

*Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas*

*Centro de Estudios de Energética y Tecnologías Ambientales*

Estudio de cogeneración para la Empresa Militar Industrial (EMI) “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus.

Autor: Serguey Pérez Pérez

Año: 5to

Tutor: Dr. Oscar Cruz Fonticiella

“Año 53 de la Revolución”

Curso 2010-2011



# *PENSAMIENTO*

*“Creo en la lucha armada como la única solución para los pueblos que luchan por liberarse y soy consecuente con mis creencias.”*

*Che*

## *DEDICATORIA*

◆ *Le dedico esta tesis a la persona que me dio la vida y renunció a todos sus sueños por mí.*

*Para mi mamá: Alicia.*

# AGRADECIMIENTOS

◆ Quiero agradecerle a mami por confiar y darme apoyo, y haber estado todos estos años junto a mí en los momentos más difíciles de mi vida y en los más felices, dándome a entender la importancia de la familia, el amor, y el ser una buena persona. Te agradezco todo lo que me has dado, y le ruego a Dios que te dé salud para que sigas viviendo y estés a mi lado muchos años más.

◆ A Dios por ayudarme a lograr mis sueños y protegerme siempre.

◆ A todos mis hermanos: Mario Manuel, Alejandro, Andy, y al amor de mi vida Laura, que ha estado conmigo en los últimos 15 años y he tratado de enseñarle todo lo que ha estado a mi alcance, espero haber sido un buen ejemplo para ti y te deseo toda la suerte y la salud del mundo.

◆ A mis abuelos: Efigenio, Mario, Estela, y principalmente a mi abuelita que está en el cielo Claudina, te agradezco a ti abuela aunque ya no estés, pero sigues estando en el corazón de todos los que te quieren.

◆ A mi papá Idel, gracias por hacer de mi familia lo que siempre esperé de ti, espero que te sientas orgulloso de mí, y que sigas queriéndonos como hasta ahora. Y recuerda que tus hijos siempre te van a querer.

◆ *A todos mis tíos: Alcides, Andrés, Abel por perder el sueño tantas madrugadas, Carmen, Maité, Irelida, a todos gracias por ayudarme de una forma u otra.*

◆ *A Nerelys, Alexander, Mercedes, Perucho, por darme tanto apoyo y ser nuestra mejor familia.*

◆ *A Sara Eneida por soportarme en todos estos años y estar siempre disponible, y a Braulio por estar pendiente siempre de la familia, gracias.*

◆ *A todos mis primos, que son muchos y de alguna forma ayudaron en algo.*

◆ *A mis amigos: Magnalys, gracias por ser mi amiga, sabes que te amo; Geily, te quiero mucho y te considero una persona muy especial, tanto a ti como Acela; Yeni, has sido una hermana mayor y has hecho de mí una mejor persona; Yordys, mi amigo; Lunmaily, te quiero mucho, mi amor, y no se me olvidará nunca todo lo que hiciste por mí; Roxana, Ivón, Manuel; Humberto, por estar pendiente y ser tan amable; Randy, te estimo mucho y te considero mi hermano; Margot y Glenda, por soportarme tanto tiempo; a todos gracias y si se queda alguno que me disculpe.*

◆ *A Yoandy y toda su familia por el cariño recibido y sentir que me sintiera como en casa.*

◆ *A mi tutor por sacar lo mejor de mí y ser un buen ejemplo a seguir.*

*A todos muchas Gracias.*

## RESUMEN

En las calderas de la Empresa Militar Industrial “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus, actualmente, mediante una válvula reductora, se disminuye la presión del vapor para suministrar calor a los tachos del comedor siendo este proceso muy ineficiente, arrojando un coeficiente de utilización de la energía aportada del combustible de sólo un 26 %. La presente tesis desarrolla un estudio de la tecnología de una planta de cogeneración para un ciclo ideal, partiendo de un análisis termodinámico y de un análisis económico y medio-ambiental del impacto de esta tecnología, arrojando como resultados que 180 kW del calor transferido se utiliza para la cocción de los tachos; asimismo, es posible demostrar que se producen entre 50 y 80 kW de potencia en el turbogenerador, manejando modos de operación convenientes y que el calor de entrada a la caldera es de 284 kW lo cual posibilita que el factor de utilización mejore hasta un 83%. El estudio concluye que con la cogeneración se podría generar unos 110 MWh al año lo cual satisface, aproximadamente, la tercera parte de la demanda de energía eléctrica de la empresa y propiciaría un ahorro aproximado de unos 6 000 dólares al año por concepto de energía eléctrica dejada de comprar al Sistema Electroenergético Nacional (SEN). El costo anualizado aproximado de la nueva instalación ascendería a unos 71 mil dólares. El costo evitado en una termoeléctrica de las emisiones de gases de efecto invernadero, la cual trabajaría con un menor coeficiente de utilización que la planta de cogeneración ascendería a unos mil dólares al año.

## **SUMMARY**

In the boilers of the Industrial Military Company "Cor. Francisco Aguiar Rodríguez" of Sancti Spíritus, at the moment, by means of a valve that reduces, he/she diminishes the pressure of the steam to give heat to the tachos of the dining room being this very inefficient process, throwing a coefficient of use of the contributed energy of the fuel of only 26%. The present thesis develops a study of the technology of a cogeneration plant for an ideal cycle, leaving of a thermodynamic analysis and of an economic and half-environmental analysis of the impact of this technology, hurtling as results that 180 kW of the transferred heat is used for the cooking of the tachos; also, it is possible to demonstrate that they take place between 50 and 80 kW of power in the upset generator, managing convenient operation ways and that the entrance heat to the boiler is of 284 kW that which facilitates that the use factor improves until 83%. The study concludes that with the cogeneration you about 110 MWh could generate approximately a year that which satisfies, the third part of the demand of electric power of the company and it would propitiate an approximate saving from about 6 000 dollars to year for concept of left electric power of buying to the National Electroenergy System (SEN). The cost for every approximate year of the new installation would ascend to about 71 thousand dollars. The cost avoided in a thermoelectric of the emissions of gases of effect hothouse, which would work with a smaller use coefficient that the cogeneration plant would ascend to about a thousand dollars a year.

### **Nomenclatura:**

$CO_2$	Dióxido de carbono [%]
$\mathcal{E}_u$	Factor de utilización del sistema de cogeneración [%]
$h$	Entalpía [kJ/kg]
$\dot{m}$	Flujo másico [kg/s]
$\dot{Q}$	Calor [kW]
$s$	Entropía [kJ/kgK]
$T$	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
$v$	Volumen específico [ $m^3/kg$ ]
$\dot{W}$	Trabajo [kW]
$P$	Presión [kPa]
$e$	Eficiencia [%]
$X$	Calidad
$\dot{E}$	Energía [kW]
$W_{E_B}$	Trabajo específico de las bombas [kW]
$\eta_{GV}$	Eficiencia del generador de vapor [%]
$Q_{dis}$	Calor disponible [kJ/kg]
$Q_u$	Calor útil [kJ/s]
$i_{aa}$	Entalpía del agua de alimentación (kJ/kg).
$D_{sat}$	Flujo de vapor saturado que va al sistema (kg/s).
$i_{sat}$	Entalpía del vapor saturado (kJ/kg).
$b_{nat}$	Gasto específico de combustible natural (kg/kWh).

$B_C'$  Consumo de combustible con la cogeneración.

$S_o$  Salario del operador

$M$  Mantenimiento

$CA$  Costo de anualización

$C$  Costo de la instalación

$i$  Tasa de interés

$O$  Costos de operación más mantenimiento

## **Abreviaciones**

ACS	<i>Agua Caliente Sanitaria</i>
CHP	<i><u>Combined Heat and Power</u></i>
ECog	<i>Estudio de Cogeneración</i>
EE	<i>Energía Eléctrica</i>
EMI	<i>Empresa Militar Industrial</i>
ET	<i>Energía Térmica</i>
FAR	<i>Fuerzas Armadas Revolucionarias</i>
GEI	<i>Gases de Efecto Invernadero</i>
GV	<i>Generador de Vapor</i>
ONG's	<i>Organizaciones No Gubernamentales</i>
pICog	<i>Planta de Cogeneración</i>
RC	<i>Recuperador de Calor</i>
RCE	<i>Relación Calor / Electricidad</i>
SEN	<i>Sistema Electroenergético Nacional</i>
TV	<i>Turbina de Vapor</i>
TVCE	<i>Turbina de Vapor de Condensación - Extracción</i>
TVCP	<i>Turbina de Vapor a Contrapresión</i>
UIM	<i>Unión de la Industria Militar</i>
Rc	<i>Recuperador del condensado</i>

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
<b>Introducción</b>	1
<b>Capítulo 1:</b> Revisión bibliográfica de los sistemas de cogeneración para empresas militares o afines y sus impactos económicos – ambientales.	6
1.1 – Conceptos generales de la cogeneración.	7
1.2 – La cogeneración para la EMI.	7
1.3 – Cogeneración vs generación convencional.	9
1.4 – Clasificación de los Sistemas de Cogeneración.	10
1.5 – Cogeneración con Turbinas de Vapor	11
1.6 – Cogeneración con Turbinas de Gas	11
1.7 – Cogeneración con Ciclo Combinado	12
1.8 – Cogeneración con Motor Alternativo	12
1.9 – Ventajas de un sistema de cogeneración.	13
1.10 – Conclusiones parciales.	13
<b>Capítulo 2:</b> Propuesta de Estudio de Cogeneración (ECog) para la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus.	15
2.1 – Caracterización del centro.	15
2.2 – Esquema de los diferentes sistemas de cogeneración.	15
2.3 – Selección del sistema de cogeneración.	16
2.4 – Esquema térmico actual de la EMI.	17
2.5 – Diagrama de flujo de la instalación actual de la EMI.	18
2.6 – Balance térmico del generador de vapor.	19
2.7 – Diagrama de flujo de la instalación propuesta para la EMI.	20
2.8 – Métodos de cálculo.	22
2.9 – Análisis del impacto medio – ambiental.	25
2.10 – Conclusiones parciales.	28
<b>Capítulo 3:</b> Estudio de caso para la cogeneración de la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus.	29
3.1 – Características del generador de vapor.	29

3.1.1 – Datos del generador de vapor.	29
3.1.2 – Datos necesarios para la metodología de cálculo.	30
3.2 – Diagrama de flujo de la instalación actual de la EMI con sus puntos de estado.	30
3.3 – Balance térmico cuantitativo del generador de vapor, para determinar el consumo de combustible y el calor entregado en los tachos.	31
3.4 – Cálculos principales para la instalación de cogeneración propuesta.	33
3.4.1 – Estudio de caso.	33
3.5 – Estudio de caso del impacto medio – ambiental.	46
3.6 – Costos de la cogeneración.	47
3.7 – Conclusiones parciales.	49
<b>Conclusiones</b>	50
<b>Recomendaciones</b>	51
<b>Referencia Bibliográfica</b>	52
<b>Anexos</b>	55

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la economía mundial está pasando por una etapa de crisis. En este contexto y con el objetivo de aumentar su competitividad, las empresas se plantean la manera de reducir sus costos de producción. La dependencia del petróleo importado es alta, de esta manera la introducción de un cambio contribuye favorablemente a la sustentabilidad de las islas pequeñas [1]. En esa coyuntura, la *cogeneración* se presenta como una inversión estratégica que va a permitir la supervivencia de ciertas industrias. En efecto, los sistemas de cogeneración hoy disponibles no solamente se caracterizan por sus importantes ventajas energéticas y medio ambientales, sino también por ser inversiones caracterizadas por su alta rentabilidad.

Es innegable y un derecho legítimo que el desarrollo en los países más atrasados requiere incrementos en el consumo de energía, pero sería imposible seguir el camino de los países desarrollados. Se sobrepasarían los límites de la capacidad del planeta para absorber los impactos asociados a la producción y uso de la energía.

En el paso del tiempo las industrias han empleado un dominio de las tecnologías del carbón, del petróleo y el gas natural, (combustibles que son extinguidos, contaminantes en alto grado, y que están concentrados en pocas regiones de la tierra, en manos de grandes consorcios transnacionales y que son utilizados de forma muy ineficiente) la producción y uso del vapor y la electricidad [2,3].

A escala mundial, existen diversas acciones enmarcadas en las políticas gubernamentales y en las líneas de trabajo de muchas Organizaciones No Gubernamentales (ONG's), que tienen como objetivo estimular las dos direcciones planteadas para lograr un desarrollo energético sostenible. Entre estas acciones se pueden mencionar: una promoción fuerte de la educación energética ambiental, legislaciones que estimulan el uso de fuentes renovables y menos contaminantes, impuestos sobre emisiones, etc. La educación energética ambiental desempeña un papel decisivo en el camino hacia el desarrollo energético sostenible, pues la implantación de cualquier medida regulatoria, legislación o acción encaminada a la reducción de los impactos ambientales de las tecnologías energéticas, debe estar

precedida por la comprensión y concientización de su necesidad [6]. Lograr un desarrollo energético sostenible es, sin duda, el camino correcto, el único camino de la supervivencia humana.

La cogeneración industrial desde los primeros años del siglo XX trajo consigo una rápida electrificación dentro de las industrias. Se creó una tendencia en la industria, dirigida hacia la instalación de calderas para generar el vapor necesario para procesos y la compra a la red de la electricidad. No obstante los factores de costo llevaron a los usuarios a sustituir la cogeneración por la electricidad de la red, y de esta manera ha sido impulsado el incremento de las instalaciones de cogeneración en los últimos años.

Este estudio está basado, en un escenario para el empleo eficiente de la cogeneración en las industrias de Cuba, con el fin de sustituir las importaciones del petróleo. El encarecimiento actual de la energía eléctrica y el abaratamiento de los precios en los combustibles ha incrementado el diferencial de costo entre estos dos tipos de energía, haciendo que la rentabilidad de este sistema sea muy atractiva [35].

En esta Tesis se realiza un estudio de cogeneración para la Empresa Militar Industrial (EMI) “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus, perteneciente al Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias. El que se trate de una empresa militar, significa tener diferentes maniobras de soluciones en caso de catástrofes, emergencias o agresiones dentro del país, además de que está vinculada a una producción que brinda servicios en su mayoría para las FAR.

