

## *EVALUACIÓN ENERGÉTICA EN LA PAPELERA PULPA CUBA*

### *PULPA CUBA MILL ENERGY ASSESSMENT*

*Juan Pedro Hernández Touse<sup>1\*</sup>, Mirialís Guevara Trujillo<sup>1</sup>, Gustavo Echerri Ureta<sup>2</sup>,  
Isis Maire Rusindo<sup>2</sup>, Rubén Espinosa Pedraja<sup>1</sup>, Agustín García Rodríguez<sup>1</sup>  
y Fidel A. Rodríguez Romano<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní, Km 5 ½ Santa Clara, Villa Clara, Cuba

<sup>2</sup> UEB Pulpa Cuba. Carretera a Trinidad, Sancti Spiritus, Cuba

Recibido: Agosto 5, 2015; Revisado: Agosto 24, 2015; Aceptado: Septiembre 3, 2015

### RESUMEN

Se realizó un estudio energético en la Papelera Pulpa Cuba, Sancti Spíritus, donde se aplicó el sistema de gestión energética según la norma NC: ISO 50001, con el objetivo de evaluar el sistema termoenergético mediante la aplicación de sistemas de gestión de la energía para la reducción de los consumos de energía y agua en la fábrica de papel, donde se diagnostica el sistema actual de generación, distribución y consumo de vapor. Se propone un esquema energético modificado con un turbogenerador de contrapresión de 1 MW y la rehabilitación de una caldera original o la instalación de una caldera de menor capacidad, que contribuye al ahorro de recursos financieros por concepto de agua, combustible y electricidad. La propuesta de implementación de cuatro proyectos generará un ahorro de 3 095 574 CUC/año y con estos beneficios se obtiene un valor actual neto de 12 928 772 CUC, cuya inversión se recupera en 1 año.

**Palabras clave:** turbina de contrapresión, cogeneración, evaluación energética, fábricas de papel.

Copyright © 2015. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

\* Autor para la correspondencia: Juan P. Hernández, Email: [juanpedro@uclv.edu.cu](mailto:juanpedro@uclv.edu.cu)

## **ABSTRACT**

An energy study was performed at Pulpa Cuba Paper Mill, located in Sancti Spiritus, where an energy management system was applied according to NC: ISO 50001, in order to assess the energy system by applying energy management systems for energy and water reduction in the paper mill, in which the current steam generation, distribution and consumption system is diagnosed. The proposal of a modified energy scheme with 1 MW Backpressure Steam Turbine Generator and rehabilitation of the original boiler or installing a lower capacity boiler contributes to save financial resources by the concept of water, fuel and electricity. The implementation of four projects will save 3,095,574 CUC / y and an average payback period of about 1 year is expected.

**Key words:** back pressure steam turbine, cogeneration, energy assessment, paper mills.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La misión de la Unidad Básica Empresarial (UEB) UEB Pulpa Cuba es satisfacer las demandas del mercado nacional de productos de papel y cartón en todos los surtidos, con la mayor calidad y competitividad, garantizando una fuerza de trabajo estable, con una capacitación permanente, con la visión de estar presentes establecidos en el mercado nacional como el mayor proveedor de productos de papel y cartón, con instalaciones modernizadas y rehabilitadas para incrementar las capacidades productivas, con el objetivo de sustituir importaciones y aumentar las exportaciones.

El sector papelerero es considerado uno de los siete sectores industriales con un mayor consumo energético. La fabricación de papel requiere de un elevado consumo eléctrico y térmico. En función del origen de esta energía, las fábricas papeleras son responsables directa o indirectamente de la producción de emisiones de CO<sub>2</sub> y de otros gases de efecto invernadero.

La cogeneración, la energía eficiente, está reconocida como Mejor Tecnología Disponible (MTD) a nivel europeo para su empleo en el sector papelerero, ya que el recurso a la cogeneración encaja perfectamente con las necesidades de calor útil en los procesos y su capacidad para ahorrar energía y emisiones, especialmente de CO<sub>2</sub>, en los procesos papeleros. Cogenerar con muy alta eficiencia es una de las apuestas sostenibles del sector papelerero, una de las industrias líderes en implantación de este sistema, alcanzándose en instalaciones del sector papelerero ahorros de energía primaria superiores al 20%.

