

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE PETRÓLEO
CURSOS ESPECIALES DE GRADO
ÁREA DE GAS**



**“SIMULACIÓN DE UNA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR
MEDIANTE EL SIMULADOR DE PROCESOS HYSYS v3.2”**

PRESENTADO POR:

REYES VALLEJO, DAGLIMAR CAROLINA

**Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como
requisito parcial para optar al título de:**

INGENIERO DE PETRÓLEO

Barcelona, abril de 2011

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE PETRÓLEO
CURSOS ESPECIALES DE GRADO
ÁREA DE GAS



**“SIMULACIÓN DE UNA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR
MEDIANTE EL SIMULADOR DE PROCESOS HYSYS v3.2”**

ASESOR ACADÉMICO

Ing. Petróleo (M.Sc). JOSÉ RONDÓN

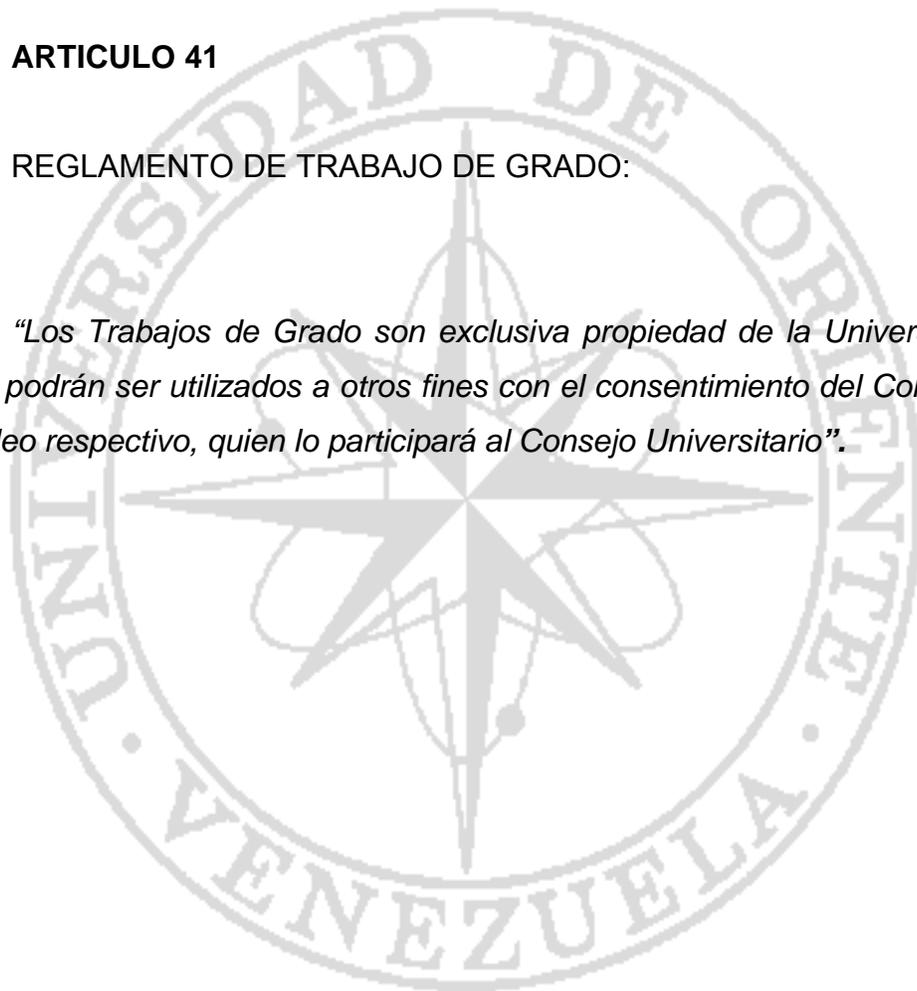
Barcelona, abril de 2011

RESOLUCIÓN

ARTICULO 41

REGLAMENTO DE TRABAJO DE GRADO:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.



DEDICATORIA

El querer esforzarse para que los sueños se hagan realidad llena de mucha satisfacción, sobre todo después de haber pasado por muchos obstáculos a lo largo de este trayecto. El llegar a la meta con deseos inmensos de superación profesional y espiritual nos permite dar paso a nuevos horizontes y continuar así ese camino, siempre con el mejor optimismo y alegría de sentir y hacer lo que deseamos.

Quiero compartir y dedicar mi triunfo a todas aquellas personas que de todo corazón me sirvieron de estímulo, guía y apoyo en cada momento, por cada paso realizado para lograr mi sueño de ser ingeniero.

*A mi **Dios Todopoderoso y Nuestra Señora de Santa Ana**, por ser mis guías espirituales, fieles compañeros y darme la fuerza necesaria para seguir adelante.*

*A mi **Madre Zulma** por ser lo máspreciado y querido en mi vida, mi más grande apoyo, guía, mano amiga, por sus consejos y todo ese amor que me da cada día. A mi **Querida Tía Nelly**, por ser mí estímulo, patrón y apoyo para seguir alcanzando todas las metas propuestas, por todo lo que me ha brindado. Espero que ambas estén orgullosas de mí y Gracias! por estar siempre conmigo. **Las AMO y las QUIERO!***

*A mis hermanos **Juan, Héctor y José** por apoyarme y guiarme a cumplir esta meta con ellas comparto hoy mi alegría, a ti Héctor porque aun espero que termines y logres tu merito personal y para que sepas que en esta vida hay que esforzarse para alcanzar las metas que nos proponemos.*

*A mis primas **Josellyn, Marlitt y Guimaly** por apoyarme y guiarme a cumplir esta meta con ellas comparto también mi alegría, por darme ánimos y apoyo cuando los necesite, a mis primos **Carlos Javier, Juan José** y en especial a **José Miguel y Juan** porque aun espero que comiencen con lo que siempre has querido hacer y que logres su cometido de graduarte. A los tres los Quiero Mucho. A mis Sobrinos **Mauricio y Nerko** quienes con su cariño, inocencia y picardía han llenado mi vida de alegría; los adoro y los quiero mucho.*

*A **Alejandro Marcano** por acompañarme a cumplir este sueño y ser un apoyo incondicional en todo momento además de ser gran amigo y compañero.*

Daglimar Carolina Reyes Vallejo

AGRADECIMIENTOS

*A mi asesor académico el Ingeniero **José Rondón**, por su valiosa colaboración, sus enseñanzas y también por toda su amabilidad. Gracias.*

*Al Ingeniero **Raúl Guarino** por haberme dado la orientación necesaria para el desarrollo de este trabajo.*

*En especial a **Graciela Tachinamo y Daniela Sanabria** por compartir sus conocimientos conmigo y brindarme su amistad durante la realización de este trabajo y por soportarme como soy.*

*A mi gente de Santa Ana (**Jaisy, Gilsy, Yolanda**), que siempre han querido lo mejor para mí y además verme como una profesional.*

*A todos mis compañeros y amigos les agradezco de corazón que me dieron su apoyo incondicional para la realización de este trabajo. **Gracias.***

Daglimar Carolina Reyes Vallejo

RESUMEN

La presente investigación se basó en el estudio del funcionamiento de una caldera recuperadora de calor a través de la herramienta de simulación de procesos Hysys v3.2. Dicha caldera es empleada en un ciclo combinado de cogeneración eléctrica; para estos efectos se describió principalmente su funcionamiento y se modeló el sistema seleccionado, empleando los datos de diseño para un flujo de gas de escape de 487000 kg/h y una alimentación de agua de 90000 kg/h. Posteriormente se determinó la eficiencia de la caldera en el ciclo combinado la cual fue de 40,84 % y la eficiencia térmica de la caldera como la carga de calor transferida desde la corriente de gas proveniente de la cámara de combustión hacia la corriente de agua arrojó un valor de 86,5%; lo que indica que la caldera recuperadora de calor es de gran eficiencia, en vista de que se aprovecha el 86,5% de la energía en forma de calor, que se puede transferir desde la corriente de gases de la turbina. Además, se realizaron dos casos de estudio mediante Hysys, donde se estudió el comportamiento de la caldera en cuanto a la eficiencia y el flujo de calor, bajo la variación de la corriente de agua en la alimentación y la temperatura de los gases exhaustos.

TABLA DE CONTENIDO

RESOLUCIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN.....	vi
TABLA DE CONTENIDO	vii
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
CAPITULO II.....	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 COGENERACIÓN: Concepto y ventajas.....	7
2.2. Clasificación de los procesos de cogeneración.....	11
2.2.1 En base a la producción de electricidad y calor.....	11
2.2.1.2 Sistemas superiores de cogeneración (Topping cycles)	11
2.2.2 En base al motor.....	13
2.3 Principales equipos que constituyen un sistema de cogeneración.....	19
2.3.1 Turbina De Gas	19
2.3.2 Turbina De Vapor	23
2.3.3 Intercambiadores De Calor.....	26
2.3.3.1 Tipos de intercambiadores de calor	26
2.4 Ciclos utilizados en sistemas de cogeneración	29
2.4.1 Ciclo Rankine.....	29

2.4.2 Ciclo Brayton	30
2.4.3 Ciclo combinado	31
2.5 Caldera de recuperación de calor	32
2.6 Principales elementos que conforman la caldera recuperadora de calor.....	33
2.6.1 Intercambiadores de calor	33
2.6.2 Reactor o cámara de combustión	34
2.6.2.1 Reactor Gibbs	35
2.6.3 Mezcladores	35
2.6.4 Divisores	36
2.6.5 Separadores	36
2.6.6 Reciclo	36
2.7 Eficiencia térmica de la caldera recuperadora.....	37
2.8 Transferencia de calor.....	38
2.8.1 Mecanismos De Transferencia De Calor	38
2.9 Leyes de la termodinámica.....	40
2.9.1 Primera ley de la termodinámica.	40
2.9.2 Segunda ley de la termodinámica.....	41
2.9.3 Tercera ley de la termodinámica.....	41
2.10 Simulación de procesos	42
2.10.1 Simulador.....	43
2.10.2 Hysys Process	43
2.11 Estimado de costos	44
2.11.1 Estimación de costos clase V.	44
2.11.2 Estimación de costos clase IV.....	44
2.11.3 Estimación de costos clase III.....	45
2.11.4 Estimación de costos clase II.....	45
2.11.5 Estimación de costos clase I.....	46
2.12 Análisis de costo	46

2.13. Inversiones	48
CAPITULO III	50
DESARROLLO DEL PROYECTO	50
3.1. Tipo de investigación.....	50
3.2. Búsqueda de la información	50
3.3. Análisis técnico.....	51
3.4. Funcionamiento de la caldera recuperadora de calor	52
3.5. Simulación de la caldera recuperadora de calor	52
3.5.1. Premisas consideradas para realizar la simulación de la caldera recuperadora de calor.....	54
3.5.1.1 Composición, temperatura y presión de los gases de alimentación.	54
3.5.1.2. Intercambiadores de calor de tubos y coraza.....	54
3.5.1.3 Reacciones químicas posibles en la cámara de combustión.....	55
3.5.1.4. Separador bifásico.	56
3.5.1.5. Consideraciones adicionales.....	57
3.5.2. Datos empleados para realizar la simulación de la caldera recuperadora de calor.....	58
3.6. Identificación de algunos parámetros que afectan la eficiencia energética de la caldera	60
3.6.1. Determinación de la eficiencia térmica del ciclo combinado	60
3.6.1.1. Determinación del flujo de gas quemado en la turbina.....	61
3.6.1.2. Potencia generada por la turbina.	64
3.6.1.3. Determinación de la eficiencia de la caldera recuperadora de calor en el ciclo combinado	66
3.6.2. Determinación de la eficiencia térmica de la caldera recuperadora.	67