No se encuentran, habitualmente, trabajos dedicados al estudio de la cogeneración en este tipo de empresas. Adicionalmente, los actuales precios del petróleo (por encima de los 100 \$/barril) y la gran demanda del país en la sustitución y ahorro de este combustible [Lineamientos Congreso PCC, abril 2011] [20], hacen impostergable la necesidad de un estudio más profundo sobre los potenciales de cogeneración de estas empresas. Entre los principales acuerdos tomados en el VI Congreso del PCC, dentro de la política industrial y energética, destacando en particular, la importancia que tiene en este tipo de empresas que abastecen al país y fundamentalmente a las FAR, se encuentran:

- Priorizar, en la política industrial, como objetivo fundamental, el fomento de las explotaciones y la reducción de los costos.
- Prestar prioridad al impacto ambiental asociado al desarrollo industrial existente.
- Elevar significativamente la eficiencia de la generación eléctrica, dedicando la atención y recursos necesarios al mantenimiento de las plantas en operación.
- Fomentar la cogeneración en todas las actividades con posibilidades [20].

El país reacomoda sus realidades y necesidades a partir de algunos principios inalienables: la eficiencia energética, el uso de las fuentes nacionales de energía (en defensa de su soberanía), el aprovechamiento de nuevas soluciones energéticas (como el caso de la cogeneración) y el respeto ambiental.

Según Copado y Gutiérrez [13], las plantas de cogeneración presentan dos características que las hacen distintas a las centrales eléctricas convencionales, y que distinguen la operación entre ambas. Mientras que una central eléctrica sólo genera electricidad, la cogeneración origina dos: electricidad y calor, habitualmente bajo la forma de vapor de proceso. Al utilizar un solo combustible para proporcionar electricidad y calor, disminuye el impacto ambiental al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), entre otros.

En esta empresa, el diplomante realizó estudios de eficiencia energética pero no de la cogeneración para mejorar esta eficiencia y la posible disminución de sus costos de producción y sus impactos ambientales [27].

De aquí se desprende el siguiente *problema científico*:

La empresa posee ya un estudio de eficiencia energética pero no conoce, aún, su potencialidad de cogeneración con vistas a la mejora de esta eficiencia y la consiguiente disminución de sus costos de producción y sus impactos ambientales.

### **Hipótesis**

Un Estudio de Cogeneración (ECog) para la Empresa Militar Industrial “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus contribuiría a mejorar su eficiencia energética, disminuir sus costos de producción y sus impactos ambientales.

## **Objetivo general**

Realizar un estudio de la tecnología de cogeneración para la Empresa Militar Industrial “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus, que partiendo de un análisis termodinámico y de un análisis medio-ambiental del impacto de esta tecnología pueda contribuir al mejoramiento de su eficiencia energética, así como la disminución de sus costos de producción y la reducción de sus impactos ambientales.

## **Objetivos Específicos**

1. Revisar el estado del arte en lo referido a sistemas de cogeneración y sus costos de producción e impactos ambientales en empresas militares industriales.
2. Proponer un Estudio de Cogeneración (ECog) para la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus, destacando sus costos de producción e impactos ambientales.
3. Presentar un estudio de caso para la cogeneración de la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus así como sus costos de producción e impactos ambientales.

## **Tareas de investigación**

1. Revisar la bibliografía más reciente en lo referido a sistemas de cogeneración en empresas militares industriales, sus costos de producción e impactos ambientales, destacando sus potencialidades y limitaciones.
2. Confeccionar un esquema lógico con los pasos básicos que permitan proponer un Estudio de Cogeneración (ECog) para la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus enfatizando en sus costos de producción e impactos ambientales.
3. Aplicar dicho esquema en un estudio de caso para la cogeneración de la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus, teniendo en cuenta sus costos de producción e impactos ambientales.
4. Discutir los resultados alcanzados en el estudio de caso con vistas a las conclusiones y recomendaciones finales.

Debilidades: Costos iniciales y limitaciones al acceso de importación de la tecnología o querer emplear calderas empacadas de tubos de fuego, ya que estas calderas, de baja presión, en general, históricamente no permitían la generación eléctrica de forma competitiva.

Amenazas: Otras tecnologías alternativas (renovables) más atractivas o la continuación de esquemas simples, sin cogeneración.

Fortalezas: Sustituye importaciones energéticas utilizando con alta eficiencia el combustible para varios productos: electricidad y vapor de proceso. También, analiza el impacto ambiental de las tecnologías alternativas.

Oportunidades: Costo actual del petróleo.

Posibles proveedores: Análisis de las ofertas del mercado, a nivel de pre-factura.

## **CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LOS SISTEMAS DE COGENERACIÓN PARA EMPRESAS MILITARES O AFINES Y SUS IMPACTOS ECONÓMICOS - AMBIENTALES.**

En los primeros días de la generación eléctrica, a principios del 1900, las plantas eléctricas se ubicaron cercanas a los usuarios térmicos y la cogeneración industrial era frecuente.

Por los años 1940, el precio de los combustibles permitió que las compañías eléctricas instalaran grandes plantas de potencia lejos de las plantas industriales descargando la energía térmica sobrante en lagos.

Alrededor de 1984, la cogeneración industrial resurge como fuente de ahorro de energía y costos dentro de las mismas plantas industriales, sin estar asociadas con las grandes plantas de potencia eléctrica. Posteriormente, a través de medidas de liberalización de los mercados energéticos y de incentivos se logró un desarrollo importante de la cogeneración, en particular en Europa, donde la cogeneración ha llegado a ser de un 10% de la generación eléctrica total y se esperan aumentos muy importantes [14].

Los principales beneficios que otorga la cogeneración, tanto para el país como para la industria o institución que se abastece de él, son el ahorro en energía primaria debido a su mayor eficiencia comparada con los sistemas de generación eléctrica y térmica tradicionales, disminución de pérdidas en las redes eléctricas, mayor seguridad y diversificación de las fuentes energéticas y la disminución de la producción de gases de efecto invernadero.

Cuba cuenta con la Unión de la Industria Militar (UIM), a la cual se subordinan siete provincias: La Habana, Matanzas, Cienfuegos, Villa Clara, Sancti Spiritus, Camagüey y Santiago de Cuba. La EMI "Cor. Francisco Aguiar Rodríguez" de Sancti Spiritus es la seleccionada en este caso para un estudio previo de la cogeneración.

## 1.1 – Conceptos generales de la cogeneración.

Cogeneración es la producción simultánea de energía mecánica y térmica, ambas utilizadas, a partir de una sola fuente de energía primaria. Su uso más común es la producción de electricidad y calor en diversas formas (vapor, agua caliente, gases calientes, etc.), lo cual se conoce también como CHP (Combined Heat and Power) [36].

Para la EMI un sistema de cogeneración es una alternativa eficiente a los sistemas tradicionales de utilización de la red eléctrica y calderas. La cogeneración es una tecnología ampliamente desarrollada e introducida en el sector industrial, tanto para la esfera militar como civil.



Figura 1.1: Esquema simple de cogeneración.

*Fuente: Gamma ingenieros S.A, Comisión Nacional de Energía, Evaluación del desempeño operacional y comercial de centrales de cogeneración y estudios del potencial de cogeneración en Chile, Comisión nacional de energía, (2004) [16].*

## 1.2 – La cogeneración para la EMI.

El potencial de ahorro de energía primaria que ofrecen las pICog es muy alto al compararlo con la generación separada de electricidad y calor (en el caso que se encuentra la EMI), lo que se traduce en una importante reducción de los costos energéticos para el usuario [36].

La generación simultánea de electricidad y calor en las plantas de cogeneración permite un buen grado de aprovechamiento de la energía del combustible. El

abastecimiento de energía entre un sistema convencional y una pICog, muestra los beneficios de esta última, ver Figura 1.2:

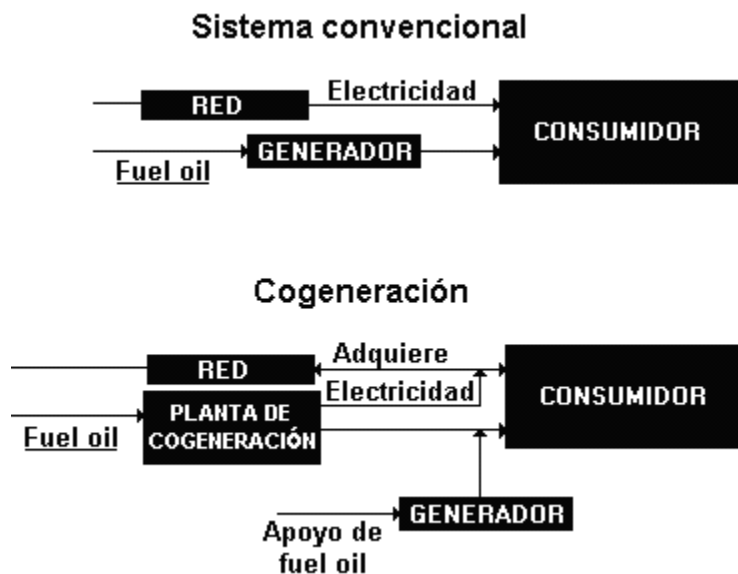


Figura 1.2: Comparación de abastecimiento de energía entre un sistema convencional y cogeneración.

Fuente: Sitio de Internet <http://html.cogeneración.com>

Los combustibles que normalmente se utilizan son menos contaminantes que los utilizados en sistemas convencionales, y el ahorro de energía implica una reducción del impacto medioambiental.

A continuación, se muestra la Tabla 1.1 de comparación de las emisiones de  $CO_2$  en sistemas convencionales y sistemas de cogeneración. En este caso, la contaminación se reduce en un 50 %.

Tabla 1.1. Comparación de emisiones de  $CO_2$ .

Combustibles más utilizados	Sistema convencional $CO_2 / kWh$	Cogeneración $CO_2 / kWh$
Carbón	1	0,5
<u>fuel oil</u>	0,7	0,35
Gas natural	0,5	0,25

Fuente: Sitio de Internet <http://html.cogeneración.com>

### 1.3 – Cogeneración vs generación convencional.

En los sistemas de cogeneración, se aprovecha hasta el 84% de la energía contenida en el combustible para la generación de energía eléctrica y calor a proceso (25-30% eléctrico y 59-54% térmico), como se muestra en la Figura 1.3:

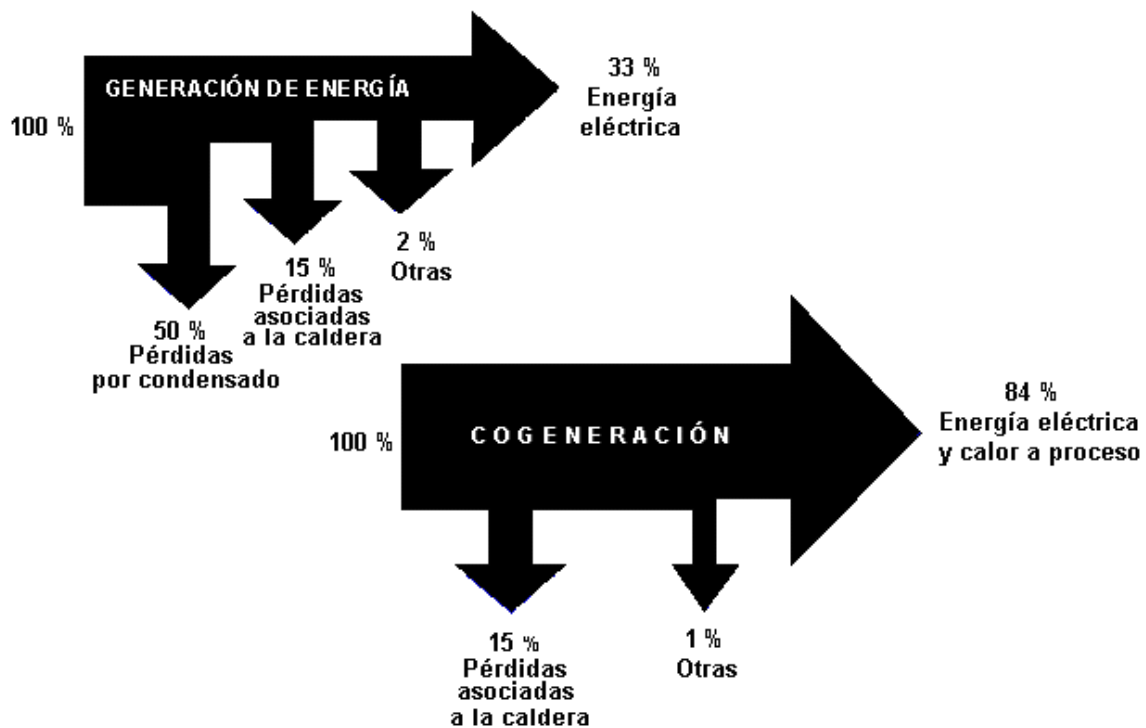


Figura 1.3: Cogeneración vs generación de energía eléctrica convencional.

Fuente: *¿Qué es la Cogeneración?*, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía CONAE. (2004) [29].

Conforme las redes eléctricas se extendieron (subsidiando en no pocas ocasiones el precio de la electricidad) y el suministro de energía eléctrica se hizo más confiable,

resultaba más barato abastecerse de este fluido de la red pública. Así, los proyectos de cogeneración poco a poco se fueron abandonando. Más tarde, debido al incremento en el costo de la energía eléctrica, la problemática ambiental y al desarrollo tecnológico de los equipos, la cogeneración vuelve a ser rentable y por ello renace, principalmente, en el ámbito industrial [33].

#### 1.4 – Clasificación de los Sistemas de Cogeneración.

Una clasificación generalmente empleada, y quizá la más utilizada, para los sistemas de cogeneración, son las siguientes:

- Cogeneración con turbina de vapor (Figura 1.4 a)
- Cogeneración con turbina de gas (Figura 1.4 b)
- Cogeneración con ciclo combinado (Figura 1.4 c)
- Cogeneración con motor alternativo (Figura 1.4 d)

En la Figura 1.4 se muestran los arreglos de los sistemas de cogeneración antes mencionados.

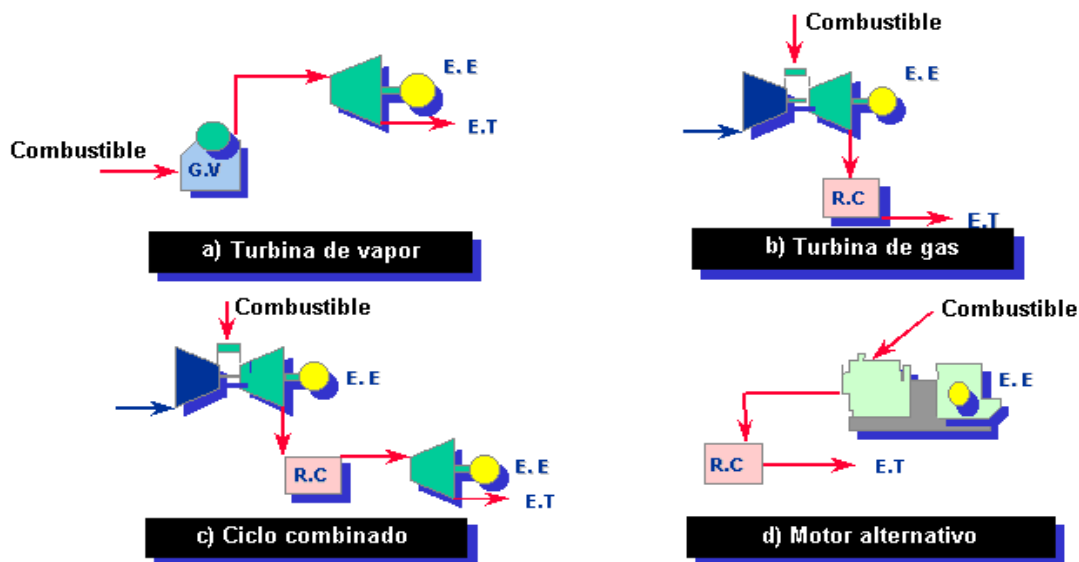


Figura 1.4: Sistemas de cogeneración.

