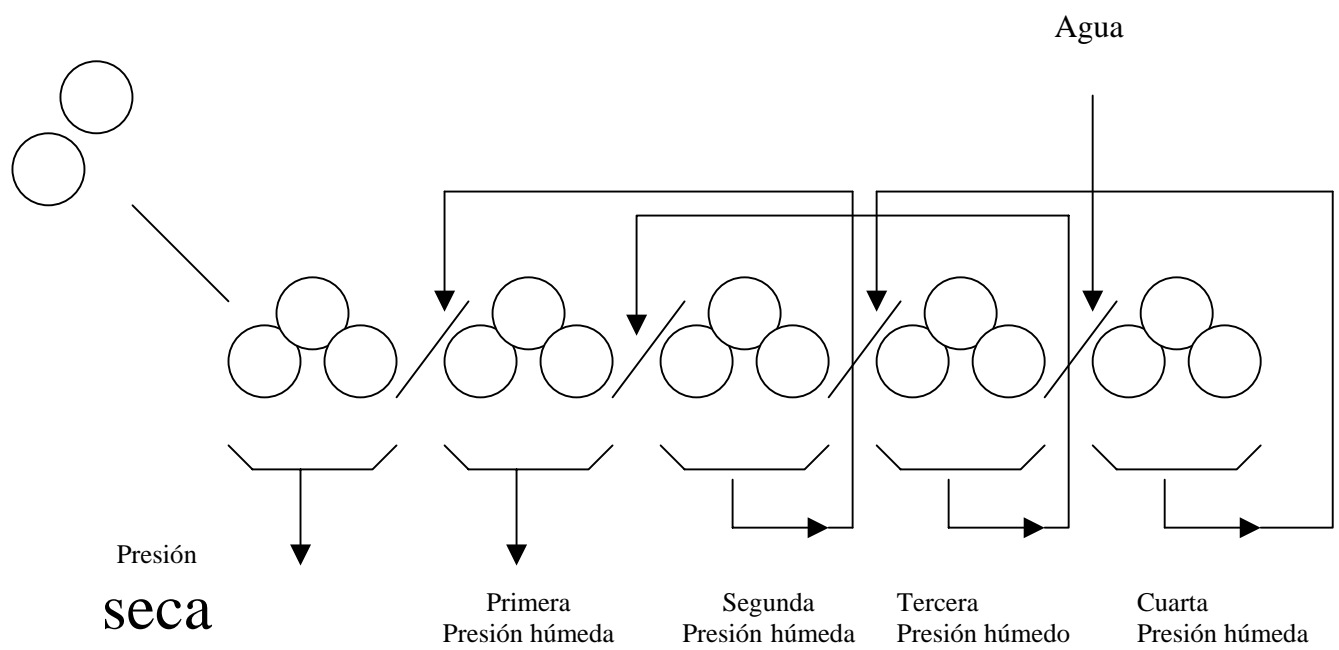
- 171.- Pons Duarte, H. Política Energética, Política Económica y Desarrollo.—La Habana: Editora Política, 1988, 103p.
- 172.- Portillo, J. Tomé, C., Pérez, A. Producción Combinada de Calor y Energía Eléctrica en los Centrales Azucareros. Cuba Azúcar, N° 1, 1973, p. 35 – 48
- 173.-Productividad Azucarera Mundial y de Algunos Productores Destacados. www.mexico.businessline.com/esp/agroind.htm. 2001.
- 174.- Proyecto: “ El Partido de la Unidad, la Democracia y los Derechos que Defendemos ”. Editora Política. La Habana, Mayo, 1997.
- 175.- Puerta Fernández, F., Castellanos Alvarez, J. A., González Pérez, F. Integración Energética de Ingenios de Azúcar Crudo y Fábricas de Papel. Parte I y II. Revista Centro Azúcar. Aceptado para Publicar.
- 176.- Purchase, B.S. Products from Sugarcane. International Sugar journal, 1995,Vol.97, N°1154. P 70-81.
- 177.- ¿ Qué es la Cogeneración ?. www.galeon.com/cogeneracion/cogeneracion.htm_7k, 2000.
- 178.- Quintana, C. et al. Impacto Ambiental Debido a la Combustión de la Biomasa Cañera en la Industria Azucarera Cubana. Revista Centroazúcar, 2, mayo-agosto, 1998, pp.48-51.
- 179.- Rene Noel, E. L. Cogeneration and the Optimal steam Energy Balance. International Sugar Journal, Vol. 96, (1146), 1994, P. 205 - 209.
- 180.- Revolución de las Nuevas Energías. DOSSIER INTERNACIONAL. Noviembre, 2000, p. 42 – 56
- 181.- Rhojraj, S. K., Ayer, R. Design of Imbibition Water Mixed Juice Heat Exchanger. Sugar. Nueva Delhi, 1986, p. 1 – 10
- 182.- Riera González, G. Gómez Peraza, A. Castaño, F. Cardona, J. Estudio del Consumo de Energía en el Area de Preparación y Molienda de un Ingenio Azucarero. ISPJAE. Cuba, CENICANA. Colombia, 1997.
- 183.- Rivacoba, R. Caña de Azúcar: Medio Ambiente y Desarrollo. Ponencia al seminario Internacional Generación Eléctrica en la Agroindustria de la Caña de azúcar. La Habana, 1996.
- 184.- Riviera, M. P. Power Cogeneration in Reunion Island. Washinton, 1990. 14p.
- 185.- Rishkin, V. Ya. Centrales Termoeléctricas . T-I. Moscú. Editorial Mir, 1979, 365p.