3.6.3. Determinación de los parámetros que afectan la eficiencia de la caldera.....	68
3.7. Estimación de los costos aplicados a la caldera recuperadora de calor.....	69
CAPITULO IV.....	74
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	74
4.1. Funcionamiento de un sistema de recuperación de calor mediante una caldera.....	74
4.2. Simulación de la caldera de recuperación de calor	76
4.3. Parámetros que afectan la eficiencia de la caldera recuperadora de calor	82
4.3.1. Eficiencia termica de la caldera recuperadora de calor en ciclo combinado.	82
4.3.2. Eficiencia térmica de la caldera recuperadora	82
4.3.3. Parámetros que afectan la eficiencia térmica de la caldera recuperadora de calor.....	83
4.3.4. Estudio de la como varia la eficiencia en función de la corriente de agua en la alimentación.....	84
4.3.5. Influencia de la composición y temperatura de los gases de escape provenientes de la turbina en la eficiencia de la caldera.....	87
4.4 Estimación de costos de los equipos aplicados a la caldera recuperadora de calor	87
4.5. CONCLUSIONES.....	89
4.6. RECOMENDACIONES.	90
BIBLIOGRAFÍA.....	91
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	93

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El gas natural es un recurso energético abundante y de bajo impacto ambiental en comparación con otros combustibles utilizados como fuente de energía, constituye un recurso muy importante como materia prima para el sector industrial, así como un producto final de gran utilidad para los sectores doméstico y comercial. Cuando se compra combustible para una caldera en forma de gas natural, petróleo, etc., realmente se está comprando energía. Dicha energía es introducida a la caldera mediante el proceso de combustión en forma de calor. El objetivo de una caldera es convertir este calor en la mayor cantidad de vapor posible. Todo calor perdido es realmente una pérdida de la energía que se ha comprado. Hay solo tres destinos para la energía que entra a la caldera: puede salir en forma de vapor producido, se puede perder al ambiente en forma de radiación de calor o puede ser perdido a la atmósfera en forma de un componente de la chimenea.

Desde que los humanos alcanzaron las primeras nociones del concepto de calor, y su conexión con la habilidad de realizar trabajo, surgió la idea de hacer uso de los sistemas térmicos, por lo que estos sistemas han jugado un papel importante en el proceso de producción desde el inicio de la revolución industrial siendo las máquinas de vapor los primeros sistemas térmicos que utilizaron el calor para producir trabajo. Desde entonces los avances tecnológicos del hombre han dependido en gran medida de su capacidad

para producir electricidad, siendo esta la actividad donde se consumen la mayor cantidad de recursos energéticos.

Es innegable la enorme importancia que tiene el equipo de generación de vapor en una central termoeléctrica. De hecho y como veremos posteriormente, es en la caldera donde se presentan las mayores pérdidas de “energía utilizable”, dentro del proceso global de transformación de la energía química presente en el combustible en la energía eléctrica suministrada a la red. El vapor de agua, es por naturaleza, el mejor trasmisor de energía calórico, por concepto de flujos controlables, y de muy bajo impacto ambiental, convirtiéndolo así, en uno de los mejores y económicos medios de transmisión de energía.

Para aprovechar la energía que se desecha en ciertos procesos podemos aplicar sistemas de cogeneración. Existen diversas opciones tecnológicas donde es posible tener cogeneración: Un sistema de caldera con turbina de vapor a extracción-condensación, motores de combustión interna cuyos gases de escape se enfrían para producir calor en forma de vapor de proceso, ciclos combinados con cogeneración, etc. El tipo de cogeneración en el que se produce electricidad y calor es ya reconocido como una tecnología eficiente y rentable cuya principal ventaja, con respecto a la generación convencional de energía, es su recuperación térmica adicional. Por esta razón, las plantas de cogeneración surgen como una opción altamente recomendable para la conservación de recursos.

La cogeneración data desde principios del siglo pasado, ha sido utilizada en ingenios azucareros, plantas de papel, siderúrgicas y otros procesos. El propósito principal consistía en asegurar el abastecimiento de energía eléctrica, que en esos años era insuficiente. Al extenderse las redes

eléctricas, resultó más barato abastecerse de electricidad directamente de la red pública y los proyectos de cogeneración fueron abandonados. Sin embargo, el costo actual de la energía eléctrica, la problemática ambiental y el desarrollo tecnológico han logrado que los procesos de cogeneración se vuelvan rentables.

- ❖ Greco S. María V. en su trabajo de grado presentado ante la universidad de oriente “**Evaluación de la factibilidad de un sistema de cogeneración de vapor y energía eléctrica para una planta de amoniaco**” estudio un sistema de cogeneración como alternativa que permitiría a la misma tener independencia y seguridad del suministro eléctrico, así como obtener una disminución en los costos de operación. Para lograr esto diseño los principales equipos que integran un sistema de cogeneración de vapor y energía eléctrica, para este proyecto los equipos principales fueron una turbina de gas y un intercambiador de calor, verificando su funcionamiento mediante el uso del simulador de procesos Hysys, llego a las conclusiones de que mediante el uso de dicho simulador se comprueba la confiabilidad del sistema propuesto y el proyecto es factible presentando una ganancia de 12.083.209 US\$ y una tasa interna de retorno anual de la inversión de un 33%.^[1]

- ❖ Sosa y Maspoli en la universidad de la plata estudiaron: “**La factibilidad económica de sistemas de cogeneración con turbinas de gas**” el estudio se baso en el aumento de la eficiencia energética en una planta industrial mediante la aplicación de un sistema de cogeneración con turbina de gas y caldera de recuperación que sustituya un sistema convencional de vapor poco eficiente obteniendo como conclusiones que el sistema de cogeneración con turbina de gas

y caldera de recuperación si bien tiene un rendimiento térmico cuantitativo que puede ser inferior al sistema con turbinas de vapor es termodinámicamente superior obteniéndose cantidades sustancialmente mayores de trabajo mecánico. Cuando los valores tarifarios de energía y del combustible son bajos, los beneficios económicos de un proyecto de cogeneración pueden no ser suficientes para brindar un retorno a la inversión, generalmente de montos muy elevados. El incremento del costo de la electricidad beneficia la rentabilidad de los proyectos de cogeneración.^[2]

Estos trabajos servirán de base para la comprensión de sistemas de cogeneración lo cual es aplicable al proyecto de caldera recuperadora de vapor a tratar en esta monografía.

1.2 Planteamiento del problema

Para la producción de electricidad el hombre ha empleado plantas termoeléctricas tradicionales. Recientemente, se han incorporado métodos que buscan incrementar la eficiencia de la generación combinando las turbinas de gas (Ciclo Brayton) con una caldera recuperadora de vapor y una turbina de vapor (ciclo Rankine) para la producción de energía eléctrica. Para unir eficientemente estos ciclos, se han tenido que desarrollar nuevos generadores de vapor, surgiendo así las calderas recuperadoras de calor.

Si en una planta de generación se toma por un lado energía de la red y por otro lado se utiliza calor producido en una caldera, se podrá obtener grandes ahorros anuales reemplazando ambas fuentes por un sistema único de cogeneración. El vapor que se produce en estos procesos puede

emplearse para calefacción, refrigeración (con enfriadores por absorción) o para generar energía adicional (turbina de vapor en Ciclo Combinado).

Las calderas de recuperación de calor son un componente esencial en el diseño de las plantas de potencia de ciclo combinado. La optimización de sus parámetros de operación permite maximizar el trabajo que se obtendrá en el ciclo de vapor, y con ello mejorar la eficiencia de la generación. Estas calderas son esencialmente un sistema de intercambio de calor a contracorriente, consistiendo en una serie de sobrecalentadores, evaporadores y economizadores ordenados desde la entrada del gas hasta su salida, de forma que sea máxima la recuperación de calor y se suministre vapor a las condiciones de temperatura y presión que requiera la turbina de vapor.

En vista de la necesidad existente de ahorrar y aprovechar la energía, se busca mediante esta investigación desarrollar los aspectos de mayor interés, que se encuentren involucrados con el funcionamiento de una caldera recuperadora de calor, empleando el simulador de procesos HYSYS, además de estudiar los factores que afecten la eficiencia del sistema, y la estimación de los costos que implica la instalación de estos en plantas existentes.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General.

Simular una caldera recuperadora de calor mediante el simulador de procesos Hysys.

1.3.2 Objetivos Específicos.

1. Describir el funcionamiento de un sistema de recuperación de calor mediante una caldera.
2. Simular los parámetros operacionales de una caldera de recuperación de calor.
3. Identificar algunos parámetros que afectan la eficiencia energética de la caldera.
4. Realizar la estimación de los costos aplicados a la caldera de recuperación de calor.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 COGENERACIÓN: Concepto y ventajas

Los sistemas de cogeneración son sistemas de producción conjunta de electricidad (o energía mecánica) y de energía térmica útil (calor) partiendo de un único combustible, es decir, es la producción eficiente de dos formas de energía útil a partir del mismo recurso combustible, mediante la utilización de la energía de escape o de desecho de un sistema de producción como insumo para el otro. El gas natural es la energía primaria más utilizada para el funcionamiento de las centrales de cogeneración de electricidad calor, las cuales funcionan con turbinas o motores de gas. No obstante, también se pueden utilizar fuentes de energía renovables y residuos como biomasa o residuos que se incineran.^[3]

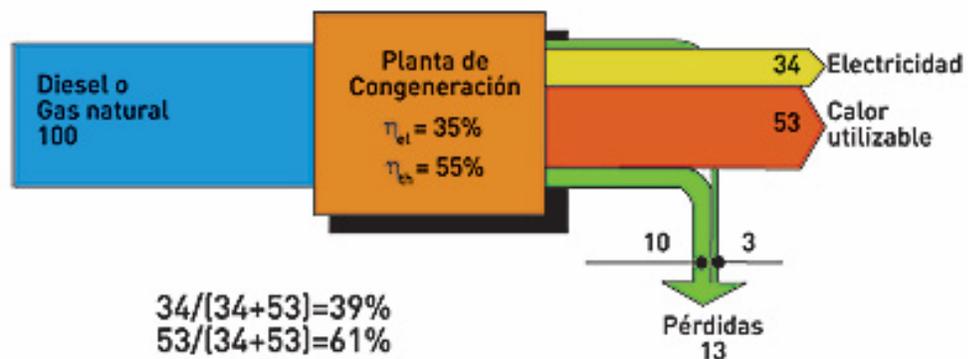


Figura 1. Esquema de un sistema de cogeneración

La gran ventaja de la cogeneración es la eficiencia energética que se puede obtener. Por eficiencia energética se entiende la energía útil que se

obtiene sobre la energía entregada por el combustible utilizado. La cogeneración de alta eficiencia, aporta los siguientes beneficios ^[3]:

- Disminución de los consumos de energía primaria.
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Disminuye las pérdidas de la red eléctrica, especialmente porque las centrales de cogeneración se suelen situar próximas a los lugares de consumo.
- Aumento de la garantía de potencia y calidad del servicio eléctrico.
- Aumento de la competitividad industrial y de la competencia en el sistema eléctrico.
- Promoción de pequeñas y medianas empresas de construcción y operación de plantas de cogeneración.
- Motivación por la investigación y desarrollo de sistemas energéticos eficientes.
- Se adapta bien a las zonas aisladas o ultra periféricas.