Fuente: *¿Qué es la Cogeneración?*, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía CONAE. (2004) [29].

E.E. - Energía Eléctrica

E.T.- Energía Térmica

R.C.- Recuperador de calor	G.V.- Generador de Vapor
----------------------------	--------------------------

### **1.5 – Cogeneración con Turbinas de Vapor.**

En esta configuración la energía mecánica es producida en una turbina, acoplada a un generador eléctrico, mediante la expansión de vapor de alta presión generado en una caldera convencional. En este sistema la eficiencia global es del orden del 85 al 90% y la eléctrica del 20 al 25%.

Las turbinas de vapor se dividen en tres tipos: a contrapresión, a extracción y a condensación. En las turbinas de contrapresión la principal característica es que el vapor, cuando sale de la turbina, se envía directamente al proceso sin necesidad de contar con un condensador y equipo periférico, como torres de enfriamiento. En la turbina de extracción/condensación, una parte del vapor puede extraerse en uno o varios puntos de la turbina antes de la salida al condensador, obteniendo así, vapor a proceso a varias presiones, mientras que el resto del vapor se expande hasta la salida al condensador.

Estos sistemas se aplican principalmente en aquellas instalaciones en las que la necesidad de energía térmica respecto a la eléctrica es de cuatro a uno o mayor.

### **1.6 – Cogeneración con Turbinas de Gas.**

En este arreglo un compresor alimenta aire a alta presión a una cámara de combustión en la que se inyecta el combustible, que al quemarse generará gases a alta temperatura y presión, que a su vez, alimentan a la turbina donde se expanden generando energía mecánica que se transforma en energía eléctrica a través de un generador acoplado a la flecha de la turbina.

Los gases de escape tienen una temperatura que va de 500 a 650 °C. Estos gases son relativamente limpios y por lo tanto se pueden aplicar directamente a procesos de secado, o pueden ser aprovechados para procesos de combustión posteriores, ya

que tienen un contenido de oxígeno de alrededor del 15%. Debido a su alta temperatura, estos gases suelen ser empleados a su vez, para producir vapor, que se utiliza en los procesos industriales e inclusive, para generar más energía eléctrica por medio de una turbina de vapor.

La cogeneración con turbina de gas resulta muy adecuada para los procesos en los que se requiere de una gran cantidad de energía térmica, o en relaciones de calor/electricidad mayores a dos.

### **1.7 – Cogeneración con Ciclo Combinado.**

Este sistema se caracteriza porque emplea una turbina de gas y una turbina de vapor. En este sistema los gases producidos en la combustión de la turbina de gas, se emplean para producir vapor a alta presión mediante una caldera de recuperación, para posteriormente alimentar la turbina de vapor, sea de contrapresión o extracción-condensación y producir por segunda vez energía eléctrica, utilizando el vapor a la salida de la turbina o de las extracciones para los procesos de que se trate. El ciclo combinado se aplica en procesos donde la razón de electricidad/calores es mayor a seis.

### **1.8 – Cogeneración con Motor Alternativo.**

El motor alternativo genera la mayor cantidad de energía eléctrica por unidad de combustible consumido, del 34 al 41%, aunque los gases residuales son a baja temperatura, entre 200 y 250 °C; sin embargo, en aquellos procesos en los que se puede adaptar, la eficiencia de cogeneración alcanza valores similares a los de las turbinas de gas (85%). Con gases residuales se puede producir vapor de baja presión (de 980 a 1 470 kPa) o agua caliente de 80 a 100 °C.

### **1.9 – Ventajas de un sistema de cogeneración.**

Son muy numerosas las ventajas que la cogeneración representa tanto para la empresa como para la sociedad en su conjunto:

- Reducción de los costos energéticos gracias al ahorro que se consigue en energía primaria y al menor costo de operación de una pICog.
- Una parte de la energía es autogenerada para los procesos industriales independientemente del SEN.
- Dimensión de la pICog acorde a las necesidades energéticas del proceso.
- Mayor protección del medio ambiente, al reducir considerablemente las emisiones de gases de invernadero (a nivel global).
- Mayor eficiencia en la generación de energía, reducción de los costos de generación, transporte y distribución de la electricidad y el calor, ya que la energía se genera allí, donde es consumida.
- Mejor adecuación entre oferta y demanda energética, lo que tiene como consecuencia la reducción y el equilibrio en los precios de la energía.

### **1.10 – Conclusiones parciales.**

1. Se identifican las EMI's plenamente como empresas que, en materia de servicios energéticos recibidos (electricidad, combustible para generación de vapor y otros) hacen posible medidas de ahorro tales como la cogeneración.
2. Los sistemas de cogeneración representan actualmente una oportunidad de ahorro para el sector industrial, incluyendo las EMIS's, que permitan aumentar su eficiencia energética, al mismo tiempo que reducen el consumo de energía primaria y contribuyen a la reducción del impacto ambiental.
3. La aplicación de estos sistemas es una respuesta concreta a las necesidades actuales y concuerda con las políticas de globalización económica regional e internacional, orientada a conseguir un desarrollo sustentable.
4. La producción de energía es, con mucho, la fuente más importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), representando aproximadamente 80% de las emisiones. El incremento de los niveles de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), principal gas de efecto invernadero, tiene su causa principal en la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles, de aquí la importancia de la cogeneración.

## **CAPÍTULO 2: PROPUESTA DE ESTUDIO DE COGENERACIÓN (ECog) PARA LA EMI “COR. FRANCISCO AGUIAR RODRÍGUEZ” DE SANCTI SPÍRITUS.**

Existen industrias que hallan más ventajoso adquirir la electricidad y cubrir las necesidades de vapor a partir de la utilización de calderas empacadas de tubos de fuego. En la EMI, actualmente, los costos de las necesidades de calor y electricidad pueden justificar la instalación de una pICog ajustada a las demandas de ambos tipos de energía en la empresa.

Por consiguiente, se realizará una propuesta de ECog para la EMI, con el fin de mejorar su sistema energético, la disminución de los costos de producción y sus impactos ambientales.

### **2.1 – Caracterización del centro.**

La EMI es una organización compuesta por varias Unidades Empresariales de Base subordinada a la Unión de Industria Militar (UIM), y su objeto social es el que se define a continuación:

1. Prestar servicios de tratamiento térmico y análisis metalográficos, a las FAR y a terceros.
2. Ejecutar la desactivación de la técnica de transporte, equipos blindados y el armamento, comercializando las partes, piezas, agregados producto de la desactivación, a las FAR y a terceros.
3. Prestar servicios de comedor – cafetería a sus trabajadores.

### **2.2 – Esquema de los diferentes sistemas de cogeneración.**

Se realizó un esquema de todos los sistemas de cogeneración posibles, para posteriormente determinar cuál es el más adecuado para la EMI, y se muestra a continuación en la Figura 2.1:

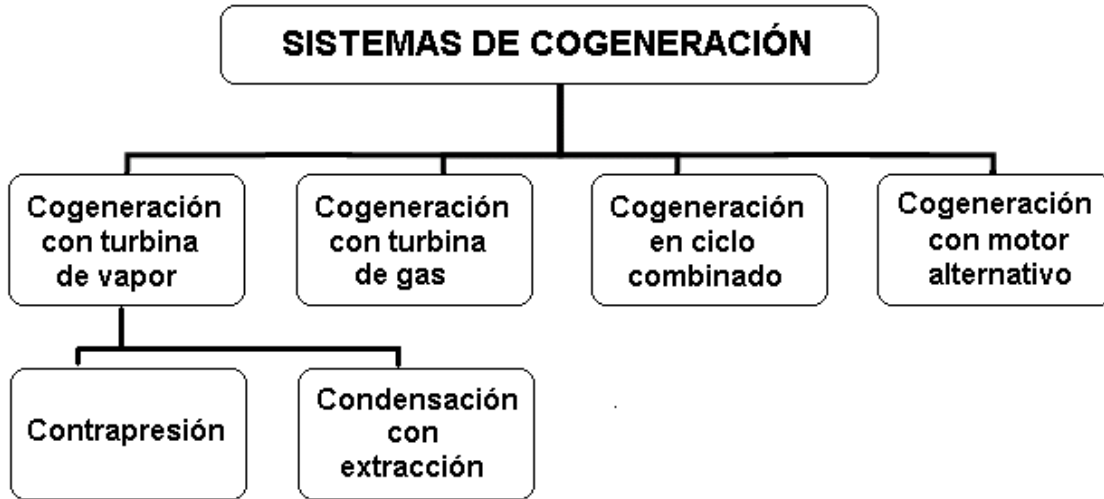


Figura 2.1: Esquema de los sistemas de cogeneración.

*Fuente: Confección propia, (2011).*

Teniendo en cuenta que se trata de un generador de vapor, en la conversión energética las más utilizadas son las siguientes tecnologías:

- TV de contrapresión.
- TV de condensación con extracción.

### **2.3 – Selección del sistema de cogeneración.**

Para la EMI, como opción básica, está la compra de energía eléctrica y la producción de calor (vapor). Para un ECog es necesario tener en cuenta la relación cuantitativa entre las demandas de energía térmica y eléctrica que deberá satisfacer la planta a proyectar.

El que representa la alternativa que mayor flexibilidad para la EMI, es la Turbina de Vapor de Condensación – Extracción (TVCE), que en principio admite una variación continua de la relación  $Q/W$  desde 0, equivalente a una turbina de condensación pura, hasta un máximo, casi equivalente a una planta de TVCP. Las plantas de TVCE son mucho más apropiadas en general, para demandas de vapor inestables, aunque también pueden afectarse en su funcionamiento si las variaciones son demasiado rápidas o demasiado amplias. La extracción

es una fuente de energía utilizable en muchos procesos industriales, en este caso para la cocción de los alimentos.

El rendimiento total de utilización de la energía primaria disminuye a medida que disminuye el vapor extraído. Es sobre todo ventajosa, cuando la fuente primaria de energía es particularmente barata, y cuando hay necesidad de reducir picos de demanda para disminuir el costo de la potencia contratada. Esta es la vía más acertada para la introducción de la cogeneración dentro de la EMI, teniendo en cuenta la necesidad de mejorar la eficiencia y la consiguiente disminución de sus costos de producción y sus impactos ambientales.

#### 2.4 – Esquema térmico actual de la EMI.

Toda la energía térmica del generador de vapor es destinada a los tachos de la cocina, además, presenta un sistema de recuperación del condensado, lo cuál se muestra en la Figura 2.2:

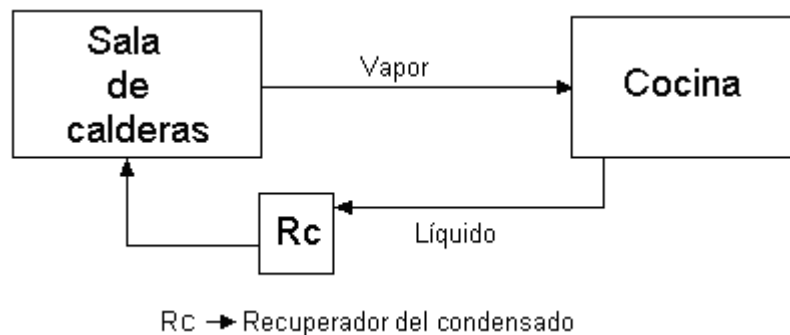


Figura 2.2: Esquema térmico de la EMI.

*Fuente: Empresa Militar Industrial (EMI) "Cor. Francisco Aguiar Rodríguez".*

#### 2.5 – Diagrama de flujo de la instalación actual de la EMI.

La Empresa Militar Industrial “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” del municipio Sancti Spíritus actualmente presenta necesidades eléctricas y térmicas, como se muestra en la Figura 2.3:

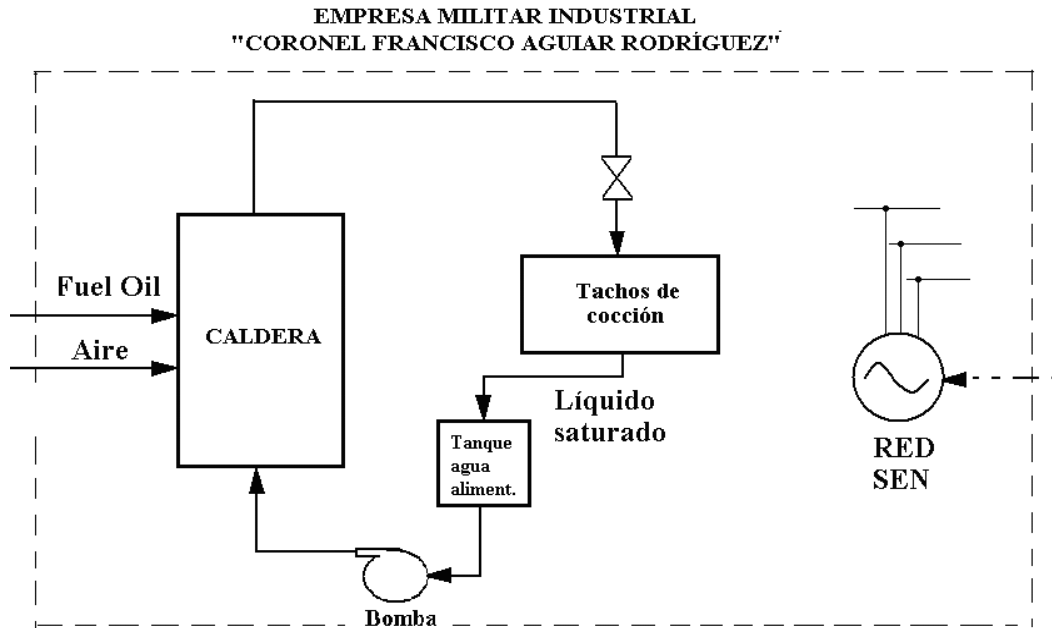


Figura 2.3: Esquema energético actual de la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez”.

