

## Propuesta para la minimización del consumo de agua fresca en una fábrica de azúcar

## Proposal for the minimization water fresh consumption in sugar factory

**Autores:** Peña-Bermúdez, Hilda<sup>1</sup>; Morales-Zamora, Marlén<sup>2</sup>; Barajas, Crisostomo<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Empresa Azucarera Antonio Guiteras. Las Tunas. AZCUBA; <sup>2</sup>Centro de Análisis de Procesos. Universidad Central de Las Villas. Cuba; <sup>3</sup>Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Colombia.  
Email: [marlenm@uclv.edu.cu](mailto:marlenm@uclv.edu.cu);

### **Resumen**

El trabajo tiene como objetivo proponer una correcta recolección y distribución del agua condensada, minimizando el consumo de agua fresca logrando utilizar en el proceso un agua de mayor calidad que favorezca el balance energético de la industria. Se realiza un diagnóstico integral en una empresa azucarera, determinando los principales consumidores y puntos débiles, y se proponen medidas para el uso y la minimización del agua. Se determinan los indicadores económicos dinámicos de las propuestas inversionistas que se proponen a realizar para el ahorro de agua.

Palabras claves: agua, energía, indicadores económicos.

### **Abstract**

The work has as objective to propose a correct recollection and distribution of condensed water, minimizing the consumption of fresh water being able to use in process water a bigger quality that favors the energy balance of industry. It is carried out an integral diagnosis in a sugar company, determining the main consumers and weak points, and proposes measures for the use and the minimization of water. The dynamic economic indicators of the proposals investors are determined that intend to carry out for the saving of water.

**Key words:** water, energy, economic indicators.

## Introducción

La disponibilidad de agua potable para consumo doméstico se va tornando en un problema muy serio para las generaciones actuales y futuras, y en esta competencia entra a formar parte, el agua que se consume en los procesos industriales. El agua es una sustancia que la industria usa en cantidades considerables con diferentes aplicaciones, para calentar y enfriar, para producir vapor de agua, como disolvente, materia prima y limpieza.

Uno de los problemas que afecta seriamente a la industria azucarera es la contribución a su utilización eficiente durante el proceso tecnológico y el aprovechamiento de sus potencialidades, en el uso del agua vegetal contenida en la caña de azúcar.

El trabajo se desarrolla en una fábrica de azúcar con destilería y otros derivados, la cual desde hace varios años ha realizado acciones encaminadas a disminuir el consumo de agua por tonelada de caña molida, sin embargo, aún persisten deficiencias en su recolección y uso manteniendo elevados índices de consumo por encima del valor deseado. Además existe la necesidad de utilizar agua de reposición para el proceso tecnológico, disminuyendo el flujo de agua a proceso, disponiendo de mayor volumen destinada a la población por tratarse de la misma fuente.

El objetivo del trabajo es proponer una correcta recolección y distribución del agua condensada, minimizando el consumo de agua fresca.

## Materiales y métodos

### 1.1 Generalidades sobre el uso del agua en la industria azucarera.

La industria azucarera tiene un consumo elevado de agua vinculada al proceso productivo en general, al mismo tiempo elevadas pérdidas al medio ambiente (Castellanos, 2005). Si se toma en cuenta que de la masa de caña que llega a la fábrica, el setenta por ciento de la misma es agua, es completamente irracional que dicha industria obtenga esas cifras, siendo explicable, por una falta de control total sobre este recurso energético y medio ambiental.

El desarrollo de una agroindustria azucarera diversificada y con esquemas flexibles de producción, induce a un incremento en el nivel de contaminación, que puede ser eliminado ó atenuado con un adecuado uso y rehúso del agua de proceso y la aplicación de los diferentes tratamientos que protejan el medio ambiente. En adición a esto las posibilidades de la

biomasa cañera como fuente de biocombustibles y energías renovables ha dado lugar incluso al desarrollo de una estrategia de procesos para la producción de biocombustibles y para la asimilación de nuevas tecnologías (González; 2008a), (González; 2008b).

Los estudios relacionados con el consumo de agua en las fábricas de azúcar comenzaron a desarrollarse hace muchos años. La característica más común en todos estos estudios es el enfoque parcial hacia alguno de los aspectos del proceso, por ejemplo el porcentaje de uso de agua de imbibición ó la visión de alguno de los aspectos del subsistema, tal es el caso del sistema de condensado. (Castellanos; 1990). Aunque es sabido que el condensado puede y debe ser un agua químicamente pura, no se atiende para su perfecta recolección, no se evita la contaminación y los arrastres con métodos eficientes desde el punto de vista tecnológico. La utilización inadecuada del agua vegetal, conlleva a un consumo elevado de agua por fuentes externas, lo cual implica gastos en utilidades.

