



Ingeniería Mecánica

Facultad: Metalurgia Electromecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICA

**Título: Evaluación de la eficiencia térmica del ciclo
tecnológico de la Central Termoeléctrica
“Lidio Ramón Pérez”**

Autor: Ernesto Díaz Espinosa

Tutor: Dr. C. Ever Góngora Leyva

Moa-2017





DECLARACIÓN DEL AUTOR

Yo, Ernesto Díaz Espinosa:

Autor de este trabajo de diploma y el tutor Dr. C. Ever Góngora Leyva, declaramos la propiedad intelectual al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Diplomante: Ernesto Díaz Espinosa

Dr. C. Ever Góngora Leyva



AGRADECIMIENTOS

- ❖ En primer lugar agradecer a mi familia que me orientó y me apoyó en todo el transcurso de la carrera de ingeniería, especialmente a mis padres quienes me ayudaron y estuvieron conmigo en todo momento.
- ❖ A mi tutor Ever Góngora Leyva por haber confiado incondicionalmente en mí y prestarme la ayuda necesaria para la realización de trabajo de diploma.
- ❖ A todos a mis amigos que estuvieron presentes desde el inicio de la carrera de ingeniería mecánica, que me apoyaron, me alentaron y me dieron fuerzas para salir hacia delante en los momentos más difíciles.
- ❖ A mis vecinos que también se preocuparon y confiaron en mí en todo el intervalo del tiempo en que estuve desarrollando esta ingeniería.
- ❖ Finalmente aquellas personas que me aman, me quieren y de una forma u otra aportaron para realizar realidad mi sueño de ser ingeniero mecánico como mi padre.

A todos muchas gracias

El autor



PENSAMIENTO

(...) lo que ha creado la inteligencia del hombre debe ser patrimonio de toda la humanidad.

Fidel Castro Ruz

Es justamente la posibilidad de realizar un sueño lo que hace que la vida sea interesante.

Paulo Coelho



RESUMEN

En el presente trabajo de diploma se realizó la evaluación del ciclo tecnológico de potencia con vapor de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”. Se establecieron los procedimientos por los cuales se determinó el consumo de combustible y la eficiencia del generador de vapor. A través del balance de masa y energía y las ecuaciones de rendimiento, se caracterizó el ciclo térmico, para variaciones de la potencia en la turbina de 125 a 240 MW, se determinaron además: el trabajo real de la turbina; el rendimiento térmico del ciclo térmico real e ideal; el rendimiento de la instalación; el consumo específico de vapor y el consumo específico de calor, demostrando que existen reservas para el ahorro de energía. Se realizó la valoración económica y ambiental sobre la propuesta analizada.



ABSTRACT

Presently work was carried out the evaluation of the technological cycle of power with steam of the Thermoelectric Power Plant "Lidio Ramón Pérez". the procedures settled down for which it was determined the consumption of fuel and the efficiency of the steam generator. Through the balance of mass and energy and the efficiency equations, the thermic cycle was characterized, for variations of the power in the turbine of 125 to 240 MW, they were also determined: the real work of the turbine; the thermal efficiency of the real thermal cycle and ideal; the efficiency of the installation; the specific consumption of steam and the specific consumption of heat, demonstrating that reservations exist for the energy saving. It was carried out the economic and environmental valuation on the analyzed proposal.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Estado del arte sobre el tema.....	4
1.2.1. Antecedentes generales.....	4
1.3. Funcionamiento de una central térmica.....	6
1.4. Descripción del flujo tecnológico de la instalación.....	7
1.4.1. Ciclo de agua en la generación de vapor.....	7
1.4.2. El combustible en la generación de vapor.....	9
1.4.3. La generación eléctrica.....	11
1.5. Ventajas y desventajas de las centrales térmicas.....	11
1.5.1. Ventajas.....	11
1.5.2. Desventajas.....	12
1.6. Trabajos precedentes.....	13
1.7. Conclusiones.....	17
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
2.1. Introducción.....	18
2.2. Consideraciones para realizar el balance de masa y energía.....	18
2.3. Balance de masa y energía para un volumen de control.....	20
2.3.1. Conservación de la masa para un volumen de control.....	21
2.3.2. Conservación de la energía para un volumen de control.....	21
2.4. Componentes de los sistemas para el balance de energía.....	24
2.5. Balance de energía.....	24
2.6. Método de cálculo para evaluar energéticamente a las calderas.....	25
2.6.1. Poder calórico inferior del combustible.....	25



2.6.2.	Cálculo de los volúmenes de la combustión	26
2.6.3.	Cálculo del coeficiente de exceso de aire para combustión incompleta.....	27
2.6.4.	Cálculo de las entalpías de los gases de la combustión y el aire	28
2.7.	Balance térmico por el método directo.....	29
2.8.	Cálculo de los flujos de aire y gases producto de la combustión.....	31
2.9.	Balance térmico por método indirecto.....	31
2.10.	Determinación de las pérdidas.....	32
2.10.1.	Pérdida a través de los gases de escape	32
2.10.2.	Pérdida de calor por incombustión química	32
2.10.3.	Pérdida de calor por incombustión mecánica.....	33
2.10.4.	Pérdida por transferencia de calor al medio ambiente	33
2.10.5.	Pérdida de calor con los residuos extraídos del horno.....	33
	Conclusiones del capítulo II	34
	CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	35
3.1.	Determinación de las pérdidas.....	35
3.2.	Análisis de los resultados de la investigación	35
3.3.	Evaluación del Generador de Vapor	37
3.4.	Evaluación del ciclo térmico de potencia con vapor	39
3.5.	Valoración económica asociada al rendimiento del ciclo tecnológico.....	44
3.6.	Impacto ambiental de la investigación	44
	Conclusiones del capítulo	45
	CONCLUSIONES GENERALES	46
	RECOMENDACIONES.....	47
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
	ANEXOS.....	51



INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la electricidad ha sido estudiado desde la antigüedad, pero su estudio científico sistemático comenzó en los siglos XVII y XVIII. A finales del siglo XIX los ingenieros lograron aprovecharla para uso doméstico e industrial. La rápida expansión de la tecnología eléctrica la convirtió en la columna vertebral de la sociedad industrial moderna. La generación de electricidad industrialmente comenzó cuando, a fines del siglo XIX, se extendió la iluminación eléctrica de las calles y los hogares. La creciente sucesión de aplicaciones que esta forma de la energía produjo hizo de la electricidad una de las principales fuerzas motrices de la Segunda Revolución Industrial.

Por lo general, la energía eléctrica se genera mediante generadores electromecánicos movidos por el vapor producido por distintas fuentes de energía primarias, o por el calor generado por reacciones nucleares, o de otras fuentes como la energía cinética extraída del viento o el agua. La moderna turbina de vapor inventada por Charles Algernon Parsons en 1884 genera cerca del 80 % de la energía eléctrica en el mundo usando una gran variedad de fuentes de energía. Este generador no tiene ningún parecido al generador de disco homopolar de Faraday, aunque ambos funcionan bajo el mismo principio electromagnético, que dice que al cambiar el campo magnético a un conductor produce una diferencia de potencial en sus terminales. La invención a finales del siglo XIX del transformador implicó transmitir la energía eléctrica de una forma más eficiente. La transmisión eléctrica eficiente hizo posible generar electricidad en plantas generadoras, para después trasportarla a largas distancias, donde fuera necesaria.

Con el descubrimiento, desarrollo de la electricidad y el paso del tiempo se incrementaron las demandas de energía eléctrica, por lo que fue necesario crear centrales termoeléctricas que satisficieran la demanda de esta energía.

Situación problemática

La Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” desempeña un papel importante dentro de la economía nacional es por ello que la eficiencia de cada uno de los procesos que ocurre dentro de las diferentes plantas e instalaciones que la compone incide considerablemente en la reducción del consumo energético. Es imprescindible para Cuba el desarrollo de una tecnología que permita el ahorro de recurso, la disminución de gasto de energía, y contaminación atmosférica. Además que se logre el incremento de la eficiencia y el uso racional de los recursos evitando la importación de productos altamente costoso. Por lo que es de vital importancia el análisis del comportamiento termoenergético de la central termoeléctrica para poder garantizar y verificar su rendimiento.

El desconocimiento de la evaluación de la eficiencia en el bloque de generación # 2 de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” para las condiciones de operación en los meses de enero a abril del 2017, impiden la toma de decisiones a fin de garantizar un menor gasto de combustible, con la respectiva disminución del impacto al medio ambiente.

A partir de la problemática plantea se declara como **problema** a resolver:

El desconocimiento de la incidencia de la variación de los parámetros que caracterizan el ciclo térmico (ciclo de potencia con vapor) con respecto a la potencia entregada por la turbina en los índices energéticos y en el rendimiento energético de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”.

Objeto de la investigación:

El ciclo térmico (ciclo de potencia con vapor) de la Central Termoeléctrica.

Hipótesis:

Si se efectúa el análisis el comportamiento del proceso de generación y consumo de vapor para la producción de energía de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” se podrá determinar el comportamiento del rendimiento térmico y los índices energéticos para diferentes condiciones de operación, garantizando un uso racional de los portadores energéticos y un menor impacto al medio ambiente.

Objetivo de la investigación:

Determinar la incidencia de la variación de los parámetros de operación y de la potencia entregada por la turbina en el rendimiento térmico y los índices energéticos que caracterizan el comportamiento termodinámico del ciclo de potencia de vapor de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”.

Campo de acción:

Los procesos de transferencia de calor y masa presente en los ciclos de potencia con vapor.

Objetivos Específicos:

1. Determinar el rendimiento y el consumo de combustible del generador de vapor del bloque número dos de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”
2. Verificar el rendimiento termo energético de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” mediante el implemento de una metodología de cálculo.

Tareas del trabajo:

1. Establecimiento de información y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el estado del arte.
2. Recopilación de datos de los parámetros de funcionamiento de los distintos elementos que inciden en el rendimiento energético de la empresa.
3. Establecimiento del procedimiento de cálculo para la evaluación del generador de vapor del bloque número dos del esquema térmico del ciclo de potencia con vapor de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”
4. Obtención de los resultados del impacto ambiental y del comportamiento inestable del factor económico en la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

En el desarrollo de este capítulo quedará establecido el estado del arte sobre el tema a tratar, donde se hará una búsqueda bibliográfica de los principales trabajos realizados sobre esta materia, además se hará una descripción del flujo tecnológico, necesario para la comprensión de dicho tema. En tal sentido **el objetivo** de este capítulo es plantear el marco teórico de la investigación para la contribución a la fundamentación y al desarrollo exitoso de la misma.

1.2. Estado del arte sobre el tema

1.2.1. Antecedentes generales

Las centrales termoeléctricas de carbón, geotérmicas, solares térmicas, de combustión de biomasa y de gas natural se conocen también como centrales térmicas, son instalaciones que funcionan según un ciclo termodinámico convencional para mover un generador y producir energía eléctrica, a partir de la energía liberada en forma de calor, o mediante la combustión de combustibles fósiles (petróleo, gas natural o carbón), liberando dióxido de carbono al medioambiente.

En las centrales termoeléctricas denominadas de ciclo combinado se usan los gases de la combustión del gas natural para accionar la turbina de gas. En la cámara de combustión se quema el gas natural y se le inyecta aire para acelerar la velocidad de los gases, que se introducen a la turbina de gas para su funcionamiento. Luego de realizar trabajo en la turbina, esos gases producto de la combustión se encuentran a alta temperatura (500 °C), se reutilizan para generar vapor de agua que realiza trabajo una turbina de vapor, cada una de estas turbinas tiene acoplado un generador de electricidad, el vapor luego es enfriado por medio de un caudal de agua abierto o torre de refrigeración como en una central térmica común. Además, se puede obtener cogeneración en este tipo de plantas, al alternar entre la generación por medio de gas natural o carbón.

Este tipo de plantas está en capacidad de producir energía más allá de la limitación de uno de los dos insumos y dan un paso a la utilización de fuentes de energía por insumos diferentes.