Atendiendo a las diferentes tecnologías de cogeneración utilizadas en el sector papelerero, es mayoritaria la aplicación de turbinas de gas, bien en ciclo simple o en ciclo combinado acompañadas de turbinas de vapor, si bien también un importante número de instalaciones utilizan motores de combustión interna, reflejo de la amplia variedad de necesidades, procesos y operaciones de las distintas empresas que lo componen. De cinco tipos de tecnologías de cogeneración, el cuarto lugar lo ocupa la turbina a contrapresión y el quinto las turbinas de condensación, (ACOGEN, 2013).

Aún cuando la cogeneración debe ser evaluada como parte de un plan de administración de energía su principal prerequisite es que la planta presente una demanda significativa y concurrente de calor y energía eléctrica, una vez identificado este escenario puede

explorarse sistemas de cogeneración aplicables al reemplazo de equipo viejo de proceso o de generación de energía eléctrica y oportunidad de mejorar la eficiencia del sistema de suministro de energía (Cogeneración, 2015).

Esta fábrica de papel es la única en Cuba con un sistema de cogeneración, sin embargo no funciona y uno de los dos turbogeneradores está en proceso de desmantelamiento.

La UEB Pulpa Cuba presenta un conjunto de factores que incrementan los consumos energéticos y de agua, introduciendo riesgos técnicos, económicos y ambientales en la industria.

Mediante la aplicación de la metodología de gestión energética eficiente, es posible la identificación, cuantificación, control, reducción o eliminación de factores que afectan la eficiencia energética de la industria, con la consiguiente reducción de las pérdidas de recursos materiales y financieros, los riesgos técnicos y ambientales. El objetivo de la investigación es evaluar el sistema termoenergético mediante la aplicación de sistemas de gestión de la energía, la identificación del potencial energético de la industria, el registro y análisis de la información sobre la generación, distribución y uso de la energía, para la reducción de los consumos de energía y agua en la fábrica de papel, la selección de una tecnología de cogeneración y la evaluación de un proyecto de un sistema de cogeneración.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***2.1 Caracterización energética de la industria***

La fábrica de papel operaba originalmente con tres calderas que suministraban vapor a dos turbogeneradores de extracción-condensación y a un turbogenerador de contrapresión.

En la fábrica se genera vapor actualmente con una caldera, la cual suministra vapor a un turbogenerador HP 1200 de 0,9 MW, a la máquina de papel, al calentador de combustible y al de aireador a través de tres válvulas de reducción de presión.

La caldera se alimenta con Fuel Oil; existe deficiente aislamiento térmico y no se recuperan más del 50 % de los condensados, siendo por tecnología original 30 % de condensados y 70 % de agua de reposición.

### ***2.2 Sistemas de gestión energética***

La planificación energética se realiza según la Norma Cubana (NC-ISO 50001: 2011) en la cual, la revisión energética analiza el uso y el consumo de la energía basándose en mediciones y otro tipo de datos, tales como: fuentes de energía actuales, uso y consumo pasados y presentes de la energía, identificación de las áreas de uso significativo de la energía, es decir, desempeño energético actual de las instalaciones, equipamiento, sistemas y procesos relacionados con el uso significativo de la energía y la identificación y registro de oportunidades para mejorar el desempeño energético. Los resultados de la evaluación del desempeño energético se incorporan, cuando sea apropiado, al diseño, a la especificación y a las actividades de compras de los proyectos pertinentes. Los resultados de la actividad de diseño se registran. El balance termoenergético se ha realizado según la metodología de Espinosa (1990).

### ***2.3 Selección de la tecnología de cogeneración.***

La turbina de no condensación (contrapresión) opera con un escape igual o en exceso a la presión atmosférica; el vapor de escape se usa para cargas de bajas de vapor para proceso; disponible en pequeños tamaños y consumen grandes cantidades de vapor por MW de salida (bajas eficiencias); producen menor trabajo útil que la turbina de condensación, pero como el vapor pasa proceso, la baja eficiencia de la generación (15 – 35 %) no es una preocupación; son económicamente efectivas con válvulas paralela de reducción de presión, garantizando un uso eficiente de los requerimientos de baja presión y normalmente tienen menor costo que las turbinas de condensación (Industrial Steam, 2015).

El uso de una turbina de contrapresión (o de reducción de presión) en una aplicación de cogeneración es la forma más eficiente de generación de electricidad. Esta eficiencia se deriva del hecho de que el vapor de proceso se usa doble; primero para generar potencia y segundo para satisfacer las cargas del proceso. Las eficiencias combustibles a electricidad tienen un rango típicamente de 75 a 90 %, mientras que las redes eléctricas en los E.U. logran solo 33 %.