En el siguiente esquema se presentan las ventajas que presenta un sistema de cogeneración respecto a los sistemas convencionales de generación energética:

Tecnología	Energía Eléctrica	<p>Una central de cogeneración representa, de hecho, disponer de una segunda fuente de energía eléctrica, además de la red, de alta confiabilidad.</p> <p>Contribuye a la estabilización de la tensión en la red (dado que mejora el equilibrio al reducir la intensidad eléctrica circulante desde las subestaciones de distribución hasta los consumidores) y en consecuencia, reduce las pérdidas de energía en la red.</p> <p>Las actuales tecnologías de control permiten asegurar una óptima calidad de la energía eléctrica generada, tanto en tensión como en frecuencia, superando en muchos casos a la de la propia red, inevitablemente influenciadas por armónicas y desequilibrios de carga originadas por industrias vecinas.</p>
Tecnología	Energía Térmica	<p>Normalmente implica una renovación del parque de calderas de la fábrica, que puede eliminar sus equipos más obsoletos y dejar los más nuevos y eficientes para situaciones de emergencia o para complemento de los equipos de la central.</p> <p>Los equipos térmicos de las centrales de cogeneración son, de hecho, muy convencionales. En muchos casos son equipos que no disponen de un proceso de combustión, lo que prácticamente elimina su mantenimiento y permite que su disponibilidad sea muy elevada.</p>
Tecnología	Operación y Mantenimiento	<p>Existe un mantenimiento muy especializado, que es el que debe realizarse en determinadas áreas de los equipos principales: turbina de gas, turbina de vapor y motores recíprocos. Este tipo de mantenimiento debe de ser contratado (en muchas ocasiones al mismo fabricante del equipo), el cual tiene un costo muy elevado.</p>

		<p>El resto de equipos (calderas, equipos eléctricos, etc.), no requieren de atenciones especiales, sus costos de operación son bajos. Estas centrales son completamente automáticas y requieren de muy poca atención. El mismo personal que lleva las calderas puede ocuparse de ellas. Es conveniente que exista un técnico encargado de la planta que la conozca completamente, que se ocupe de su supervisión y que pueda comunicarse con los fabricantes de los equipos y los encargados de mantenimiento para eventuales intervenciones.</p>
Tecnología	Combustibles Empleados	<p>El gas natural dentro de la gama de combustibles es el más conveniente, el que menos contamina y el que permite disponer de sistemas de generación más modernos y eficientes. Asegura también la viabilidad de su operación al ser un combustible muy limpio.</p>
Tecnología	Seguridad	<p>Las plantas de cogeneración disponen de modernos sistemas de control y seguridad que impiden la aparición de accidentes graves. De todas formas, es conveniente la contratación de seguros de accidentes y de incumplimiento para cubrir estas eventualidades.</p>
Tecnología	Vida del proyecto	<p>Las plantas de cogeneración, adecuadamente mantenidas y operadas pueden estar operativas por periodos de entre 20 y 30 años.</p>
Economía	Costos Energéticos	<p>En general una planta de cogeneración producirá una energía que será siempre más económica que la obtenida de la red eléctrica. La razón de ello está que su consumo específico será siempre inferior al de una planta de energía convencional que no pueda sacar provecho de sus efluentes térmicos (es decir, la generada por las grandes centrales termoeléctricas). El mayor o menor ahorro dependerá, en cualquier caso, de políticas de subsidio a las tarifas de la energía eléctrica que pueda tomar el Estado en determinadas</p>

		circunstancias.
Administración de la Energía	Control Operativo	La existencia de una Planta de Servicios Auxiliares implica tener un control operativo detallado de los consumos de energía eléctrica y térmica del proceso industrial. Eso es siempre positivo, pues permite reconocer la aparición de ineficiencias dentro del mismo proceso industrial, que de otra forma posiblemente hubieran pasado desapercibidos.
Ecología	Impacto Ambiental	La cogeneración reduce la emisión de contaminantes, debido principalmente a que es menor la cantidad de combustible que consume para producir la misma cantidad de energía útil, además los sistemas de cogeneración utilizan tecnologías más avanzadas y combustibles más limpios como el gas natural.

2.2. Clasificación de los procesos de cogeneración.

2.2.1 En base a la producción de electricidad y calor.

Los sistemas de cogeneración pueden clasificarse de acuerdo con el orden de producción de electricidad y energía térmica en:

2.2.1.2 Sistemas superiores de cogeneración (Topping cycles)

Son los más frecuentes, son aquellos en los que una fuente de energía primaria (como el gas natural, diesel, carbón u otro combustible similar) se utiliza directamente para la generación de energía eléctrica en el primer escalón. A partir de la energía química del combustible se produce un fluido caliente que se destina para generar la energía mecánica y la energía

térmica resultante, el denominado calor residual como vapor o gases calientes, es suministrada a los procesos industriales ya sea para secado, cocimiento o calentamiento, que constituyen el segundo escalón. Este tipo de sistemas se utiliza principalmente en la industria textil, petrolera, celulosa y papel, cervecera, alimenticia, azucarera, entre otras, donde sus requerimientos de calor son moderados o bajos con temperaturas de 250 °C a 600 °C.

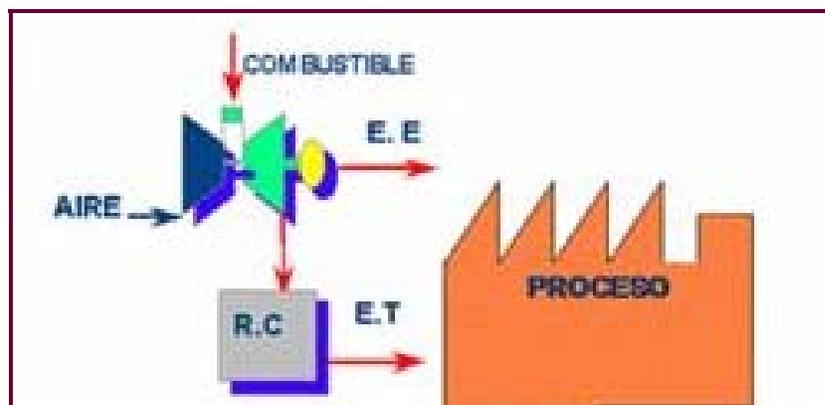


Figura 2. Sistema superior con turbina de gas.

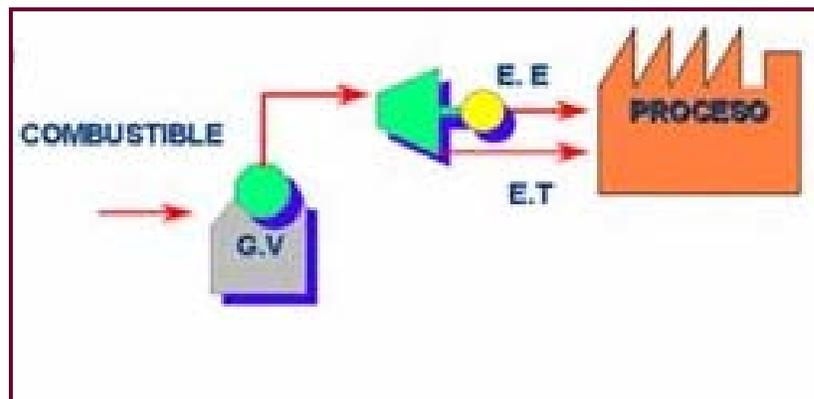


Figura 3. Sistema superior con turbina de vapor

A- Sistemas inferiores de cogeneración (Bottoming cycles)

La energía primaria se utiliza directamente para satisfacer los requerimientos térmicos del proceso del primer escalón y la energía térmica

residual o de desecho, se usará para la generación de energía eléctrica en el segundo escalón. Los ciclos inferiores están asociados con procesos industriales en los que se presentan altas temperaturas como el cemento, la siderúrgica, vidriera y química. En tales procesos resultan calores residuales del orden de 900 °C que pueden ser utilizados para la producción de vapor y electricidad.

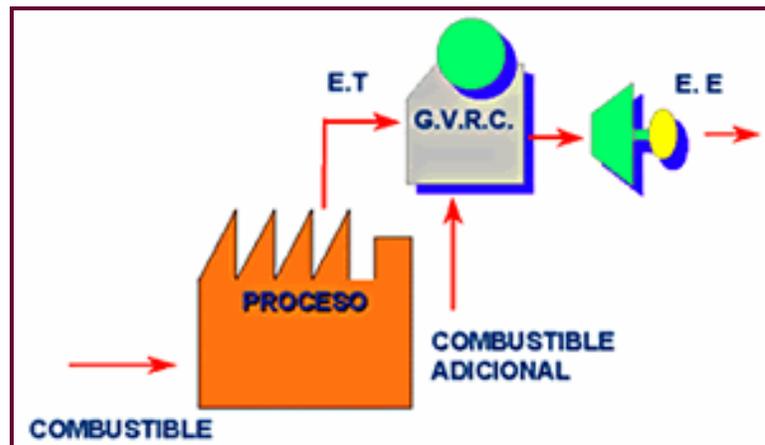


Figura 4. Sistema inferior con turbina de vapor

2.2.2 En base al motor.

Generalmente los sistemas de cogeneración se clasifican de acuerdo al motor empleado para generar la energía eléctrica en:

A- 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 4 a 1 o mayor.^[3]

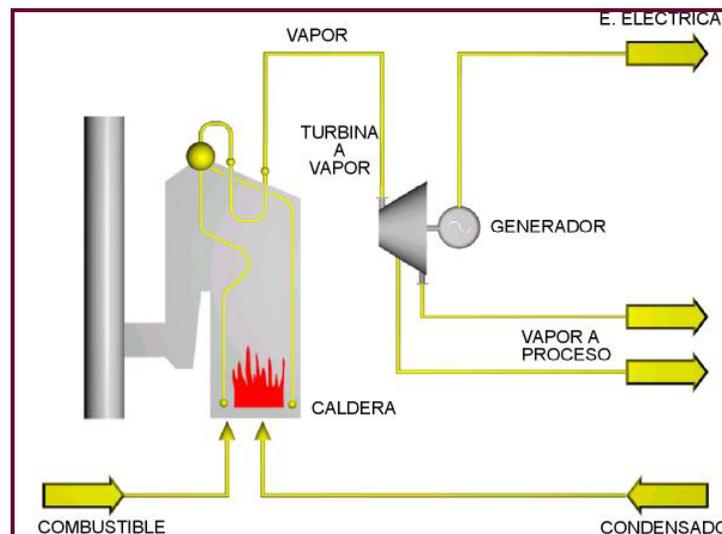


Figura 5. Sistema de cogeneración con turbina de vapor.

B- 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.

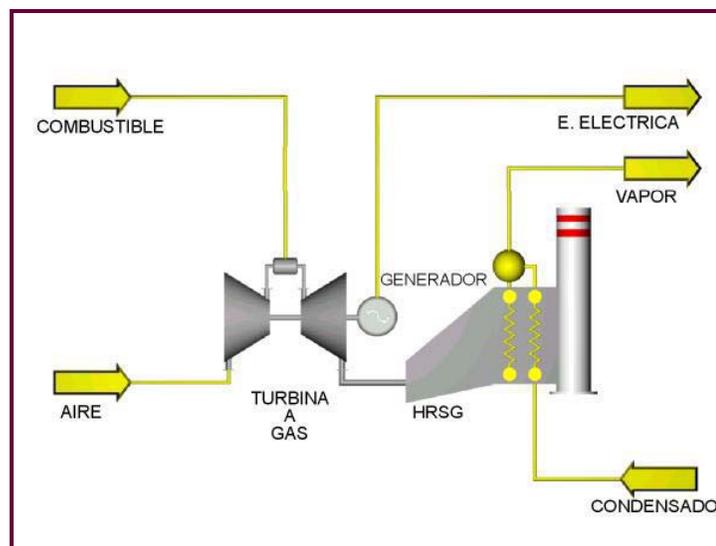


Figura 6. Sistema de cogeneración con turbina de gas.