Las centrales térmicas que usan combustibles fósiles liberan a la atmósfera dióxido de carbono (CO²), considerado el principal gas responsable del calentamiento global. También, dependiendo del combustible utilizado, se emiten otros contaminantes como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas sólidas (polvo) y cantidades variables de residuos sólidos. Prácticamente todas las centrales eléctricas de carbón, nucleares, geotérmicas, de energía solar térmica o de combustión de biomasa, así como algunas centrales de gas natural son centrales termoeléctricas. Las centrales termoeléctricas no nucleares, particularmente las de combustibles fósiles se conocen también como centrales térmicas o centrales termoeléctricas convencionales (Góngora Leyva, 2014).

Se llaman centrales clásicas o de ciclo convencional a aquellas centrales térmicas que emplean la combustión del carbón, petróleo (aceite) o gas natural, para generar la energía eléctrica. Son consideradas las centrales más económicas y rentables, por lo que su utilización está muy extendida en el mundo económicamente avanzado y en el mundo en vías de desarrollo, a pesar de que estén siendo criticadas debido a su elevado impacto medioambiental.

En las centrales térmica de fuel-oíl, el combustible se calienta hasta que alcanza la fluidez óptima para ser inyectado en los quemadores, presentan como principal inconveniente las oscilaciones del precio del petróleo y derivados, y a menudo también se exigen tratamientos de desulfuración de los humos para evitar la contaminación y la lluvia ácida.

La primera central termoeléctrica fue construida por Sigmund Schuckert en la ciudad de Ettal en Baviera y entró en funcionamiento en 1878. Las primeras centrales comerciales fueron la *Central de Pearl Street* en Nueva York y la *Edison Electric Light Station*, en Londres, que entraron en funcionamiento en 1882. El desarrollo de la de vapor permitió construir centrales más eficientes por lo que en 1905 la turbina de vapor reemplazó a los motores de vapor de pistones en las grandes centrales eléctricas.

1.3. Funcionamiento de una central térmica

El esquema básico de funcionamiento de todas las centrales térmicas convencionales es prácticamente el mismo, independientemente de que utilicen carbón, fuel -oil o gas. La energía liberada por el combustible fósil se transforma en energía eléctrica. Las únicas diferencias sustanciales consisten en el distinto tratamiento previo del combustible antes de ser inyectado en la caldera y el diseño de los quemadores de la misma, que varía según el tipo de combustible empleado.

La Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” es clasificada como una central térmica de ciclo convencional ya que produce electricidad a partir de un combustible fósil (petróleo) mediante un ciclo termodinámico de agua – vapor (Figura 1.1). El término convencional sirve para diferenciarla de otras centrales térmicas, como las nucleares o las de ciclo combinado.

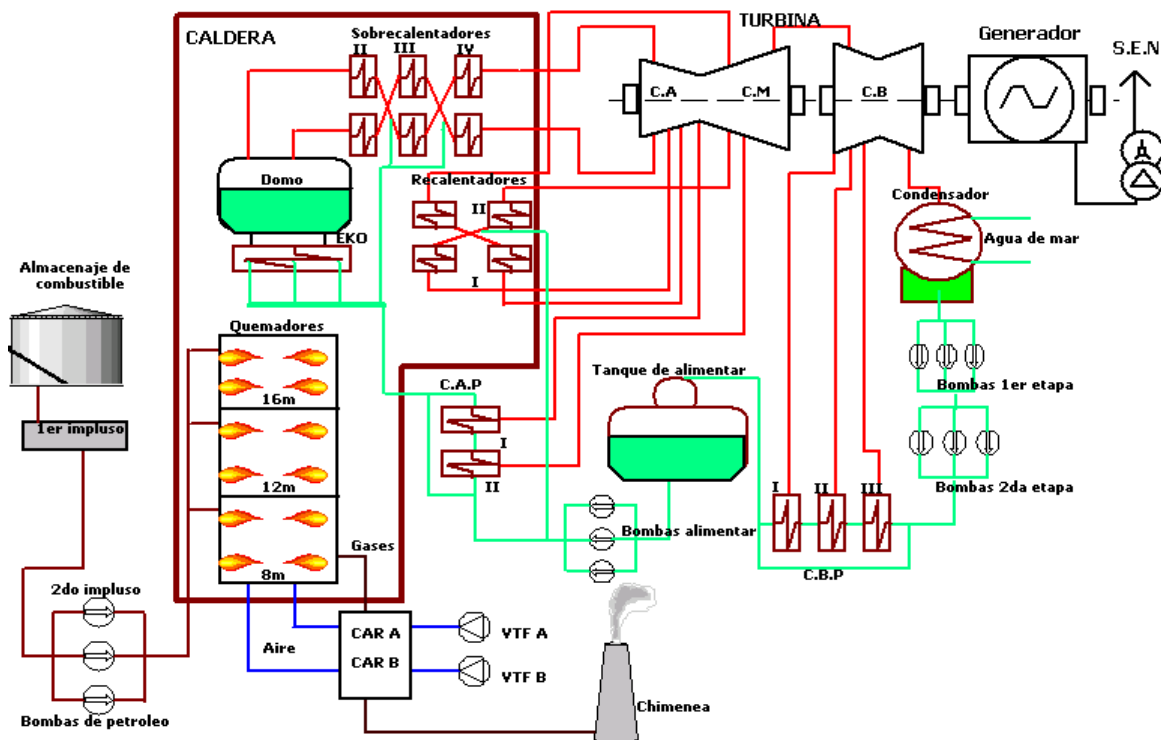


Figura 1.1. Esquema de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”.

1.4. Descripción del flujo tecnológico de la instalación

1.4.1. Ciclo de agua en la generación de vapor

El agua procedente de la Planta Tratamiento Químico de Agua es bombeada al pozo caliente del condensador, desde donde se succiona por las bomba de primera etapa del condensado, descargando en la succión de la bomba de segunda etapa del condensado y esta a la vez va a tres calentadores de baja presión cuya función es incrementar previamente la temperatura del agua, la fuente de alimentación de estos calentadores son extracciones de retornos provenientes de la turbina desde el cilindro de baja presión.

El agua luego de pasar previamente por el desareador alcanza temperaturas aproximadas a 150 °C y se almacena en el tanque de agua de alimentar, desde donde es succionada por las bombas de alimentación que descargan el agua a los calentadores de alta presión cuya fuente de energía proviene del retorno de vapor desde la turbina en varias etapas del cilindro de media presión y el cilindro de alta presión respectivamente. Estos calentadores llevan el agua desde 191 a 216 °C , cuya máxima temperatura alcanza valores de hasta 238 °C .

El agua pasa al economizador que se encuentra en la parte más baja de la caldera donde se incrementa la temperatura hasta 264 °C aproximadamente donde se dirige al domo.

El domo es el recipiente donde se acumula el agua y se produce el proceso de separación del agua y el vapor. El agua que sale del domo baja por la pared trasera de la caldera, llamada pared de agua, que está constituida por tubos alimentadores o de descenso que hacen fluir el agua hacia el resto de las paredes internas que son cinco, cuatro de estas paredes exteriores forman un cuadrado a toda la altura de la caldera y una pared interna que divide la caldera en dos cámaras a manera de tabique.

La caldera queda dividida en dos zonas, el horno que es donde se encuentran los quemadores y la cámara de eje convectivo o de segundo tiro donde ocurren otras series de transformaciones del agua y el vapor.

El agua mientras baja por dentro de la pared de agua absorbe calor y cuando termina su recorrido comienza el ascenso en forma de una mezcla agua vapor a través de tubo conectores que la llevan a la parte superior del domo donde el agua y el vapor son separados mediante separadores mecánicos de partículas.

Después el líquido baja a la parte inferior del domo y retorna al ciclo interno de agua y el vapor resultante sube y se incorpora al sobrecalentador uno que está formado por un cabezal superior en el techo de la caldera formado por una armazón de tubo que ramifican hacia abajo por dentro de esta cámara hasta un cabezal inferior de forma tal que se adquiere más calor en el trayecto obteniendo un mejor balance masa energía.

Estos haces de tubos que conforman a estos cabezales del sobre calentador uno son a su vez el soporte mecánico de otro sistema de tuberías calentadoras que coinciden con estos dentro de la cámara de eje convectivo. El vapor que se produce en el cabezal inferior pasa a un haz de tubo exteriores y retoma al sobrecalentador dos dentro de la cámara de eje convectivo, de este punto pasa al sobrecalentador tres que está en la parte superior de la caldera y de ahí baja al sobrecalentador cuatro, todos dentro de la cámara de eje convectivo, con el objetivo de aprovechar toda la energía disponible de los gases que salen del horno y gradualmente ganar en temperatura durante el recorrido.

Del sobre calentador cuatro el vapor sale aproximadamente a 525 °C y 13,2 MPa llegando a la turbina con unos 520 °C , por pequeñas pérdida de energía en el recorrido.

Cuando entra en la turbina comienza realizar trabajo o sea hace girar el rotor en el cilindro de alta presión y cuando termina de realizar trabajo el vapor retorna a la caldera directamente al recalentador uno donde eleva su temperatura a 490 °C , y luego asciende al recalentador dos que eleva su temperatura hasta 525 y 528 °C con el objetivo que sea devuelto a la turbina a 520 °C y comience a realizar trabajo en el cilindro de media presión que se encuentra acoplado y girando junto al cilindro de alta presión.

Luego de realizar trabajo en el cilindro de media presión el vapor pasa al cilindro de baja presión donde igualmente realiza un último trabajo de empuje en la turbina y al terminar es trasegado al condensador donde este se condensa y de conjunto con el agua que viene de la Planta de Tratamiento Químico de Agua se reincorporan al ciclo cerrado del proceso una vez más.

En el condensador para convertir el vapor de retorno en agua que llega del cilindro de baja presión de la turbina es necesario que utilice agua de mar proveniente del canal de entrada, para lo cual se utilizan bomba de circulación que hacen fluir el agua de mar que se encuentran a temperatura ambiente a través del condensador y este devuelve esta agua que adquiere elevadas temperaturas hacia un canal de salida que la reincorpora a otra parte de la bahía.

1.4.2. El combustible en la generación de vapor

Para lograr el incremento de temperatura necesaria para convertir el agua en vapor se utilizan fundamentalmente el combustible y una caldera con un horno de combustión a alta presión, para estos fines existen un grupo de instalaciones intermedia especiales que apoyan las diferentes etapas proceso.

El combustible llega a la central eléctrica a través de buques cisterna donde mediante un sistema de bombeo es transportado hacia una batería de tanques en tierra para su recepción y almacenamiento, los mismos tienen una capacidad de 15 000 m³ y poseen dispositivos interiores a manera de serpentines y otros exteriores llamados calentadores de boca para el calentamiento del mismo, labor que se realiza en ambos casos con vapor de agua. De ahí pasa a la casa de bomba de primer impulso y desde esta es bombeado con 65 °C hacia la casa de bomba de segundo impulso donde se le incrementa la temperatura entre los 132 y 140 °C para lograr una viscosidad adecuada a su entrada a los quemadores de la caldera.

A la vez ocurre otro proceso de apoyo a la combustión, donde el aire atmosférico succionado a través de los ventiladores de tiro forzado es introducido en los precalentadores de aire a vapor donde el aire eleva su temperatura desde 32 hasta 70 °C y se entrega en los calentadores de aire regenerativos, donde elevan la

temperatura del aire por encima de los 200 °C , para ser suministrado a la cámara de combustión en la caldera donde se mezcla con el combustible y así favorecer la reacción de oxidación que allí se produce.

Cada caldera consta de 12 quemadores tangenciales en tres niveles acotados en cuatro por nivel ubicados en las esquinas del horno, cada uno puede suministrar hasta 5 700 l/h , para la pulverización y quema final del combustible son auxiliado con vapor de agua a 1 MPa y 250 °C .

La combustión que se produce en la boquilla de los quemadores libera calor y gases que poseen altas presiones que se acumulan en la cámara principal llamada horno, el calor es transferido al agua que baja por las paredes de agua que rodean esta cámara y se comienza a producir el vapor.