Esta diferencia de eficiencia lleva a ahorros sustanciales para los cogeneradores, que pueden producir electricidad de 1,5 a 2,0 centavos por kWh, comparado con los valores de los servicios que son de 4 a 10 centavos por kWh. Esto significa también que un cogenerador de contrapresión puede producir electricidad con 1/3 del combustible requerido por la red lo que significa menores emisiones de cada contaminante incluyendo el CO<sub>2</sub> (Maintenance World, 2015).

En cuanto a la selección del nivel actual de cogeneración, en el escenario actual, dada la problemática del sector eléctrico, los beneficios de los sistemas de cogeneración no solo se manifiestan hacia el usuario directo en un menor costo energético, sino también en la posibilidad de la venta de excedentes eléctricos a la red pública. Aunque en general la mayoría de los empresarios muestran interés por satisfacer sus necesidades de energía de proceso, existe la alternativa de convertirse además en productor de electricidad, que puede resultar muy atractiva, atendiendo inicialmente a la satisfacción total de sus necesidades térmicas y, en función de esto, ampliar su capacidad de generación eléctrica. En el escenario que se evalúa se trata de definir un nivel de cogeneración donde hay satisfacción térmica al 100 % y compra de electricidad. Este es incapaz de generar toda la electricidad requerida en ocasiones, debido a fuertes variaciones en la relación Q/E, causadas por la variación de la demanda eléctrica. La flexibilidad que se requiere complicaría considerablemente el sistema y dada la duración de los picos de demanda eléctrica, no se justifica la inversión en incrementar así su capacidad eléctrica.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### ***3.1 Aplicación del diagnóstico energético al sistema actual***

El diagnóstico energético incluye primeramente, la aplicación del balance de agua y fibra en la máquina de papel, a partir del cual se obtienen el consumo de vapor en la etapa de secado, deareador y calentador de combustible. La realización de los balances de materiales se lleva a cabo en condiciones estables de operación, en la cual se produce Linner de 175 g/m<sup>2</sup> con una producción de 73 ton/día. Las materias primas utilizadas en el presente estudio están constituidas por recortes Old Corrugated Containers (OCC)

nacional. El esquema energético actual se muestra en la Figura 1. Como se observa, el esquema térmico actual tiene dos válvulas de reducción de presión en las líneas que suministran vapor a la máquina de papel, calentador de combustible y deareador. Originalmente tenía tres calderas de 23 ton/h, dos turbogeneradores de extracción condensación y uno de contrapresión. Actualmente solo opera el turbo de 0,9 MW que suministra electricidad a la máquina de papel.