El uso del agua en los ingenios azucareros depende de varios factores, siendo los más importantes los vinculados con la disponibilidad, calidad y temperatura de la misma, por ello es oportuno trabajar en la minimización de los consumos de energía y agua a la vez (González; 2011b).

### 1.2 Diagnóstico del consumo de agua en la fábrica de azúcar bajo estudio.

#### Caracterización de la fábrica de azúcar.

El área de molinos posee un tándem eléctrico de tecnología inglesa con una capacidad instalada para procesar de 7000 t/d (695652@/d) de caña.

La generación del vapor la forman cinco calderas, de ellas 4 son alemana (EKE) de 45 t/h cada una y otra cubana, (CAP) 60 t/h con horno Pin Hole a una presión de vapor de 30 atm y 410 °C.

En la Planta Eléctrica se encuentran instalados a cuatro turbos generadores con capacidad nominal de 32 MW con voltaje de generación de 6.3 kV y 13.8 kV.

En el área de Fabricación, el calentamiento del jugo, se efectúa en 2 etapas, para lo cual se utilizan 12 calentadores tipo Honolulu de 1.42 m de diámetro, 20 tubos/pase, con una superficie calorífica de 167 m<sup>2</sup> cada uno; la forma de operación es en paralelo. Cada banco está constituido por 4 calentadores, de los cuales, 3 se mantienen trabajando y 1 de limpieza. El banco de calentadores primarios trabaja con los

vapores procedentes de los segundos vasos de los dobles efectos, a una presión de 1.40 atm, los 2 bancos de calentadores rectificadores trabajan con vapor de la evaporación de los pre evaporadores a una presión de 1.74 atm.

En el área de evaporación existen 3 tipos de evaporadores, 2 de de tipo CECA, con una superficie calorífica de 1858 m<sup>2</sup> y otro de 1485 m<sup>2</sup> En el área de los cristalizadores se cuenta con 12 tachos, de los cuales 11 son del tipo Low head y uno Hawaiano, la superficie calorífica de 7 es de 376 m<sup>2</sup> cada uno y de 5 es de 248 m<sup>2</sup>.

Para realizar los cálculos de forma más efectiva se divide la fábrica en bloques tecnológicos que permiten calcular las producciones y consumos de agua de las diferentes etapas del proceso, teniendo en cuenta en cada una las particularidades de los flujos involucrados.

**Bloques Tecnológicos.**

- Bloque tecnológico Tándem – Molino.
- Bloque tecnológico Purificación.
- Bloque tecnológico Evaporación a Múltiple Efecto.

De esta forma se calculan las producciones de agua vegetal identificando la cantidad que debe incorporarse al área de generación de vapor como agua de alimentar calderas. El objetivo del cálculo viene dado por la importancia que tiene el balance energético de la fábrica y la incidencia positiva en los costos debido a la disminución del consumo de agua. En el caso de estudio se realizó teniendo como referencia la zafra azucarera 2010.

**Diagnóstico en el caso de estudio.**

En el diagnóstico se determinaron los equipos que intervienen en la producción o consumo

de agua caliente. Dentro de los productores de agua se encuentran los calentadores primarios, calentadores de jugo clarificado, los calentadores rectificadores, equipos de evaporación y los tachos. Los procesos donde se emplea el agua vegetal son:

- Agua de imbibición en los molinos.
- Agua para la preparación de la lechada de cal.
- Agua del lavado de los filtros.
- Agua para la purgas de las tiempas en las centrifuga.
- Agua para la dilución de mieles A y B.

En la Figura 1 se refleja el consumo de agua por áreas de la industria, siendo más significativas las áreas de fabricación, tándem y generación de vapor.