- 186.- Rishkin, V. Ya. Centrales Termoeléctricas. T-II. Moscú. Editorial Mir, 1979, 351p.
- 187.- Romero Romero, O., Pérez de Alejo Victoria, H. (Tutor). Evaluación Técnico – Económica de Diferentes Variantes para Cogenerar en un Central con Destilería Anexa. Tesis en Opción al Grado Científico de Máster en Ciencias. Ucf, 1997.
- 188.- Ronco Consulting Corporation. Caña en Jamaica. Estudio de Factibilidad de un Proyecto Energético. Jamaica. USAID, 1986.
- 189.- Roque Díaz, P., Rubio González, A., Pérez Bermúdez, R. y Ponce Arrieta F. Hacia una Industria Sucroenergética Cubana. International Sugar journal, 1998, Vol. 100, N° 1199S.
- 190.- Rosef, N. Sugar Cane Review, (1), 1989, P. 7 - 19.
- 191.- Rosillo Calle, F., Hall D. O. Biomass Energy, Forests and Global Warning. Información and Skills Centre. Kings College London, Febrero, 1992.
- 192.- Rubio González, A. M. Incremento de la Eficiencia Térmica de la Caldera RETAL de 45 t/h Mediante Modificaciones de la Aerodinámica del Horno. Tesis Doctoral, UCLV, 1994.
- 193.- Sánchez Machado, I. R., Alvarez Luna, M., Roque Díaz, P. Valoración Crítica de un Estudio de Caso sobre Cogeneración Eléctrica en la Industria Azucarera Cubana. Revista Centro Azúcar, Enero – Abril, 1998, p. 63 – 68
- 194.- Sarría López, B. Aerodinámica de la Zona de Flujo Inverso que se Crea en una Cámara de Combustión que Combina un Estabilizador Rotatorio y un Turbulizador Estático Tangencial. Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, UCf, 1999.
- 195.- Schegliaev, A. N. Turbinas de Vapor. T-I. Moscú. Editorial Mir, 1978, 351p.
- 196.- Schegliaev, A. N. Turbinas de vapor. T-II. Moscú. Editorial Mir, 1978, 246p.
- 197.- Schwarzenbach, a. Cogeneration: Fundamental Considerations. Brown Boven Review, Marzo 1980, p. 160 - 165.
- 198.- Singh, H., Sharma, S.M., Prasad, C.R.K., Otros. Energy Conservation and Improved Operation in the Sugar Industry. Research Institute. Pelani, Rajasthan, India. International Sugar Journal, 1992, Vol. 94, N° 1122, p.123 –131
- 199.- Spencer, G. Cane Sugar Handbook. Editorial Wiley. New York, 1963.

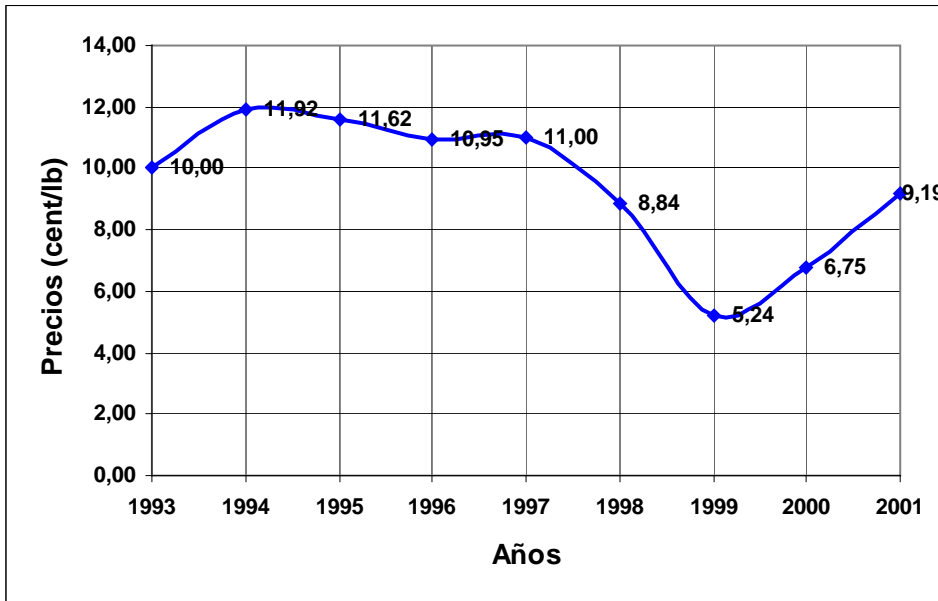
- 200.- Técnicas de Conservación Energética en la Industria. Ahorro en Procesos. Edición Revolucionaria. La Habana, 1987.
- 201.- Técnicas de Conservación Energética en la Industria. Fundamentos y Ahorro en Operaciones. Edición Revolucionaria. La Habana, 1987.
- 202.- Toledo, L., Pérez de Alejo, H. Método para la Validación de los Resultados Obtenidos por Distintas Metodologías de Balance Energético. Revista Centro Azúcar, N°2, 1981, p. 117 – 124
- 203.- Torres, J. Biomasa Cañera y Electricidad. Revista Energía y Tú. Cubasolar, N° 4, Octubre-Diciembre, 1998.
- 204.- Tugwell, F. Y Otros. Electric Power from Sugarcane in Costa Rica. A Technical and Economic Analysis. Office of Energy. Washinton, 1998, 54 p.
- 205.- Un Problema Llamado Petróleo. www.miactualidad.com/244/53-petroleo.htm.2001
- 206.-Upadhiaya, U.C. Bagasse as Fuel. Mechanical Engineering Dept. Florida International University, Miami. Florida. USA. International Sugar Journal, 1991, Vol.93. N°1111. pp.132-138.
- 207.- Upadhiaya, U. C. Cogeneration of Steam and Electric Power (The Factory / Sugar Production / Cogeneration Case). International sugar Journal, N° 1117, Vol. 94, 1992, p. 2 – 10
- 208.-USAID. Análisis de la Cogeneración en la Industria de la Caña de Azúcar de Swazilandia/USAID. E.E.U.U:Ed.USAID, 1990.
- 209.- USA. United Ststes Agency for International Development. Interconection of Sugar Mills to the Thailand Electric Power Guid. Washinton, 1990, 123p.
- 210.- USA. United States Agency for International Development. Jamaica Cane. Energy Project Feasibility Study. Ronco Consulting Corporation Bechtel National Inc. Washinton, 1986, 14p.
- 211.- USA. Winrock International Institute for Agricultural Development. Energy from Sugar Cane Cogeneration in the Salvador, 1994, 85p.
- 212.- Valdés Barrón, E., González González, E., Burgos Gil, W., Villalonga González, M. Dinámica de los no Azúcares en los Jugos en el Proceso de Fabricación de Azúcar de Caña. Revista Centro Azúcar, N° 2, Mayo – Agosto, 1994, p. 89 – 96
- 213.- Valdés , E. y Otros. La Eliminación Deficiente de Cogollos y sus Efectos en el Proceso Azucarero. Revista Centro Azúcar, 15(2), 1988, p. 27 – 30