En las zonas más cercana de las boquillas de los quemadores se produce gran cantidad de vapor, luz y una especie de torbellino de los gases inflamados de la combustión que se mueven dentro de la caldera en un movimiento de ascenso, fenómeno que se aprovecha para la irradiación a altas temperaturas a todas las paredes del horno y del aporte de gran parte de esta energía a la otra cámara de la caldera de segundo tiro.

El traslado de toda este flujo de gases cargado de energía se realiza a través de una apertura que se encuentra en la parte superior de la caldera, sobre la pared divisoria entre ambas cámaras, creando un acceso por donde pasan los gases para realizar otras funciones de calentamiento en las diferentes etapa del proceso de transformación del agua en vapor.

Los gases al pasar a la cámara de segundo tiro comienzan a descender por la misma y aportan calor al entramado de tubería que conforman varias de las etapas que se encuentran allí.

Al finalizar el proceso de transferencia de calor en esta cámara, los gases que aun poseen altas temperaturas unos 300 °C son aprovechables para otras funciones y entonces pasan a los calentadores de aire regenerativo. En estos dispositivos se

produce una transferencia de energía entre los gases de escape y el aire de entrada que se dirige a la zona de combustión en la caldera, para favorecer la combustión completa del combustible.

1.4.3. La generación eléctrica

Cuando el vapor generado adquiere las características de presión y temperatura necesarias para realizar trabajo este es entregado a los diferentes cilindros y etapas de la turbina donde mueve sus partes móviles. El rotor del generador eléctrico se encuentra acoplado directamente al eje de la turbina por lo que ambos giran a una velocidad de 3 600 r.p.m. Es un generador del tipo trifásico, con una potencia activa nominal de 250 MW/h y máxima de 275 MW/h , al girar el generador se produce en sus bornes de salida un flujo de energía eléctrica de 15,75 kV pasando a un banco de transformadores de salida que lo convierte a 220 kV y se conecta o sincroniza al sistema electro-energético nacional mediante el interruptor de salida.

1.5. Ventajas y desventajas de las centrales térmicas

1.5.1. Ventajas

- Son las más baratas de construir (teniendo en cuenta el precio por megavatio instalado), especialmente las de carbón, debido a la simplicidad (comparativamente hablando) de construcción y la energía generada de forma masiva.
- Las centrales de ciclo combinado de gas natural son mucho más baratas (alcanzan el 50 %) que una termoeléctrica convencional, aumentando la energía térmica generada (y por tanto, las ganancias) con la misma cantidad de combustible, y reduciendo las emisiones gases al medioambiente en un 20 % , quedando así en 0,35 kg de CO₂, por kW/h producido.
- La energía térmica se puede aprovechar en un motor térmico.
- Baja relación coste/potencia. Son el tipo de centrales más baratas, en el sentido de que por cada kW de potencia instalado, la inversión económica es inferior.

- Elevada potencia específica. Una sola central suele generar potencias del orden de 1 GW .
- Son muy flexibles. Esto quiere decir que se puede regular su potencia de una forma relativamente rápida para responder ante las variaciones en la demanda del consumo eléctrico.
- Puede funcionar de manera continua durante meses, siendo necesaria su parada únicamente para el mantenimiento periódico o ante averías puntuales.
- Es posible construir centrales térmicas también de pequeñas potencias (aunque cuanto más pequeña es la central, más elevada es la relación coste/potencia), existiendo pequeñas centrales que producen tan sólo 1MW que aprovechan restos agrícolas para producir electricidad suficiente como para abastecer a una población.

1.5.2. Desventajas

- El principal inconveniente de estas centrales es son muy susceptibles al precio de los combustibles. Los incrementos del precio del petróleo afectan directamente al precio de la electricidad.
- Relacionado con lo anterior, se destaca que los recursos necesarios para su funcionamiento (gas natural, petróleo, etc.) se encuentran principalmente en países políticamente inestables.
- El uso de combustibles calientes genera emisiones de gases de efecto invernadero y de lluvia ácida a la atmósfera, junto a partículas volantes que pueden contener metales pesados.
- Al ser los combustibles fósiles una fuente de energía finita, su uso está limitado a la duración de las reservas y/o su rentabilidad económica.
- Sus emisiones térmicas y de vapor pueden alterar el microclima local.
- Afectan negativamente a los ecosistemas fluviales debido a los vertidos de agua caliente en éstos.

- La obtención de energía térmica implica un impacto ambiental. La combustión libera CO₂ y otras emisiones contaminantes. y los riesgos de contaminación por accidentes en el uso de los materiales implicados, como los derrames de petróleo o de productos petroquímicos derivados.
- Las reservas de combustible son limitadas. Algunas fuentes indican que hay recursos de petróleo para 40 años (algo más para el gas), pero mucho antes de agotarse el precio se disparará todavía más.
- Emisiones de gases contaminantes. Es necesario controlar bien los gases, ya que fallos en los sistemas de filtración pueden provocar liberación importante de gases contaminantes (NO_x, SO_x, etc.). Además, aunque existen muchos estudios que sustentan lo contrario, está oficialmente admitido que el CO₂ provoca cambios en el clima por aumento del efecto invernadero.

1.6. Trabajos precedentes

A partir de la importancia que tienen los trabajos precedentes sobre la temática tratada se realizó una búsqueda bibliográfica relacionada con la evaluación de la eficiencia en los procesos para la obtención de energía en Centrales Termoeléctrica.

Rodríguez (2001) estableció el estudio de los combustibles usado en los generadores de vapor el cual realiza un análisis del petróleo crudo nacional a partir de los elementos químicos que lo componen, haciendo referencia a los efectos que producen cada uno de ellos durante su almacenamiento, transportación y quema en las instalaciones estudiadas. El trabajo muestra algunas recomendaciones prácticas para la manipulación y quema del combustible. Algunas de las conclusiones planteadas por el autor, que son consideradas importante para la economía cubana se relacionan a continuación:

1- Con el tratamiento químico adecuado y operando con bajos niveles de aire en la caldera, se incrementa sustancialmente la producción de CO₂, se garantizan limpieza en las superficies de transferencia de calor y se reduce al mínimo la velocidad de corrosión de los metales.

2- El crudo mejorado tiene influencia directa en el potencial de corrosión de los electrofiltros y tratado con aditivo organometálico de base magnesio es posible controlar el potencial de corrosión a valores similares o inferiores alcanzados por el petróleo regular.

Al estudio de las centrales termoeléctricas dedica particular interés Rizhkin (1987), en su trabajo se abordan los aspectos técnicos generales para la explotación de este tipo de instalación, se analizan algunos parámetros económicos relacionados con el consumo de calor en las centrales termoeléctricas.

Por su parte Tanquero et al. (1987), dedican su trabajo al cálculo térmico de los diferentes equipos y agregados existentes en los generadores de vapor, recoge ecuaciones importantes para el análisis térmico de estos equipos y constituye una guía metodológica para la realización de cálculos relacionados con la temática.

Fernández (1994), plantea las leyes termodinámicas empleadas en el análisis de los procesos térmicos, los conceptos fundamentales empleados en el estudio de estos y detalla con claridad la metodología empleada en la solución de problemas prácticos. Otro aporte importante de este trabajo es que describe otra forma de análisis térmico de los procesos industriales a partir de la inserción del concepto de exergía el cual es aplicado para realizar el balance exergético de varios equipos industriales entre los que se figuran: la turbina de gas, las bombas, calentadores y generadores de vapor.

También aportó temas de considerable interés Kasatkin et al. (1971), donde abordan sobre los agentes calentadores, métodos de calentamiento, calentamiento con vapor de agua y vapor encerrado, así como los procedimientos básicos para la realización del balance térmico en estos equipos.

Resulta útil el aporte dado por Muhica (2001), al efectuar la evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica “Ernesto Che Guevara”. El trabajo está encaminado a facilitar la toma de decisiones en la modernización y expansión de la planta, para ello se determinan los principales indicadores del ciclo térmico modernizado, también la investigación expone el cálculo de las pérdidas de

energía en los equipos tecnológicos principales de la central termoeléctrica, el impacto económico y ambiental de la propuesta estudiada.

Al estudio de los generadores de vapor instalados en la empresa René Ramos Latour también se dedicaron algunos trabajos, Del Valle (2002) realizó la evaluación verificativa de la eficiencia en la planta eléctrica de esta empresa, a partir de la instalación de dos generadores de vapor, en este trabajo se establecen comparaciones con parámetros anteriores del mismo proceso lo que demostró que hubo un aumento considerable de la eficiencia en la producción de níquel hasta el 95 % .

De forma análoga Abreu (2003), realizó la evaluación de la eficiencia del generador de vapor No. 10 de la Central Termoeléctrica basándose en este trabajo el autor realizó un cálculo verificativo de la eficiencia de la instalación, teniendo en cuenta la utilización de crudo nacional mejorado y la aplicación de la tecnología aditivación – emulsión del combustible, permitiéndole llegar entre otras a las siguientes conclusiones:

La tecnología de aditivación aplicada a partir de septiembre del 2002 logró incrementar la eficiencia del generador de vapor en 1,1 % .

Esta tecnología debe mejorarse en lo que respecta al ensuciamiento del calentador de aire regenerativo, con la misma se logra disminuir las emulsiones de contaminantes al medio ambiente.

Otro trabajo importante en este sentido fue dado por Suárez (2005) quien realizó un diagnóstico del sistema de generación de la central termoeléctrica de la empresa antes mencionada, el autor muestra un profundo análisis del proceso de generación de vapor existente en la instalación y expone resultados importantes basados en el estudio detallado de los generadores de vapor presente en el proceso, este trabajo muestra además varias recomendaciones que constituyen un punto de partida para el correcto análisis térmico de las instalaciones productoras de vapor.

En el manual de operaciones de la Central Termoeléctrica de la empresa “Pedro Sotillo Alba” se detalla el proceso de generación de vapor y se ofrecen las principales características de las máquinas y agregados que componen la planta.

Caballero y Gonzáles (2007) calcularon los rendimientos y los consumos de combustible de las calderas de la empresa Pedro Sotillo Alba y Ernesto Che Guevara, pero no establecieron el comportamiento de los parámetros más influyentes respecto a la eficiencia.

Al diagnóstico de los generadores de vapor 1 y 2 de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” se dedicó Lahens (2001), el cual tomó como referencia la influencia de la temperatura de los gases en la eficiencia y consumo de combustibles de los generadores de vapor.

Es positivo y resulta beneficioso la quema del combustible Crudo Cubano Mejorado, ya que aunque la eficiencia disminuye de un 92 a un 87 % , según se comprobó en los cálculos realizados en el Balance Energético, esta eficiencia no es considerada baja, ni la planta es ineficiente si la comparamos con otras plantas del país (Batista, 2004).

Con el cambio del combustible de fuel oil a crudo nacional la eficiencia exergética de la caldera solo varió en un 0,941 % , valor considerado no significativo, por lo que está fundamentada la utilización de crudo nacional desde el punto de vista de la eficiencia (Cuza, 2011). Además se evaluó los resultados de la eficiencia para dos tipos de combustibles, el mazut y el crudo mejorado a través de un balance típico de los generadores de vapor, en el cual no se establecen valores prácticos para determinar políticas operacionales.

Al compararse los resultados del comportamiento de los generadores de vapor con los aditivos Pentol y Bycosin, las caídas de presiones con el uso del Pentol en el eje convectivo alcanza el valor de 1,92 kPa y en los Calentadores Aire Regenerativo (CAR) de 1,84 kPa , los que se mantienen por debajo del normativo, relacionados con las deposiciones encontradas en estas superficies, por lo que se decide el uso del aditivo Bycosin en ambos generadores de vapor (Espinosa, 2013).