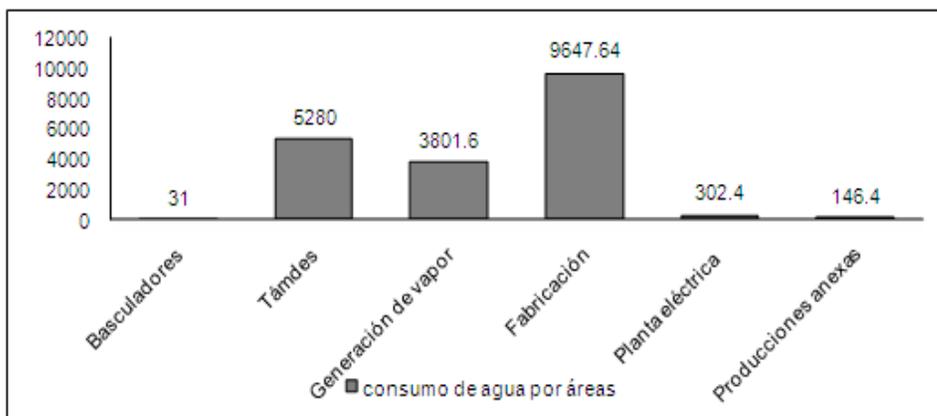
En la fábrica se utiliza el agua procedente del río, distribuida además a la población. También se utiliza agua de mar para la inyección.

Para el suministro de agua a la fábrica existen 3 bombas de 1400 rpm y 240 HD, de los cuales en el periodo de zafra se mantienen 2 trabajando y una de repuestos. La línea de abastecimiento es de hierro fundido con un diámetro nominal de  $\phi=30.48$  cm (12 pulgadas) y una longitud normal de 1460 m.

Consumidor	Indice de consumo de agua
Destilería de etanol	0,121 t/t caña
Tonula	0,125 t/t caña
Población	0,335 t/t caña
Fabrica de azúcar	0,350 t/t caña
Total	0,930 t/t caña

Fuente: Expediente de agua de la empresa, 2010.

**Tabla 1.** Consumidores de agua de la planta potabilizadora



**Figura 1.** Consumo de agua por área de la industria en estudio.

En la tabla 1 se muestran los consumos de agua en las instalaciones industriales y la población, así como en la tabla 2 se muestran los índices de consumos en diferentes zafra. Obsérvese que en este caso, la tendencia ha ido a la reducción del consumo de agua,

supeditada a variaciones en los flujos de caña de molienda.

**Tabla 2.** Índices de consumo por zafras.

Zafra	Índice de consumo (m <sup>3</sup> /t caña)
2003	0,85
2004	0,90
2005	0,43
2006	0,44
2007	0,39
2008	0,36
2009	0,35
2010	0,36
2011	0,35

Análisis de los resultados

1.1 Diagnóstico de primer nivel al sistema.

-La fábrica tiene un índice de consumo superior a 0,30 m<sup>3</sup>/t de caña.

-Se dispone de una planta activa de tratamiento de agua, con gastos de 80 m<sup>3</sup>/h como promedio que trabajan unas 11 horas diarias.

- La fábrica consume agua de fuentes externas, siendo las más importantes: presa y río, con una dureza promedio de 400 ppm.

-Se utiliza agua de mar en sus circuitos de enfriamiento.

-No se realiza ningún control analítico del consumo del agua de alimentar las calderas y la planta de tratamiento.

-No se recupera el agua de la extracción continua de las calderas.

-La limpieza del tacho se efectúa usando vapor directo (escoba).

- La medición del consumo de agua de fuentes externas es efectuada con cálculo, por el caudal y el tiempo de bombeo, lo que resta confiabilidad al dato.

-El consumo social del agua está mezclado con el consumo de la industria.

-En la empresa se emite vapor a la atmósfera de manera rutinaria.

Diagnóstico de primer nivel a las áreas

Área de fabricación de azúcar.

1.Salideros de agua de uso tecnológico para las bombas de vacío.

2.Salidero en el tanque superior del tacho #2.

3.Salideros en los prenses de las válvulas.

4.Salideros en los prenses de las bombas.

5.Salidero en tuberías de condensado.

6.Falta de aislamiento térmico en tuberías y equipos evaporadores.

7.El agua de los calentadores no se aprovecha.

Área de Tándem y Molinos.

El área posee una molida horaria de 238,45 t/h con una humedad de 50,19% y un consumo de agua de imbibición según la norma de 81,35 t/h. Para la limpieza del tándem, durante un día de trabajo se aplica agua por un tiempo de 20 min, 6 veces al día, es decir 120 min. Para un flujo total de agua de limpieza de 0.458 m<sup>3</sup>/h si se realiza en el tiempo requerido y una vez terminada la misma se cierra el agua. En total el consumo de agua en el tándem es de 81,808 m<sup>3</sup>/h.

En esta área se detectaron como incidencias en el transcurso de la zafra:

1.Uso indiscriminado del agua caliente.

2.Tupiciones en molinos obliga a un consumo excesivo de agua.