- 214.- Valdés , E. y Otros. Las Materias Extrañas y su Influencia en la Calidad del Jugo Primario. Centro Azúcar, 13(3), 1986, p. 73 – 76
- 215.- Valdés, A. Obtención de Combustible, Energía y/o Materia Prima a Partir de la Producción Azucarera. Revista Industria Azucarera, (1), 1992, P. 44 - 61.
- 216.- Ventajas de la Cogeneración. www.conae.gob.mx/cgis/cogeneracion.shtml, 2000.
- 217.- Vila Martínez, R. D. Determinación de las Pérdidas por Incombustión Mecánica por un Método Analítico Experimental. Ingeniería Energética, N o 1, 1985, p. 4
- 218.- Villada Duque, F. Modelo Económico de Optimización Energética para Cogeneración en un Ingenio Cañero. Colombia. International Sugar Journal, 1996, Vol.98, No 1169, p. 265 – 270
- 219.- Viqueira Landa, J. La Presencia del Medio Ambiente y el Futuro de la Industria Eléctrica. Memorias Energía , Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable. (Acatlán. México.), 1992, P. 55 - 66.
- 220.- Vukalovich, M. P. Propiedades Termodinámicas del Agua y el vapor. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 1983, 245p.
- 221.- Zabolonitte, E. S. Empleo de la cogeneración en Cuba. OLADE. Quito, 1992.
- 222.- Zagrodzki, S., Kubasiewicz, A. Heat Economy in Beet Sugar Factory – Evaporation. Sugar Technology Reviews, No 5, 1978, p. 103 – 154

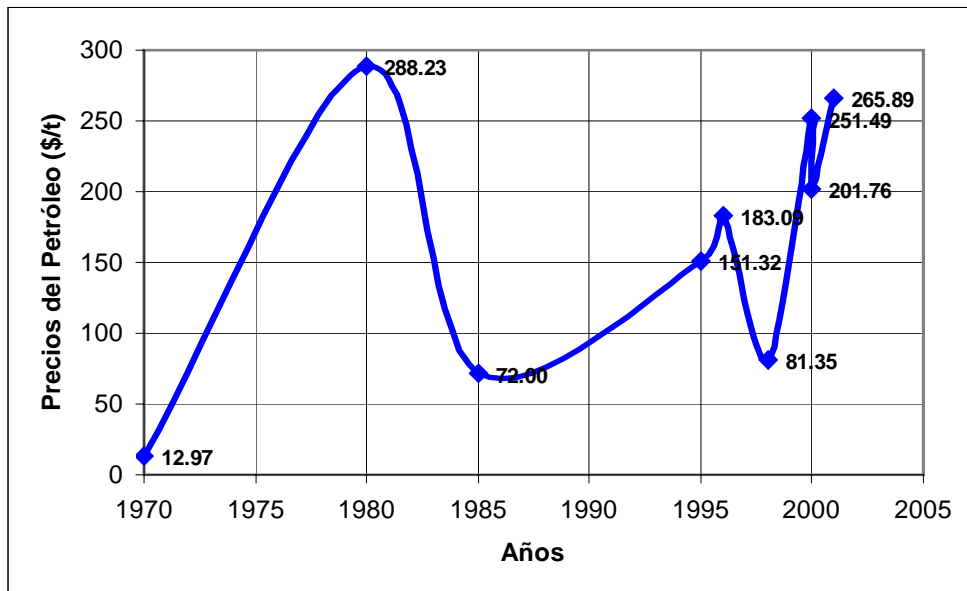
Anexos.



Anexo 1.1. Imbibición cuádruple compuesta.



Anexo 1.2. Comportamiento de los precios del azúcar crudo en el mercado mundial en los últimos años.



Anexo 1.3. Comportamiento de los precios del petróleo en el mercado mundial en los últimos años.

Provincia	Grado de dependencia del SEN (%)
Pinar del Río	27.5 %
La Habana	55 %
Matanzas	33.5 %
Villa Clara	33.3 %
Cienfuegos	25.3 %
Sancti Spíritus	19.3 %
Ciego de Avila	28.4 %
Camagüey	12.5 %
Las Tunas	8.6 %
Holguín	36.8 %
Granma	37.1 %
Santiago de Cuba	42. %
Guantánamo	61.9 %
Nacional	30.5 %

Anexo 1.4. Grado de dependencia de las provincias al SEN en tiempo zafra año 1997.

Año	89	90	91	92	93	94	95	96	97
Autoabast. Energ. eléct.(%)	64,57	65	64,21	67,5	55,72	58,53	57,37	65,48	69,5

Anexo 1.5. Grado de autoabastecimiento de energía eléctrica a nivel nacional desde 1989 hasta 1997.

Año	Caña Molida MMt	Cons.E.E S.E.N G.W.h	T.E.P E.E M.t	Combustible Petr. Mt.	Diesel Mt	Gasolina Mt	Leña Mt	T.E.P Mt
1986	68.3	649.2	220.7	494.4	523	139.2	201.2	1520.5
1987	66.8	628.8	213.8	368.5	507.1	126.7	181.0	1346.8
1988	68.36	653.0	222.0	359.0	528.8	128.4	187.1	1374.0
1989	68.05	702.3	275.8	385.5	532.8	126.5	166.5	1446.5
1990	78.83	780.9	306.7	476.9	512.5	107.4	204.9	1547.4

1991	66.31	703.7	276.4	323.5	455.2	74.3	192.3	1257.7
1992	67.22	609.4	239.3	317.0	464.1	66.4	198.4	1233.7
1993	42.77	621.8	244.2	279.6	354.3	51.2	107.4	1008.5
1994	42.65	637.3	250.3	275.5	436.6	65.9	158.7	1138.5
1995	31.1	358.4	140.8	173.5	298.0	48.9	61.0	714.1

Anexo 1.6. Consumo de portadores energéticos en el MINAZ años 1986 - 1995.