El trabajo anterior citado analiza el tratamiento con los aditivos y se hace una evaluación de los resultados obtenidos con los aditivos de la firma Bycosin en donde se concluyó que el generador de vapor # 2 trabajaba con menor eficiencia que el generador de vapor # 1, (Leyva, 2013)

Caballero (2016), encaminó su estudio acerca del proceso de combustión en la eficiencia del generador de vapor en el bloque # 2 de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”, apoyándose en las características del combustible CM1100 cSt. También realizó un estudio experimental en el banco de prueba o calibración del quemador, donde se evalúan los comportamientos de dos tipos diferentes de boquillas de atomización de los quemadores de petróleo del generador de vapor, quedando establecidos nuevos patrones operacionales de la presión delante de los quemadores.

Tresord (2016) determinó la eficiencia térmica y exergética comprendido para los componentes principales de la Unidad Básica de Suministro Planta Termoenergética de la Empresa del Níquel Comandante “Ernesto Che Guevara” desarrollando una metodología de cálculo establecida mediante los conocimientos teórico de los fundamentos de la termodinámica.

1.7. Conclusiones

- Con el desarrollo de este capítulo se demostró la necesidad del conocimiento del rendimiento termoexergético de las instalaciones del ciclo de potencia de vapor, ya que si este rendimiento se encuentra deficiente el costo económico para la producción de la energía se encarece e incide directamente en la economía del país.
- Mediante la búsqueda bibliográfica realizada se evidenció que la tecnología de las centrales térmicas de ciclo combinado permite un mayor aprovechamiento del combustible y por tanto los rendimientos tienden a aumentar.
- La literatura consultada aporta elementos teóricos suficientes para la realización de esta investigación, tomando como punto de partida aquellos trabajos que se realizaron en instalaciones con ciclos similares de operación.

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

El conocimiento del valor numérico del rendimiento termoenergético del ciclo tecnológico de generación de vapor de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” en el primer semestre de año 2016 es de vital importancia para la evaluación de los parámetros funcionales de operación de dicha empresa en ese periodo.

Por lo que el **objetivo del capítulo** es:

Desarrollar una metodología de cálculo para obtener el valor de la eficiencia termoenergética del ciclo de potencia con vapor de la entidad en cuestión.

2.2. Consideraciones para realizar el balance de masa y energía

Para desarrollar los balances de masa y energía, se hacen las siguientes consideraciones (Galván Robles, 2012):

1. Se considera que toda la planta y sus componentes se encuentran en estado estacionario, esto significa que todas las propiedades no varían con el tiempo. Si consideramos un volumen de control en estado estacionario, esto significa que la cantidad total de masa en cualquier instante t presente en el sistema es constante.

Considerando la ecuación 2.1 para el balance de materia

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad (2.1)$$

Donde:

$\sum_e \dot{m}_e$: Suma de los caudales másicos entrando al volumen de control; (kg/s).

$\sum_s \dot{m}_s$: Suma de los caudales másicos saliendo del volumen de control; (kg/s).

El término $\frac{dm_{vc}}{dt} = 0$ ya que de acuerdo a lo anteriormente indicado la cantidad de materia en el volumen de control y sobre las fronteras del sistema no varía con respecto al tiempo.

Entonces la ecuación 2.1 queda de la forma de la ecuación 2.2:

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (2.2)$$

Que significa que la sumatoria de los flujos másicos que entran a un sistema es iguales a la sumatoria de los flujos másicos que salen del mismo.

Similarmente considerando al volumen de control, en estado estacionario, la variación de la energía en el volumen de control y sobre las fronteras del sistema es independiente del tiempo, o sea:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0 \quad (2.3)$$

2. En el balance de energía el término Q_{vc} correspondiente a la transferencia de calor por unidad de tiempo en el volumen de control se iguala a cero en el balance energético debido a que es muy pequeño al compararlo con las otras transferencias de calor que tienen lugar a través de las fronteras del volumen de control.

Esta consideración está justificada de acuerdo a alguna o varias de las siguientes causas:

- ❖ La superficie exterior del volumen de control está completamente aislada.
- ❖ La superficie exterior es muy pequeña para que exista una transferencia de calor representativa.
- ❖ La diferencia de temperatura entre los alrededores y el volumen de control es mínima y por lo tanto la transferencia de calor.
- ❖ El fluido que circula por el sistema abierto lo hace tan rápido que no da tiempo a que ocurra una transferencia de calor.

3. También se considerara al flujo como unidimensional. Este tipo de flujo se considera que existe si las propiedades en la frontera de entrada y salida de flujo no varían en la sección transversal, estas propiedades solo pueden variar en la dirección del flujo.

En los análisis que se efectuarán a cada equipo se considera que las fronteras permeables del volumen de control pueden seleccionarse de modo que esta idealización se justifique.

En un régimen estacionario, la ecuación 2.2 para flujo másico unidimensional se reduce a:

$$\dot{m} = \rho \cdot Av \quad (2.4)$$

Donde:

ρ : Densidad el fluido; (kg/m^3).

Av : Flujo o caudal volumétrico; (kg/h).

4. Otra consideración aplicable, la cual está asociada solo a las ecuaciones de la energía, consiste en considerar a los términos de energía cinética y potencial de la materia que entra y sale del volumen de control como despreciable, esto no significa que las velocidades sean cero o que no existían variaciones en la altura.

5. Dentro de la ecuación de la energía, el término \dot{W}_{vc} se eliminará si no hay trabajo en el eje.

2.3. Balance de masa y energía para un volumen de control

En esta sección del capítulo se desarrolla el uso del principio de la conservación de la masa para un volumen de control y el principio de la conservación de la energía para el mismo sistema abierto o volumen de control considerando que esta es la energía que acompaña a los flujos de masa que entran o salen del volumen de control.

Posteriormente se aplicaran estos balances de masa y energía para los diferentes volúmenes de control definidos tomando en cuenta las diferentes consideraciones indicadas anteriormente.

2.3.1. Conservación de la masa para un volumen de control

Para un volumen de control, el principio de la conservación de la masa se expresa como sigue:

La variación con respecto al tiempo de la masa dentro de un volumen de control en el instante t es igual a la diferencia entre las masas que entran y salen del volumen de control a través de las fronteras permeables por unidad de tiempo.

Un caso importante para los desarrollos posteriores es aquel en el que los flujos de entrada y de salida del volumen de control ocurren a través de una o más secciones. Para este caso el principio de conservación de la masa toma la forma de la ecuación 2.5:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad (2.5)$$

El lado izquierdo de la ecuación 2.5 representa la tasa de cambio de la masa contenida dentro del volumen de control, \dot{m}_e indica el flujo másico en una sección de entrada al volumen de control en el instante t y \dot{m}_s representa el flujo másico que abandona el volumen de control a través de una sección de salida en el instante t .

2.3.2. Conservación de la energía para un volumen de control

Para un volumen de control, el principio de la conservación de la energía se expresa de la siguiente forma: La variación de la energía respecto al tiempo dentro del volumen de control es igual al flujo neto de energía que atraviesa la frontera como calor y trabajo más el flujo total de energía que entra con la masa en el volumen de control menos el flujo total de energía que sale con la masa del volumen de control. De acuerdo a lo anterior, para un volumen de control considerando un flujo unidimensional con una sola entrada y salida, tenemos la ecuación 2.6:

$$\frac{d}{dt} (U + E_c + E_p) = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m} \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) - \dot{m} \left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) \quad (2.6)$$

Siendo:

U : Energía interna; (J).

E_c : Energía cinética; (kJ).

E_p : Energía potencia; (kJ).

Q : Variación del calor con respecto al tiempo; (W).

\dot{W} : Variación del trabajo con respecto al tiempo; (W).

\dot{m} : Caudal másico; (kg/s).

u_e : Energía interna a la entrada por unidad de masa; (J).

V_e : Velocidad de entrada; (m/s).

g : Aceleración debido a la gravedad; (m/s²).

z_e : Posición de entrada con respecto a una referencia común con la posición de salida; (m).

u_s : Energía interna a la salida por unidad de masa; (kJ/kg).

V_s : Velocidad de salida; (m/s).

z_s : Posición de salida con respecto a una referencia común con la entrada; (m)

En la ecuación 2.6 se separa el trabajo \dot{W} en dos partes. La primera se debe al trabajo asociado a la frontera permeable, a este tipo de trabajo se le conoce como trabajo de flujo y se refiere al trabajo que necesita la masa que entra o sale del volumen de control para empujar el fluido hacia adentro o hacia fuera del sistema, mediante ecuaciones se representa a este trabajo como lo expresa la ecuación 2.7:

$$\dot{W}_{permeable} = \dot{m}(pv) \quad (2.7)$$

Considerando una entrada y una salida:

$$\dot{W}_{permeable} = \dot{m}_e(pv)_e - \dot{m}_s(pv)_s \quad (2.8)$$

La otra parte del trabajo, es el asociado a la frontera impermeable, considera todos los trabajos asociados al desplazamiento de un límite, a efectos eléctricos o al asociado a la rotación de un eje.

Finalmente, el trabajo total \dot{W} total es igual:

$$\dot{W} = \dot{W}_{vc} + \dot{m}_s(p_s v_s) - \dot{m}_e(p_e v_e) \quad (2.9)$$

Sustituyendo la ecuación 2.8 en la ecuación 2.5 y arreglando los términos de entrada y de salida, se obtiene la ecuación 2.10:

$$\frac{d}{dt}(U + E_c + E_p)_{vc} = \dot{Q} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}_e \left(u_e + p_e V_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) - \dot{m}_s \left(u_s + p_s V_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) \quad (2.10)$$

Si se incluye el concepto de entalpía entonces obtendremos la ecuación 2.12:

$$h = u + p v \quad (2.11)$$

$$\frac{d}{dt}(U + E_c + E_p)_{vc} = \dot{Q} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) - \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) \quad (2.12)$$

Para permitir la aplicación donde existen varias secciones sobre los límites del sistema en los cuales entra o sale masa, es más adecuada la ecuación 2.13:

$$\frac{d}{dt}(U + E_c + E_p)_{vc} = \dot{Q} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) \quad (2.13)$$

Donde \dot{W}_{vc} representa todos los modos de trabajo que se realizan en las fronteras impermeables.

Si consideramos que el volumen de control se encuentra en situación estacionaria, se hace la siguiente simplificación expresada en la ecuación 2.14:

$$\frac{d}{dt}(U + E_c + E_p)_{vc} = 0 \quad (2.14)$$

Y la ecuación 2.10 queda como la planteada en la ecuación 2.15:

$$0 = \dot{Q} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) \quad (2.15)$$

Donde:

h_e : Entalpía de entrada; (kJ/kg).

h_s : Entalpía de salida; (kJ/kg).

2.4. Componentes de los sistemas para el balance de energía

El primer paso para efectuar el balance de energía es determinar las propiedades termodinámicas de cada uno de los puntos de entrada y salida de los equipos principales que conforman el esquema térmico (Anexo 1) de la Central Térmica. Las propiedades obtenidas corresponden al funcionamiento del bloque # 2 de generación el cual está diseñado para 250 MW , Los valores relacionados concierne durante los meses de (enero hasta junio del 2016).

2.5. Balance de energía

A continuación se planteará el balance de energía de los componentes principales que conforman la Central Termoeléctrica, para esto se aplicarán las consideraciones indicadas en la sección 2.2. Los valores de entalpía y de caudal másico, se toman de los calculados e indicados en la Tabla 2.1. En la Tabla 2.1 se muestran las ecuaciones correspondientes para cada uno de los componentes principales que integran a la Termoeléctrica

Tabla 2.1. Ecuaciones para el balance de energía correspondientes a los principales equipos del ciclo tecnológico de la Termoeléctrica.