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 2.^[3]

C- 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 electricidad/calor es mayor a 6.^[3]

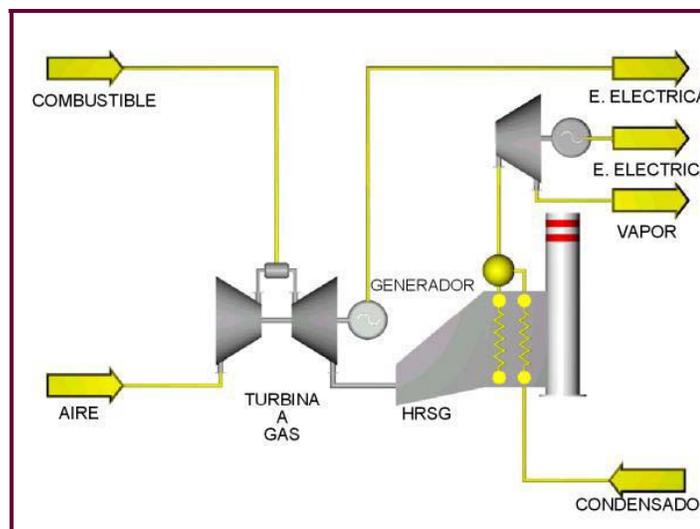


Figura 7. Sistema de cogeneración con ciclo combinado.

D- 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 los gases residuales se puede producir vapor de baja presión (de 10 a 15 kg/cm²) o agua caliente de 80 a 100 °C.^[3]

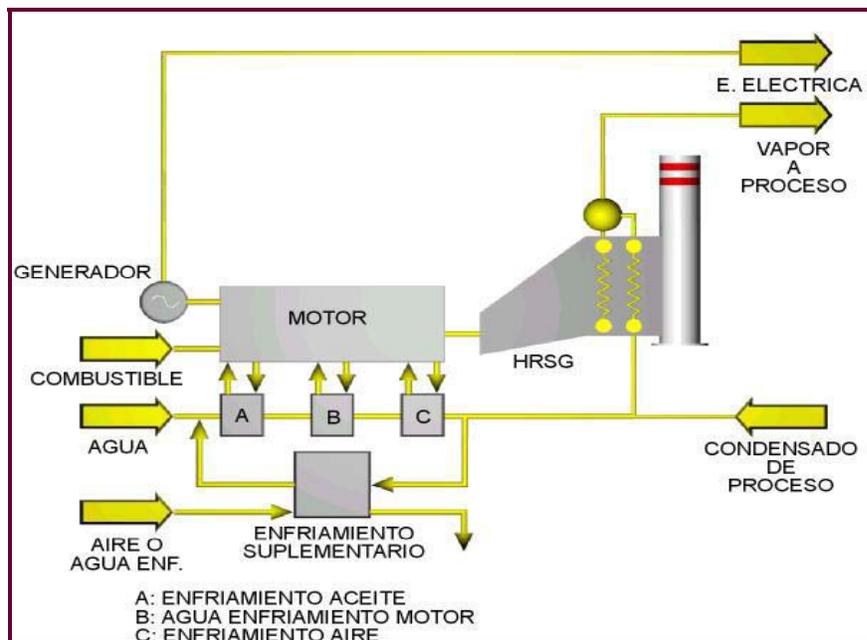


Figura 8. Sistema de cogeneración con motor alternativo.

E- Cogeneración con microturbinas.

Las microturbinas difieren sustancialmente de la mayoría de los métodos tradicionales de generación de energía eléctrica usados en la industria, con emisiones sumamente bajas, y que resultan particularmente útiles en muchísimas aplicaciones industriales y comerciales. Una microturbina es esencialmente una planta de poder miniatura, autocontenida, que genera energía eléctrica y calorífica en rangos desde 30kW hasta 1.2MW en paquetes múltiples (multipacks). Tiene una sola parte móvil, sin

cajas de engranes, bombas u otros subsistemas, y no utiliza lubricantes, aceites o líquidos enfriantes.

Estos equipos pueden usar varios tipos de combustibles tanto líquidos como gaseosos, incluyendo gas amargo de pozos petroleros con un contenido amargo de hasta 7%, gas metano, gases de bajo poder calorífico (tan bajo como 350 Btu) emanados de digestores de rellenos sanitarios.

Uno de los usos más prácticos y eficientes de la microturbina está en la cogeneración, utilizando ambas formas de energía simultáneamente, energía eléctrica y calor, implica precisamente maximizar el uso del combustible con eficiencias del sistema entre 70-80%. Empresas comerciales, pequeñas industrias, hoteles, restaurantes, clínicas, centros de salud, y una multitud de otras aplicaciones pueden combinar sus necesidades de electricidad y energía térmica mediante el uso de microturbinas como sistemas de cogeneración que anteriormente era difícil de lograr.^[3]

Tabla 1. Eficiencias de diferentes tecnologías de cogeneración

Tecnología de cogeneración	Eficiencia Eléctrica (%)	Eficiencia Térmica (%)
Turbina de vapor	33	52
Turbina de gas sin post-combustión.	38	47
Turbina de gas con post-combustión.	38	42
Ciclo combinado	57	33
Motor recíprocante (aprovechando calor de gases de combustión y calor del sistema de enfriamiento)	40	30
Motor recíprocante (aprovechando calor de gases de combustión y calor del sistema de enfriamiento)	40	20
Microturbina	30	50

2.3 Principales equipos que constituyen un sistema de cogeneración.

Los elementos principales de un sistema de cogeneración son los siguientes:

- ✓ **Elemento primo-motor (Turbinas de vapor, Turbinas de gas y Motores de combustión interna).** Este se encarga de convertir la energía del combustible en energía mecánica, que es aprovechada para generar energía eléctrica.
- ✓ **Elemento de recuperación de calor:** Caldera de recuperación, Intercambiador de calor, etc. Su función es recuperar el calor de los gases calientes de la combustión de la unidad primo-motor, para producir vapor o fluidos calientes.
- ✓ **Sistemas auxiliares:** Bombas, Compresores, Tratamientos de Agua, etc.
Estos son los equipos secundarios con los que debe contar el sistema de cogeneración para su óptimo funcionamiento.
- ✓ **Sistema de control:** Necesario para la automatización de la operación del sistema de cogeneración optimizándolo y dándole seguridad.

2.3.1 Turbina De Gas

El funcionamiento de un sistema de cogeneración con turbina a gas, permite transformar la energía contenida en el combustible, en energía mecánica a través de una Turbina a Gas, usualmente a través del ciclo conocido como ciclo Brayton, la que a su vez es transformada mediante un generador eléctrico en energía eléctrica. Hoy en día esta es una de las tecnologías más utilizadas para cogenerar, por su alta eficiencia y el amplio rango de tamaños que pueden ser utilizados, que además requieren una inversión inicial relativamente baja.

La generación eléctrica constituye entre un 25 y 35% de la energía suministrada por el combustible, según cada turbina. Entre un 75 y 65% de esta energía sale por los gases de combustión de la turbina, que después de su expansión se encuentra a temperaturas entre 400 y 600°C. De aproximadamente el 70 %, perdido a la atmósfera un 50 % de la energía entregada por el combustible puede ser “recuperado” de los productos de combustión, para ser utilizado en el proceso. Esta energía es posible utilizarla a través de equipos de recuperación de calor. Debido a la alta temperatura este calor se puede transformar en vapor a través de una caldera de recuperación. A diferencia de los motores no existe entrega de calor como agua caliente.

Las calderas recuperadoras de calor usadas para generar vapor a partir de la energía de los gases de escape de los motores y turbinas a gas tienen usualmente eficiencias entre el 60% y 70%. En algunas aplicaciones industriales también es posible el uso directo de los gases de escape de estos equipos en procesos de calentamiento y secado

Comúnmente se habla de las turbinas a gas por separado de las turbinas ya que, aunque funcionan con sustancias en estado gaseoso, sus características de diseño son diferentes, y, cuando en estos términos se habla de gases, no se espera un posible cambio de fase, en cambio cuando se habla de vapores sí. El sistema formado por la turbina de gas consta de un compresor, una cámara de combustión y un generador eléctrico conectado a una turbina. Generalmente el compresor, la cámara de combustión y la turbina forman un conjunto compacto y el generador eléctrico va separado.^[4]

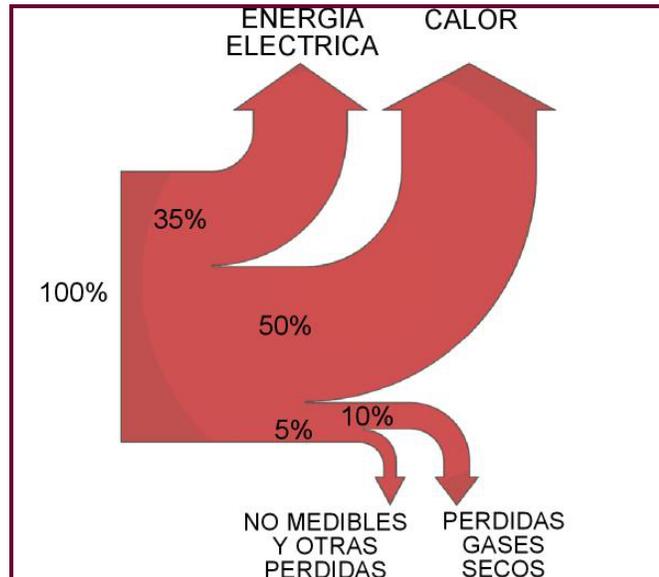


Figura 9. Diagrama Sankey para sistema de cogeneración con turbina a gas.

a.) Compresor.

Es una máquina motora, que trabaja entregándole energía a un fluido compresible. Ésta energía es adquirida por el fluido en forma de energía cinética y presión (energía de flujo). La presión del fluido se eleva reduciendo el volumen específico del mismo durante su paso a través del compresor. El compresor de la turbina de gas es un turbocompresor de tipo radial o axial; algunas turbinas de gas con más de un compresor pueden tener los primeros del tipo axial y los otros radiales. El compresor utilizado en el motor de turbina de gas no es distinto del empleado para otros usos.

b.) La cámara de combustión.

En la cámara de combustión se lleva a cabo, como función principal, la combustión del combustible con aire como comburente. La entrada de

combustible se realiza mediante una serie de válvulas de inyección. La temperatura que se alcanzaría con la cantidad teórica de aire sería muy elevada, con lo cual se dañarían los alabes de la turbina y en general toda la zona de entrada a la misma.

Para que no alcancen temperaturas tan elevadas este tipo de turbinas utilizan un gran exceso de aire. La cantidad total de aire no se mezcla directamente con el combustible, puesto que daría lugar a una combustión inestable.

c.) Turbina.

La turbina propiamente dicha del motor de turbina de gas es de tipo axial, aunque posee algunas características propias que la diferencian de la turbina de vapor. La turbina de gas se caracteriza por:

- Presiones de utilización más bajas. Esto redundaría en unas paredes más delgadas y piezas menos pesadas.
- Temperaturas más elevadas. Debe tenerse especial cuidado con los materiales que estén expuestos a las zonas de mayor temperatura, en estas zonas se han de utilizar aleaciones especiales de gran calidad, que sean muy resistentes a la temperatura.
- Mayor facilidad de montaje y fabricación, y por consiguiente, mejor precio.^[4]

d.) Generador eléctrico

Es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos, llamados polos, terminales o bornes. Los

generadores eléctricos son máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estator). Si mecánicamente se produce un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se generara una fuerza electromotriz (F.E.M.). Una característica de cada generador es su fuerza electromotriz (F.E.M.), definida como el trabajo que el generador realiza para pasar la unidad de carga positiva del polo negativo al positivo por el interior del generador.

Se clasifican en dos tipos fundamentales: primarios y secundarios. Son generadores primarios los que convierten en energía eléctrica. La energía de otra naturaleza que reciben o de la que disponen inicialmente, mientras que los secundarios entregan una parte de la energía eléctrica que han recibido previamente.

2.3.2 Turbina De Vapor

Los sistemas de Cogeneración con turbina a vapor son ampliamente utilizados en el mundo, y van desde 1 MW hasta más de 100 MW de potencia eléctrica. Estos sistemas fueron ampliamente utilizados en la industria de la celulosa y papel, la industria azucarera, las refinerías de petróleo y en general en la industria pesada. En la actualidad han ido perdiendo terreno frente a otros sistemas de cogeneración más modernos, salvo en procesos como el de la celulosa donde se cuenta con combustibles que son subproductos de los procesos forestales, los que son aprovechados para la cogeneración.