Año	Kwh/tc	Kg fuel/tc	Kg diesel/tc	Kg gasol/tc
89	10.3	5.66	7.83	1.85
90	9.9	6.05	6.5	1.36
91	10.0	4.88	6.87	1.12
92	9.07	4.71	7.13	0.99
93	14.5	6.53	8.28	1.20
94	14.9	6.46	10.24	1.54
95	11.4	4.48	9.52	1.56

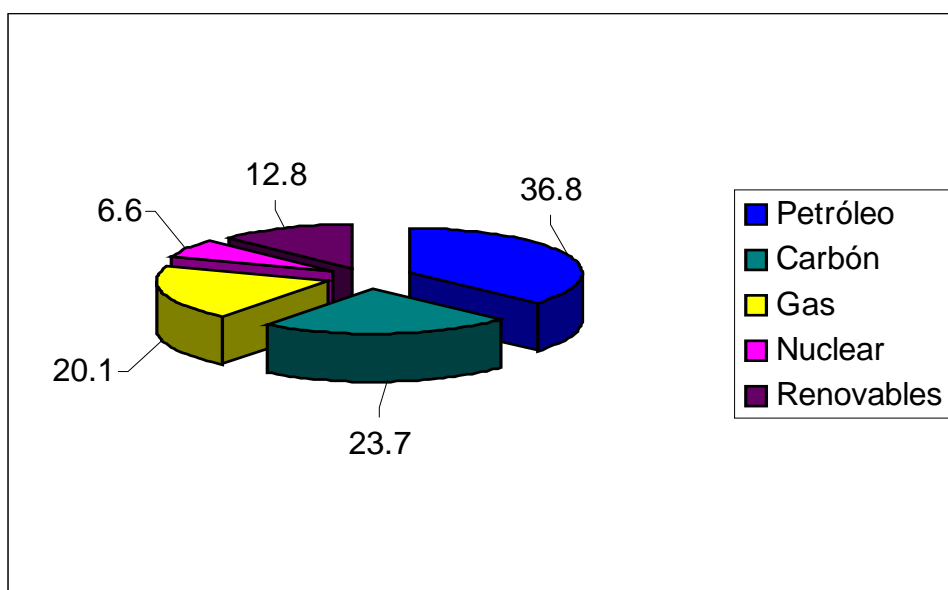
Anexo 1.7. Índice de consumo de portadores energéticos por tonelada de caña molida.

	89	90	91	92	93	94	95	96
Cons.total (GWh)	1982.4	2230.4	1966.1	1975.3	1496.1	1536.7	1357.3	1585.8
Generación(GWh)	1280.1	1449.5	1262.4	1333.4	833.6	899.4	778.7	1038.4
Cons.SEN (GWh)	820.2	899.4	812.5	771.7	697.0	718.3	650.7	641.3
EntregaSEN (GWh)	117.9	118.5	108.8	129.8	84.5	81	72.1	93.9
Cons. Neto (GWh)	702.3	780.9	709.7	609.4	621.8	637.3	578.6	548.1
Índ.Gen. (kWh/ t.c)	18.8	18.4	18.6	19.36	19.87	20.32	21.3	22
Índ.Cons.SEN (kWh/ t.c)	10.32	9.9	10.6	9.06	14.53	14.94	13.31	11.73
Cap.Instalada(Mw)	649.8	655.3	676.9	683.1	714.8	751.2	789.7	827
Días Zafra	109	111	105	69	80	60	-	-
% Aprov. Capac.	78	85.6	73	80	74	73	72	-

Anexo 1.8. Índices de generación y consumo de electricidad.

Año	<u>TEP. EE</u> Ton. Az	<u>Ton. Fuel</u> Ton. Az	<u>Ton. Diesel</u> Ton. Az	<u>Ton. Gasol.</u> Ton. Az	MM USD	USD/Ton. Az
86	0.03	0.067	0.071	0.018	194.8	26.42
87	0.03	0.052	0.071	0.018	175.9	24.55
88	0.028	0.045	0.066	0.016	179.0	22.37
89	0.037	0.051	0.051	0.017	186.9	25.00
90	0.037	0.057	0.061	0.013	191.3	25.96
91	0.039	0.045	0.064	0.01	155.2	21.79
92	0.034	0.044	0.067	0.009	153.5	21.58
93	0.058	0.067	0.085	0.012	124.8	29.88
94	0.062	0.07	0.111	0.017	142.7	36.25
95	0.044	0.055	0.094	0.015	94	29.74

Anexo 1.9. Consumo de portadores energéticos en toneladas equivalentes de combustible convencional por tonelada de azúcar producida.



Anexo 1.10. Balance energético mundial (Noviembre del 2000)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
(1)average	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(2)A:CH2O	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(3)B:T	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(4)C:ME	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(5)D:Mo1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(6)E:F	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
(7)AB	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
(8)AC	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
(9)AD	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(10)AE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(11)BC	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(12)BD	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(13)BE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(14)CD	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(15)CE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(16)DE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
(1)average	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(2)A:CH2O	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(3)B:T	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(4)C:ME	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(5)D:Mo1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(6)E:F	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(7)AB	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(8)AC	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(9)AD	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(10)AE	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(11)BC	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(12)BD	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(13)BE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(14)CD	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
(15)CE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
(16)DE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

Anexo 2.1. Matriz de correlación para los efectos estimados.