3.Moladores que operan con mayor tonelaje de agua de imbibición que el establecido.

4.Mala calidad de las zapatillas de los molinos.

5.Humedad en el bagazo superior al 50 %.

Área de Generación de Vapor.

1.El desareador no está presurizado debido al alto nivel de deterioro en que se encuentra, disminuyendo así la temperatura del agua alimentar y aumentando la presencia de oxígeno en la misma.

2.Tanques Flash con deficiencias técnicas, (bajo espesor) lo que no permite la utilización del agua de las extracciones continuas de las calderas.

3.Válvulas de seguridad mal reguladas o con deficiencias mecánicas.

4.Válvulas de extracción de fondo de los generadores de vapor en mal estado.

5.Se han utilizados válvulas de extracción de fondo que no están aptas para la presión de trabajo de estos generadores.

6.Uso indiscriminado de la planta de tratamiento de agua.

7.Se realizan aproximadamente 9 extracciones de fondo diarias a los generadores de vapor para disminuir los sólidos totales disueltos.

8.El personal que interviene en la operación de las calderas, posee poca experiencia en la realización de una extracción.

9.No se cuenta con instrumentos para medir el flujo de agua que se evacua al realizar una extracción.

10.No se recupera el agua de las extracciones, por no existir un tanque para el almacenaje de los condensados contaminados.

11.Los aditamentos que miden el flujo de agua de las calderas presentan un alto grado de deterioro

brindando inseguridad en la información.

12. Falta de aislamiento térmico en tuberías y tanques de almacenamiento.

13. Salideros en juntas, frente de válvulas y en empaquetaduras de bombas de condensado.

Estas incidencias detectadas permiten conocer los problemas que atentan contra el uso eficiente del agua vegetal en esta área, lo cual conllevan a la utilización de agua de fuentes externas y a la explotación desmedida de la planta de tratamiento de agua, con el gasto que su funcionamiento representa. Además de ser esta un agua fría que al mezclarse con el agua vegetal, baja las propiedades termodinámicas de la misma, y altera los parámetros operacionales como los sólidos totales disueltos, que obligan a la realización de extracciones a los generadores de vapor, aumentando el consumo de agua y haciendo estos equipos más ineficientes.

Entre los factores que ocasionan un consumo de agua adicional se pueden valorar razones de origen operativo, como las frecuentes paradas en el proceso y el despilfarro incontrolado en labores de limpieza y enfriamiento y de origen tecnológico, entre las que pueden señalarse:

1. Arrastres de azúcar en pre evaporadores.
2. No se recupera el agua de la extracción continua de las calderas.
3. Extracción excesiva por sólidos totales disueltos.
4. Limpieza inadecuada de tachos.
5. Mezcla de agua fría cruda en la imbibición del tándem.
6. Condensadores de tachos y evaporadores de muy elevado consumo específico.
7. Baja eficiencia en los enfriaderos.
8. Desorden en el uso de agua contaminada en el proceso.

Estos factores inducen altas pérdidas de agua, o de agua y calor combinados, que cuando se aúnan conducen a crisis por falta de agua y paradas innecesarias de la fábrica. El consumo de agua de fuentes externas se puede reducir a valores menores  $\dots \dots \dots$  <sup>3</sup>/t de caña molida.

## 1.2 Cálculo del flujo de agua en las extracciones.

Datos:

- Temperatura del agua: 120°C.
- Densidad del agua a 120°C:  $0.9431 \text{ kg/m}^3 \times 10^{-3}$ .
- Volumen del agua a 120°C:  $1.0603 \text{ m}^3/\text{kg} \times 10^{-3}$ .
- Presión de trabajo de la caldera: 28 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Longitud y diámetro de la tubería: 10 m/Ø 50 mm.
- Números de codos: 2 de 90°.

· Números de válvulas en la tubería: 2

· Valor del coeficiente de fricción: 0.01385.

Altura equivalente en metros de la presión de trabajo:  $\dots \dots \dots$  <sup>2</sup> equivale a una columna de agua de 10.0168 m; pero a la densidad del agua a 120°C equivale a 10.6211 m

Cálculo de la velocidad de salida en m/s.

$$V = 4.43 \sqrt{\frac{d \cdot h}{f \cdot l}} \quad d: 0.05 \text{ m} \quad f: 0.01385$$

$$h: 28 \times 10.6211 = 297.39 \text{ m.}$$

Para el cálculo de  $\dots$  hay que tener en cuenta la equivalencia en metros de las válvulas y los codos.