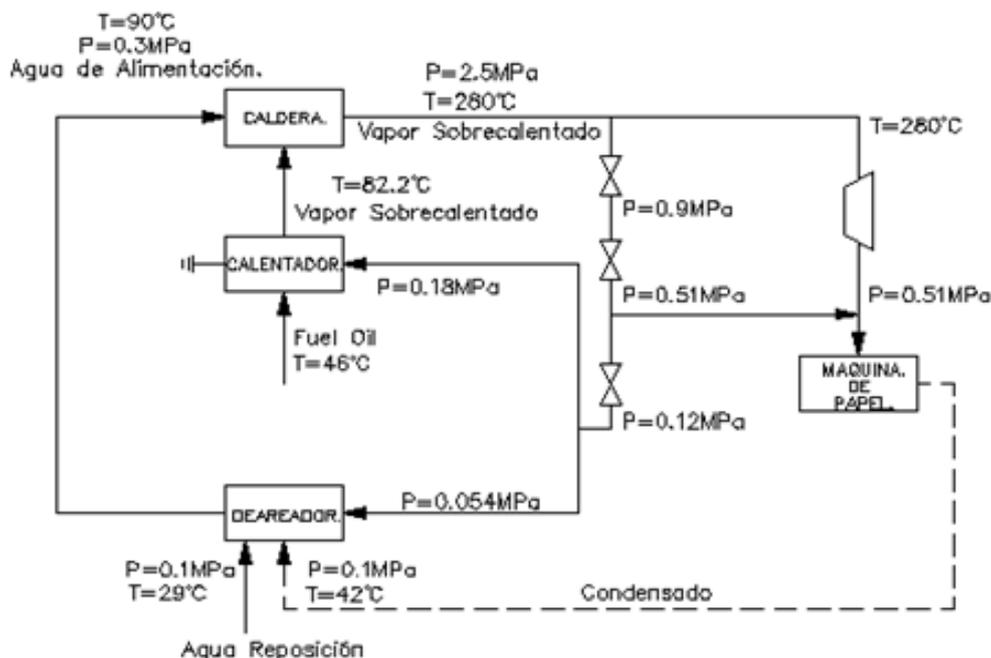


Figura 1. Esquema energético actual

En la Tabla 1 se muestran los resultados del diagnóstico energético del esquema térmico actual tomando información de Pavlov (1981). Como se observa, la mayor carga de calor se encuentra en la máquina de papel y en las pérdidas, las que están asociadas principalmente a las fugas y al condensado, provocando elevados gastos de combustible y por tanto de recursos financieros (Tabla 2).

Tabla 1. Distribución del calor en el proceso

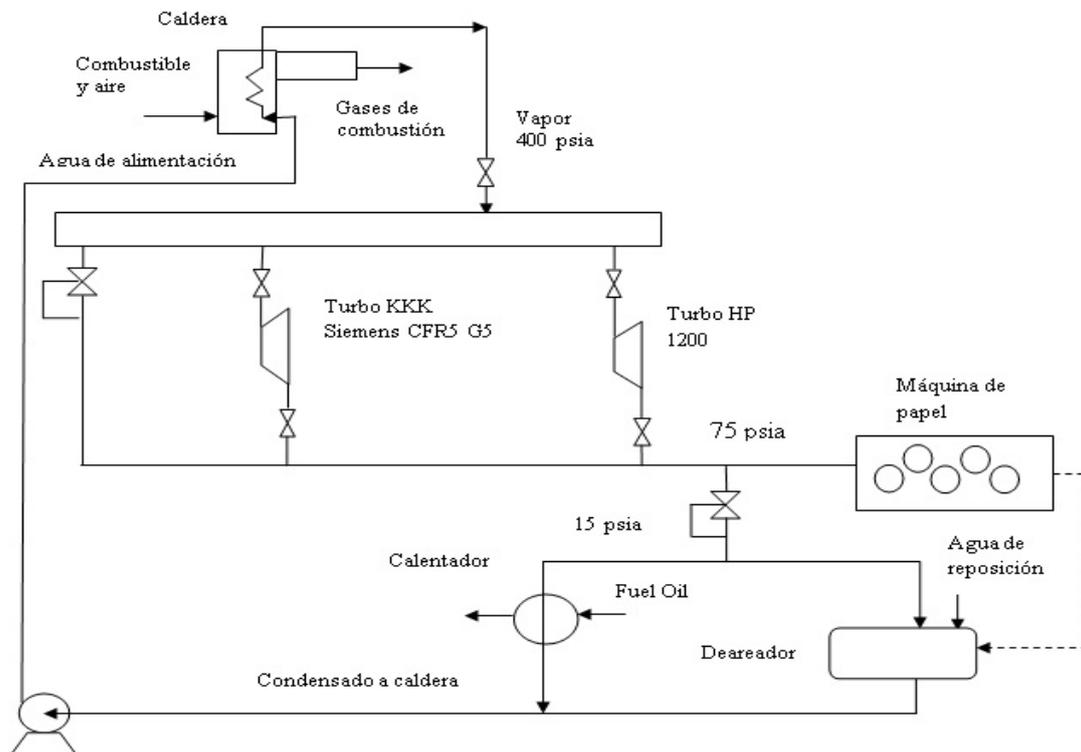
Aspectos	Distribución del calor, kW
Condensado	427,3
Turbogenerador	811,9
Máquina de papel	12 645,0
Calentador	91,5
Deareador	1 369,9
Pérdidas	2 532,9

**Tabla 2.** Distribución y magnitud de las pérdidas en el proceso

<i>Tipo de pérdida</i>	<i>Valor (kW)</i>	<i>Por ciento (%)</i>	<i>Gasto de Fuel Oil (kg/h)</i>	<i>Pérdidas de recursos financieros (CUC/año)</i>
Tuberías	33,6	1,3	2,8	8 813,6
Condensado	427,3	16,8	175,3	543 508,9
Fugas y purgas	2072	81,9	39,5	124 151,9
Total	2532,9	100	217,6	676 473,8

**3.2 Propuesta de un esquema térmico modificado**

Considerando los resultados obtenidos en el epígrafe 3.1 y suponiendo condiciones normales de operación en cuanto a: agua de reposición, fugas, purgas, aislamiento y recuperación de condensado se propone la instalación de un nuevo turbogenerador KKK Siemens CFR5 G5 cuya generación es de 983 kW, con un consumo de vapor de 10 000 kg/h con el objetivo de reducir los consumos energéticos. En la Tabla 4 se muestran los resultados del diagnóstico del esquema térmico actual, comparados con los resultados de la aplicación del balance energético en un esquema térmico modificado.