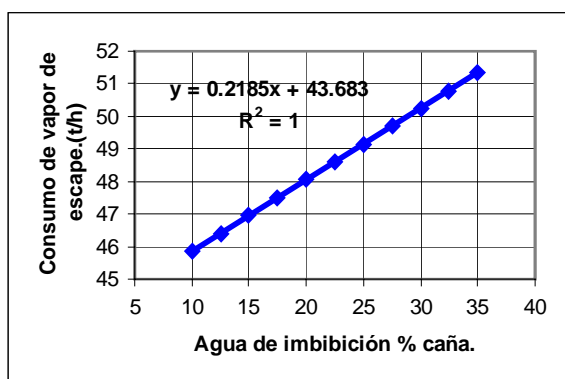


Fig.2.3. Comportamiento del consumo de vapor de

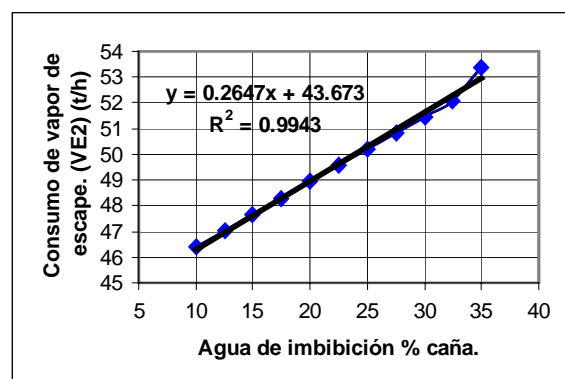


Fig.2.8. Comportamiento del consumo de vapor de

escape (VE1) para un esquema de evaporación de quíntuple efecto con extracciones en función de la cantidad de agua de imbibición a utilizar.

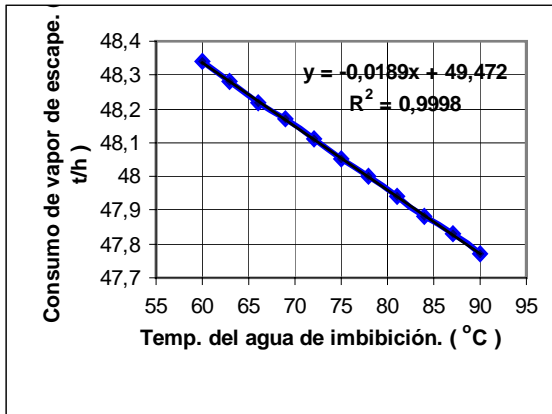


Fig.2.4. Comportamiento del consumo de vapor de escape (VE1) para un esquema de evaporación de quíntuple efecto con extracciones en función de la temperatura del agua de imbibición a utilizar.

escape (VE2) para un esquema de evaporación de cuádruple efecto sin extracciones en función de la cantidad de agua de imbibición a utilizar.

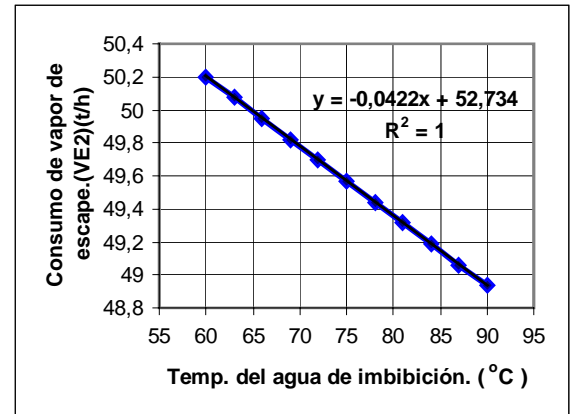


Fig.2.9. Comportamiento del consumo de vapor de escape (VE2) para un esquema de evaporación de cuádruple efecto sin extracciones en función de la temperatura del agua de imbibición a utilizar.

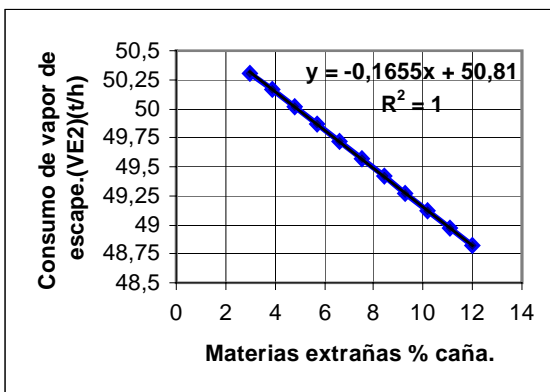


Fig.2.5. Comportamiento del consumo de vapor de escape (VE1) para un esquema de evaporación de quíntuple efecto con extracciones en función de las materias extrañas entradas a fábrica.

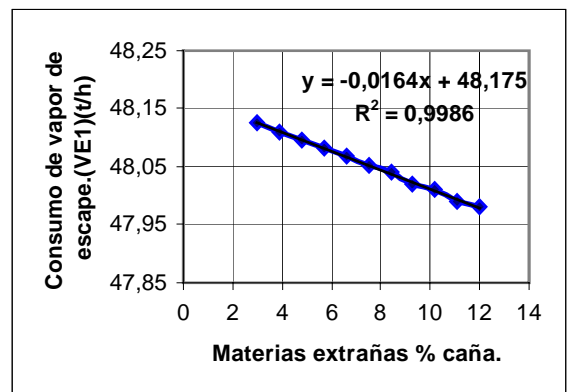


Fig.2.10. Comportamiento del consumo de vapor de escape (VE2) para un esquema de evaporación de cuádruple efecto sin extracciones en función de las materias extrañas entradas a fábrica.

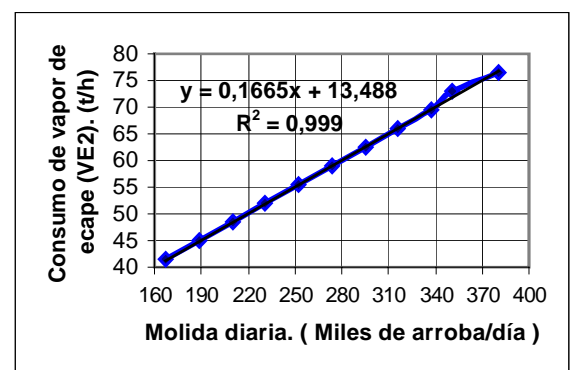
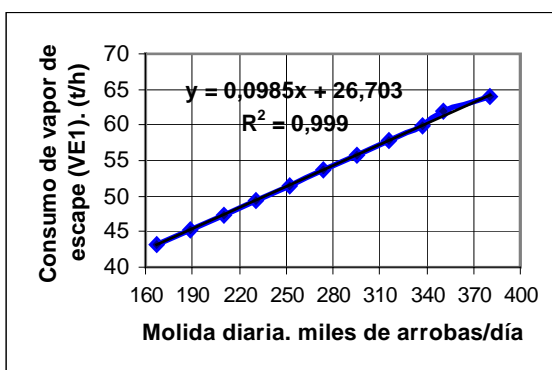


Fig.2.6. Comportamiento del consumo de vapor de escape (VE1) para un esquema de evaporación de quintuple efecto con extracciones en función de la molida.