#	Equipo	Balance
1	Calentador de baja presión 1	$m_I h_I + m_4 h_4 = m_C h_C + m_5 h_5$
2	Calentador de baja presión 2	$m_{II} h_{II} + m_5 h_5 = m_b h_b + m_6 h_6$
3	Calentador de baja presión 3	$m_{III} h_{III} + m_6 h_6 = m_a h_a + m_7 h_7$
4	Tanque de alimentar	$m_{IV} h_{IV} + m_7 h_7 = m_8 h_8$
5	Calentador de alta presión 1	$m_V h_V + m_9 h_9 = m_{10} h_{10} + m_{11} h_{11}$
6	Calentador de alta presión 2	$m_{VII} h_{VII} + m_{11} h_{11} = m_{13} h_{13} + m_{12} h_{12}$

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.2 Ecuaciones para el cálculo de trabajo en los equipos del esquema térmico de la instalación

#	Equipo	Balance
1	Turbina	$W_t = (h_1 - h_{VI}) + (1 - m_{VI})(h_{VI} - h_V) +$ $(1 - m_{VI} - m_V)(h_V - h_{IV}) + (1 - m_{VI} - m_V - m_{IV})(h_{IV} - h_{III}) +$ $(1 - m_{VI} - m_V - m_{IV} - m_{III})(h_{III} - h_{II}) +$ $(1 - m_{VI} - m_V - m_{IV} - m_{III} - m_{II})(h_{II} - h_I) +$ $(1 - m_{VI} - m_V - m_{IV} - m_{III} - m_{II} - m_I)(h_I - h_2)$
2	Bomba de condensado	$W_b = h_4 - h_3 \text{ ó } v_3(p_4 - p_3)$
3	Bomba de alimentar	$W_b = h_9 - h_8 \text{ ó } v_8(p_9 - p_8)$

Según Fernández Condes, 1984 el rendimiento térmico de una instalación de generación de vapor viene dada por la siguiente expresión:

$$\eta_{\text{cent}} = \frac{W_t - \sum W_b}{q_1} \quad (2.16)$$

2.6. Método de cálculo para evaluar energéticamente a las calderas

El diagnóstico energético de los generadores de vapor tendrá en cuenta el balance térmico. La metodología utilizada es la recomendada por Pérez (1972) y Pankratov (1987), la misma se establece a continuación.

2.6.1. Poder calórico inferior del combustible

Para la determinación del valor calórico bajo del combustible se debe tener en cuenta el tipo combustible; como el utilizado en la Central Termoeléctrica en análisis es del tipo líquido se utilizará la fórmula 2.16 de Mendeleiev que viene dada por la siguiente expresión:

$$Q_b^t = 339 C^t + 1030 H^t - 109 (O^t - S^t) - 24 W^t \quad (2.16)$$

Donde:

Q_b^t : poder calórico inferior del combustible; (kJ/kg).

C^t : cantidad de Carbono en el combustible; (%).

H^t : cantidad de Hidrógeno en el combustible; (%).

O^t : cantidad de Oxígeno en el combustible; (%).

S^t : cantidad de Azufre en el combustible; (%).

W^t : cantidad de Humedad en el combustible; (%).

A_z^t . Contenido de sacarosa en la masa de trabajo del bagazo; (%).

Según Pérez (1972) y Pankratov (1987) la determinación del volumen de los gases producto de la combustión es necesaria en el cálculo del generador de vapor, pues son estos los que transfieren el calor al agua y al aire a través de las superficies metálicas.

2.6.2. Cálculo de los volúmenes de la combustión

- Volumen de aire teórico

$$V_a^0 = 0,0889 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,265 \cdot H^t - 0,0333 \cdot O^t \quad (2.17)$$

- Volumen total real de gases triatómicos

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) \quad (2.18)$$

- Volumen teórico de nitrógeno

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_a^0 + 0,008 \cdot N^t \quad (2.19)$$

- Volumen teórico de los gases secos

$$V_{gs}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 \quad (2.20)$$

- Volumen teórico de los vapores de agua

$$V^0_{H_2O} = 0,111 \cdot H^t + 0,0124 \cdot W^t + 0,0161 \cdot V^0_a \quad (2.21)$$

- Volumen teórico total de gases

$$V^0_g = V^0_{gs} + V^0_{H_2O} \quad (2.22)$$

- Volumen real de gases

$$V_g = V^0_g + (\alpha - 1) \cdot V_a \quad (2.23)$$

- Volumen real de aire

$$V_a = V^0_a \cdot \alpha \quad (2.24)$$

2.6.3. Cálculo del coeficiente de exceso de aire para combustión incompleta

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76 \cdot (O_2 - 0,5 \cdot CO - 0,5 \cdot H_2 - 2 \cdot CH_4)} \quad (2.25)$$

$$N_2 = 100 - (CO + CO_2 + O_2) \quad (2.26)$$

Donde:

α : coeficiente de exceso de aire; adimensional

N_2 : cantidad de Dinitrógeno presente en los gases de escape; (%).

O_2 : cantidad de Dioxígeno presente en los gases de escape; (%).

CO : cantidad de Monóxido de Carbono presente en los gases de escape; (%).

CO_2 : cantidad de Dióxido de Carbono presente en los gases de escape; (%).

H_2 : cantidad de Dihidrógeno presente en los gases de escape; (%).

CH_4 : cantidad de Metano presente en los gases de escape; (%).

2.6.4. Cálculo de las entalpías de los gases de la combustión y el aire

- **Entalpía teórica de los gases**

$$I^0_g = V_{R0_2} \cdot I_{CO_2} + V^0_{N_2} \cdot I_{N_2} + V^0_{H_2O} \cdot I_{H_2O} + 0,01 \cdot A^t \cdot A_{arr} \cdot I_{cen} \quad (2.27)$$

Donde:

I^0_g : entalpía teórica de los gases; (kJ/kg)

I_{CO_2} : entalpía de los gases triatómicos (en este caso el CO_2); (kJ/m³)

I_{N_2} : entalpía del Dinitrógeno; (kJ/m³)

I_{H_2O} : entalpía de los vapores de agua; (kJ/m³)

I_{aire} : entalpía del aire; (kJ/m³)

I_{ceniza} : entalpía de la ceniza; (kJ/kg)

A_{arr} : fracción de ceniza arrastrada por los gases; (%)

A^t : cantidad de ceniza arrastrada por los gases; (%)

Tabla 2.1 Valores de entalpía para diferentes temperaturas (Faires, 1991).

$T^{\circ}C$	I_{CO_2}	I_{N_2}	I_{H_2O}	I_{aire}	I_{ceniza}
100	169,98	129,79	150,72	132,30	80,80
200	357,55	260	304,38	266,28	169,14
300	558,93	311,88	462,64	403,77	263,76
400	772	527	626	542	360
500	996	664	794	684	458,5
600	1222	804	967	830	560,6

- **Entalpía real de los gases**

$$I_g = I^0_g + I^0_{aire} \cdot (\alpha - 1) \quad (2.28)$$

$$I^0_{aire} = V^0_a \cdot i_{aire} \quad (2.29)$$

Donde:

I_g : entalpía real de los gases producto de la combustión; (kJ/kg)

I^0_{aire} : entalpía teórica del aire; (kJ/kg)

i_{aire} : entalpía del aire; (kJ/kg)

2.7. Balance térmico por el método directo

$$\eta_{GVMD} = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_d \cdot B} \cdot 100 \quad (2.30)$$

Donde:

η_{GVMD} : eficiencia bruta del generador de vapor, obtenida por el Método Directo; (%)

B : consumo de combustible; (kg/s)

$Q_{\text{útil}}$: calor útil; (kJ/s)

Q_d : calor disponible; (kJ/kg)

- **Determinación del calor disponible**

$$Q_d = Q_b^t + Q_{fc} + Q_{fa} + Q_{atm} \quad (2.31)$$

Donde:

Q_{fc} : calor físico del combustible; (kJ/kg)

Q_{fa} : calor físico del aire; (kJ/kg)

Q_{atm} : calor para la atomización; (kJ/kg)

Siendo:

$$Q_{fc} = Cc \cdot t \quad (2.32)$$

Donde:

Cc: calor específico del combustible a la temperatura t; (kJ/(kg · °C))

t: temperatura del combustible; (°C)

El calor específico del combustible (Cc) se determina según el usado:

- Para combustibles líquidos: $Cc = 1,783 + 0,0025(Tc - 273)$ (2.33)

$$Q_{fa} = \alpha \cdot V^0_a \cdot (i_{sp} - i_{af}) \quad (2.34)$$

Donde:

i_{sp} : entalpía a la salida del precalentador de aire; (kJ/m³)

i_{af} : entalpía del aire frío; (kJ/m³)

$$Q_{at} = D_{atm} (I_{at} - 2510) \text{ (kJ/kg)} \quad (2.35)$$

Donde:

D_{atm} : flujo de atomización; (kgv/kgc)

I_{atm} : Entalpía del vapor de atomización; (kJ/kg)

▪ **Determinación del calor útil**

$$Q_{\text{útil}} = D_v \cdot (i_v - I_{aa}) + D_R \cdot (i_{SR} - i_{ER}) + D_P \cdot (i_{lsa} - i_{aa}) \quad (2.36)$$

Donde:

$Q_{\text{útil}}$: calor útil; kJ/s.

D_v : producción de vapor sobrecalentado; (kg/s)

i_v : entalpía del vapor sobrecalentado; (kJ/kg)

i_{aa} : entalpía del agua de alimentación; (kJ/kg)

i_{SR} ; i_{ER} : entalpía del vapor a la salida y entrada del sobrecalentador; (kJ/kg)

D_p : flujo de extracciones de purga; (kg/s)

i_{lsa} : entalpía del líquido saturado; (kJ/kg)

2.8. Cálculo de los flujos de aire y gases producto de la combustión

Flujo de aire necesario para la combustión Q_a (m³/s)

$$Q_a = V_a \cdot B$$

Flujo de gases producto de la combustión Q_g (m³/s)

$$Q_g = V_g \cdot B \quad (2.37)$$

2.9. Balance térmico por método indirecto

$$\eta_{GVMI} = 100 - \sum_{n=2}^6 q_n \quad (2.38)$$

Siendo:

$$\sum q_n = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad (2.39)$$

Donde:

$\sum q_n$: Sumatoria de todas las pérdidas de calor; (%)

η_{GVMI} : eficiencia bruta del generador de vapor, por el Método Indirecto; (%)

q_2 : pérdida a través de los gases de escape; (%)

q_3 : pérdida de calor por incombustión química; (%)

q_4 : pérdida de calor por incombustión mecánica; (%)

q_5 : pérdida por transferencia de calor al medio ambiente; (%)

q_6 : pérdida de calor con los residuos extraídos del horno; (%)

2.10. Determinación de las pérdidas

2.10.1. Pérdida a través de los gases de escape

Esta pérdida se produce al salir de la caldera los gases a una alta temperatura que arrastran una cantidad de calor hacia la atmósfera, está caracterizada por dos factores fundamentales:

- El coeficiente de exceso de aire.
- La temperatura de los gases de escape.

Además esta pérdida depende de:

- ΔT mínima para lograr la transferencia de calor.
- Temperatura adecuada para evitar la corrosión.

$$q_2 = \frac{(I_{ge} - \alpha \cdot I_{af}) \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.40)$$

2.10.2. Pérdida de calor por incombustión química

Estas pérdidas se originan porque no todos los carbonos y otras sustancias hallan oxígeno suficiente para sufrir una oxidación completa, lo que causa que la reacción sea incompleta y se desprenda cierta cantidad de calor, la misma depende de:

- El coeficiente de exceso de aire.
- La mala selección de los equipos auxiliares (calentador, ventiladores y quemadores)

$$q_3 = \frac{(30,2 \cdot CO + 25,8 \cdot H_2 + 85,5 \cdot CH_4) \cdot V_{gs} \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.41)$$

2.10.3. Pérdida de calor por incombustión mecánica

La magnitud de esta pérdida depende del combustible, del tipo de horno y de su temperatura. La determina el combustible que no reacciona en el proceso de combustión.