*Fuente: Empresa Militar Industrial (EMI) “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez”.*

Hay consumo eléctrico procedente del SEN y simultáneamente hay necesidad de vapor para la cocción de los alimentos de la Empresa, correspondiente a este esquema, se realiza un diagrama Ts, ver Figura 2.4:

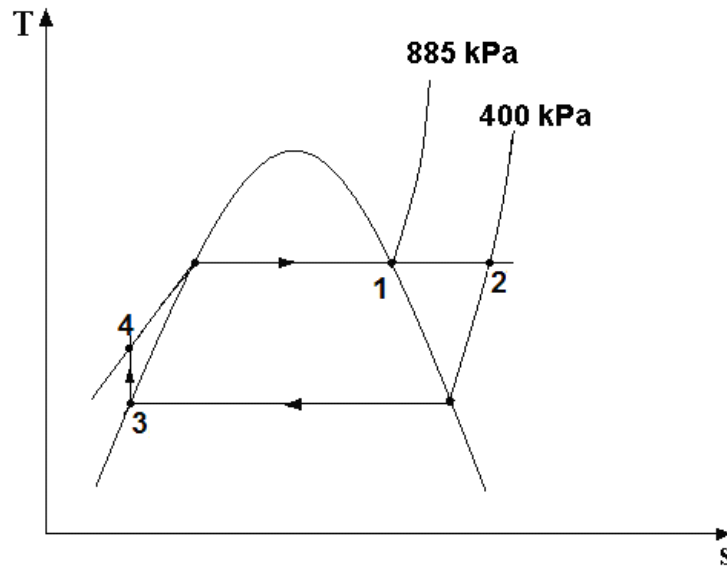


Figura 2.4: Diagrama Ts del esquema energético actual de la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez”.

Fuente: Diagrama referenciado de Cengel, Y., Boles, M., *Termodinámica, 6ta Edición (en español), capítulo 10-8, aplicado en la EMI, (2009) [10]*.

Para posteriormente, determinar el calor enviado a los tachos de cocción:

### **Calor entregado a la cocción**

$$\dot{Q}_{entregado,cocción} = \dot{Q}_{proceso,máximo} = \dot{m}_2 (h_2 - h_3) \quad (2.1)$$

## **2.6 – Balance térmico del generador de vapor.**

La determinación de la eficiencia de un generador de vapor conlleva el tener que efectuarle un balance térmico. Se tomaron una serie de parámetros directamente del generador de vapor, por consiguiente la eficiencia se determina mediante la ecuación:

$$\eta_{GV} = \frac{Q_u}{B_c Q_{dis}} 100(\%) \quad (2.2)$$

Donde:

$\eta_{GV}$  - Eficiencia del generador de vapor

$B_C$  - Gasto total de combustible

$Q_{dis}$  - Calor disponible

$Q_u$  - Calor útil

El calor útil es:

$$Q_u = D_{sat} (i_{sat} - i_{aa}) \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

$i_{aa}$  - Entalpía del agua de alimentación (kJ/kg).

$D_{sat}$  - Flujo de vapor saturado que va al sistema (kg/s).

$i_{sat}$  - Entalpía del vapor saturado (kJ/kg).

La ecuación (2.3) que se ha analizado, en este caso solo se entrega vapor saturado por lo que, no se extrae vapor sobrecalentado, no hay recalentamiento, ni calentamientos adicionales.

## 2.7 – Diagrama de flujo de la instalación propuesta para la EMI.

El método de la cogeneración permite brindar los servicios simultáneos de electricidad y calor utilizando una sola fuente energética, en este caso sería el fuel oil que entra a la caldera, como se puede ver en la Figura 2.5:

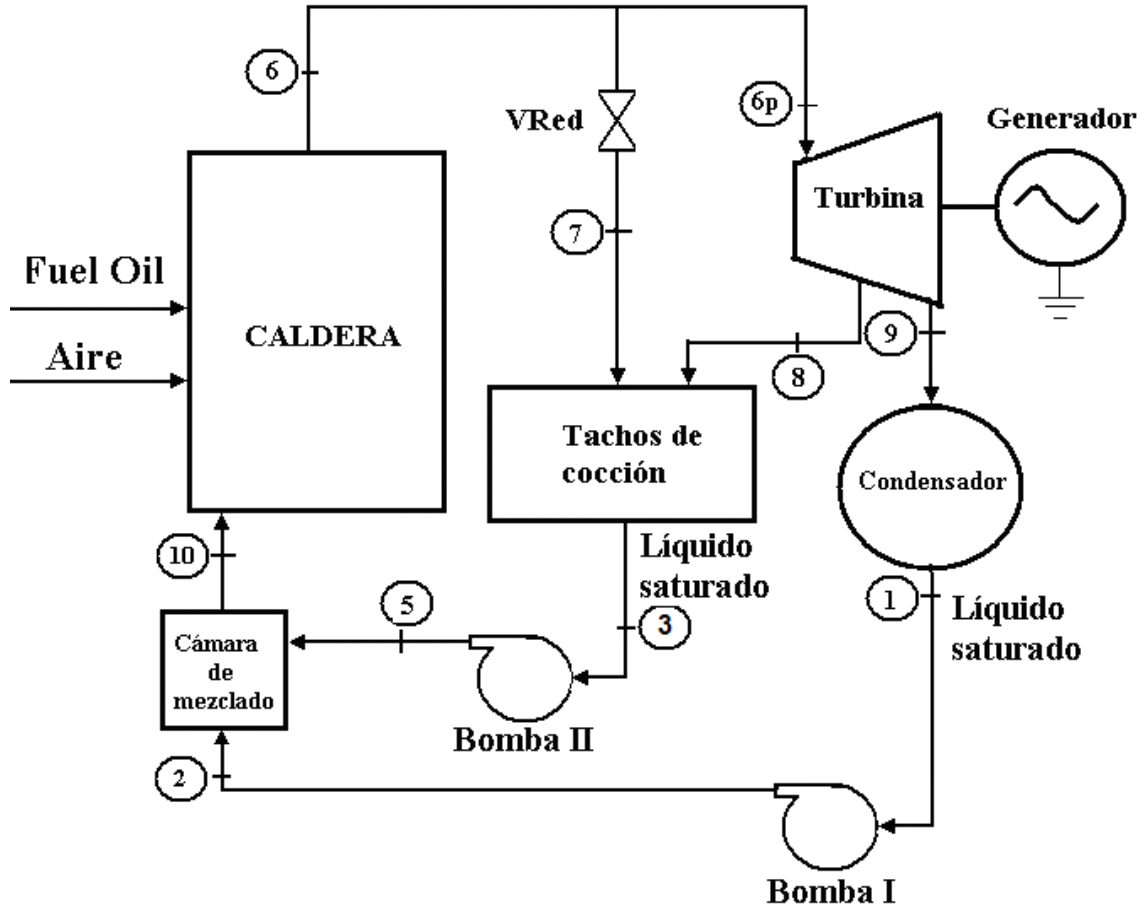


Figura 2.5: Esquema de cogeneración propuesto para la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez”.

Fuente: Ejemplo del libro, Cengel, Y., Boles, M., Termodinámica, 6ta Edición (en español), capítulo 10-8, aplicado en la EMI, (2009) [10].

Suposiciones:

1. El sistema opera a flujo estacionario.
2. Se desprecian los cambios de energías cinética y potencial.
3. La turbina y las bombas operan de manera isentrópica.
4. No se consideran las caídas de presión en las líneas donde circula la sustancia de trabajo.
5. No se tienen en cuenta las pérdidas térmicas al medio circundante, sino sólo las irreversibilidades del proceso (estrangulamiento y diferencias de temperaturas finita).



Por consiguiente se expresan las siguientes ecuaciones:

*Trabajo de las bombas*

Trabajo de la bomba 1

$$W_{bomba1,entrada} = v_{f@a10kPa} (p_2 - p_1) \quad (2.4)$$

Trabajo de la bomba 2

$$W_{bomba2,entrada} = v_{f@a400kPa} (p_5 - p_3) \quad (2.5)$$

Trabajo específico de las bombas

$$W_{E_B} = W_{bomba1,entrada} + W_{bomba2,entrada} \quad (2.6)$$

Trabajo total de las bombas

$$W_{Total,Bombas} = \dot{m}_1 v_{f@a10kPa} (p_2 - p_1) + \dot{m}_4 v_{f@a400kPa} (p_5 - p_3) \quad (2.7)$$

Trabajo de la turbina a la salida del condensador

$$W_{turbina,salida} = \dot{m}_{6p} (h_{6p} - h_9) \quad (2.8)$$

Trabajo de la turbina a la salida

$$W_{turbina,salida} = \dot{m}_{6p} (h_{6p} - h_8) + \dot{m}_8 (h_8 - h_9) \quad (2.9)$$

Trabajo neto de la turbina

$$W_{neto,turbina} = W_{turbina,salida} - W_{bomba1,entrada} \quad (2.10)$$

$$W_{neto,turbina} = \dot{m}_{6p} (h_{6p} - h_8) + \dot{m}_8 (h_8 - h_9) - v_{f@10kPa} (p_2 - p_1) \quad (2.10.1)$$

Balance de energía

$$\dot{E}_{Entrada} = \dot{E}_{Salida} \quad (2.11)$$

Calor entregado a la cocción:

$$\dot{Q}_{entregado,cocción} = \dot{m}_7 (h_7 - h_3) \quad (2.12)$$

Calor entregado a la caldera:

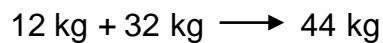
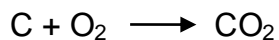
$$\dot{Q}_{entrada,caldera} = \dot{m}_6 (h_6 - h_{10}) \quad (2.13)$$

Factor de utilización del sistema de cogeneración

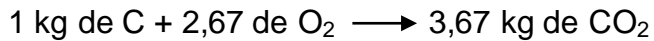
$$\mathcal{E}_u = \frac{\dot{W}_{neto,turbina} + \dot{Q}_{entregado,cocción}}{\dot{Q}_{entrada,caldera}} \quad (2.14)$$

## 2.9 – Análisis del impacto medio – ambiental.

Formación de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>).



Dividido entre 12:



Es decir, se forman unas cuatro toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de carbono durante la combustión del combustible.

Una segunda vía de calcular la formación de gases invernadero sería acudir a los estándares de emisión de CO<sub>2</sub> por kWh de generación de acuerdo al tipo de planta. Por ejemplo, Morris Rosen en su trabajo sobre “*Energy Outlook and Role for Nuclear Energy*” [32], indica unos 890 gCO<sub>2</sub> por cada kWh de energía generada a partir de combustible líquido (fuel oil), considerando la cadena completa (fully chain) de generación, desde la extracción del combustible hasta el usuario final.

De todas las sustancias que se han formado durante la combustión sólo los vapores de agua, el nitrógeno, el gas carbónico y el oxígeno no son dañinos para el organismo vivo. Los demás, los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub> = SO<sub>2</sub> + SO<sub>3</sub>) y de nitrógeno (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>), el monóxido carbónico, el negro de humo, la ceniza, el pentóxido de vanadio en una u otra medida son sustancias tóxicas que influyen perniciosamente sobre los órganos de la respiración, la piel del hombre y de animales, los vegetales, etc., ver Figura 2.7:

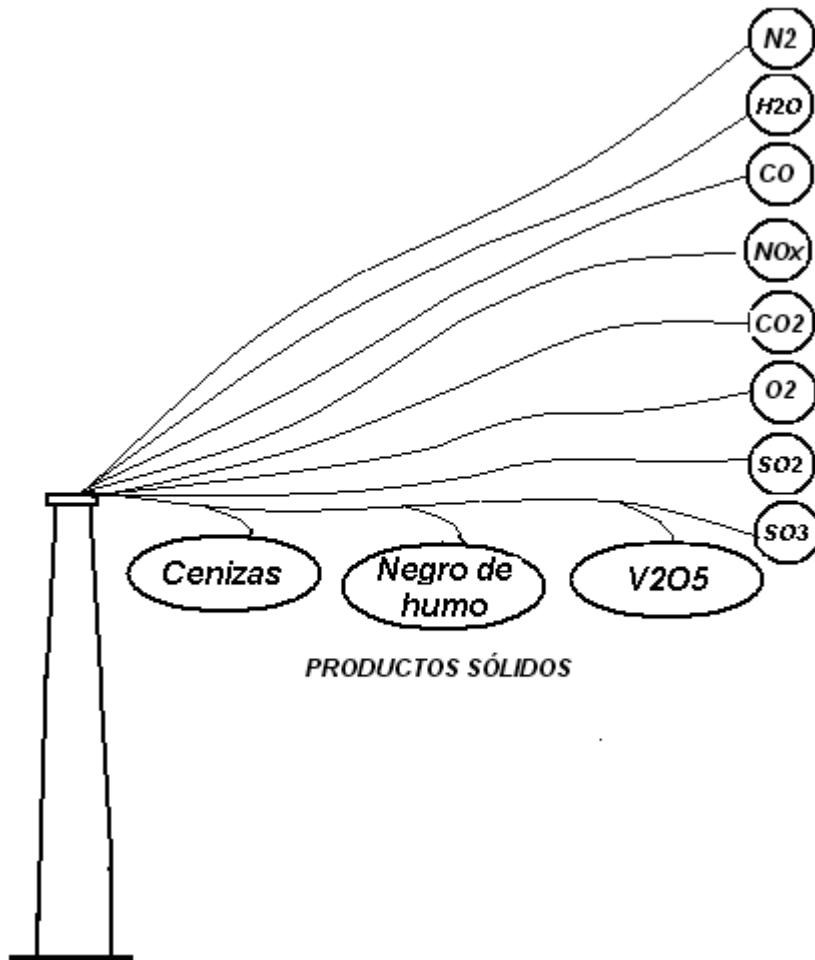


Figura 2.7: Composición de los gases de humo.

*Fuente: Generación de vapor y calor en las centrales térmicas, tema 2: Conferencia 8, Centrales Térmicas, Formación de  $NO_x$ 's y  $SO_x$ 's. Protección del medio ambiente contra la influencia dañina de los productos resultantes de la combustión, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Curso 2009-2010.*

Las sustancias dañinas, según sea el grado de peligro que éstas representan para el organismo humano, se dividen en varios grupos. A los extremadamente peligrosos pertenecen el pentóxido de vanadio y el benzapireno, el cual aparece en los gases de humo al quemar cualquier tipo de combustible con insuficiencia de oxígeno. Son altamente peligrosos el dióxido de nitrógeno  $NO_2$  y el anhídrido sulfúrico  $SO_3$ . Los gases de humo suelen contener un 2 - 5 % de anhídrido sulfúrico de la cantidad total de anhídrido sulfuroso  $SO_2$  que se forma al quemar el combustible. El peligro consiste en que, al reaccionar con los vapores de agua contenidos en el aire

atmosférico, se forman vapores de ácido sulfúrico, el cual es una sustancia tóxica y corrosiva.