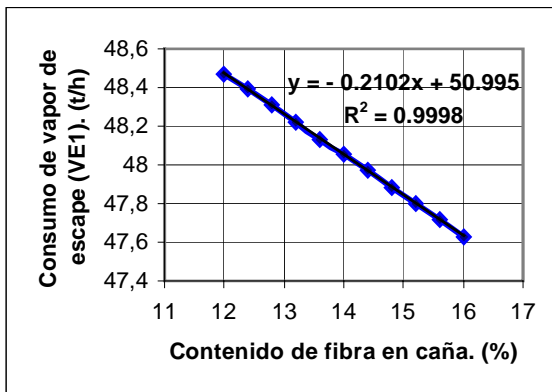


Fig.2.7. Comportamiento del consumo de vapor de escape (VE1) para un esquema de evaporación de quintuple efecto con extracciones en función del contenido de fibra en caña.

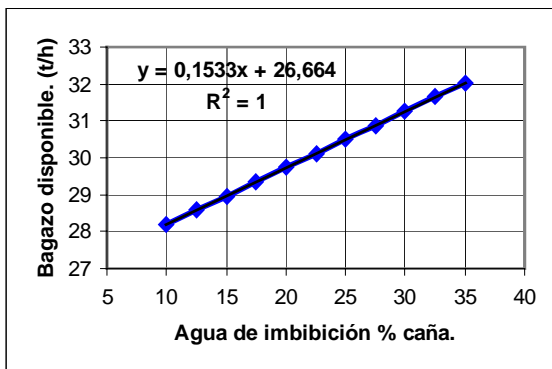


Fig.2.13. Comportamiento del bagazo disponible (BD) en función de la cantidad de agua de imbibición a utilizar.

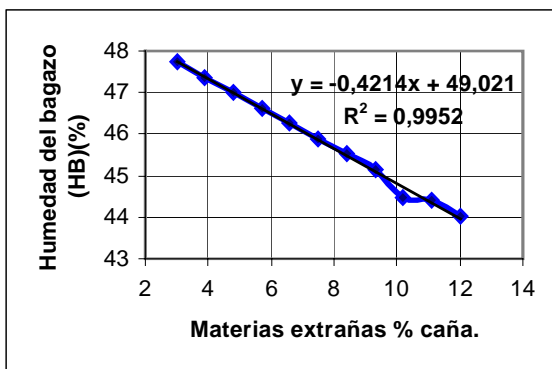


Fig.2.21. Comportamiento de la humedad del bagazo (HB) en función de las materias extrañas entradas a fábrica.

Fig.2.11. Comportamiento del consumo de vapor de escape (VE2) para un esquema de evaporación de cuádruple efecto sin extracciones en función de la molida.

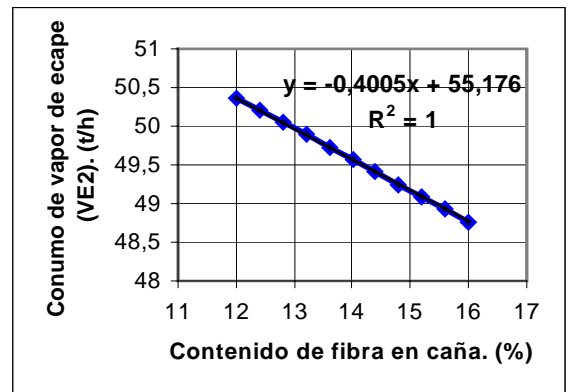


Fig.2.12. Comportamiento del consumo de vapor de escape (VE2) para un esquema de evaporación de cuádruple efecto sin extracciones en función del contenido de fibra en caña.

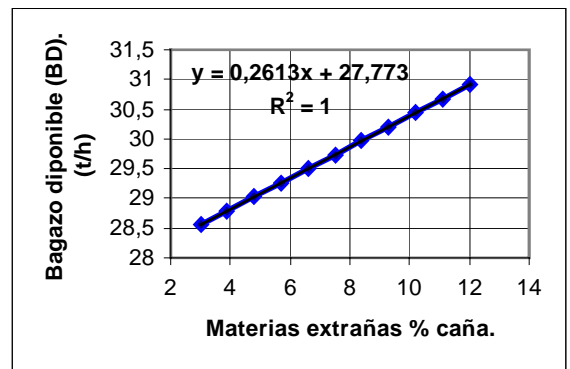


Fig.2.14. Comportamiento del bagazo disponible (BD) en función de las materias extrañas entradas a fábrica.

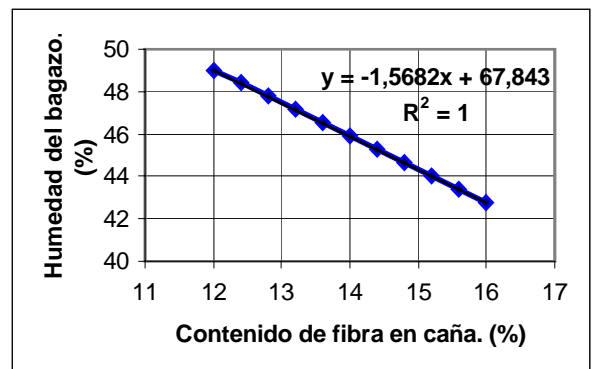


Fig.2.22. Comportamiento de la humedad del bagazo (HB) en función del contenido de fibra en caña..