$q_4 = 0 \%$ (para combustibles líquidos y gaseosos)

2.10.4. Pérdida por transferencia de calor al medio ambiente

Esta abarca todo el calor que por diferentes vías se transfiere al medio ambiente, ya sea por radiación directa a través de los registros abiertos, por conducción a través de las paredes y por convección al aire. Según Pérez (1972) y Pankratov (1987) los rangos de estas pérdidas son:

Caldera de	$D < 10 \text{ t/h}$	$q_5 = 2 - 2,5 \%$
	$D = 10 - 100 \text{ t/h}$	$q_5 = 0,5 - 2 \%$
	$D = 100 - 300 \text{ t/h}$	$q_5 = 0,4 - 0,5 \%$

$$q_5 = q_{5N} \frac{D_N}{D_R} \quad (2.42)$$

Donde:

q_{5N} : pérdida de calor nominal; (%)

D_N : producción de vapor nominal; (kg/s)

D : producción de vapor real; (kg/s)

2.10.5. Pérdida de calor con los residuos extraídos del horno

Es la que se produce al evacuar las cenizas a altas temperaturas, depende fundamentalmente del tipo de combustible y la temperatura de extracción.

Para combustibles líquidos y gaseosos $q_6 = 0$ (Pérez, 1972; Pankratov, 1987)



Conclusiones del capítulo II

- Se indicaron las expresiones matemáticas y los fundamentos teóricos de las leyes respecto a la termodinámica; estableciendo así el procedimiento de cálculo para la evaluación de los parámetros fundamentales que se relacionan con la eficiencia del ciclo tecnológico de la Central Termoeléctrica.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Determinación de las pérdidas

En el presente capítulo se muestran y evalúan los resultados principales respecto a la eficiencia térmica del ciclo de potencia con vapor para el sistema de cogeneración presente en la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” obtenidos a partir del análisis del esquema térmico, el estudio minucioso de los elementos que lo componen y del empleo de los métodos de cálculos detallados en el capítulo 2. Además, se fundamentan los impactos económicos y ambientales asociados a la producción de la instalación.

Por lo tanto el **objetivo** de este capítulo es:

Evaluar los resultados obtenidos en la investigación y los impactos económico-ambientales asociados al objeto de estudio.

3.2. Análisis de los resultados de la investigación

Para dar cumplimiento al objetivo planteado se realizaron las mediciones de los parámetros que caracterizan los procesos que integran el ciclo térmico de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”, con un sistema de adquisición de datos, haciendo uso de la instrumentación utilizando un conjunto básico de sensores, que incluye la medición, adquisición, procesamiento y registro de datos en PC para las variables: flujo másico, presión y temperatura, entre otros.

La tabla 3.1, muestra un resumen promedio de las principales variables medidas y que serán empleadas en la evaluación del ciclo de potencia con vapor. La toma de datos consistió en la observación del comportamiento del proceso para cuatro valores de carga entregada en la turbina (potencia): 125 MW ; 170 MW ; 210 MW y 240 MW .

Tabla 3.1 Valores promedios de los parámetros que intervienen en el ciclo térmico.

PARAMETROS	U/M	125	170	210	240
Agua de Alimentar					
Flujo de agua alimentar	t/h	497,31	664,47	752,67	867,04
Temperatura entrada a la Caldera	°C	218,00	225,85	226,01	232,15
Presión entrada a la Caldera	MPa	14,6	14,8	15,1	15,6
Vapor Sobrecalentado					
Flujo de vapor sobrecalentado	t/h	465,71	625,37	711,49	823,74
Flujo de atemperamiento I izquierda	t/h	0,02	2,06	3,45	2,51
Flujo de atemperamiento I derecha	t/h	0,03	2,31	3,67	3,31
Flujo de atemperamiento II izquierda	t/h	4,30	8,89	10,54	12,40
Flujo de atemperamiento II derecha	t/h	2,58	7,53	12,24	16,19
Temperatura salida de Caldera.	°C	522,00	521,95	522,00	522,00
Flujo de atemperamiento III izquierda	t/h	1,33	5,00	1,52	3,12
Flujo de atemperamiento III derecha	t/h	0,28	5,00	0,32	2,75
Presión de vapor en el Domo	MPa	14,04	14,46	14,79	15,21
Presión vapor sobrecalentado salida caldera	MPa	13,35	13,41	13,46	13,55
Temperatura vapor sobrecalentado	°C	522,00	521,95	522,00	522,00
Presión vapor entrada turbina	MPa	13,24	13,24	13,24	13,24
Vapor Recalentado					
Temperatura de vapor recalentado	°C	523,00	523,00	523,00	523,00
Flujo de vapor recalentado entrada turbina A	t/h	181,78	258,08	299,12	349,08
Presión de vapor recalentado A	MPa	2,02	2,44	2,84	3,32
Flujo de vapor recalentado entrada turbina B	t/h	182,70	257,40	300,79	350,35
Presión de vapor recalentado B	MPa	1,96	2,38	2,80	3,27
Presión vapor recalentado retorno A	MPa	2,01	2,47	2,92	3,42
Temperatura vapor recalentado retorno A	°C	340,00	337,00	343,00	355,00
Presión vapor recalentado retorno B	MPa	2,01	2,47	2,92	3,42
Temperatura vapor recalentado retorno B	°C	337,71	332,00	341,00	356,00
Vacío					
Presión en el Condensador	MPa	0,005	0,005	0,005	0,005

La tabla 3.2 refleja los valores de presión y temperatura en las extracciones, estos son necesarios para obtener el conocimiento de otros parámetros que intervienen en la eficiencia del ciclo.

Tabla 3.2 Valores de presión y temperaturas en las extracciones a la turbina.

EXTRACCIONES	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (kPa)
Extracción I	152	68
Extracción II	115	11,2
Extracción III	162	86,3
Extracción IV	239	500
Extracción V	346	1 300
Extracción VI	357	3 530

3.3. Evaluación del Generador de Vapor

En la tabla 3.3 se muestra el comportamiento de los volúmenes de la combustión para las distintas demandas energéticas, donde se mantienen constantes los volúmenes de aire teórico V^0_a , volúmenes totales real de los gases triatómicos $V^0_{RO_2}$, volúmenes teóricos de nitrógeno $V^0_{N_2}$, los volúmenes teóricos de los gases seco V^0_{gS} , los volúmenes teóricos de los vapores de agua $V^0_{H_2O}$ y los volúmenes teóricos totales de los gases V^0_g , que dependen de la composición química del combustible. Durante el periodo que duró la investigación se empleó un solo tipo de combustible, el comportamiento de los parámetros antes mencionados, su valor es el mismo para las cuatro variantes analizadas.

Tabla 3.3 Resultados del cálculo de los volúmenes de aire y gases productos de la combustión.

MW	Parámetros									
	(m ³ /kg)									
	V^0_a	$V^0_{RO_2}$	$V^0_{N_2}$	V^0_{gS}	$V^0_{H_2O}$	V^0_g	Vg	Va	α	N_2
240	10,1	1,5	7,98	9,48	1,4	10,88	13,3	12,12	1,2	81,97

En la tabla 3.4 se evidencia el comportamiento del poder calórico del combustible Q_{bt} , el calor de atomización Q_{atm} , el calor físico del combustible Q_{fc} , el calor específico del combustible C_c y el calor disponible Q_d , con las diversas demandas eléctricas para la que funciona la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” donde se encuentra el generador de vapor en estudio.

Tabla 3.4 Comportamiento de calores de entrada al generador de vapor.

Parámetros	125 MW	180 MW	210 MW	240 MW	U/M
Q_{bt}	38 626,94	38 626,94	38 626,94	38 626,94	kJ/kg
Q_{atm}	22,961	22,961	22,961	22,961	kJ/kg
Q_{fc}	343,244	330	339,3	316,05	kJ/kg
C_c	2,2	2,2	2,2	2,2	kJ/(kg.°C)
Q_d	38 993,145	38 979,9	38 989,201	38 965,951	kJ/kg

Según la metodología de cálculo desarrollada en el capítulo 2, la tabla 3.5 muestra los valores de los parámetros de operación y se observa que a medida que aumentan las necesidades energéticas aumentan las pérdidas a través de los gases de escape y las pérdidas de calor por incombustión química.

Tabla 3.5 Comportamiento de las entalpías del aire, los gases y pérdidas de calor.

Parámetros	125 MW	180 MW	210 MW	240 MW	U/M
I^0_g	2 066,8	2 337,9	2 402,6	2 223,4	kJ/kg
I_g	2 433,6	2 545,3	2 614,98	2 223,01	kJ/kg
I^0_{aire}	1 834,2	2 073,53	2 123,8	1 972,2	kJ/kg
I^0_{af}	426,8	426,8	426,8	426,8	kJ/kg
I_{af}	42,259	42,259	42,259	42,259	kJ/m ³
q_2	5	5,3	5,5	6	%
q_3	0,9	0,9	1,2	1,15	%
q_5	0,5	0,5	0,5	0,5	%
V_{gs}	11,14	13,14	9,86	9,4	kJ/kg

La tabla 3.6 muestra la variación del rendimiento, del consumo de combustible y la demanda del flujo de aire y gases para las distintas condiciones de trabajo de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”. Se observa que a medida que aumenta la carga a la instalación de turbinas disminuye el rendimiento del generador de vapor $\eta_{GV_{MI}}$ en un 1 % aproximadamente, ya que la instalación demanda mayor cantidad de calor útil $Q_{\text{útil}}$, que se ve reflejado en un incremento del consumo de combustible.

Tabla 3.6 Comportamiento del rendimiento del generador de vapor.

Parámetros	125 MW	180 MW	210 MW	240 MW	U/M
$Q_{\text{útil}}$	386 705,6	520 998,7	594 185,6	688 112,3	kJ/s
$\eta_{GV_{MI}}$	93,6	93,3	92,8	92,35	%
Q_g	140,98	171,5	196,6	217,93	m ³ /s
Q_a	128,5	158,9	182,2	202,46	m ³ /s

3.4. Evaluación del ciclo térmico de potencia con vapor

A partir del procedimiento descrito en el capítulo 2 para la realización del balance térmico y de masa, la evaluación del comportamiento de las variables de entrada y salida de los elementos que componen el ciclo térmico de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”, se procedió a determinar las propiedades (entalpía, entropía y volumen específico), para las sustancias a las condiciones de trabajo (presión y/o temperatura) tanto para el ciclo ideal como real.

Las propiedades de la sustancia en sus diferentes estados de agregación se determinaron a través de tablas que aparecen en la literatura especializada y con ayuda del Software WinPropagua, así como también se debe señalar que en los anexos 1 y 2 se muestran los cálculos realizados con ayuda del Software profesional MathCAD 13. Garantizando así un mayor entendimiento del procedimiento empleado en la solución del problema planteado.

De los resultados del balance térmico y de masa se obtienen los resultados que se mostrarán en lo adelante.

La figura 3.1, confirma lo reflejado en la tabla 3.6 del epígrafe 3.3, donde existe una estrecha relación entre el rendimiento del generador de vapor como elemento decisorio en el consumo de combustible que a su vez determina la eficiencia de la caldera y del ciclo térmico de potencia con vapor. Un incremento de la potencia en la turbina, requiere mayor producción de vapor y por ende mayor consumo de combustible.

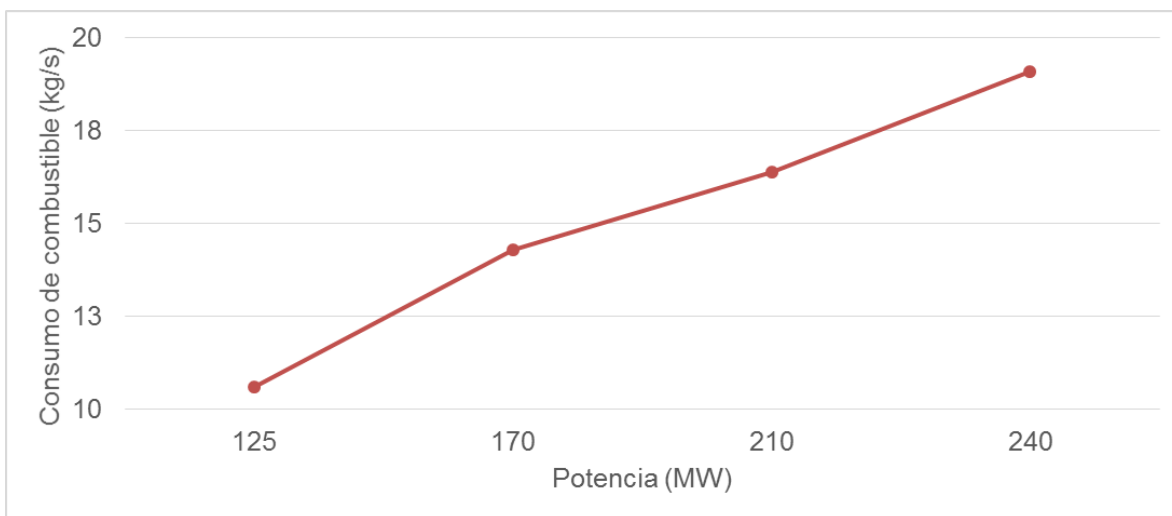


Figura 3.1 Relación del consumo combustible vs potencia entregada en la turbina.