Tabla 2.1: Composición elemental y poder calorífico de los combustibles líquidos y sólidos por 1 kg de masa aprovechable.

Combustible	C <sup>a</sup>	H <sup>a</sup>	S <sup>a</sup>	O <sup>a</sup>	N <sup>a</sup>	A <sup>a</sup>	W <sup>a</sup>	Q <sub>i</sub> <sup>a</sup> , MJ/kg
Mazut o petróleo	83,0	10,4	2,8	0,7	0,7	0,1	3,0	38,7

Fuente: "Fundamentos de Termotecnia", V. Ojotin y col. Editorial MIR, Moscú, (1988) [37].

Entonces, el gasto específico de combustible natural será el siguiente:

$$b_{nat} = \frac{b_{con} Q_{con}}{Q_i^a} \quad (2.15)$$

Por consiguiente, durante una hora la planta de cogeneración quemará la siguiente cantidad de combustible:

$$B_c = b_{nat} N \quad (2.16)$$

Semejante cantidad de combustible contiene la siguiente cantidad de azufre:

$$S = BS^a / 100 \quad (2.17)$$

Y de acuerdo con la fórmula:

$$S + O_2 = SO_2 \quad (2.18)$$

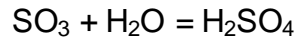
O bien

$$32 \text{ kg de S} + 2.16 \text{ kg de O} = 64 \text{ kg de SO}_2$$

$$1 \text{ kg de S} + 1 \text{ kg de O} = 2 \text{ kg de SO}_2,$$

Es decir, la combustión total de 1 kg de azufre requiere el suministro de 1 kg de oxígeno con la formación de 2 kg de dióxido de azufre SO<sub>2</sub>.

La interacción total de SO<sub>3</sub> con los vapores de agua según la ecuación:



$$80 \text{ kg de SO}_3 + 18 \text{ kg de H}_2\text{O} = 98 \text{ kg de H}_2\text{SO}_4$$

$$1 \text{ kg de SO}_3 + 0,225 \text{ kg de H}_2\text{O} = 1,225 \text{ kg de H}_2\text{SO}_4$$

Mediante este procedimiento se puede determinar la formación de ácido sulfúrico durante un año por cada kilowatt de potencia instalada.

### **2.10 – Conclusiones parciales.**

1. Se mostró un diagrama de flujo de la instalación propuesta, que muestra varias alternativas para cogenerar, y se realizó una metodología de cálculo para tres casos.
2. Se explicó cómo influyen los productos resultantes de la quema del combustible orgánico sobre el medio ambiente, enfatizando en el hecho de que de todas las sustancias que se han formado durante la combustión sólo los vapores de agua, el nitrógeno, el gas carbónico y el oxígeno *no son dañinos* para el organismo vivo. Los demás, sí lo son en alguna medida.

## **CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE CASO PARA LA COGENERACIÓN DE LA EMI “COR. FRANCISCO AGUIAR RODRÍGUEZ” DE SANCTI SPÍRITUS.**

El objetivo fundamental que persigue la cogeneración es el ahorro de energía primaria y la consiguiente disminución de la emisión de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes.

La Empresa Militar Industrial “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez”, representa un objetivo potencial para un ECog, es la primera vez que se realiza un estudio de este tipo en esta Empresa, por lo que puede ser la vía para continuar estudios posteriores más detallados.

### **3.1 – Características del generador de vapor.**

El generador de vapor tiene la función de producir el vapor durante 6 horas al día para los tachos de la cocina, los cuales garantizan la elaboración de alimentos a 447 trabajadores de la EMI. Dicho generador, en estos momentos, se encuentra trabajando a un 80 % de eficiencia, y se desconoce el consumo de combustible de entrada a la caldera. En el anexo A1 se explica, con detalle, las características actuales de dicha caldera y de acuerdo con el criterio de expertos en el tema de los generadores de vapor se muestran varias conclusiones de su funcionamiento con sus medidas correspondientes.

#### **3.1.1 – Datos del generador de vapor.**

Tipo: E - 1/9 – 1M.

Fabricación: Soviética.

Año en que comenzó a explotarse: 1976.

Presión de trabajo: 885 kPa abs.

Capacidad a la que trabaja: 0,083 kg/s

Temperatura de salida de los gases de la chimenea: 350 – 400 °C.

#### **3.1.2 – Datos necesarios para la metodología de cálculo.**

Coeficiente de exceso de aire: 1,10 Fuente: *Faires V., Termodinámica, (1987).*

Presión en los tachos de cocción: 400 kPa abs.

### 3.2 – Diagrama de flujo de la instalación actual de la EMI con sus puntos de estado.

Actualmente, la Empresa Militar Industrial “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” presenta los siguientes puntos de estado, como se muestra en la Figura 3.1:

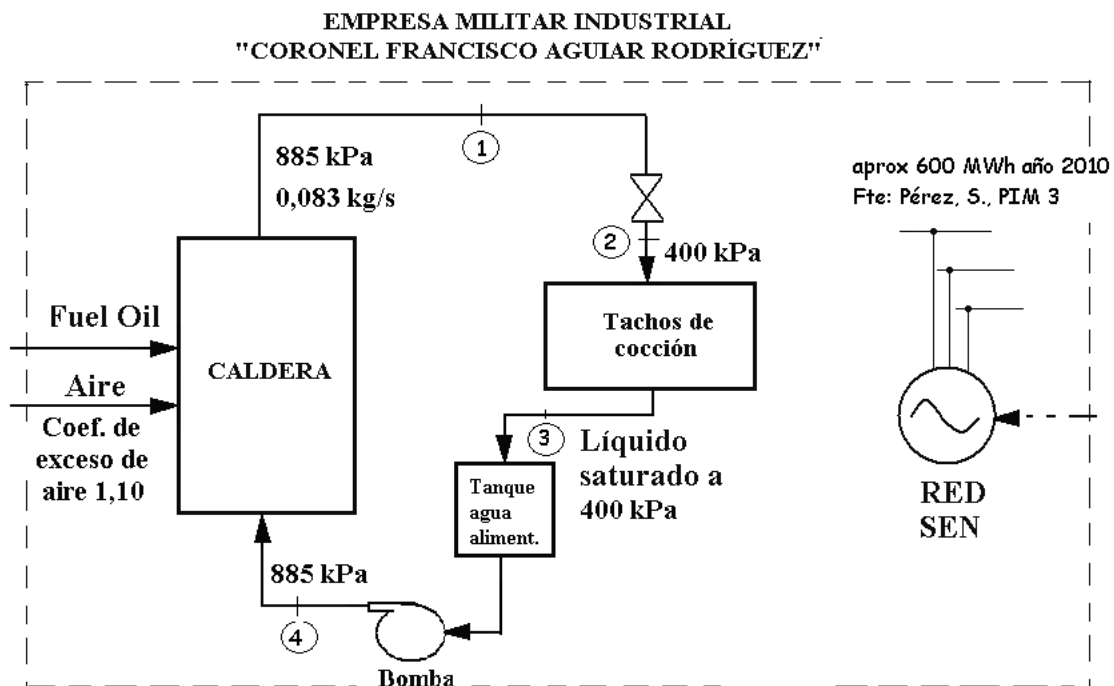


Figura 3.1: Esquema energético actual de la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” con sus punto de estado.

Fuente: *Empresa Militar Industrial (EMI) “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez”.*

Correspondiente a este esquema, se tabulan los valores en un diagrama Ts, ver Figura 3.2:

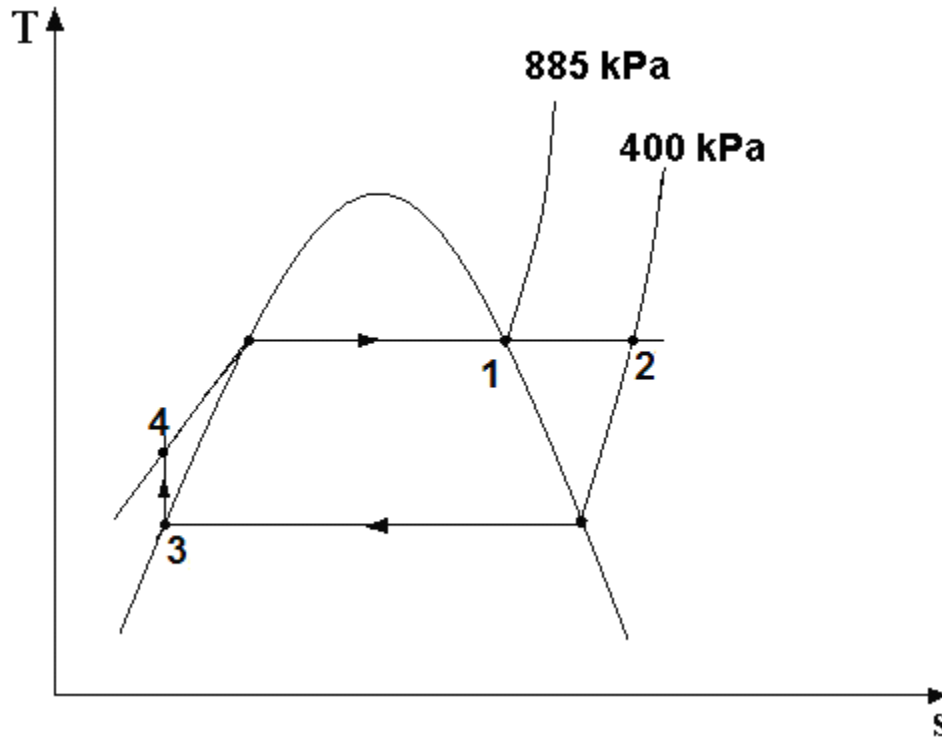


Figura 3.2: Diagrama Ts del esquema energético actual de la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez”.

Fuente: Diagrama referenciado de Cengel, Y., Boles, M., *Termodinámica, 6ta Edición (en español), capítulo 10-8, aplicado en la EMI, (2009) [10]*.

### 3.3 – Balance térmico cuantitativo del generador de vapor, para determinar el consumo de combustible y el calor entregado en los tachos.

Con la ecuación (2.1), se podrá determinar el consumo de combustible que se le suministra al generador de vapor.

$$\eta_{GV} = \frac{Q_u}{B_c Q_{dis}} \cdot 100(\%) = \frac{D_{sat} (i_{sat} - i_{aa})}{B_c Q_{dis}}$$

$$B_c = \frac{D_{sat} (i_{sat} - i_{aa})}{\eta_{GV} \cdot Q_{dis}} = \frac{0,083 \text{ kg/s} (2773,21 - 604,74) \text{ kJ/kg}}{0,8 \cdot 43157 \text{ kJ/kg}}$$

$$B_c = 0,0052 \text{ kgc/s} = 0,019 \text{ t/h}$$

Mediante la ecuación (2.1), se podrá determinar el calor entregado a los tachos de cocción:

**Calor entregado a la cocción**

$$\dot{Q}_{entregado,cocción} = \dot{Q}_{proceso,máximo} = \dot{m}_2 (h_2 - h_3)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 = 0,083 \text{ kg / s}$$

Previamente, utilizando el software educativo STEAM.exe:

Entrando con  $p = 885 \text{ kPa abs.}$ , y calidad del vapor saturado  $x = 1$

$$h_1 = h_2 = 2773,21 \text{ kJ / kg}$$

$$h_3 = h_f \text{ a } 400 \text{ kPa abs.}$$

Entrando con  $p = 400 \text{ kPa abs.}$ , y calidad del vapor saturado  $x = 0$

$$h_3 = 604,74 \text{ kJ / kg}$$

Por consiguiente, el calor de entrada a la cocción:

$$\dot{Q}_{entregado,cocción} = 0,083 \text{ kg / s} (2773,21 - 604,74) \text{ kJ / kg}$$

$$\dot{Q}_{entregado,cocción} = 179,98 \text{ kJ / s} \approx 180 \text{ kJ / s} = 180 \text{ kW}$$

Se observa que se utilizarán en los tachos de cocción 180 kW del calor transferido en la caldera.

**3.4 – Cálculos principales para la instalación de cogeneración propuesta.**

La metodología de cálculo fue basada mediante un ejemplo de una planta ideal de cogeneración, con la ayuda del software: *Cengel, Y., and Boles, M., Software STEAM.exe, Thermodynamics – An Engineering Approach, 2d ed., McGraw- Hill, Inc., New York, (1994) [11]*, y se proponen varios sistemas de operación para tres casos dados.

### 3.4.1 – Estudio de caso.

Primeramente, se determinará la tasa máxima de calor de proceso suministrada, la potencia producida y el factor de utilización cuando no se suministra calor de proceso, así como la tasa de suministro de calor de proceso cuando se extrae vapor de la línea de vapor y de las turbinas a las tasas especificadas.

*Suposiciones:*

1. Existen condiciones estacionarias de operación.
2. La caída de presión y las pérdidas de calor en la turbina son insignificantes.
3. Los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes.
4. Se asumen eficiencias para la turbina de vapor y las bombas considerando una planta ideal de cogeneración, es decir 100 %.

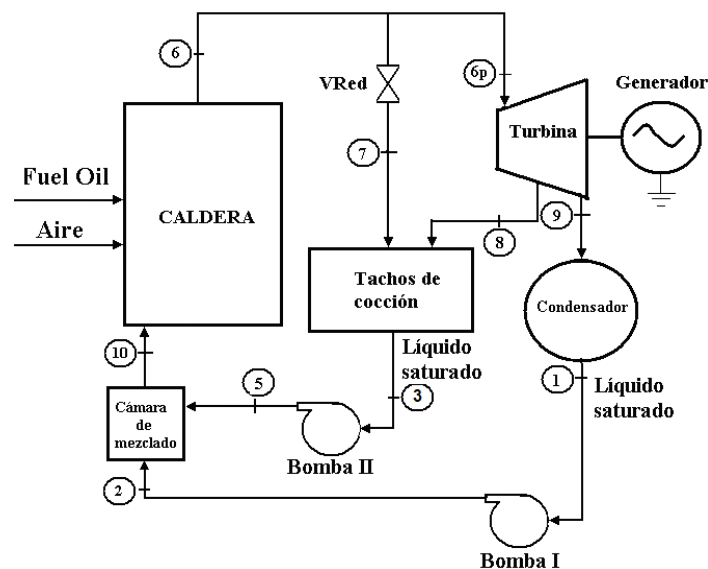


Figura 3.3: Esquema de cogeneración propuesto para la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez”.