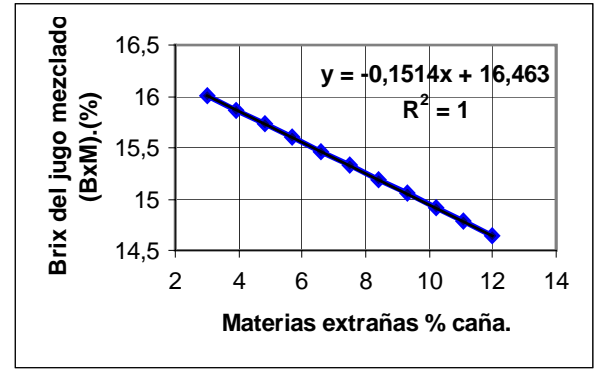
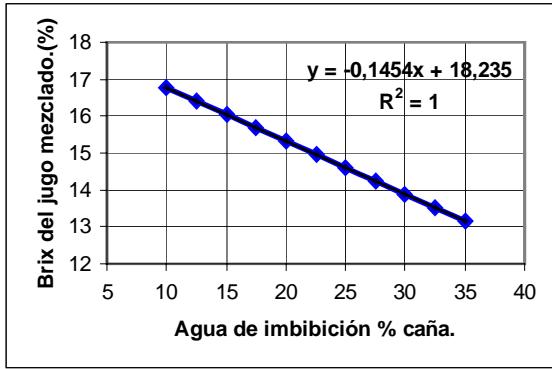


Fig.2.23. Comportamiento del brix del jugo mezclado (BxM) en función de la cantidad de agua de imbibición a utilizar.

Fig.2.24. Comportamiento del brix del jugo mezclado (BxM) en función de las materias extrañas entradas a fábrica.

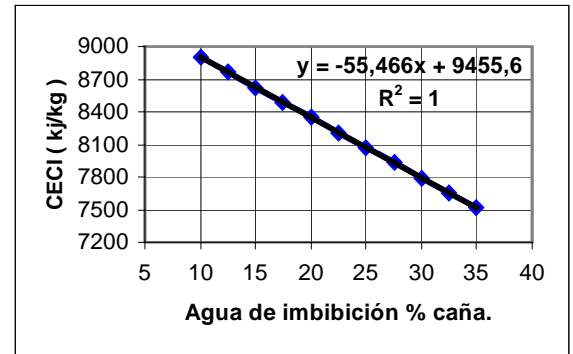
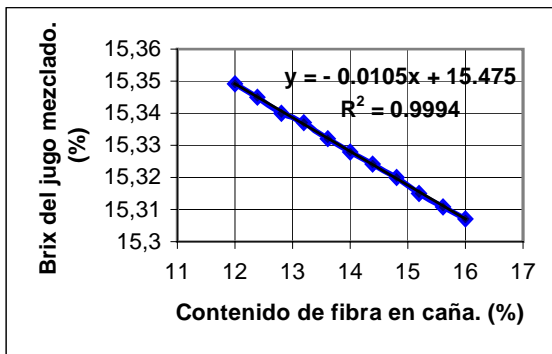


Fig.2.25. Comportamiento del brix del jugo mezclado (BxM) en función del contenido de fibra en caña.

Fig.2.26. Comportamiento del calor específico de combustión inferior (CECI) en función de la cantidad de agua de imbibición a utilizar.

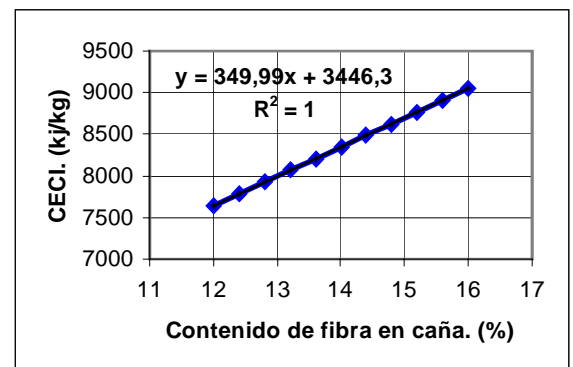
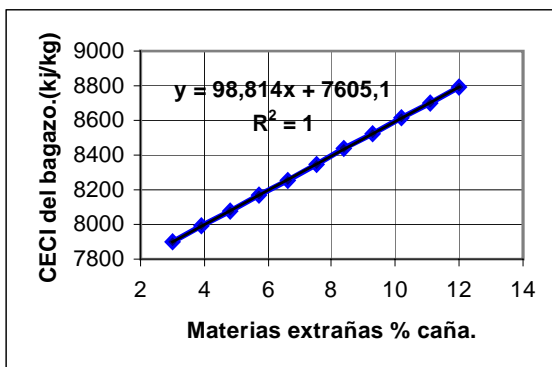


Fig.2.27. Comportamiento del calor específico de combustión inferior (CECI) en función de las materias extrañas entradas a fábrica.

Fig.2.28. Comportamiento del calor específico de combustión inferior (CECI) en función del contenido de fibra en caña.

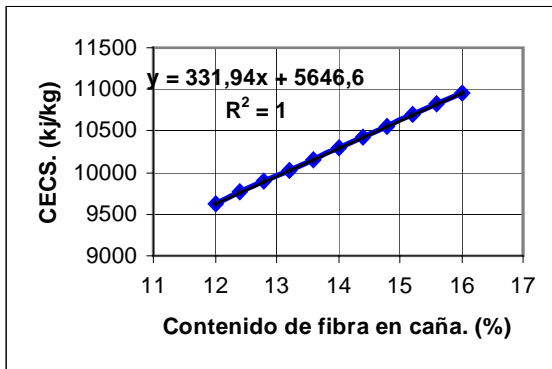
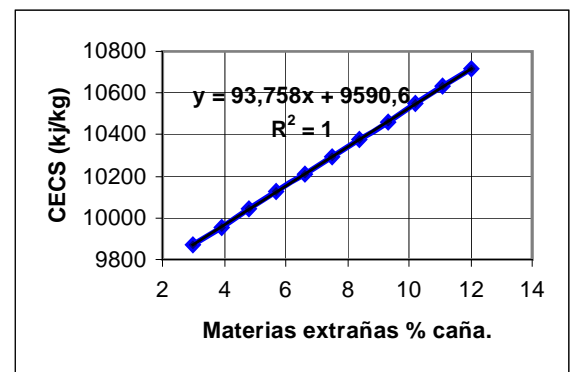
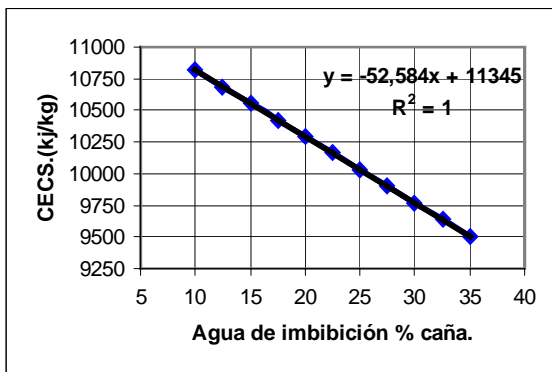