La figura 3.2 muestra el comportamiento del trabajo de la turbina para las condiciones ideales y reales de operación. Las condiciones ideales se asumen al considerar que el trabajo de la turbina es a entropía constante y las condiciones reales se asumen considerando las pérdidas y las irreversibilidades propias del proceso de expansión, en cada una de las etapas de la misma. Como se observa a medida que se incrementa la carga en la turbina, existe una disminución en entre los valores real e ideal, indicando una mejora en el rendimiento teórico de la turbina.

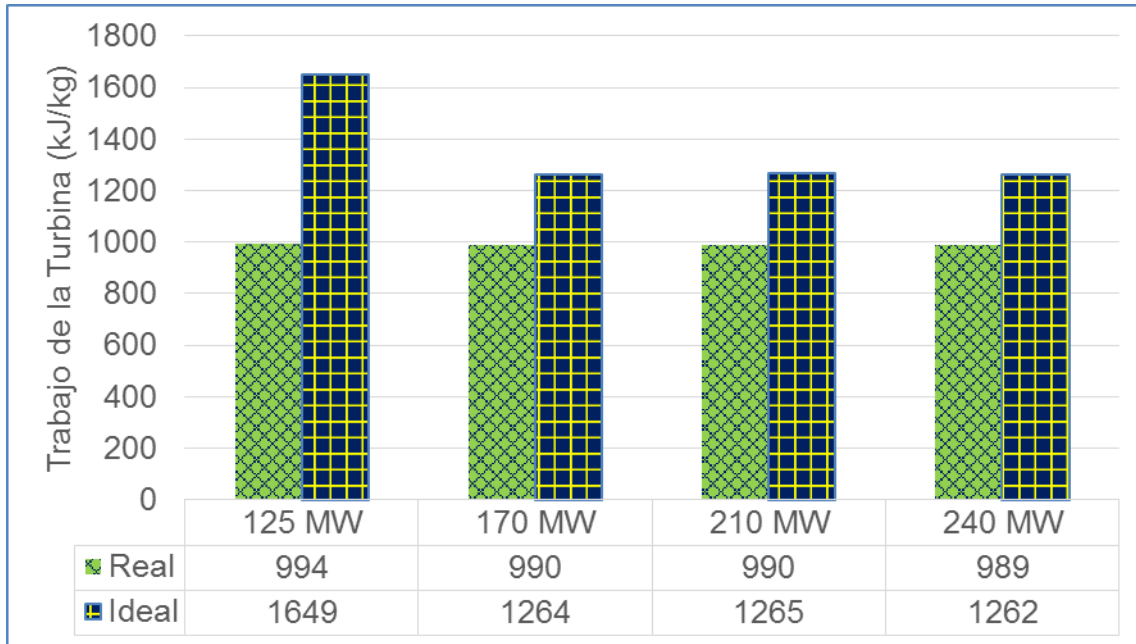


Figura 3.2 Comportamiento del trabajo en la turbina.

La figura 3.3 muestra que el rendimiento de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” muestra un comportamiento real que está dentro de los valores establecidos en la literatura especializada. No obstante se demuestra que existe una reserva disponible, si se logra disminuir las pérdidas de energías existentes en el ciclo térmico, como son la deficiente insulación de tuberías y superficies a altas temperaturas, deficiente funcionamiento de las trampas de líquido y vapor. Pérdidas de calor en gases producto de la combustión y fluidos calientes que se vierten al medioambiente, por ejemplo condensado de vapor.

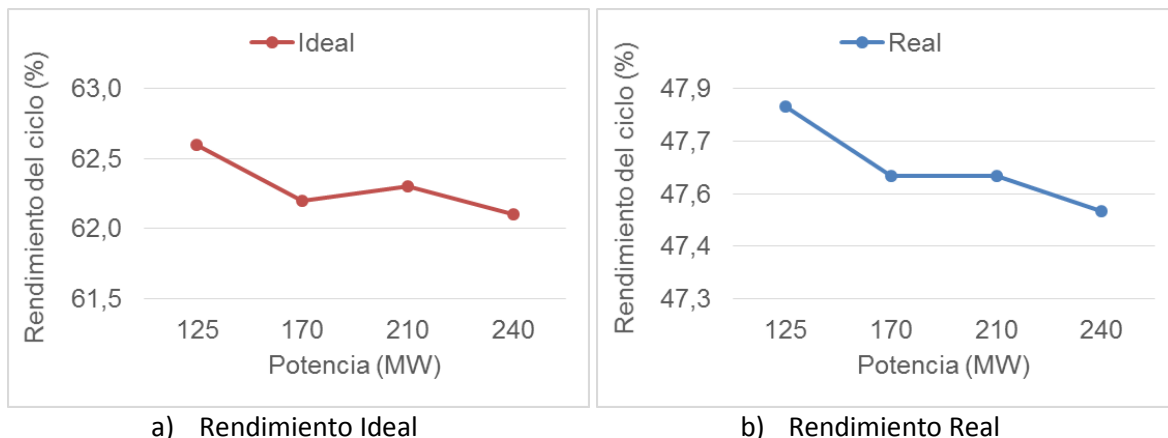


Figura 3.3 Comportamiento del rendimiento del ciclo térmico.

El rendimiento de la instalación de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” relación la potencia producida menos la potencia consumida en los equipos auxiliares propios para el funcionamiento de la misma, entre el calor total liberado por el combustible. Según se muestra en la figura 3.4, existe un incremento del rendimiento de la instalación con el incremento de la carga, demostrando un mejor aprovechamiento de la energía disponible, el cual se considera que aún es insuficiente. El comportamiento decreciente en algunos casos se le atribuye a dificultades en el proceso de producción, relacionadas con averías en los quemadores y el proceso de combustión en el horno del generador de vapor.

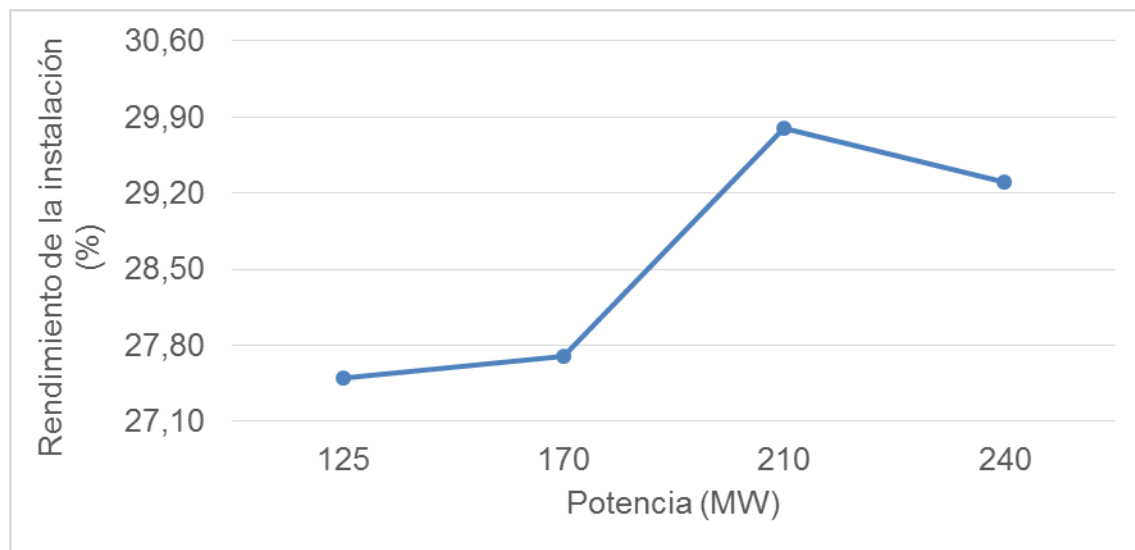


Figura 3.4 Comportamiento del rendimiento de la instalación.

La figura 3.5 demuestra la importancia de explotar el ciclo de potencia con vapor a su carga nominal por diseño, ya que de esa manera se hace un mejor aprovechamiento de la energía disponible. Si además se tiene en cuenta según se muestra en los resultados de los experimentos que aparecen en la tabla 3.1 que aunque se disminuya la potencia entregada en la turbina y los valores de los flujos de agua y vapor, los parámetros de calidad del vapor a la entrada y salida de la turbina tienden a ser contantes, garantizando así la disponibilidad de la misma y alargando su vida útil.

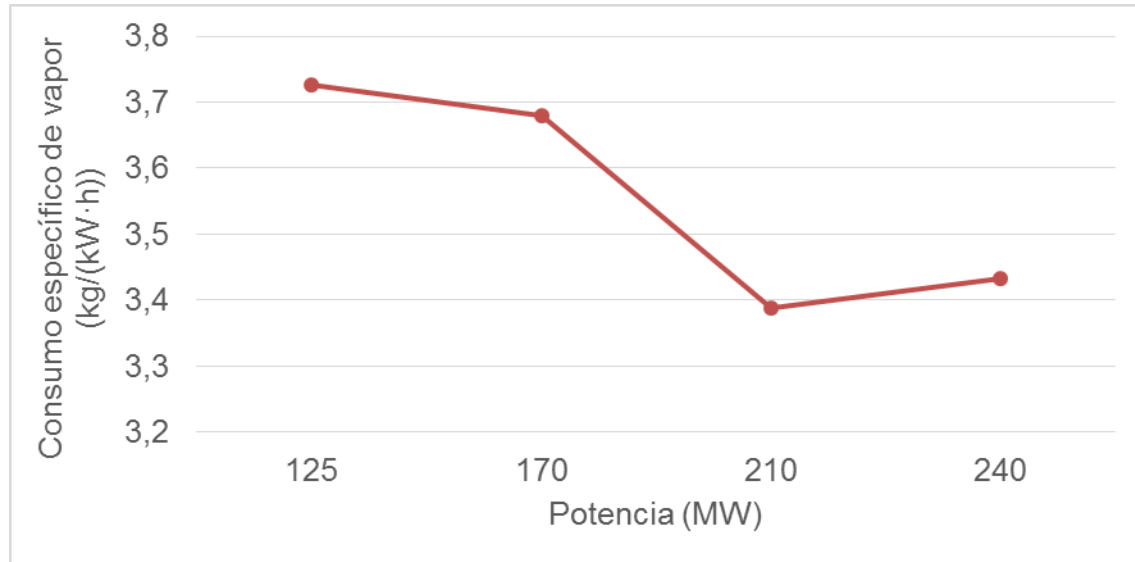


Figura 3.5 Comportamiento del consumo específico de vapor.

Al igual que en la figura 3.5, la figura 3.6 muestra un descenso del consumo específico de calor con el incremento de la potencia entregada por la turbina. Se debe destacar que ambos índices están dentro del rango establecido por la literatura especializada.