**Figura 2.** Esquema térmico modificado

Las especificaciones técnicas del turbogenerador seleccionado se toman de la Empresa alemana Siemens Stromerzeuger-Discount (2015), mostradas en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Especificaciones técnicas del turbogenerador de contrapresión

<i>Aspecto</i>	<i>Valor</i>
Potencia eléctrica	983 kW
Generador	AEG 1250 kVA, 400 Volts, 50 Hz, cos phi 0,8
Consumo de vapor	10 ton/h a carga máxima
Presión de entrada	16,6 - 25,4 bar
Presión de salida	0,0 - 1,5 bar
Temperatura de entrada del vapor	300 - 378 °C
Peso	9 ton
Dimensiones (m)	3,50 long., 2,50 alto; 2,40; 2,75 ancho

**Tabla 4.** Comparación del esquema energético actual y modificado

<i>Parámetros</i>	<i>Esquema actual</i>	<i>Esquema modificado</i>
Consumo vapor máquina de papel,	16 555,3	16 625
Consumo vapor calentador, kg/h	149,1	149,1
Consumo vapor Turbo HP 1200, kg/h	7 126	7 126
Consumo vapor deareador, kg/h	1 145	1 145
Flujo de agua de reposición, kg/h	18 596, 3	1 792
% Agua de reposición	85	9
Flujo de condensado, kg/h	8 770,3	3 052
Vapor a válvula reductora 2, kg/h	18 843, 7	1 294
Vapor válvula reductora 1, kg/h	20 827,1	793
Vapor en la caldera, kg/h	21 817,9	19 711
Calor de caldera, kW	17 878,5	26 000
Calor del proceso, kW	14 105,5	13 755
Calor perdido, kW	2 533	2 336
Calor en condensado, kW	427,3	3 052
Calor en TG <sub>2</sub> , kW	-	5 786
Calor en máq. papel, kW	12 645	9 762
Calor en calentador, kW	91,5	87
Calor en deareador, kW	1 369,9	717
Calor en TG <sub>1</sub> , kW	4 123	4 123
Consumo de combustible, kg/h	1 534	1 317
Generación de electricidad, kWh/año	6 480 000	13 557 600
Eficiencia térmica general, %	85,8	91

Como se observa en la Tabla 4, los resultados obtenidos en la evaluación del esquema térmico modificado difieren de los obtenidos en diagnóstico del esquema térmico actual, ya que se reducen sensiblemente el por ciento de agua de reposición, las pérdidas de condensado, las pérdidas de calor y por tanto se incrementa la eficiencia térmica general del proceso. La energía total se distribuye en 52,9 %, 38,1 % y 9 % en calor, generación de electricidad y pérdidas, respectivamente.

### 3.3 Evaluación económica

La evaluación económica del sistema termoenergético de la papelería, incluye la estimación del costo de inversión del nuevo sistema de cogeneración; la determinación de los beneficios o ahorros netos por concepto de agua, consumo de fuel oil y electricidad y la determinación de los indicadores de rentabilidad tales como el Valor

Actualizado Neto (VAN), y el Período de Recuperación al Descontado (PRD), (Towler y Sinnott, 2008).

El costo de inversión para un turbogenerador completo a contrapresión (U.S. DOE, 2012) varía desde 900 USD/kW para un sistema pequeño (150 kPa) y hasta menos de 200 USD/kW para un sistema mayor (2000 kW).

**Tabla 5.** Beneficios económicos por concepto de ahorro de agua, combustible y electricidad

<i>Denominación</i>	<i>Ahorro de recursos materiales</i>	<i>Ahorro de recursos financieros, CUC/año</i>
Agua de reposición	16 804,3 kg/h	12 098
Consumo de Fuel Oil	217 kg/h	1 170 401
Electricidad	7 077 600 kWh/año	1 913 075
Total		3 095 574

**Nota:** Los precios adoptados para el análisis de rentabilidad son los que actualmente utiliza la fábrica de papel, siendo 0,1 \$CUC/m<sup>3</sup>, 748,00 CUC/ton y 270,3 CUC/MW, para el agua, combustible y electricidad, respectivamente.