Un sistema de cogeneración con turbina vapor comprende una fuente de calor, típicamente una caldera, la que transforma la energía primaria del combustible en vapor, este a su vez mueve una turbina conectada a un generador eléctrico, este ciclo se conoce como ciclo Rankine. Como productos de la turbina se obtienen electricidad y vapor de baja presión cuya energía es aprovechada en cualquier proceso que requiera calor y devuelta al sistema como condensado.

La variedad de turbinas de vapor es muy amplia: a condensación, a contrapresión, con o sin extracciones de vapor; existen diseños estándar y diseños especiales (fabricados a pedido). En plantas pequeñas normalmente se usa vapor saturado y la turbina de vapor sólo tiene una etapa de expansión. En plantas de mayor tamaño se usa vapor sobrecalentado, el cual se expande en varias etapas. Las extracciones de vapor pueden efectuarse a distintas presiones, según sean los requerimientos

La fuente de calor de la caldera puede ser un combustible tradicional, biomasa, o calor residual de proceso; en este último caso se usa una caldera recuperadora de calor.

Las calderas que queman combustible o biomasa tienen eficiencias entre 70 a un 80%.

La eficiencia de las calderas recuperadoras varían aprox. entre 60% y 80%, dependiendo de la temperatura del calor residual y de su composición. La razón Potencia Calor es relativamente baja con eficiencias eléctricas que no superan el 20%.

La eficiencia eléctrica del sistema depende de la presión del vapor de baja presión. Para una presión de vapor de 8 bar la eficiencia eléctrica puede variar entre 10 y 15%.

En general, la eficiencia global (eléctrica más térmica) de este tipo de plantas de cogeneración es inferior a la de las plantas con motor o turbina a gas, lográndose eficiencias globales entre un 40% y 70%.

Los costos de inversión son también superiores a los de las plantas de cogeneración a base de motores o turbinas a gas (de 2000 a 3000 US\$/kW).

Por el bajo rendimiento eléctrico y por los altos costos de inversión, estos sistemas de cogeneración sólo son utilizados con combustibles muy económicos (biomasa) o calores residuales, (caso de las centrales de ciclo combinado).

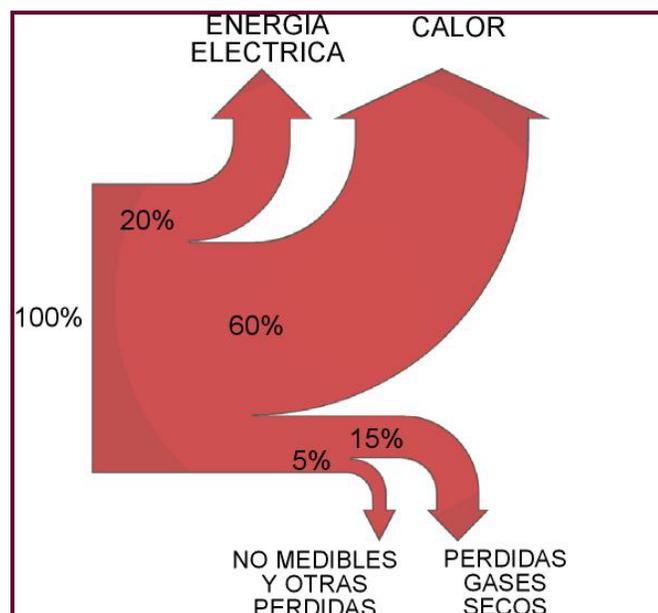


Figura 10. Diagrama de Sankey para cogeneración con turbina a vapor.

2.3.3 Intercambiadores De Calor

Un intercambiador de calor se define como un dispositivo mecánico o equipo diseñados para transferir calor entre dos o más fluidos que fluyen a través del equipo sin mezclarse. La función básica de los intercambiadores de calor es la transferencia de energía térmica entre dos o más fluidos a diferente temperatura. El calor fluye como resultado del gradiente de temperatura.

2.3.3.1 Tipos de intercambiadores de calor

A- Intercambiador de calor de doble tubo

Es el tipo más sencillo de intercambiador de calor. Está constituido por dos tubos concéntricos de diámetros diferentes. Uno de los fluidos fluye por el tubo de menor diámetro y el otro fluido fluye por el espacio anular entre los dos tubos. En este tipo de intercambiador son posibles dos configuraciones en cuanto a la dirección del flujo de los fluidos: contraflujo y flujo paralelo. En la configuración en flujo paralelo los dos fluidos entran por el mismo extremo y fluyen en el mismo sentido. En la configuración en contraflujo los fluidos entran por los extremos opuestos y fluyen en sentidos opuestos.

En un intercambiador de calor en flujo paralelo la temperatura de salida del fluido frío nunca puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente.

En un intercambiador de calor en contraflujo la temperatura de salida del fluido frío puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente. El caso límite se tiene cuando la temperatura de salida del fluido frío es igual

a la temperatura de entrada del fluido caliente. La temperatura de salida del fluido frío nunca puede ser superior a la temperatura de entrada del fluido caliente. [5]

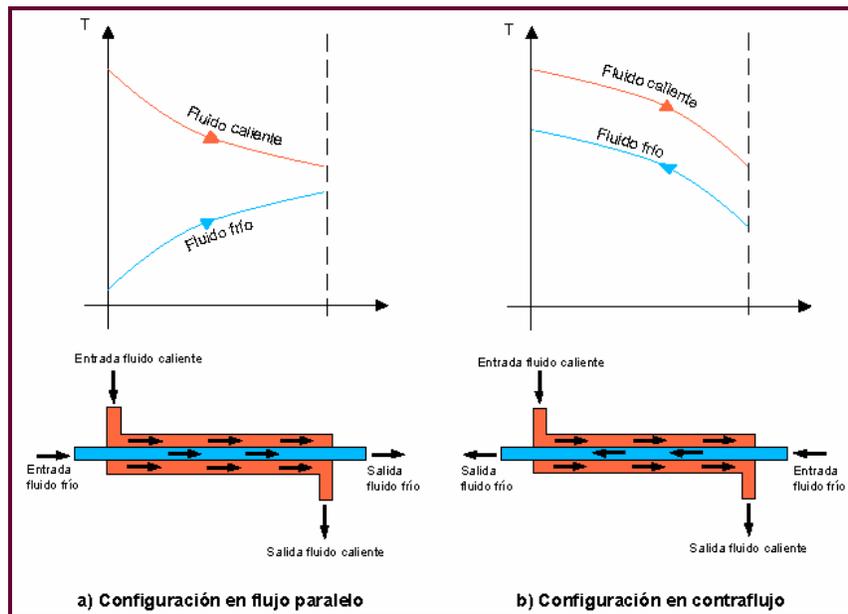


Figura 11. Comportamiento de la temperatura con respecto a la dirección de los fluidos en un intercambiador.

B - Intercambiador de calor de tubo y coraza

Es el tipo más común de intercambiador de calor en las aplicaciones industriales. Este tipo de intercambiadores están compuestos por gran cantidad de tubos (a veces varios cientos) contenidos en un casco. Los tubos se disponen con sus ejes paralelos al eje del casco. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por el interior de los tubos mientras que el otro se mueve por fuera de éstos, por el casco. Este tipo de intercambiadores se clasifican por el número de pasos por el casco y por el número de pasos por los tubos. En la figura siguiente se muestran dos ejemplos [5]:

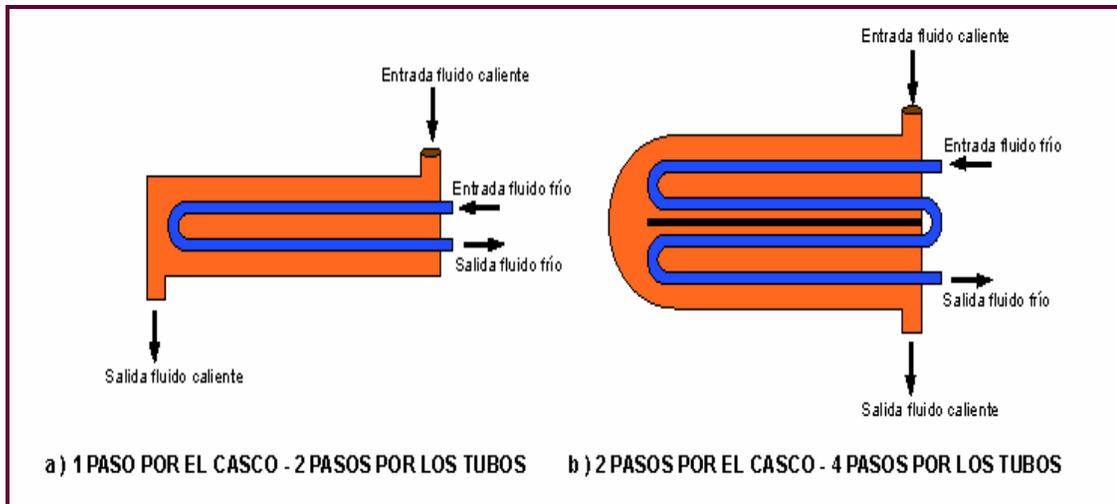


Figura 12. Intercambiadores de calor de tubo y coraza.

C - Intercambiador de calor de placas.

Los intercambiadores de calor de placas, como el que se muestra en la figura 13, consisten en placas estándares, que sirven como superficies de transferencia de calor y un armazón para su apoyo. ^[6]

Los intercambiadores de calor de placa son de uso frecuente en fluidos de baja viscosidad con demandas moderadas de temperaturas y presión, típicamente por debajo de los 150°C. El material de los sellos se elige preferentemente para soportar la temperatura de operación y conforme a las características del líquido de proceso.

Los intercambiadores de calor de placas y marco consisten en una serie de placas acanaladas que se montan en un marco y se afianzan con abrazaderas. Cada placa se hace de un material prensable (acero inoxidable, níquel, titanio, etc.) y se forma con una serie de corrugaciones. El

paquete también incluye una junta o sello. La junta o sello contiene la presión y controla el flujo.

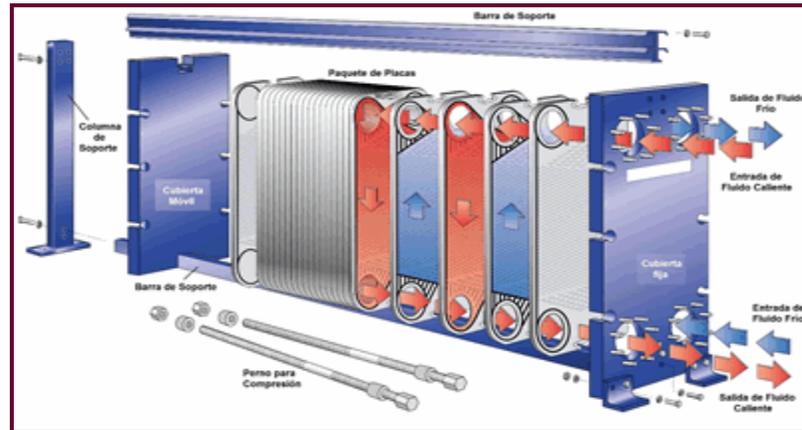


Figura 13. Intercambiador de calor de placas.