*Fuente: Ejemplo del libro, Cengel, Y., Boles, M., Termodinámica, 6ta Edición (en español), capítulo 10-8, aplicado en la EMI, (2009) [10].*

Como el calor de entrada a la cocción no cambia (180 kW), para la cogeneración es necesario determinar el consumo de combustible prima ( $B_c'$ ) y el flujo de vapor ( $\dot{m}_6$ ) que sale de la caldera.

Primeramente, haciendo un **balance de masa** en los tachos se tiene que:

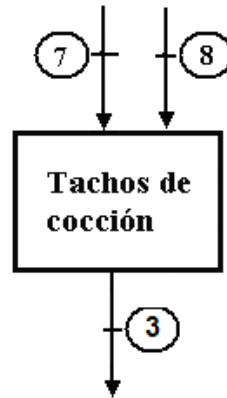


Figura 3.4: Balance de masa en los tachos de cocción.

*Fuente: Confección propia.*

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8$$

Si se desprecia cualquier cambio en la energía cinética y potencial, un **balance de energía** en los tachos de cocción arroja:

$$\dot{E}_{Entrada} = \dot{E}_{Salida}$$

$$\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{Q}_{proceso, salida} + \dot{m}_3 h_3$$

$$\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8 = 180 \text{ kW} + \dot{m}_3 h_3$$

Para una mejor estrategia de operación y de acuerdo a recomendaciones de la literatura consultada [9] para un determinado caso puede tomarse un 10 % del vapor que genera la caldera para extraerlo antes de que entre a la turbina, (o sea, que pase

por la válvula reductora un 10 % del vapor que genera la caldera) y, simultáneamente, manejar un 70 % de vapor que se extraiga de la turbina a 400 kPa para la cocción de los tachos.

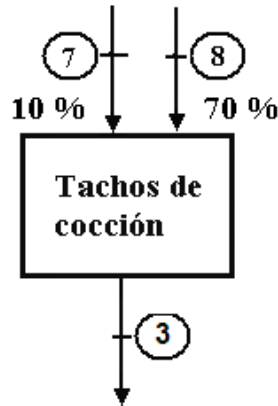


Figura 3.5: Balance de masa con sus porcentajes.

*Fuente: Confección propia.*

El balance de masa quedaría de la siguiente forma:

$$80 \% \dot{m}_6 = 10 \% \dot{m}_7 + 70 \% \dot{m}_8$$

Relacionándolo, con el balance de energía:

$$0,1 \dot{m}_6 h_7 + 0,7 \dot{m}_6 h_8 = 180 \text{ kW} + 0,8 \dot{m}_6 h_3$$

*Previamente, utilizando el software educativo STEAM.exe:*

*Entrando con  $p = 885 \text{ kPa abs.}$ , y calidad del vapor saturado  $x = 1$*

$$h_{6,p} = h_6 = h_7 = 2773,21 \text{ kJ / kg}$$

$$h_3 = h_f \text{ a } 400 \text{ kPa abs.}$$

*Entrando con  $p = 400 \text{ kPa abs.}$ , y calidad del vapor saturado  $x = 0$*

$$h_3 = 604,74 \text{ kJ / kg}$$

*Entrando con  $p = 400 \text{ kPa abs.}$ , y calidad del vapor saturado  $x = 1$*

$$S_{g8} = 6,8959 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$h_{g8} = 2738,70 \text{kJ}/\text{kg}$$

Entrando con  $p = 400 \text{ kPa abs.}$ , y calidad del vapor saturado  $x = 0$

$$S_{f8} = 1,7766 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$h_{f8} = 604,74 \text{kJ}/\text{kg}$$

Entrando con  $p = 885 \text{ kPa abs.}$  Y calidad del vapor saturado  $x = 1$

$$S_8 = 6,6284$$

Por consiguiente:

$$S_8 = S_{f8} + X_8(S_{g8} - S_{f8})$$

$$6,6284 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 1,7766 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) + X_8(6,8959 - 1,7766) \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$X_8 = 0,948$$

$$h_8 = h_{f8} + X_8(h_{g8} - h_{f8})$$

$$h_8 = 604,74 \text{kJ}/\text{kg} + 0,948(2738,70 - 604,74) \text{kJ}/\text{kg}$$

$$h_8 = 2627,73 \text{kJ}/\text{kg}$$

Entonces, el balance de energía quedaría como:

$$0,1 \dot{m}_6 2773,21 + 0,7 \dot{m}_6 2627,73 = 180 + 0,8 \dot{m}_6 604,74$$

$$277,321 \dot{m}_6 + 1839,411 \dot{m}_6 = 180 + 483,792 \dot{m}_6$$

$$\dot{m}_6 = \frac{180}{1632,94} = 0,11 \text{ kg}/\text{s}$$

Por tanto, el consumo de combustible para la planta de cogeneración propuesta sería:

$$B_C' = \frac{D_{sat}(i_{sat} - i_{aa})}{\eta_{GV} \cdot Q_{dis}} = \frac{0,11 \text{ kg/s} (2773,21 - 604,74) \text{ kJ/kg}}{0,8 \cdot 43157 \text{ kJ/kg}}$$

$$B_C' = 0,0069 \text{ kgc/s} = 0,025 \text{ t/h}$$

$$\therefore \nabla B_C = B_C' - B_C = 0,0069 \text{ kgc/s} - 0,0052 \text{ kgc/s}$$

$$\nabla B_C = 0,0017 \text{ kg/s} = 0,00612 \text{ t/h}$$

A continuación, se muestra la pICog propuesta mediante un esquema, ver Figura 3.6:

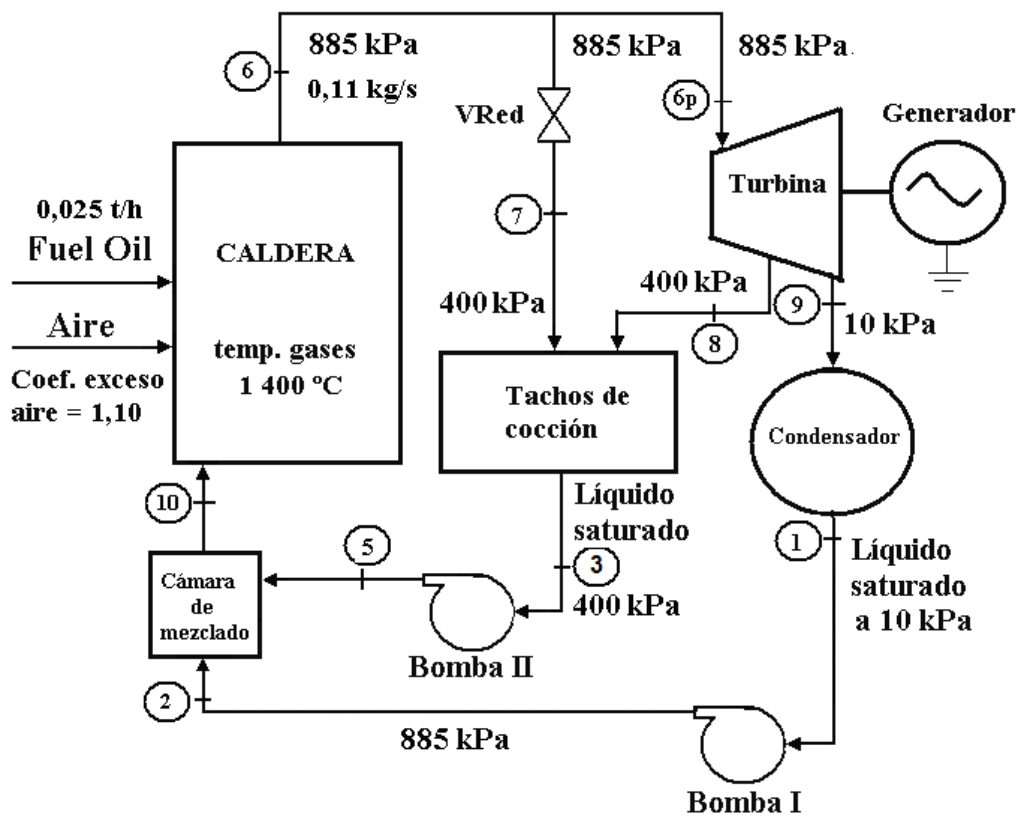


Figura 3.6: Esquema de cogeneración propuesta para la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez”.

Fuente: Ejemplo del libro, Cengel, Y., Boles, M., Termodinámica, 6ta Edición (en español), capítulo 10-8, aplicado en la EMI, (2009) [10].

Conjuntamente se expone un diagrama Ts para el esquema propuesto, ver Figura 3.7:

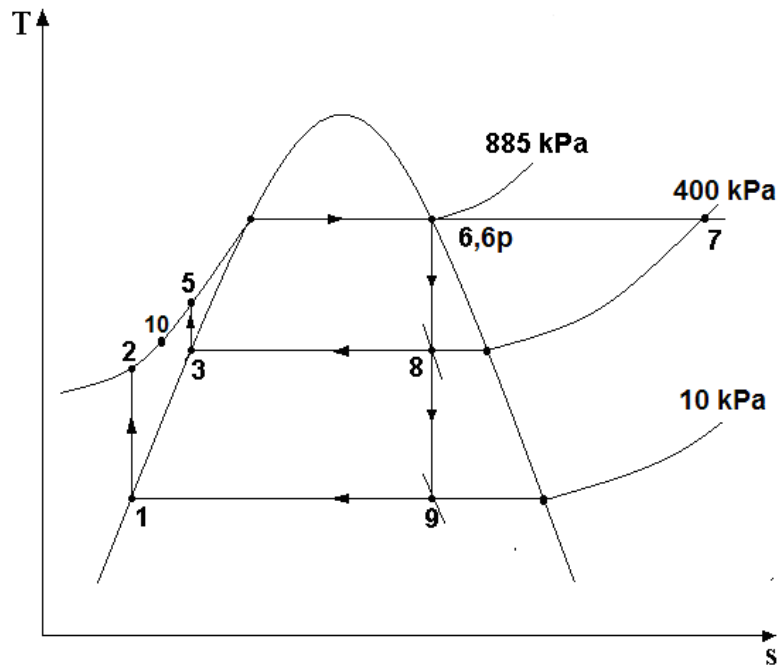


Figura 3.7: Diagrama Ts del esquema de cogeneración propuesto.

Fuente: Ejemplo del libro, Cengel, Y., Boles, M., Termodinámica, 6ta Edición (en español), capítulo 10-8, aplicado en la EMI, (2009) [10].

**Análisis:**

La pICog propuesta opera en un ciclo ideal y en consecuencia las bombas y las turbinas son isentrópicas; no existen caídas de presión en la caldera, en los tachos de cocción y el condensador; además el vapor sale del condensador y de los tachos de cocción como líquido saturado.

Las entradas de trabajo a las bombas son:

**Trabajo de las bombas**

Trabajo de la bomba 1

$$W_{bomba1,entrada} = v_{f @ 10kPa} (p_2 - p_1)$$

Previamente, se entra al STEAM.exe

Con la presión  $p_1 = 10 \text{ kPa abs.}$ , y calidad del vapor  $X_1 = 0$

$$v_f = 0,0010 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$p_2 = 885 \text{ kPa abs.}$$

$$p_1 = 10 \text{ kPa}$$

$$W_{bomba1,entrada} = 0,0010(885 - 10) = 0,875 \text{ kJ / kg}$$

Trabajo de la bomba 2

$$W_{bomba2,entrada} = v_{f @ 400kPa} (p_5 - p_3)$$

Previamente, se entra al STEAM.exe

Con la presión  $p_3 = 400 \text{ kPa abs.}$ , y calidad del vapor  $X_3 = 0$

$$v_f = 0,001084 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$p_5 = 885 \text{ kPa abs.}$$

$$p_3 = 400 \text{ kPa abs.}$$

$$W_{bomba2,entrada} = 0,001084(885 - 400) = 0,526 \text{ kJ / kg}$$

**Trabajo específico de las bombas**

$$W_{E_B} = W_{bomba\ 1,\ entrada} + W_{bomba\ 2,\ entrada}$$

$$W_{E_B} = 0,875\text{kJ} / \text{kg} + 0,526\text{kJ} / \text{kg}$$

$$W_{E_B} = 1,4\text{kJ} / \text{kg}$$

A) En el primer caso cuando todo el calor es entregado al proceso:

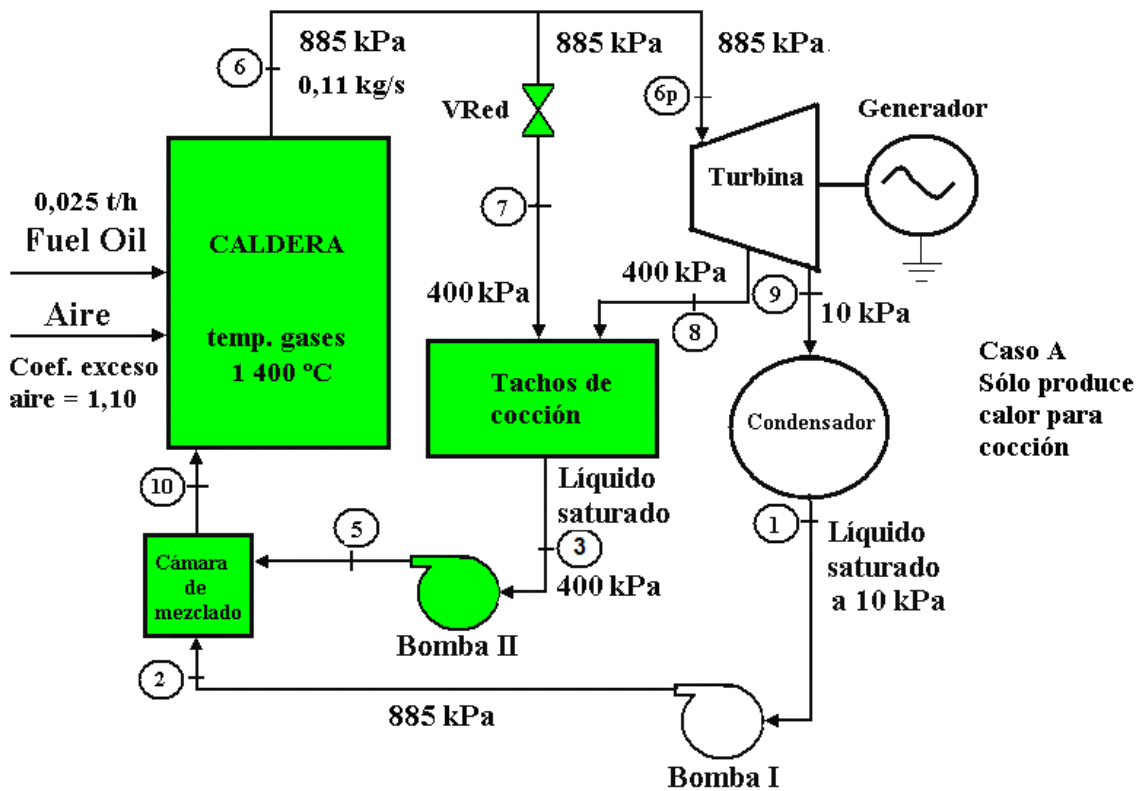


Figura 3.8: Esquema propuesto para el primer caso de operación (sólo cocción).