Fig.2.31. Comportamiento del calor específico de combustión superior (CECS) en función del contenido de fibra en caña.

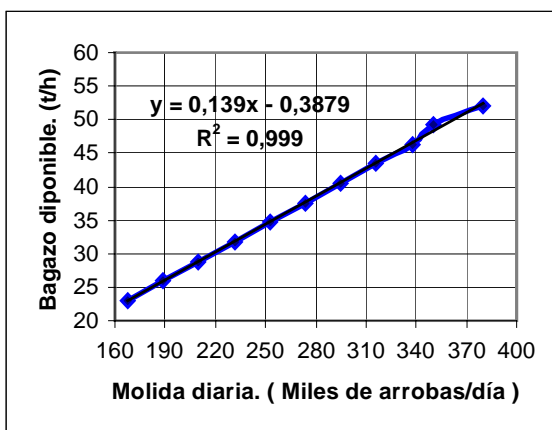


Fig.2.15. Comportamiento del bagazo disponible (BD) en función de la molida.

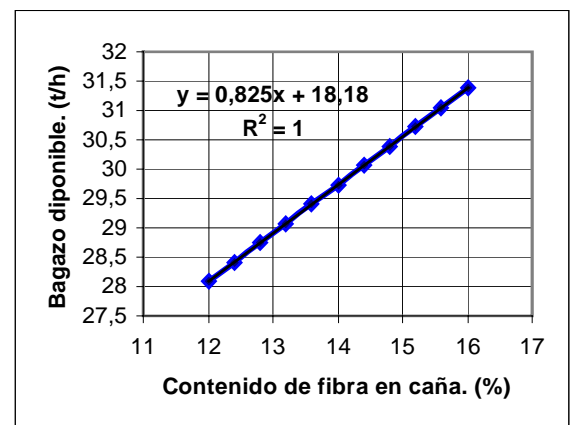


Fig.2.16. Comportamiento del bagazo disponible (BD) en función del contenido de fibra en caña.

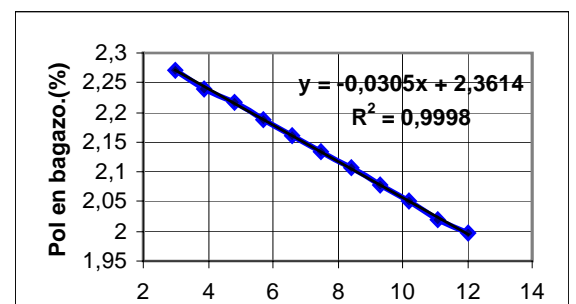
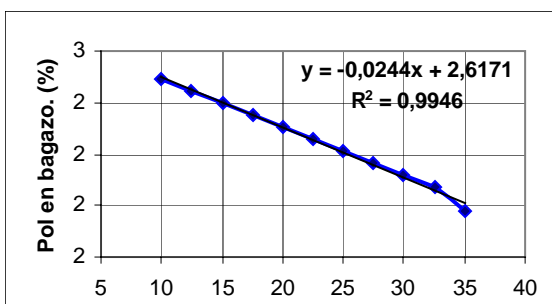


Fig.2.17. Comportamiento del contenido de sacarosa en el bagazo (PolB) en función de la cantidad de agua de imbibición a utilizar.

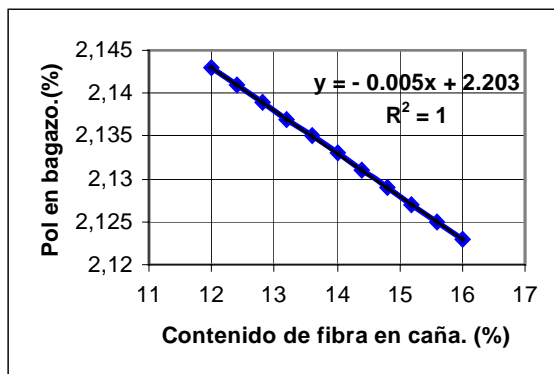


Fig.2.19. Comportamiento del contenido de sacarosa en el bagazo (PolB) en función del contenido de fibra en caña.

Fig.2.18. Comportamiento del contenido de sacarosa en el bagazo (PolB) en función de las materias extrañas entradas a fábrica.

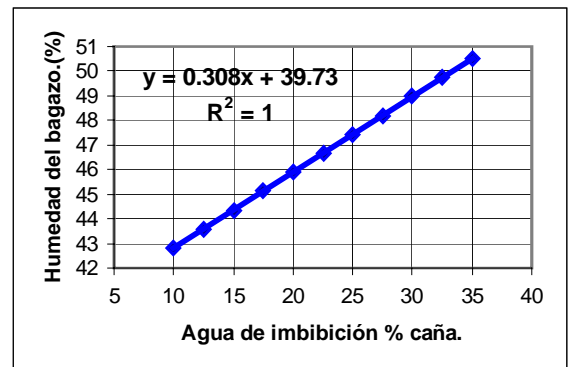


Fig.2.20. Comportamiento de la humedad del bagazo (HB) en función de la cantidad de agua de imbibición a utilizar.