El costo de instalación varía dependiendo del sistema de tuberías, típicamente en un promedio de 75% del coste de equipamiento. El costo de adquisición del turbogenerador es de 900 000 USD, estimado por Back Pressure Turbine (2003) y un gasto de salario de 12 000 \$/a. No se considera el costo de operación, atendiendo que son similares a los costos actuales. Se adopta como vida útil un período de 15 años.

**Tabla 6.** Resultados del análisis de factibilidad

<i>Indicadores de rentabilidad</i>	<i>Valor</i>
Valor actual neto (VAN), CUC	12 928 772
Período de recuperación al descontado (PRD), años	1

Como resultado de la evaluación energética se proponen los siguientes proyectos:

1. Instalación de un turbogenerador de 1 MW acoplado con un turbogenerador original de 0,9 MW para una potencia total instalada de 1,9 MW.
2. Rehabilitación de las redes de distribución de vapor, incluyendo reposición de aislamiento y la supresión de una válvula de reducción de presión.
3. Evaluación de la rehabilitación una caldera de vapor de 23 000 kg/h o incorporación de una caldera de 14 000 kg/h
4. Diseño e instalación de los sistema de recuperación de condensados, tratamiento de agua y alimentación de agua a las calderas.

#### 4. CONCLUSIONES

1. El diagnóstico energético realizado en las actuales condiciones de operación muestra 14 % de pérdidas energéticas, por concepto de deficiente aislamiento, vertimiento de condensados y fugas de vapor, con una eficiencia térmica general de 85,8 %, considerando la recuperación de un 50 % del condensado, siendo 70 % por diseño original.
2. El esquema térmico modificado presupone la sustitución total de los turbogeneradores de extracción-condensación por un turbogenerador de

contrapresión KKK (Siemens) CFR 5 G5 de 1 MW, operando en paralelo con el turbogenerador actual de 0,9 MW para una potencia total instalada de 1,9 MW; la continuidad de la generación de vapor con una caldera de 23 000 kg/h, la rehabilitación de una caldera similar operando a menor capacidad o instalación de una de 4 ton/h y la supresión de una válvula reductora.

3. Los beneficios económicos que se obtienen como resultado de la propuesta de un nueva tecnología de cogeneración son de 3 095 574 CUC/año por concepto de ahorro de agua de reposición, combustible y electricidad; con estos beneficios se obtiene un valor actual neto de 12 928 772 CUC, cuya inversión se recupera en 1 año.

## REFERENCIAS

- ACOGEN, C., Acogen-cogeneración, Online, 2013, Disponible URL en: <http://www.acogen-org/post/informe-acogen-cogeneración>. Consultado: 7/6/2015
- Back Pressure Turbine, Online, 2003, Disponible URL en: <http://www.backpressureturbine.com>. Consultado: 17/6/2015.
- Cogeneración. Online, 2015, Disponible URL en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/cogeneracion.pdf> Consultado: 17/6/2015
- Espinosa, R., Sistemas de utilización del calor en la industria azucarera., La Habana, Ediciones ENPES, Capítulo VI, 1990, pp. 282 – 328.
- Industrial (Steam)., Online, 2015, Disponible URL en: [http://www.midwestchptap.org/Archive/pdfs/060216\\_Industrial\\_Steam.pdf](http://www.midwestchptap.org/Archive/pdfs/060216_Industrial_Steam.pdf)
- Maintenance World, The Cost of Producing Electricity., Online, 2015 Disponible URL en: <http://www.maintenanceworld.com/the-cost-of-producing-electricity/> Consultado: 12/6/2015
- NC-ISO 50001: 2011, Sistemas de gestión de la energía – Requisitos para su uso.
- Pavlov, K. F., Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aspectos en tecnología química., Moscú, Editorial Mir, 1981, pp. 545 – 607.
- Stromerzeuger-Discount, Online, 2015, Disponible URL en: <http://www.stromerzeuger-discount.com/index.html> Consultado: 12/6/2015
- Towler, G. y Sinnott, R., Chemical Engineering Design. Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design., Butterworth-Heinemann, EUA, 2008, pp. 297- 363.
- US. DOE, Consider Installing High-Pressure Boilers with Backpressure Turbine-Generators, Advanced Manufacturing Office Energy Efficiency and Renewable Energy, Online, 2012, Disponible URL en: <http://manufacturing.energy.gov> Consultado: 14/6/2015.