· Longitud de la tubería: 10 m.

· Equivalencia de las válvulas:  $2 \times 20 = 40 \text{ m.}$

· Equivalencia de los codos de 90°:  $2 \times 7 = 14 \text{ m.}$

· Longitud equivalente de la tubería:  $10 + 40 + 14 = 64 \text{ m.}$

$$V = 4.43 \sqrt{\frac{d \cdot h}{f \cdot l}} = 4.43 \sqrt{\frac{0.05 \times 297.39}{0.01385 \times 64}} = 4.43 \times$$

$$4.09 = 18.14 \text{ m/seg.}$$

Como la tubería es de 0.05 m de diámetro, su área será:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0.05^2 \times \frac{3.1416}{4} = 0.0019635 \text{ m}^2.$$

$$\text{Volumen de desalojo } \text{m}^3/\text{min} = 60 \times 18.14 \times 0.0019635 = 2,137 \text{ m}^3/\text{min.}$$

Que bajará a un volumen de: 2.015 m<sup>3</sup>/min.

Cálculo económico.

Para determinar la economía del régimen químico del agua de calderas en general se puede utilizar la siguiente expresión:  $H = 7 + 5DT$

Donde: H= costo del agua tratada según tabla, en \$/t; DT dureza total

Capacidad de la planta = 80 /h

En los cálculos se consideran todos los gastos de taller, salarios de personal, consumo de energía, reactivos, materiales, gastos de organización y la realización del control químico, así como, descuentos de amortización de los gastos generales para la construcción de los equipos de tratamiento de agua. El costo de los gastos por unidad de producción de vapor está referido a 1 t de vapor. Para determinar la economía del régimen químico del agua de calderas en general se puede utilizar la siguiente expresión:

$DC = 0.0001 H (100 + \%E) a$

Donde:

DC: costo del agua tratada para producir 1 t de vapor, en \$/t.

H: costo del agua tratada según tabla, en \$/t.

a: cantidad de agua en reposición en TM.

%E: extracción de las calderas, en %.

Esta expresión es aplicable íntegramente para la comprobación del régimen químico de cualquier agua de calderas en distintos periodos de trabajo. La planta produce 80 t/h de agua tratada que costaría \$165,6.

1.3 Medidas propuestas para el uso y redistribución de agua de los equipos productores y consumidores de agua.

·Automatización de la parte mecánica del sistema recolección de los condensados en toda la instalación.

·Reparación de la torre de enfriamiento de la planta generación de energía eléctrica.

·Cambio de placa de un evaporador doble efecto del área de evaporación de la fábrica de azúcar.

·Conexión del tanque de para agua contaminada con el tanque elevado de recolección de agua.

·Modernización del sistema actual de rebose del tanque elevado de recolección de agua.

·Conectar los calentadores al colector de agua vegetal para su análisis y utilización en la generación de vapor.

·Mantener en buen estado el aislamiento térmico de todos los componentes de las conductoras de agua caliente y vapor, para resolver de inmediato cualquier imprevisto.

·Mantener limpias las superficies de transferencias de calor en todos los intercambiadores, calentadores y otros elementos de transferencia, para disminuir las pérdidas.

·Limpiar periódicamente las tuberías que trabajan con agua no tratada, para evitar que la sedimentación disminuya los diámetros de las conductoras y aumenten las pérdidas por transporte.

Las principales acciones previstas son las siguientes:

1.Una vez terminada la zafra, desmontar todas las válvulas de extracción de fondo de los generadores de vapor y pasarlas por un banco de prueba.

2.Que la dirección del departamento valore la posibilidad de presurizar el desareador aunque sea a una menor presión.

3.La sustitución de los tanques flash para la recuperación del agua proveniente de las calderas.

4.Sustitución de válvulas de seguridad en mal estado y lograr una correcta regulación de las mismas.

5.Valorar la recuperación del agua de las extracciones de las calderas.

6.Desmontar todos los aditamentos que miden el flujo de agua de los generadores de vapor, estandarizarlos y repararlos.

7.Trabajar en el aislamiento térmico de tuberías y tanques de almacenamiento de agua vegetal.

8.Que al realizarse la capacitación de los operadores de calderas para la próxima contienda azucarera se incluya en los temas a tratar el tema del uso eficiente del agua vegetal y la correcta realización de las extracciones de fondo según la causa.

9.Reducir al mínimo posible el tiempo de explotación de la planta de tratamiento de agua.