2.4 Ciclos utilizados en sistemas de cogeneración

2.4.1 Ciclo Rankine

El ciclo Rankine es un ciclo de potencia representativo del proceso termodinámico que tiene lugar en una central térmica de vapor. Utiliza un fluido de trabajo que alternativamente evapora y condensa, típicamente agua (si bien existen otros tipos de sustancias que pueden ser utilizados, como en los ciclos Rankine orgánicos). Mediante la quema de un combustible, el vapor de agua es producido en una caldera a alta presión para luego ser llevado a una turbina donde se expande para generar trabajo mecánico en su eje (este eje, solidariamente unido al de un generador eléctrico, es el que generará la electricidad en la central térmica). El vapor de baja presión que sale de la turbina se introduce en un condensador, equipo donde el vapor condensa y cambia al estado líquido (habitualmente el calor es evacuado

mediante una corriente de refrigeración procedente del mar, de un río o de un lago). Posteriormente, una bomba se encarga de aumentar la presión del fluido en fase líquida para volver a introducirlo nuevamente en la caldera, cerrando de esta manera el ciclo. Existen algunas mejoras al ciclo descrito que permiten mejorar su eficiencia, como por ejemplo sobrecalentamiento del vapor a la entrada de la turbina, recalentamiento entre etapas de turbina o regeneración del agua de alimentación a la caldera.^[7]

2.4.2 Ciclo Brayton

Uno de los ciclos utilizados en los sistemas de cogeneración, es el ciclo Brayton; este es un ciclo termodinámico de compresión, calentamiento y expansión de un fluido compresible, generalmente aire, que se emplea para producir trabajo neto y su posterior aprovechamiento como energía mecánica o eléctrica.

En la mayoría de los casos el ciclo Brayton opera con fluido atmosférico o aire, en ciclo abierto, lo que significa que toma el fluido directamente de la atmósfera para someterlo primero a un ciclo de compresión, después a un ciclo de calentamiento y, por último, a una expansión.

Este ciclo produce en la turbina de expansión más trabajo del que consume en el compresor y se encuentra presente en las turbinas de gas utilizadas en la mayor parte de los aviones comerciales y en las centrales termoeléctricas, entre otras aplicaciones. Al emplear como fluido termodinámico el aire, el ciclo Brayton puede operar a temperaturas elevadas, por lo que es idóneo para aprovechar fuentes térmicas de alta temperatura y obtener un alto rendimiento termodinámico.

Sobre el ciclo básico existen variantes que incorporan nuevos elementos para mejorar alguna de sus prestaciones, como la potencia o el

rendimiento. Ejemplos de estas variantes son el ciclo Brayton con regenerador, el ciclo Brayton de múltiples etapas (de compresión u expansión), o la combinación de un ciclo Brayton con un ciclo Rankine para dar lugar al denominado ciclo combinado. [8]

2.4.3 Ciclo combinado

En la generación de energía se denomina ciclo combinado a la co-existencia de dos ciclos termodinámicos en un mismo sistema, uno cuyo fluido de trabajo es el vapor de agua y otro cuyo fluido de trabajo es un gas producto de una combustión.

En una central eléctrica el ciclo de gas genera energía eléctrica mediante una turbina de gas y el ciclo de vapor de agua lo hace mediante una o varias turbinas de vapor. El principio sobre el cual se basa es utilizar los gases de escape a alta temperatura de la turbina de gas para aportar calor a la caldera o generador de vapor de recuperación, la que alimenta a su vez de vapor a la turbina de vapor. La principal ventaja de utilizar el ciclo combinado es su alta eficiencia, ya que se obtienen rendimientos superiores al rendimiento de una central de ciclo único y mucho mayores que los de una de turbina de gas.

Al aumentar la temperatura de entrada de los gases en la turbina de gas, se obtienen rendimientos de la turbina de gas cercano al 60%, exactamente 57,3% en las más modernas turbinas Siemens. Este rendimiento implica una temperatura de unos 1.350°C a la salida de los gases de la cámara de combustión. El límite actualmente es la resistencia de los materiales cerámicos empleados en el recubrimiento interno de las cámaras de combustión de las turbinas a esas temperaturas.

Las centrales de ciclo combinado son, como todas ellas, contaminantes para el medio ambiente y para los seres vivos, incluidas las personas, por los gases tóxicos que expulsan al ambiente. No obstante es la que menos contamina de todas las industrias de producción de electricidad por quema de combustible fósil. Básicamente las emisiones son de [CO₂](#).^[9]

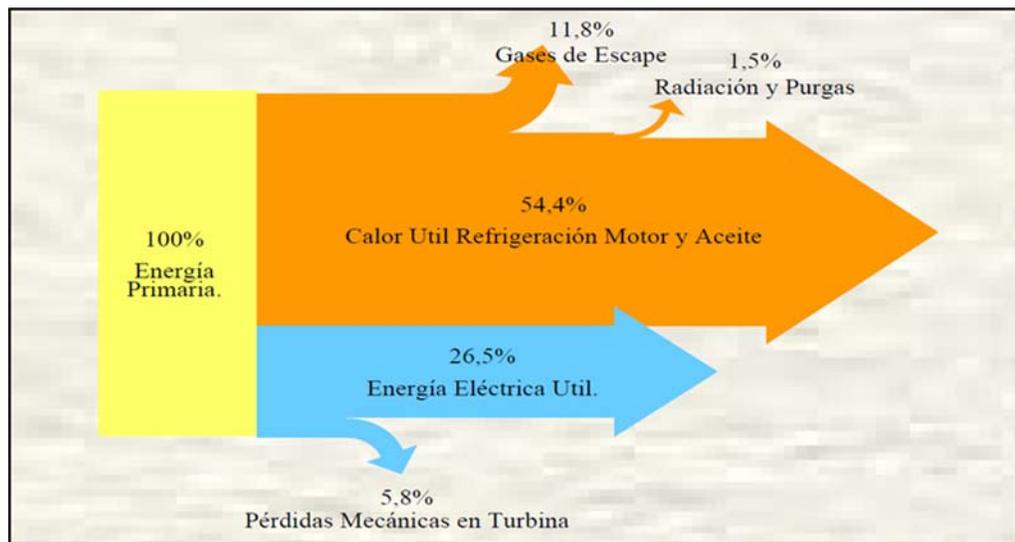


Figura 14. Diagrama Sankey para sistema de cogeneración con ciclo combinado.

2.5 Caldera de recuperación de calor

Existen dos formas del aprovechamiento del nivel térmico de los gases de escape de un motor de cogeneración:

- ✓ Uno es utilizar directamente los gases en procesos de secado.
- ✓ La otra consiste en la generación de vapor para transportar y distribuir energía térmica a temperaturas moderadas, hasta los puntos de consumo.

Con este último método es necesaria la utilización de las llamadas calderas recuperación (Heat Recovery Steam Generator, HRSG). La caldera de recuperación aprovecha la entalpia de los gases calientes para generar vapor, por lo que se pueden describir de forma sencilla diciendo que consiste en una serie de intercambiadores de calor que utilizan un gas como fluido caliente y como fluido frío un líquido, que habitualmente será agua.

La utilización de calderas de recuperación se da fundamentalmente en instalaciones de cogeneración con turbinas de gas e instalaciones de ciclo combinado.

Estas calderas tienen como principales ventajas:

- Un coste relativamente bajo.
- Una gran fiabilidad de operación.
- El presentar un elevado nivel energético, provocando que el rendimiento energético total de la instalación de cogeneración sea bastante elevado.

2.6 Principales elementos que conforman la caldera recuperadora de calor

Los principales elementos que conforman la caldera recuperadora de calor en este proyecto son:

2.6.1 Intercambiadores de calor

La operación unitaria de transferencia de calor en el simulador HYSYS puede tener lugar en enfriadores, calentadores, intercambiadores de calor y

en intercambiadores para gas natural licuado. La transferencia de calor en la caldera recuperadora es en intercambiadores de calor a contracorriente, por lo que éste es el modelo que se explica. Los cálculos para los intercambiadores de calor están basados en balances de masa y energía para los fluidos fríos y calientes, donde el fluido caliente aporta calor al fluido frío.

Para simular un intercambiador de calor es necesario seleccionar el modelo matemático de diseño, recomendándose usar el Modelo End Point, dado que este modelo está basado en la ecuación de calor para un intercambiador de calor estándar, definida por el coeficiente de transferencia de calor, área disponible para el intercambio de calor y la diferencia media logarítmica de temperatura. Las principales consideraciones de este modelo son: el coeficiente de transferencia de calor es constante, y los calores específicos por el lado de la coraza y por el lado de los tubos permanecen constantes. Este modelo es seleccionado cuando no hay cambio de fase en el intercambio y los calores específicos no tienen mucha variación.

2.6.2 Reactor o cámara de combustión

Un reactor químico es una unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones químicas. Dicha unidad procesadora está constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas, y está gobernado por un algoritmo de control.

Los reactores químicos tienen como funciones principales:

- ✓ Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes.
- ✓ Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción.
- ✓ Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.

2.6.2.1 Reactor Gibbs

Este módulo fue el seleccionado para simular la cámara de combustión. En este reactor se calculan las composiciones de salida para lograr el equilibrio de fase y químico en la corriente de salida, sin necesidad de una estequiometría de reacción específica, pues utiliza la condición de que la energía libre de Gibbs del sistema en reacción, está a un mínimo del estado de equilibrio para determinar la composición de la mezcla producto. Para seleccionar el método con que HYSYS solucionará el Reactor Gibbs, se escoge Sólo Reacciones Gibbs, dado que este modo, no se necesita conocer el paquete de reacción para solucionar el sistema por minimización de la energía libre de Gibbs.

2.6.3 Mezcladores

La operación de mezclado combina dos o más corrientes de entrada para producir una simple corriente de salida. Se realiza un completo balance de materia y energía en el mezclador. Si se conocen las propiedades de las corrientes de entrada (temperatura, presión, flujo y composición), las

propiedades de la corriente de salida serán calculadas automáticamente de forma rigurosa.

2.6.4 Divisores

La operación de división separa una corriente de alimentación en múltiples corrientes de producto con las mismas condiciones y composición que la corriente de entrada, y es usada para simular T en tuberías y tubos múltiples. El único parámetro requerido para su simulación es la fracción de separación o los flujos de cada corriente de salida.

2.6.5 Separadores

Los separadores son básicamente tanques FLASH donde la separación de las fases ocurre a la menor presión de alimentación menos una caída de presión a través del equipo, que debe ser definida y consta de una corriente producto en fase vapor y otra en fase líquida. Como se tienen reciclos en el proceso, será necesario usar un paquete lógico para determinar los cálculos de forma iterativa hasta alcanzar convergencia en el sistema. En HYSYS este módulo se conoce con el nombre de reciclo.

2.6.6 Reciclo

La capacidad para resolver reciclos fiablemente, de cualquier simulador es crítica. HYSYS tiene ventajas inherentes sobre otros simuladores en este aspecto. Tiene la habilidad única de cálculo inverso a través de muchas operaciones en forma no secuencial, permitiendo solucionar muchos problemas. El reciclo instala un bloque teórico en la corriente del proceso. Las condiciones de la corriente pueden ser transferidas hacia delante o

hacia atrás, en términos de solución hay valores asumidos y valores calculados para cada variable en la corriente de entrada y salida de este módulo. HYSYS emplea un método de aproximaciones sucesivas para alcanzar la convergencia del sistema con la tolerancia especificada.

2.7 Eficiencia térmica de la caldera recuperadora

La eficiencia térmica de un generador de vapor puede ser expresada como la energía que es aprovechada para producir vapor; simplemente es la relación entre la energía que sale y la energía que entra al sistema. La energía que entra a la caldera no es más que el calor proveniente del combustible, que viene dado por el valor calórico neto del mismo. En el caso particular que se estudia, se tienen dos corrientes combustibles: el gas natural y el gas exhausto de turbina. La eficiencia térmica puede ser determinada por la ecuación 1. ^[10]

$$\eta_{En_HRSG} = \frac{F_{VSC} \times (H_{VSC} - H_{AA})}{(F_{GT} \times VCN - N_{GT}) + (F_{DB} \times VCN)} \times 100$$

Ec. 1

Donde:

η_{En_HRSG} : eficiencia térmica del generador de vapor;

F_{VSC} : flujo de vapor sobrecalentado, kg/h;

H_{VSC} : entalpía del vapor sobrecalentado, kJ/kg;

H_{AA} : entalpía del agua de alimentación, kJ/kg;

F_{GT} : flujo de gas natural quemado en la turbina de gas, kg/h;

VCN : valor calórico neto del gas natural, kJ/kg;

N_{GT} : potencia entregada por la turbina de gas en el ciclo combinado, kJ/h;

F_{DB} : flujo de gas natural quemado en el generador, kg/h.