Fuente: Confección propia.

La tasa máxima de calor de proceso se alcanza cuando todo el vapor que sale de la caldera se estrangula mediante la válvula reductora y se envía al proceso mientras que a la turbina no se envía nada, es decir:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_7 = \dot{m}_6 = 0,11\text{kg} / \text{s}$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_8 = \dot{m}_{6p} = 0$$

**Calor entregado a la cocción**

$$\dot{Q}_{entregado, cocción} = 180 kW$$

En este caso, el factor de utilización ( $\epsilon_u$ ) es 100 por ciento porque ningún calor se rechaza desde el condensador y las pérdidas de calor de la tubería y los demás componentes se consideran despreciables, tampoco se consideran las pérdidas por combustión.

B) Segundo caso, cuando todo el vapor pasa a través de la turbina:

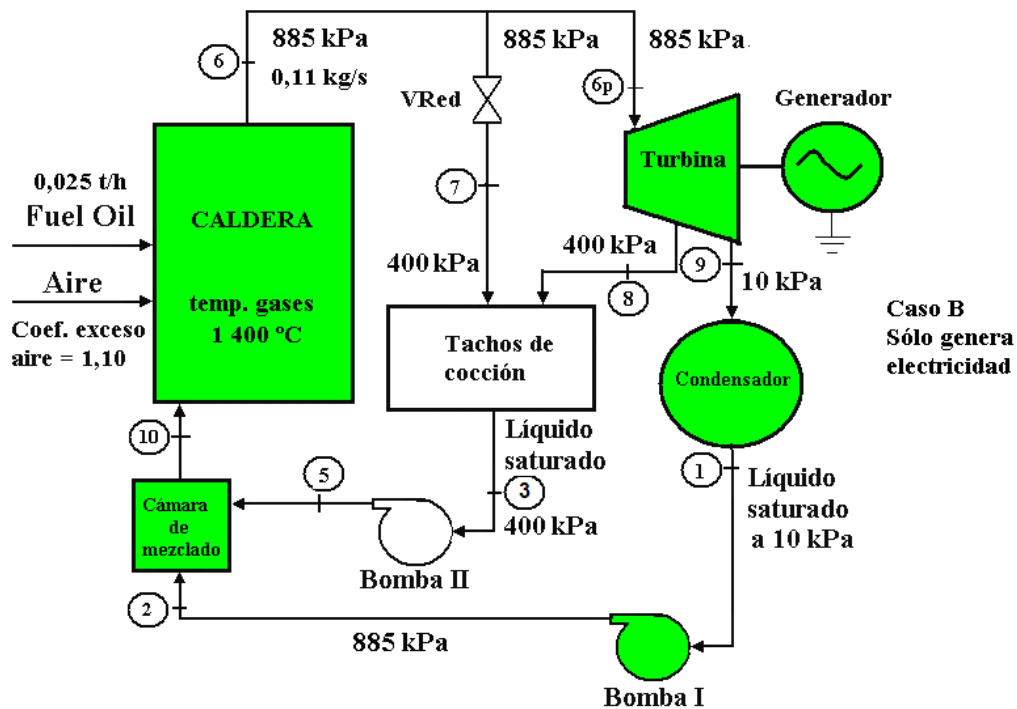


Figura 3.9: Esquema propuesto para el segundo caso de operación (sólo electricidad).

Fuente: Confección propia.

En el caso adverso, cuando no se suministra calor de proceso, todo el vapor que sale de la caldera pasará a través de la turbina y se expandirá hasta la presión del condensador de 10 kPa, lo cual llevaría a considerar que:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_{6p} = \dot{m}_9 = 0,11 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_7 = 0$$

$$h_{6p} = 2773,21 \text{ kJ/kg}$$

La potencia máxima se determina como:

***Trabajo de la turbina a la salida del condensador***

$$W_{\text{turbina, salida}} = \dot{m}_{6p} (h_{6p} - h_9)$$

*Entrando con  $p = 10 \text{ kPa abs.}$ , y calidad del vapor saturado  $x = 1$*

$$S_{g9} = 8,1502 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$h_{g9} = 2584,70 \text{ kJ/kg}$$

*Entrando con  $p = 10 \text{ kPa abs.}$ , y calidad del vapor saturado  $x = 0$*

$$S_{f9} = 0,6493 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$h_{f9} = 191,83 \text{ kJ/kg}$$

*Entrando con  $p = 885 \text{ kPa abs.}$  Y calidad del vapor saturado  $x = 1$*

$$S_9 = 6,6284$$

Por consiguiente:

$$S_9 = S_{f9} + X_9 (S_{g9} - S_{f9})$$

$$6,6284kJ/(kg \cdot K) = 0,6493kJ/(kg \cdot K) + X_9(8,1502 - 0,6493)kJ/(kg \cdot K)$$

$$X_9 = 0,797$$

$$h_9 = h_{f9} + X_9(h_{g9} - h_{f9})$$

$$h_9 = 191,83kJ/kg + 0,797(2584,70 - 191,83)kJ/kg$$

$$h_9 = 2098,95kJ/kg$$

Alcanzando el valor:

$$W_{turbina,salida} = 0,11kg/s(2773,21 - 2098,95)kJ/kg$$

$$W_{turbina,salida} = 74,17kJ/s \approx 74kJ/s = 74kW$$

Con este valor, pasamos a calcular el **Trabajo neto de la turbina:**

$$W_{neto,turbina} = W_{turbina,salida} - W_{bomba1,entrada}$$

$$W_{bomba1,entrada} = 0,11kg/s(0,873kJ/kg)$$

$$W_{bomba1,entrada} = 0,096kJ/s = 0,096kW$$

$$W_{neto,turbina} = 74kW - 0,096kW$$

$$W_{neto,turbina} = 73,90kW$$

Posteriormente se calcula lo siguiente:

**El calor de entrada a la caldera**

$$\dot{Q}_{\text{entrada,caldera}} = \dot{m}_6 (h_6 - h_{10})$$

Entrando con  $p = 10 \text{ kPa abs.}$ , y calidad del vapor saturado  $x = 0$

$$h_1 = 191,83 \text{ kJ / kg}$$

$$h_2 = h_1 + W_{\text{bomba1,entrada}} = 191,83 + 0,873 = 192,7 \text{ kJ / kg}$$

Prácticamente,  $h_{10} \approx h_2 = 192,7 \text{ kJ / kg}$

Entonces sería:

$$\dot{Q}_{\text{entrada,caldera}} = 0,11 \text{ kg / s} (2773,21 - 192,7) \text{ kJ / kg}$$

$$\dot{Q}_{\text{entrada,caldera}} = 283,86 \text{ kJ / s} \approx 284 \text{ kJ / s} = 284 \text{ kW}$$

Por lo tanto, el **factor de utilización** sería:

$$\varepsilon_u = \frac{\dot{W}_{\text{neto,turbina}} + \dot{Q}_{\text{entregado,cocción}}}{\dot{Q}_{\text{entrada,caldera}}} = \frac{73,90 + 0}{284} = 0,26 = 26 \%$$

En otras palabras, 26 por ciento de la energía se utiliza con un propósito útil. Se aprecia, además que en este caso, el factor de utilización es equivalente a la eficiencia térmica, y se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Eficiencia} = e = \frac{\text{producción}}{\text{consumo}} = \frac{\dot{W}_{\text{neto,turbina}}}{\dot{Q}_{\text{entrada,caldera}}} = \frac{73,90}{284} = 0,26 = 26 \%$$

C) En un tercer caso tenemos un balance de energía.

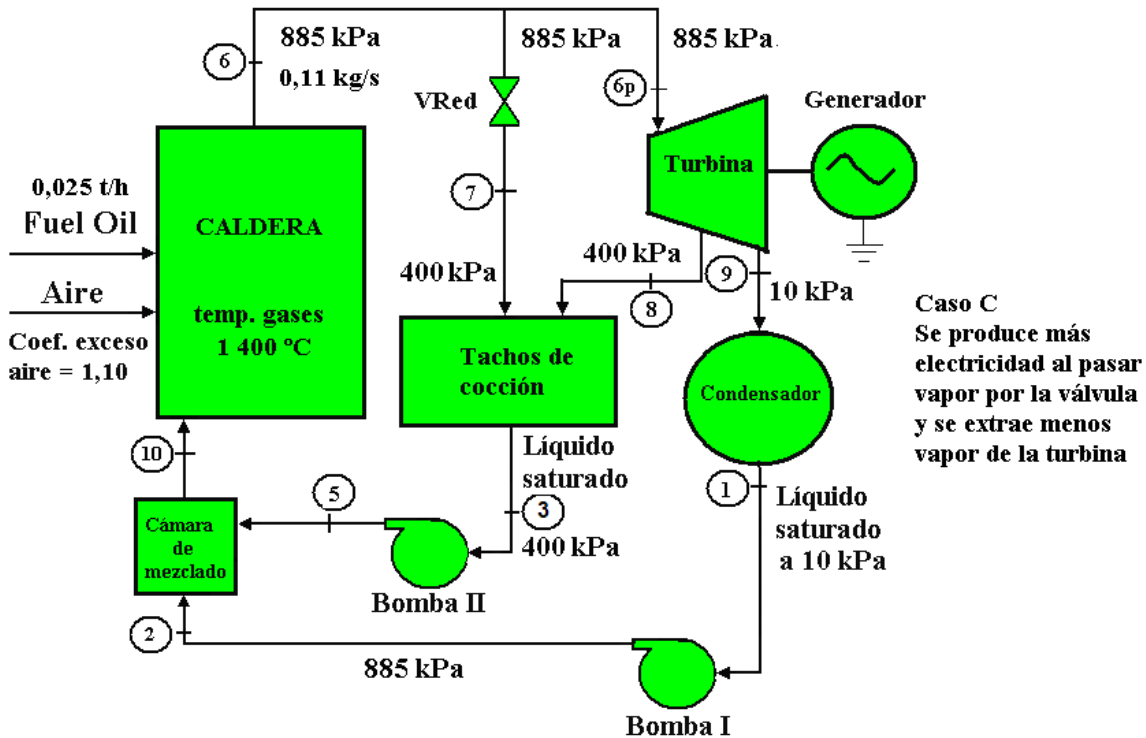


Figura 3.10: Esquema propuesto para el tercer caso de operación (balance de energía).

Fuente: Confección propia.

$$\dot{Q}_{entregado, cocción} = 180 \text{ kW}$$

Cálculo de la potencia que se produciría en este caso:

**Trabajo de la turbina a la salida**

$$W_{turbina, salida} = \dot{m}_{6p} (h_{6p} - h_8) + \dot{m}_8 (h_8 - h_9)$$

$$\dot{m}_{6p} = \dot{m}_6 - \dot{m}_7$$

$$\dot{m}_{6p} = (0,11 - 0,011) \text{ kg/s} = 0,099 \text{ kg/s}$$

$$W_{\text{turbina,salida}} = (0,099)(2\,773,21 - 2\,627,73) + (0,077)(2\,627,73 - 2\,098,95)$$

$$W_{\text{turbina,salida}} = (14,40 + 40,72) \text{kJ/s} = 55,12 \text{kJ/s} \approx 55 \text{kJ/s} = 55 \text{kW}$$

Por lo tanto, el nuevo **factor de utilización** sería:

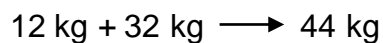
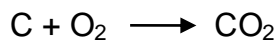
$$\varepsilon_u = \frac{\dot{W}_{\text{neto,turbina}} + \dot{Q}_{\text{entregado,cocción}}}{\dot{Q}_{\text{entrada,caldera}}} = \frac{55 + 180}{284} = 0,83 = 83 \%$$

*Comentario:*

Observe que 180 kW del calor transferido se utilizará en los tachos de cocción. Asimismo, es posible demostrar que en este caso se producen 55 kW de potencia, y la tasa de entrada de calor a la caldera es de 284 kW. Por consiguiente el factor de utilización es 83 %.

### 3.5 – Estudio de caso del impacto medio – ambiental.

Considerando la formación de dióxido de carbono a partir de la combustión del carbono presente en el combustible que se quema en la caldera:



Dividido entre 12:



Es decir, se emiten aproximadamente unas cuatro toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de carbono correspondiente al combustible que se quema en la caldera.

El generador de vapor trabaja 2 000 horas al año, multiplicándolo por los 55 kW de la turbina, se producirían 110 MWh al año, que dividido entre 600 MWh que consumió la empresa en el año 2010 (ver anexo A2), se estaría evitando arrojar al medio ambiente un 18 % de CO<sub>2</sub> y esto satisface un poco la generación eléctrica de la empresa, y por consiguiente la disminución de la contaminación ambiental; además, siguiendo el ejemplo de Morris Rosen [32]:

$$890 \text{ gCO}_2 / \text{kWh} (110\,000 \text{ kWh}) = 98 \text{ tCO}_2$$

La termoeléctrica deja de emitir 98 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, por el contrario, para la empresa, existe un pequeño aumento del consumo de combustible, lo que provoca un incremento de la contaminación ambiental, pero esto no es comparado con el impacto medio-ambiental que produce la termoeléctrica a nivel global.

### 3.6 – Costos de la cogeneración.

Para la EMI, los costos de anualización, estarían dados por:

$$CA = C \cdot i + O + C \left[ \frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \left( \frac{\$}{\text{año}} \right)$$

*CA* Costo de anualización

*C* Costo de la instalación

*i* Tasa de interés

*O* Costos de operación más mantenimiento

$$C = \frac{\$1000}{\text{kW}} \cdot 55 \text{ kW} = \$55\,000$$

$$i = 10 \%$$

$$O = B_C' + S_O + M$$

$B_C'$  Consumo de combustible con la cogeneración.