10.Trabajar por lograr parámetros permisibles en el agua de las calderas.

En la práctica de las decisiones inversionista para los procesos industriales vinculados a la industria química y fermentativa se utilizan las evaluaciones de los indicadores dinámicos (González; 2005) (Perry; 1985). Para la determinación del análisis económico de las medidas se requiere de los valores estimados de cada inversión y el impacto favorable que anualmente se obtiene con cada medida, tal y como se muestra en la tabla 3.

Medida propuesta	Costo de la inversión \$	Aporte anual \$
Automatización de la parte mecánica del sistema recolección de condensado	78650,00	192472,39
Reparación de la torre de enfriamiento de la planta eléctrica	5000,00	9407,20
Cambio de placas de un evaporador doble efecto	47000,00	149240,00
Conexión del tanque para agua contaminada con el tanque elevado	1500,00	17961,60
Modernización del sistema del reboso del tanque elevado	1280,00	2909,00
Conectar los calentadores al colector de agua vegetal para su análisis y utilización en la generación de vapor	1780,00	73518,90
Valorar la recuperación del agua de las extracciones de las calderas	31700,00	29,451,11
Todas las medidas	161910,00	474960,20

**Tabla 3.** Medidas para minimizar el consumo de agua, costos inversionistas y el ahorro.

En la tabla 4 se ofrecen los resultados de los indicadores dinámicos para cada una de las inversiones propuestas. Los cálculos se realizan con los métodos de estimación recomendados en la literatura científica especializada (Peters-Timmerhaus, 1968)

**Tabla 4.** Indicadores dinámicos para cada una de las medidas propuestas.

Medida propuesta	VAN (\$)	TIR (%)
Automatización de la parte mecánica del sistema recolección de condensado	516075,84	150
Reparación de la torre de enfriamiento de la planta eléctrica	16477,70	120
Cambio de placas de un evaporador doble efecto	415971,30	197
Conexión del tanque para agua contaminada con el tanque elevado	54764,17	725
Modernización del sistema del reboso del tanque elevado	7696,88	139
Conectar los calentadores al colector de agua vegetal para su análisis y utilización en la generación de vapor	259571,12	139
Todas las medidas	1304240,85	176

Como se puede observar al realizar el estudio global del conjunto de inversiones, el resultado es favorable, propiciando la ejecución de las mejoras en conjunto. Los valores obtenidos del total son los siguientes: VAN: 1 304240,85 \$, TIR: 176%, PRD: 1 año.

## Conclusiones

Las propuestas para la minimización del consumo de agua fresca en la fábrica de azúcar bajo estudio, en el orden técnico y económico, garantizarán la recuperación de un alto volumen de agua vegetal muy favorable a operación tecnológica de la fábrica y a su balance energético, de tal forma que el resultado final sea la obtención de un azúcar de alta calidad, la operación del ingenio en condiciones más estables y la reducción del consumo de agua fresca que afecta tanto al balance energético como al suministro de agua la población

## Referencias Bibliográficas

1. Castellanos Álvarez, J. (1990) Análisis de alternativas del esquema de evaporación, calentamiento y cocción de un central azucarero que entrega energía eléctrica y bagazo a una fábrica de papel. Tesis de Doctorado. UCLV.
2. Castellanos, J. A. Félix González, Juan Francisco Puerta (2005). El consumo de agua en la industria azucarera como un problema energético y medio ambiental. Centro azúcar.p.43-47.
3. Francisco W., López E. y Monteagudo J.: Gestión y uso racional del agua. Editorial Universo Sur, UCF. ISBN 978-959-257-179-2. Universidad de Cienfuegos, Folleto de Explotación de Operación y Explotación Generadores de Vapor. ICINAZ 2004
4. González, E. (2005) Vías para el diseño de nuevas instalaciones de la industria química, fermentativa y farmacéutica. Editorial Científico Técnica., La Habana, pp 263 .ISBN: 959-05-0377-2
5. González, E. (2008a) Estrategia de procesos en las nuevas tecnologías para la obtención de biocombustibles. Editorial CYTED. La Habana, ISBN 978-959-7136-60-6. pagina150.
6. González, E. (2008b): Asimilación (Adopción) y reconversión de tecnologías para la producción de biocombustibles. Editorial Cuba Energía La Habana, ISBN 978-959-7136-58-3. pagina150
7. Peters, M.S., K.D. Timmerhaus. (1981) Plan Design and Economics for Chemical Engineers. McGraw-Hill Chemical Engineering Series ISBN-0-07-Y64