2.8 Transferencia de calor

El calor es la capacidad de trabajo debido al movimiento molecular, es la energía interna molecular de los cuerpos. La cantidad de energía calorífica o calor que un cuerpo posee está dada por la cantidad de movimiento de sus moléculas dependiendo de la cantidad de moléculas que posean y la rapidez con que ellas se muevan.

La transferencia de calor es el área de ingeniería que trata los mecanismos encargados de la transferencia de energía de un lugar a otro cuando existe una diferencia de temperaturas.

Se puede decir que la transferencia de calor es el proceso de intercambio entre dos fluidos que están a diferentes temperatura y separados por una pared sólida ocurre en muchas aplicaciones de ingeniería.

El dispositivo que se utiliza para llevar a cabo este intercambio se denomina intercambiador de calor, y las aplicaciones específicas se pueden encontrar en calefacción de locales y acondicionamiento de aire, producción de potencia, recuperación de calor de desecho y algunos procesamientos químicos. ^[11]

2.8.1 Mecanismos De Transferencia De Calor

La transferencia de calor como se definió anteriormente, es una interacción entre fluidos y materiales a consecuencia de un gradiente de temperatura entre ellos. Esta interacción ocurre mediante mecanismos diferentes a saber:

Hay tres tipos fundamentales de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Los tres tipos de transferencia de calor se pueden producir al mismo tiempo y es aconsejable tomar en consideración la transferencia de calor por cada uno de esos tipos en cada caso en particular.

A- Transferencia de calor por conducción.

Es la transferencia de calor desde una parte de un cuerpo a otra del mismo cuerpo, o bien, desde un cuerpo a otro que esté en contacto físico con él, sin desplazamiento apreciable de las partículas del cuerpo.

El calor que pasa de una parte a otra de una sustancia, o de una sustancia a otra en contacto físico, sin ningún movimiento aparente de las partículas de cualquiera de las dos sustancias se dice que fluye por conducción.

B- Transferencia de calor por convección.

Es la transferencia de calor desde un punto a otro, dentro de un fluido, un gas o un líquido, mediante la mezcla de una porción del fluido con otra. En la convección natural, el movimiento del fluido se debe totalmente a diferencias de densidad como resultado de diferencias de temperatura; en la convección forzada, el movimiento se produce por medios mecánicos. Cuando la velocidad forzada es relativamente baja, se debe entender que los factores de “convección libre” como las diferencias de temperatura y densidad, pueden tener una influencia importante.

Todos sistemas de calefacción dependen de las corrientes de convección, las cuales son causadas por la expansión de líquidos y gases

cuando cambian de temperatura. La corriente de convección consiste en la circulación continua de un líquido o gas caliente. La parte caliente de la corriente de convección sube a donde la temperatura del fluido es menor y mientras sube traspaasa calor al fluido frío.

C- Transferencia de calor por radiación

Es la transferencia de calor desde un cuerpo a otro, que no se encuentra en contacto con él, por medio del movimiento ondulatorio a través del espacio.

Implica doble transformación de la energía para llegar al cuerpo al que se va a propagar; primero de energía térmica a radiante y luego viceversa.

2.9 Leyes de la termodinámica

Las leyes de la termodinámica gobiernan las transformaciones de la energía.

2.9.1 Primera ley de la termodinámica.

La energía no puede crearse ni destruirse, sólo puede transformarse. Este principio parte de observaciones experimentales y se conoce cómo la primera ley de la termodinámica o el principio de conservación de la energía. La primera ley puede establecerse del modo siguiente: durante interacción de un sistema y sus alrededores, la cantidad de energía ganada por el sistema debe ser exactamente igual a la energía perdida por su entorno. La energía cruza la frontera de un sistema cerrado en dos formas distintas: calor y trabajo. Es importante distinguir entre estas dos formas de energía.^[11]

2.9.2 Segunda ley de la termodinámica

En términos más o menos sencillos diría lo siguiente: “No existe un proceso cuyo único resultado sea la absorción de calor de una fuente y la conversión íntegra de este calor en trabajo”. Este principio (principio de Kelvin Planck) nació del estudio del rendimiento de máquinas y del mejoramiento tecnológico de las mismas. Si este principio no fuera cierto, se podría hacer funcionar una central térmica tomando el calor del medio ambiente; aparentemente no habría ninguna contradicción, pues el medio ambiente contiene una cierta cantidad de energía interna, pero debemos señalar dos cosas: primero la segunda ley de la termodinámica no es una consecuencia de la primera, sino una ley independiente, segundo, la segunda ley nos habla de las restricciones que existen al utilizar la energía en diferentes procesos, en nuestro caso en una central térmica. No existe una máquina que utilice energía interna de una sola fuente de calor. ^[11]

2.9.3 Tercera ley de la termodinámica

Propuesto por Walther Nernst, afirma que es imposible alcanzar una temperatura igual al cero absoluto mediante un número finito de procesos físicos. Puede formularse también como que a medida que un sistema dado se aproxima al cero absoluto, su entropía tiende a un valor constante específico. La entropía de los sólidos cristalinos puros puede considerarse cero bajo temperaturas iguales al cero absoluto; puesto que no hay incertidumbre en torno al estado de las moléculas en ese instante. No es una noción exigida por la termodinámica clásica, así que es probablemente inapropiado tratarlo de “ley”.

Es importante recordar que los principios o leyes de la termodinámica son sólo generalizaciones estadísticas, válidas siempre para los sistemas macroscópicos, pero inaplicables a nivel cuántico. Asimismo, cabe destacar que el primer principio, el de conservación de la energía, es la más sólida y universal de las leyes de la naturaleza descubiertas hasta ahora por la ciencia.^[11]

2.10 Simulación de procesos

La simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería industrial, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más simple.

La simulación de un proceso dentro de una industria desempeña un papel muy importante, sobre todo ahora que los avances científicos y tecnológicos en el campo de la computación se desarrollan con mayor rapidez.

Estos paquetes de simulación facilitan el estudio de procesos existentes de una forma más rápida, económica y completa que en la planta real. La simulación permite comparar con rapidez y minuciosidad distintos procesos, modificaciones o diseños que se desean poner en operación, lo cual permite también ensayar hipótesis sobre sistemas o procesos antes de llevarlos a la práctica. Esto da como resultado que se pueden tomar en consideración un mayor número de alternativas de procesos y obtener así diseños de mejor calidad y menor costo. Con un modelo matemático adecuado se pueden realizar ensayos en los intervalos extremos de las condiciones de operación, lo cual puede no ser práctico o ni siquiera posible en la planta real.^[12]

2.10.1 Simulador

Un Simulador es un programa de computación que automatiza los cálculos para el diseño de equipos y estudio de procesos. Sirve para entrenar a los ingenieros y técnicos en los cálculos implícitos en múltiples diseños y se organiza para efectuar los cálculos de un modo directo. Con él se pueden emular los diseños de los fabricantes de equipos. El simulador representa eventos del mundo real, bien sea a través de modelos simples o de complicados procesos de animación.

El empleo de un simulador permite presentar o mostrar los diseños de proceso de manera rápida; minimiza el trabajo; optimiza la evaluación de un diseño; permite la selección adecuada de un equipo para las especificaciones de diseño; la correcta y fácil evaluación ante cambios de alimentación; alteraciones diversas de las condiciones de operación de una planta; y, permite obtener seguridad y rendimiento en el ciclo de vida útil de la planta. ^[12]

2.10.2 Hysys Process

Hysys Process es un programa de simulación desarrollado por la empresa Hyprotech. Es una herramienta de gran utilidad para los ingenieros de procesos, mediante el cual se puede realizar desde una simple evaluación de propiedades de la mezcla hasta la simulación completa de una planta de procesos. Con Hysys Process se pueden mostrar varios diseños alternativos, las especificaciones de un determinado equipo y evaluar problemas que se presentes en un proceso industrial o una planta, a través de cálculos rápidos y confiables. Este es un software de los más avanzados en ingeniería, es

completamente interactivo y está diseñado para ser: integrado, intuitivo, interactivo, abierto y extensible. ^[12]

2.11 Estimado de costos

Es un pronóstico de los costos de los diferentes elementos que integran un proyecto o programa de alcance definido, el cual respalda la toma de decisiones de la gerencia de cada una de las fases de dicho proyecto. Estos estimados de costos se clasifican en clase V, IV, III, II, I. ^[13]

2.11.1 Estimación de costos clase V.

Es un pronóstico de costos basado en la determinación de la necesidad de un bien o servicio, con una precisión del tipo orden de magnitud, basada en la información global o a “grosso modo” del proyecto y de sus principales unidades de proceso; El cual se utiliza en la planificación a mediano plazo para establecer si los proyectos reúnen los méritos suficientes para proseguir su desarrollo. Está asociado a la fase visualizar del proyecto. La probabilidad de que los costos finales resulten dentro de más o menos 10% del estimado, es el 15%. La contingencia sobre el estimado se encuentra entre el rango 25% - 30%, y los costos relativos necesarios para contar con la información básica del proyecto se encuentran entre el rango 0.1% y 0.6 % del costo total del proyecto.

2.11.2 Estimación de costos clase IV.

Estimado con ingeniería conceptual completa y se ha avanzado en las especificaciones de diseño básico. Se han concluido los estudios para la preselección del tipo y tamaño de los equipos mayores, así como también se

han preparado los diagramas principales de flujo y los requerimientos de servicios profesionales. La probabilidad de que los resultados finales resulten dentro de más o menos 10% del estimado, es el 30%. La contingencia sobre el estimado se encuentra entre el rango 15% - 25%, y los costos relativos necesarios para contar con la información básica del proyecto se encuentran entre el rango de 1% y 2% del costo total del proyecto.

2.11.3 Estimación de costos clase III.

Es un pronóstico realizado después la “base del diseño” del proyecto se ha completado un 60% de la ingeniería básica. Se han concluido también los estudios para seleccionar el tipo, tamaño, y parámetros de diseño para las plantas de procesamiento y otras unidades y se ha comenzado el trabajo de diseño de equipos básicos, incluyendo las especificaciones de diseño. Las probabilidades de que los resultados finales resulten dentro de más o menos 10% del estimado, es el 60%. La contingencia sobre el estimado se encuentra entre el rango 1% - 15%, y los costos relativos necesarios para contar con la información básica del proyecto se encuentran entre el rango de 2% y 4% del costo total del proyecto.

2.11.4 Estimación de costos clase II.

Es un pronóstico basado en especificaciones de diseño completadas (ingeniería básica), las cuales son de un alcance suficiente como para definir íntegramente el proyecto para el diseño y la ingeniería de detalle subsiguiente. Los principales componentes de equipos, edificios, requerimientos de almacenaje, etc. Han sido completamente especificados en lo referente a trabajo, detalles críticos de diseño, materiales de construcción, distribución física etc. Las probabilidades de que los resultados

finales resulten dentro de más o menos 10% del estimado, es el 80%. La contingencia sobre el estimado se encuentra entre el rango de 5% - 10%, y los costos relativos necesarios para contar con la información básica del proyecto se encuentran entre el rango de 5% y 7% del costo total del proyecto.

2.11.5 Estimación de costos clase I.

Estimado para contratación de obras y/o servicio, es un pronóstico de costos realizado cuando el avance de la ingeniería de detalle es tal que se dispone del diseño completo de fundaciones, estructuras, despliegue de líneas, y tuberías y se conocen cómputos métricos de los materiales de construcción. Las probabilidades de que los resultados finales resulten dentro de más o menos 10% del estimado, es el 90%. La contingencia sobre el estimado depende de la estrategia de contratación seleccionada y los costos necesarios para contar con la información básica del proyecto se encuentran en el rango entre 57% y 9% del costo total del proyecto.