$S_O$  Salario del operador

$M$  Mantenimiento

$$B_C' = 0,025 \frac{t}{h} \cdot 1000 \frac{\$}{t} = 25 \frac{\$}{año} \cdot 2\,000 \frac{h}{año} = 50\,000 \$/año$$

$$S_O = 500 \frac{\$}{mes} \cdot 12 \frac{meses}{año} = 6\,000 \$/año$$

$$O = 50\,000 + 6\,000 + 6\,000 = 62\,000 \$/año$$

Entonces, es costo de anualización será:

$$CA = 55\,000 \cdot 0,10 + 62\,000 + 60\,000 \left[ \frac{0,10}{(1 + 0,10)^{10} - 1} \right] \left( \frac{\$}{año} \right)$$

$$CA = 71\,265 \$/año$$

El costo de la turbina es aproximadamente de \$ 1 000 por cada kW (MINBAS, 2011), entonces, si se producen 55 kW de potencia:

$$110\,000 \frac{kWh}{año} \cdot 0,055 \frac{\$}{kWh} = 6\,050 \$/año$$

Se ahorran 6 050 \$/año de electricidad que no tienen que comprar a la termoeléctrica.

### **3.7 – Conclusiones parciales.**

1. Se concluye que la estrategia de operación obtuvo resultados satisfactorios, se pudo alcanzar un factor de utilización de un 26 a un 83 %, y eso muestra el alto rango de diferencia, por tanto haciendo un balance adecuado de la energía se puede alcanzar un alto potencial de cogeneración con vistas a mejorar la eficiencia energética de la EMI.
2. La pICog propuesta evita tener que comprarle a la termoeléctrica 110 MWh de energía eléctrica, que representa un 18 % de contaminación menos que se emite al medio ambiente.
3. Los costos anualizados arrojaron que por cada año es costo es de \$ 71 265, y un ahorro de 6 050 \$/año.

## CONCLUSIONES

5. Se concluye que se realizó un análisis en las calderas de la Empresa Militar Industrial “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus, destacando que actualmente, el calor sólo se suministra a los tachos de cocción, y dando como resultado un coeficiente de utilización de la energía aportada del combustible de un 26 %.
6. Se realizó un estudio de la cogeneración para la Empresa Militar Industrial “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus, partiendo de un análisis termodinámico y de un análisis medio-ambiental, con el objetivo de que esta tecnología pueda contribuir al mejoramiento de la eficiencia energética.
7. Se presentó un estudio de caso de tres modos de operación distintos para la planta de cogeneración propuesta, y los resultados demostraron que 180 kW del calor transferido se utiliza en los tachos de cocción; asimismo, es posible demostrar que con un balance de energía la pICog, utiliza calor para la cocción y generara 55 kW de potencia, y que la tasa de calor de entrada a la caldera es de 284 kW; por consiguiente, el factor de utilización mejora de un 26 a un 83 %.
8. Con el generador de vapor, trabajando aproximadamente 2 000 horas, se producen 110 MWh de potencia al año, cuya potencia se deja de comprar a la termoeléctrica, evitando tener que arrojar al medio ambiente 98 toneladas de CO<sub>2</sub>.
9. Con la cogeneración los costos anualizados ascenderían a 71 000 dólares al año, al mismo tiempo propiciaría un ahorro de unos 6 000 dólares de electricidad que no se compra al SEN, además, de el costo evitado en una termoeléctrica por las emisiones de GEI, ascenderían a unos 1 000 dólares al año.

## **RECOMENDACIONES**

1. Implementar el sistema de cogeneración propuesto para la EMI “Cor. Francisco Aguiar Rodríguez” de Sancti Spíritus, teniendo en cuenta sus costos de producción e impactos ambientales.
2. Realizar un estudio posterior de un modo de operación en que todo el vapor pase a través de la turbina y nada se estrangule por la válvula reductora, además, de un estudio medio ambiental con otros tipos de contaminantes dañinos y nocivos para el organismo humano.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Amow, G., A Survey of Small-Scale Cogeneration Technologies for Military Applications: Technical memorandum, Defense R&D Canada - Atlantic, Dartmouth NS (CAN), 01-Jul (2009).
2. Borroto Bermúdez Aníbal J., Borroto Nordelo A., Evaluación Económica de Proyectos de Ahorro de Energía, Universidad de Cienfuegos, Cuba, (1998).
3. Borroto Nordelo, A., Administración de Energía: Auditorías Energéticas y Cogeneración, Especialización en Ciencias Térmicas, Universidad de Valle, Cali, Colombia, (1997).
4. Borroto Nordelo, A., Borroto Bermúdez A., El Verdadero Costo de la Energía, Revista Mundo Eléctrico Colombiano. (1999).
5. Campos Avella, Juan C., Herramientas para Establecer un Sistema de Gestión Total Eficiente de la Energía, Diplomado en Gestión Energética, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia, (2000).
6. Campos Avella, Juan C., Borroto Nordelo, A., Armas Teyra M., Gestión Energética en la Agroindustria de la Caña de Azúcar, Seminario Internacional sobre Energía en la Agroindustria Azucarera. La Habana, (2000).
7. Campos, J. Carlos, La Eficiencia Energética en la Gestión Empresarial, et.al., Editorial Universidad de Cienfuegos, Cuba, ISBN 959 – 257 – 018 – 3, (1997).
8. Cardona, E. y A. Piacentino; A methodology for sizing a trigeneration plant in Mediterranean areas, Applied Thermal Engineering, 23, 1665-1680 (2003).
9. Cardona, E. y A. Piacentino; Cogeneration: a regulatory framework toward growth, Energy Policy, 33, 2100-2111 (2005).
10. Cengel, Y., Boles, M., Termodinámica, 6ta Edición (en español), Mc Graw-Hill, ISBN 978-970-10-7286-8, México, D.F., (2009).
11. Cengel, Y., and Boles, M., Software STEAM.exe, Thermodynamics – An Engineering Approach, 2d ed., McGraw- Hill, Inc., New York, (1994).
12. Colectivo de autores, Gestión Energética Empresarial, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cuba, (2002).
13. Copado, A, Gutiérrez, F.J., *Líneas de mejora en plantas de cogeneración*, Grupo de Ingeniería de Procesos, INERCO, (1997).

14. Diario Oficial de la Unión Europea, anexo III, (2004).
15. Fernández M., Manuel F., Huarte P., L., y Romo M., Cesar A., Sistemas de Cogeneración, México, (2005).
16. Gamma ingenieros S.A, Comisión Nacional de Energía, Evaluación del desempeño operacional y comercial de centrales de cogeneración y estudios del potencial de cogeneración en Chile, Comisión nacional de energía, (2004).
17. Guevara Calviño, Y., Propuesta de un sistema de gestión ambiental para la Empresa Militar Industrial (EMI) "Cor. Francisco Aguiar Rodríguez", Sancti Spiritus, Trabajo de Diploma, Facultad de Química y Farmacia, UCLV, Santa Clara, (2010).
18. IEA; Energy Technology Perspectives - Scenarios & Strategies to 2050, IEA (2006).
19. Li, H. y otros tres autores; Energy utilization evaluation of CCHP systems, Energy and Buildings, 38, 253-257 (2006).
20. Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y La Revolución, aprobado el (18 de abril de 2011).
21. Lozano, Miguel A., Análisis Energético y Económico de Sistemas Simples de Cogeneración, Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Mecánica, GITSE-13A, C/ Maria de Luna s/n, 50018 Zaragoza-España, Vol. 18 Nº 5 – (2007).
22. Lozano, Miguel A.; Diseño óptimo de sistemas simples de cogeneración, Información Tecnológica, 12(4), 3-58 (2001).
23. Lozano, M.A.; J. Ramos y R. Monzón, Análisis termoeconómico de sistemas de trigeneración, Anales de Ingeniería Mecánica, 15(2), 1341-1349 (2004).
24. Lozano, M.A., J. Ramos y R. Monzón; Optimización de sistemas de cogeneración para calefacción y refrigeración de distrito, Anales de Ingeniería Mecánica, 15(2), 1385-1393 (2004).
25. Lucas, K.; On the thermodynamics of cogeneration, Int. J. Therm. Sci., 39, 1039-1046 (2000).

26. Martens, A.; The energetic feasibility of CHP compared to the separate production of heat and power, *Applied Thermal Engineering*, 18, 935-946 (1998).
27. Pérez Pérez, S., Estudio de la eficiencia energética de la Empresa Militar industrial (EMI) "Cor. Francisco Aguiar Rodríguez" Sancti Spíritus, Proyecto de Ingeniería Mecánica (PIM III), UCLV, (2010).
28. Petchers, N., Combined heating, cooling and power handbook: technologies and applications, The Fairmont Press (2003).
29. ¿Qué es la Cogeneración?, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía CONAE.(2004)
30. Ramos, J.; Integración térmica de plantas de cogeneración y trigeneración, III Jornadas de Ingeniería Termodinámica, 653-651, Valencia-España (2003).
31. Roqueta, J.Mª., y Márquez, M., Quién es quién en la cogeneración en España Directorio de asociados de Cogen España 2003, AESA España, (2003).
32. Rosen M., Energy Outlook and Role for Nuclear Energy, *Nucleus*, No. 25, ISSN 0864-084X, (1998).
33. Sala Lizárraga, J. Ma., Cogeneración, Aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos, (Segunda Edición), Servicio Especial. Universidad del País Vasco, ISBN: 84-7585-571-7, Bilbao, (1994).
34. Tchouate, P.M y L. Bolle; Economie d'énergie en trigénération, *International Journal of Thermal Sciences*, 41, 1151-1159 (2002).
35. Torres, J., Energía y tú, Biomasa cañera, energía y medio ambiente, Revista científico-popular trimestral de CUBASOLAR No. 29, ISSN 1028-9925, Cuba, (enero-marzo, 2005).
36. TriGeMed; Survey Report: Promotion of tri-generation technologies in the tertiary sector in Mediterranean countries, [www.trigemed.com](http://www.trigemed.com) (2003).
37. V. Ojotin, Fundamentos de Termotecnia, Editorial MIR, Moscú, (1988).
38. Yokohama, R. y otros 3 autores; Development of a General-Purpose Optimal Planning System for Energy Supply Plants, *ASME Journal of Energy Resources Technology*, 116, 290-296 (1994).

## **ANEXOS**

Anexo 1: Conclusiones y medidas para el generador de vapor.

### Conclusiones

1. La caldera está trabajando a un 80 % de eficiencia.
2. La temperatura de los gases de salida de la chimenea está elevada si se considera que para este tipo de generadores este parámetro debe de estar sobre los 200 °C.
3. El elevado valor de la temperatura de los gases de salida nos da una medida de que la combustión es incompleta, por lo que no se aprovechan completamente los gases y por ende hay mayor emisión de gases contaminantes a la atmósfera.
4. Dado los años de explotación que posee la misma y teniendo en cuenta que no se le practica un mantenimiento frecuentemente se puede decir que presenta incrustaciones y que en su interior hay presencia de hollín.
5. El sistema de caldera trabaja ineficientemente debido a la cantidad de incrustaciones provocadas por el mal trabajo que sobre ella se realiza, la falta de mantenimiento periódico, la falta de tratamiento al agua que se utiliza en este proceso, así como el incorrecto ajuste de la combustión.

### Medidas

1. Realizar análisis de los gases de salida (análisis de combustión) para determinar la composición química que presentan los mismos, ya que durante este estudio no fue posible realizarlo por carecer del equipo necesario para tales fines. Solo luego de practicado este análisis, se podrá definir el paso a seguir, que puede ser sustitución del quemador.
2. Analizar el estado térmico del equipo para determinar como está siendo la transferencia en su interior o lo que es lo mismo verificar como se comporta la eficiencia térmica. Si esta última es baja el tiempo de trabajo del generador se alargará para lograr la producción de vapor necesaria, por lo que el consumo de combustible aumentará y por tanto habrá una mayor carga contaminante al medio

ambiente. Entonces se procederá a practicarle un buen mantenimiento. En el caso que no resista este, habría que proseguir a una sustitución de la misma.

3. Realizar un contrato de mantenimiento con una entidad especializada para el sistema de tratamiento de agua y de la explotación del equipo.

4. Ajustar parámetros de combustión para disminuir la cantidad de emisiones al medio ambiente.

5. Realizar la desincrustación de las paredes de la caldera.

6. Acometer un proyecto de remodelación del suavizador para disminuir su tamaño de acuerdo a las necesidades de la única caldera que funciona.

7. Ponerle el reboso del tanque de agua más grande para evitar los encharcamientos en los alrededores de la caldera.

8. Desmontar los dos generadores de vapor que están inutilizados, dejando las piezas que se encuentran en buen estado para repuesto y lo demás venderlo a materia prima como chatarra.

Anexo 2: Consumo de energía eléctrica del 2006-2010.

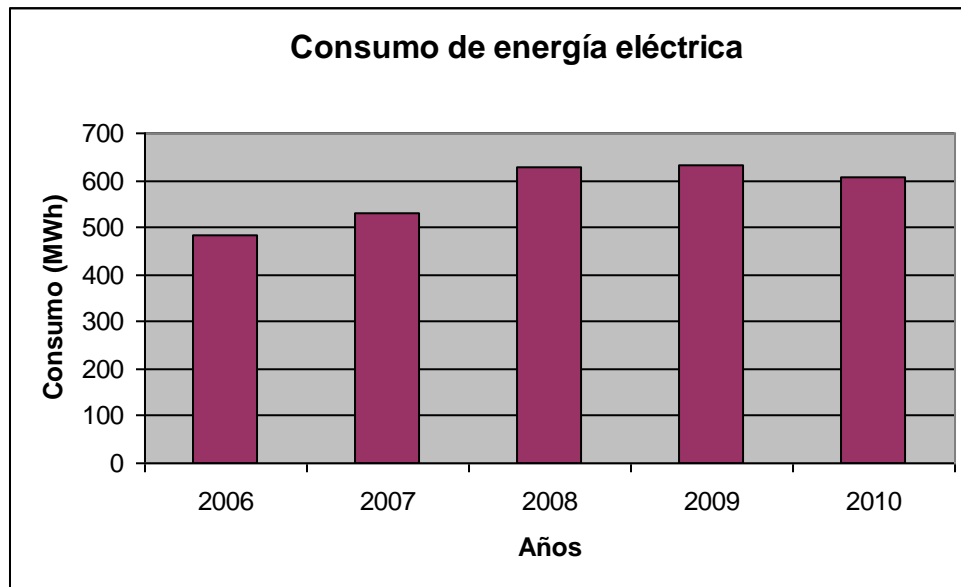


Figura 1.2: Consumo de energía eléctrica del 2006 – 2010.

*Fuente: Pérez Pérez, S., Estudio de la eficiencia energética de la Empresa Militar industrial (EMI) "Cor. Francisco Aguiar Rodríguez" Sancti Spiritus, Proyecto de Ingeniería Mecánica (PIM III), UCLV, (2010) [27].*