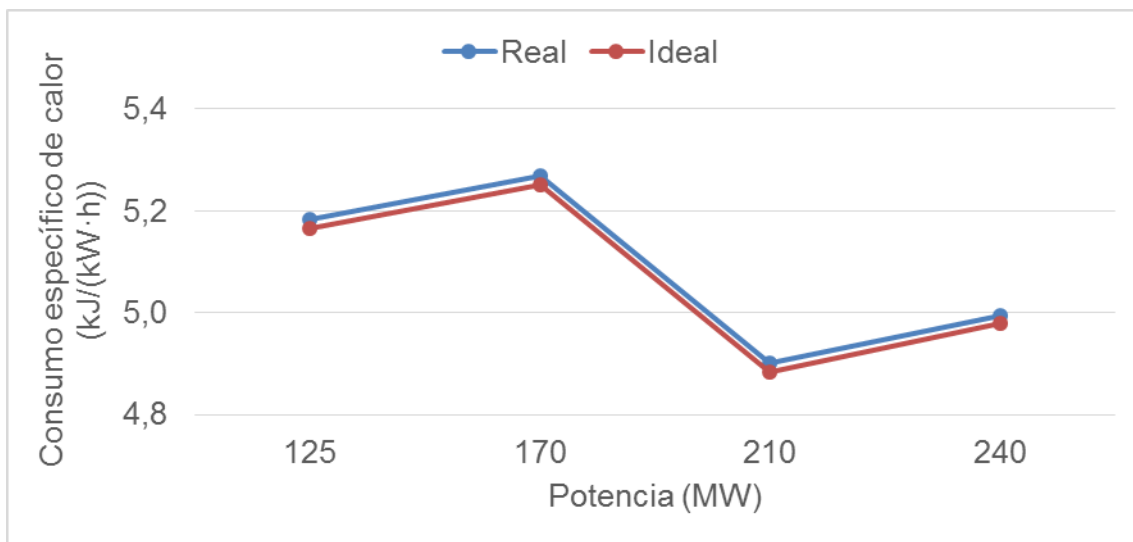


Figura 3.6 Comportamiento del consumo específico de calor.

3.5. Valoración económica asociada al rendimiento del ciclo tecnológico

La Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” está diseñada para abastecer al sistema energético nacional 250 MW, pero la misma presenta una variación de potencia en dependencia de las demandas energéticas del país. Como la fuente de energía de la misma viene dada producto a la quema de un combustible fósil (petróleo) y comportarse este de una forma variable monetariamente en el mercado mundial es necesario la mayor eficiencia de cada uno de los componentes del ciclo de potencia con vapor para disminuir los gastos en que se incurren en la generación de la energía.

En dicha empresa se han tomado diversas medidas para disminuir el costo económico en la producción de energía eléctrica ya que este es su principal objetivo, unas de esa medidas es incremento de las políticas de mantenimiento para disminuir las averías e incorrecto funcionamiento de los equipos que intervienen en el ciclo elevando así su eficiencia y disminuyendo los gastos de combustible producto al bajo rendimiento que estos presentan al disminuir su capacidad de trabajo.

Otras de las medidas tomadas fue la sustitución del crudo ya que el mismo para la cual fue diseñada la empresa provenía del exterior lo que encarecía el costo de la producción, esto trajo consigo la eliminación de importaciones del crudo y por tanto un ahorro económico considerable, en su lugar se estableció que el combustible utilizado para la generación de electricidad fuera crudo cubano mejorado 650.

3.6. Impacto ambiental de la investigación

La emisión de residuos a la atmósfera y los propios procesos de combustión que se producen en las centrales térmicas tienen una incidencia importante sobre el medio ambiente. Para tratar de paliar, en la medida de lo posible, los daños que estas plantas provocan en el entorno natural, se incorporan a las instalaciones diversos elementos y sistemas.

Algunos tipos de centrales termoeléctricas contribuyen al efecto invernadero emitiendo dióxido de carbono. También hay que considerar que la masa de este gas emitida por unidad de energía producida no es la misma en todos los casos.

Una central térmica de fuelóleo suponiendo que posea un rendimiento del 40 % sobre la energía primaria consumida, emite aproximadamente 0,70 kg/kWh de CO₂, la incidencia de este tipo de centrales sobre el medio ambiente se produce por la emisión de residuos a la atmósfera (procedentes de la combustión del combustible) y por vía térmica, (calentamiento de las aguas de los ríos y mares por la utilización de estas aguas para la refrigeración en circuito abierto).

Por lo que se refiere al primero de los aspectos citados, esa clase de contaminación ambiental es escasa en el caso de las de *fuel-oil*, por lo que se refiere a estas centrales, su emisión de partículas sólidas es muy inferior a las de carbón, y puede ser considerada insignificante. Sólo cabe tener en cuenta la emisión de hollines ácidos (neutralizados mediante la adición de neutralizantes de la acidez) y la de óxidos de azufre (minimizada por medio de diversos sistemas de purificación).

En cuanto a la contaminación térmica, como se señalaba anteriormente, el agua que utiliza la central, tras ser convertida en vapor y empleada para hacer girar la turbina, es enfriada en el condensador para volver posteriormente a los conductos de la caldera. Para efectuar la operación de refrigeración, se emplean el agua proveniente del mar, a las cuales se transmite el calor incorporado por el agua de la central que pasa por los condensadores.

Conclusiones del capítulo

1. El rendimiento que manifiesta la instalación es de un 28,6 % por lo que se puede afirmar que el rendimiento de la instalación para las condiciones de trabajo evaluada es bajo con respecto para la que fue diseñada.
2. En este capítulo se expuso los resultados de los cálculos efectuado en el capítulo II para la evaluación del rendimiento térmico del generador de vapor perteneciente al bloque # 2 de la Central Termoeléctrica "Lidio Ramón Pérez".

CONCLUSIONES GENERALES

1. A través del procedimiento descrito en el capítulo 2, se determinó que:
 - Con un incremento de la potencia en la turbina de 125 a 240 MW se incrementa el consumo combustible de la instalación en 8,50 kg/s .
 - Que el trabajo real de la turbina se acerca al ideal en un 78 % , demostrando que existen reservas para el ahorro de energía.
 - Que el rendimiento térmico del ciclo térmico real se acerca al ideal en un 76 % , demostrando que existen reservas para el ahorro de energía.
 - Que el rendimiento de la instalación es de 28,5 % como promedio para las cuatro potencias a las que operó la turbina.
 - Que el consumo específico de vapor (3,5 kgv/(kW·h)) y el consumo específico de calor (5,1 kJ/(kW·h)) están dentro de los rangos permisibles.



RECOMENDACIONES

Hacer la evaluación termoenergética de todos los equipos que conforman el ciclo de potencia con vapor y determinar las potencialidades de ahorro energético y las deficiencias técnicas que inciden en el incremento de las pérdidas de energía.

Continuar con el estudio del ciclo térmico de potencia con vapor, agregando elementos que permitan caracterizar el mismo a la mayor brevedad para garantizar la toma de decisiones.

Proponer un trabajo conjunto entre profesores del departamento de mecánica y técnicos de la empresa que contribuya al perfeccionamiento del trabajo presentado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abreu, J. *Evaluación de la eficiencia actual del generador de vapor 10 de la Central Termoeléctrica de la Empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMM.2003. 70p.
2. Caballero, B. A; Y. González. *Diagnóstico energético de los Generadores de Vapor de las empresas productoras de níquel en Moa*. Trabajo de Diploma. ISMM 2007. 43 p.
3. Carcallido, M. *Balance energético y exergético del CAI Guatemala*. Trabajo de Diploma. ISMM 1999. 71 p.
4. Colectivo de Autores. *Generadores de Vapor*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1970. 520 p.
5. Conceptos básicos de agua de aporte a calderas.
<http://www.monografias.com/trabajos5/aquacald/aquacald.shtml>. Marzo 2008.
6. Contaminación por ruido. http://www.conam.gob.pe/educamb/cont_ruido.htm. Marzo 2008.
7. Del Valle, R. *Balance energético verificativo de la planta eléctrica de la empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMM 2002. 64 p.
8. Faires, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
9. Fernández, E. *Termodinámica Técnica*. La Habana: Editorial "Félix Varela", 1994. Tomo I. 290 p.
10. Fernández, E. *Utilización del vapor en la industria*. Editorial Científico-Técnica. La Habana, 2001. 138 p.
11. Ficha Técnica de los Generadores de Vapor 6 y 7. Proyecto de Modernización de la Central Termoeléctrica. Moa, 2004. 25 p.
12. Hernández, J. N. *Diagnóstico térmico verificativo de los generadores de vapor insertados en la Central Termoeléctrica de la empresa "Ernesto Ché Guevara"*. Trabajo de Diploma. ISMM 2006. 48 p.

13. Hurtado, F. G. *Estudio de la Influencia en el Medio Ambiente del Sistema de Generación de la Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara y el Sistema de Transmisión Eléctrico Adyacente*. Tesis doctoral. ISMM, Moa. 1999. 120p.
14. Jarrosay, E. *Balance energético de las calderas del hospital "Guillermo Luis Fernández"*. Trabajo de Diploma. ISMM 2000. 63 p.
15. Jiménez, U. *Propuesta para el plegado de las chapas del sistema de mantenimiento de aire regenerativo de las centrales termoeléctricas*. Trabajo de Diploma. ISMM 2001. 72 p.
16. Lahenz, V. *Calculo de la eficiencia en los generadores de vapor*. Trabajo de Diploma. ISMM 2001. 56 p.
17. *Manual de operaciones de la Central Termoeléctrica Empresa "Ernesto Che Guevara"*. Moa, 2005.
18. *Manual de operaciones de la Central Termoeléctrica Empresa "Pedro Sotto Alba"*. Moa, 2006.
19. Muñoz, C. *Aprovechamiento de la biomasa forestal para la producción sostenida de electricidad en el CAI "Argeo Martínez" de Guantánamo*. Trabajo de Diploma. ISMM 2001. 69 p.
20. Muhica, J. *Evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica de la empresa Ernesto Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 62 p.
21. Oliva, R. Luis. *Explotación y materiales constructivos de generadores de vapor*. Ediciones ISPJAM. Santiago de Cuba. 1988. 320 p.
22. Pankratov. G. *Problemas de termotecnia*. Editorial MIR Moscú. URSS, 1987. 235 p.
23. Pereira, M. *Balance de energía de la caldera del comedor del ISMM*. Proyecto de curso. 2001. 33 p.
24. Pérez, Garay. L.: *Generadores de Vapor*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 1972. 447 p.
25. *Proyecto de Modernización de la Central Termoeléctrica*. Moa, 2005. 50 p.

26. Rivera, B. Y; Y. Regueiferos. *Diagnóstico térmico de los Generadores de Vapor de las empresas presupuestadas del municipio Moa*. Trabajo de Diploma. ISMM 2007. 50 p.
27. Rizhkin, Y. V. Centrales termoeléctricas. Primera y segunda parte. Editorial pueblo y educación. Ciudad de La Habana. 1987. 370 p.
28. Rodríguez, Y. *Análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa Ernesto Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 57 p.
29. Steam and electricity generation.
<http://www.schoolscience.co.uk/content/4/chemistry/petroleum/knowl/4/2index.htm?steam.html>, Marzo 2008.
30. Steam Generation. <http://www.segainc.com/energystmgeneration.html>. Marzo 2008.
31. Suárez, L; E. Rodríguez. *Propuesta de selección del esquema térmico principal para la modernización de la planta termoeléctrica de la Empresa Ernesto Che Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM 1999. 75 p.
32. Suárez, V. *Diagnóstico del sistema de generación de vapor de la Central Termoeléctrica perteneciente a la empresa "Comandante René Ramos Latour"*. Trabajo de Diploma. ISMM, 2005. 70 p.
33. Tanquero, N. *Guía metodológica para proyectos del curso de generadores de vapor*. Editorial ISPJAE. La Habana. Cuba. 1997. 120 p.
34. Tuzón, E. Diagnóstico energético del generador de vapor 1 de la empresa Ernesto Che Guevara. Proyecto de Curso. ISMM. 2005. 30 p.
35. Vukalovitch, M. *Propiedades Termodinámicas del agua y el vapor*. Editorial. Revolucionaria 1978. 245 p.



ANEXOS