2.12 Análisis de costo

Ante la posibilidad de llevar a cabo un proyecto, ya se trate de una planta completa o la ampliación o transformación de una ya instalada, una de las decisiones más difíciles y trascendentales que se debe encarar es la decisión de invertir. Para esto se debe demostrar que el mismo es económicamente viable, es decir, que el proyecto propuesto esta formulado de tal forma, que permite minimizar los costos de inversión, producción y comercialización del producto.

El análisis económico tiene mayor peso, en comparación con el análisis técnico, comercial y de impacto ambiental, en la toma de decisión de invertir recursos financieros para la ejecución de un proyecto. Sobre la base de este análisis se determina la aprobación o rechazo del mismo. Para estudiar económicamente un proyecto se debe identificar y cuantificar los costos que intervienen en él, la inversión necesaria y los beneficios que pueden obtenerse.

El costo es el desembolso en efectivo o en especie hecho en el pasado, en el presente, en el futuro o en forma virtual. Para realizar el análisis económico de un proyecto, conviene dividir los costos de la siguiente manera: ^[13]

- **Costos directos de producción:** son todos los gastos directamente vinculados con la fabricación o producción. Las partidas incluidas en estos gastos son: materias primas, mano de obra directa vinculada directamente con el proceso, servicios (electricidad, combustible, agua, refrigeración), mantenimiento y otros materiales directos.
- **Costos fijos:** son los gastos que existen siempre en una planta independientemente que esté operando o no, y estos no varían con el volumen de producción.
- **Costos indirectos:** son aquellos gastos, que no están directamente vinculados con la producción necesarios para el funcionamiento de equipos o de la planta en su totalidad. Se incluyen dentro de estos gastos, los financieros y administrativos.

Los beneficios que se esperan obtener de un proyecto, se determinan sobre la base de la rentabilidad. El término de rentabilidad generalmente se utiliza para medir el monto de las ganancias o beneficios que se pueden obtener en una situación determinada.

Para que una inversión sea rentable, el inversionista espera recibir una cantidad de dinero mayor de la que originalmente invirtió. En otras palabras, debe ser posible obtener una tasa de retorno o rendimiento sobre la inversión de atractivos.

En ingeniería, las alternativas se evalúan con base en un pronóstico de una tasa de retorno razonable. Por consiguiente se debe establecer una tasa razonable para la fase de elección de criterios de un estudio de ingeniería económica. La tasa razonable recibe el nombre de tasa mínima atractiva de retorno (TAMR) y es superior a la tasa que ofrece un banco o alguna inversión segura que implique un riesgo mínimo.

2.13. Inversiones

Una inversión es la conversión de efectivo en activos de menos grado de liquidez, primordialmente en activo fijo. Implica movilizar recursos propios y ajenos para la adquisición de factores de producción. Bajo este rubro debe incluirse el costo total del programa o proyecto sujeto a la evaluación. Entre los renglones más importantes que, tradicionalmente, forman parte del costo de una inversión se encuentran: estudio de factibilidad, diseño de ingeniería de detalle, adquisición de materiales y equipos, construcción e instalación de propiedades, plantas y otros sistemas de operación, etc. Los renglones detallados anteriormente se aplican tanto a presupuestos originales como a modificaciones de dichas propuestas.

Con relación al costo de inversión debe tenerse en cuenta lo siguiente: El costo de la inversión es un elemento básico en la evaluación económica de una propuesta, por lo tanto es necesario efectuar una buena estimación del mismo que, a su vez, redundará en un resultado más ajustado a la realidad. Las estimaciones deben ser conservadoras, a fin de no desvirtuar el resultado de la evaluación.^[13]

CAPITULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1. Tipo de investigación

La investigación se desarrollo bajo la modalidad documental y aplicativa. Se designo una metodología que permitió describir de manera clara y sencilla todas y cada una de las etapas que constituyen el proyecto.

Según Arias, Fidias G. 2006 la investigación documental y aplicativa es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica, interpretación y aplicación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o digitales. Como en toda investigación, el propósito de este proyecto es el aporte de nuevos conocimientos.

3.2. Búsqueda de la información

Se inicio con la recopilación de información vía electrónica a través de internet, seguidamente de bibliografías referente a la cogeneración eléctrica, de ciclo combinados para la generación eléctrica, calderas recuperadoras de calor y todo lo relacionado al tema de estudio. Se recopiló además, lo referente a la simulación de procesos mediante el simulador de procesos HYSYS y la estimación de costos de equipos empleados en el sistema de estudio. Este proceso de búsqueda de información se hace continuo a lo largo de todo el desarrollo del proceso, de manera de ir engranando todas las

etapas que representan esta investigación técnica, para así establecer el objetivo planteado.

Se realizaron entrevistas con personas de experiencia en la industria del gas natural y en Generación eléctrica. Los datos en la simulación fueron análisis cromatográficos de una planta de generación eléctrica que emplea turbina de gas y además de un estudio realizado a una caldera recuperadora de calor hecho en la Universidad de Matanzas de Cuba.

3.3. Análisis técnico

Para la simulación de la caldera recuperadora de calor mediante el simulador de procesos HYSYS, se estudio primeramente en qué consiste este sistema, donde se aplica y como funciona. Se selecciono un sistema de recuperación que funciona bajo el principio de recuperación de calor, se estudiaron varios análisis cromatográficos, de los cuales se escogieron dos corrientes como lo son Gas de Escape de turbinas de gas y una corriente de gas natural de composiciones diferentes. Considerando las características que deben poseer estos gases para cumplir con lo exigido en estos sistemas.

Para el cumplimiento de los objetivos se utilizó el simulador de procesos HYSYS v3.2, con el fin de modelar la caldera recuperadora de calor con las condiciones de diseño. Posteriormente a partir de la simulación de procesos se determino la eficiencia de esta caldera para generar el vapor empleado en la cogeneración, los factores que afectan dicha eficiencia del sistema y de qué forma repercuten en su funcionamiento, como también se realizo de acuerdo a los requerimientos una estimación de costo de la caldera grado V, en congruencia con los flujos que se manejan en el sistema y los rangos de presión y temperatura.

3.4. Funcionamiento de la caldera recuperadora de calor

Para comprender el funcionamiento de la caldera recuperadora de calor, se seleccionó primeramente un sistema que funciona bajo este principio. Se determinó el número de equipos que lo conforman como las condiciones de presión, temperatura y flujo de gas y agua que se manejan. Como algunos parámetros de diseño necesarios para la comprensión y simulación del mismo mediante HYSYS.

Se determinara además que procesos químicos están presentes en el sistema, evaporación, calentamiento, separación, economización, además de la reacción de combustión en la cámara de combustión de gases. Se recopiló el material necesario que aportara un rango más amplio para definir el sistema, como los rangos de temperatura a la cual debe desalojarse el agua del proceso, el contenido de agua vaporizada, y las condiciones de temperatura y presión del gas a la salida del proceso.

3.5. Simulación de la caldera recuperadora de calor

Para el cumplimiento de este objetivo, se establecieron las condiciones de diseño de la caldera, se definieron las corrientes y equipos involucrados. Se empleó el simulador de procesos HYSYS v3.2 y se establecieron los siguientes criterios de forma que el modelaje de la caldera sea validado mediante lo establecido para la simulación de procesos. (Anexo A)

Se procedió con la elaboración de un esquema de simulación, donde se representan las corrientes de materia y de energía involucrados en el proceso. Como se muestra en la figura 3.1.

3.5.1. Premisas consideradas para realizar la simulación de la caldera recuperadora de calor.

3.5.1.1 Composición, temperatura y presión de los gases de alimentación.

Se asumen composición, temperatura y presión de entrada del gas natural a la cámara de combustión (reactor de gibbs), solo se conoce como dato de esta corriente el volumen de gas quemado para aumentar la temperatura de los gases de escape de la turbina desde 544 °C hasta 656 °C.

Se asume composición y presión de entrada de los gases de escape entrando al reactor de gibbs, la composición es asumida no existen valores reales para el diseño, se asume la fracción de CO, CO₂, H₂O y O₂, dejando fijos los valores de estas para el agua el dióxido de carbono y asumiendo valores de CO que permita cumplir la temperatura de la corriente de salida del reactor en 656 °C y un valor de fracción molar de O₂ que no produzca mucha variación en dicha temperatura y que la composición volumétrica de O₂ en los gases de salida del reactor se encuentre entre 0.12 y 0.20, valores establecidos en las calderas recuperadoras. (Anexo A)

3.5.1.2. Intercambiadores de calor de tubos y coraza.

Para las dos etapas de sobrecalentamiento (SH1-2) y (SH3-4), se asume caída de presión por el lado de la coraza y el lado de los tubos de 0 psi, empleando en el simulador el modelo exchanger desing end point y en heat leak/loss. Este modelo está basado en la ecuación de calor para un intercambiador de calor estándar, definido por el coeficiente de transferencia

de calor, área disponible para el intercambio de calor y la diferencia media logarítmica de la temperatura. Donde los coeficientes de transferencia de calor permanecen constantes. Este modelo se asume cuando no hay cambios de fase durante el intercambio y los calores específicos no tienen mucha variación. (Anexo D; Figura D.3)

También se simuló, un evaporador (Cooler) y un Rehervidor (Heater), dentro de los cuales habrá transferencia de energía de un fluido al otro por el calor desprendido por el gas producto de combustión y el absorbido por el agua el fase líquida a la salida del intercambiador, simulados ambos bajo el principio explicado para los intercambiadores de las etapas anteriores. Para ambos equipos se asumió que la caída de presión es igual a 0. (Anexo D; Figura D.3 y D.4)

En la etapa de economización (EC), se asume caída de presión por el lado de la coraza y el lado de los tubos de 10 psi, se selecciona exchanger desing end point y en heat leak/loss, al igual que los intercambiadores empleados para el sobrecalentamiento se selecciona none y para la geometría del intercambiador se desactiva la opción de cálculo del Ft factor de corrección.

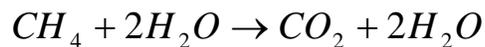
En todos los intercambiadores los gases calientes se hacen pasar por el lado de la coraza y el agua por el lado de los tubos en el caso de los intercambiadores de calor tubo/coraza. (Anexo D; Figura D.2)

3.5.1.3 Reacciones químicas posibles en la cámara de combustión.

La caldera cuenta con una cámara de combustión, la cual será modelada como un reactor de conversión, empleando las reacciones de

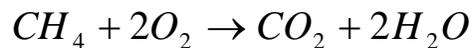
combustión (Anexo D; Figura D.1). En este reactor se calculan las composiciones de la mezcla producto. Para efectos de la simulación con HYSYS v3.2, se selecciono un reactor general, donde se da origen a la reacción de combustión del gas, se introdujeron en el simulador las reacciones posibles de combustión del gas natural, como se expresan a continuación:

Reacción de reformado del gas natural:^[10]



Asumiendo que la reacción se da en fase vapor con una conversión del metano del 30%.

Reacción de combustión para el reformado del gas natural:



Esta reacción es posible en fase vapor con una conversión del metano del 100 %.

3.5.1.4. Separador bifásico.

Los separadores son básicamente tanques FLASH donde la separación de las fases ocurre a la menor presión de alimentación menos una caída de presión a través del equipo, que deben ser definidas y consta de una corriente, producto en fase vapor y otra en fase líquida.

Para el caso de este modelo se asumió que la caída de presión de entrada y del vapor de salida son iguales a 0 Psi. Además que el porcentaje o nivel de líquido dentro del separador debe ser de 20 %. (Anexo D; Figura D.4)

3.5.1.5. Consideraciones adicionales.

- Se seleccionó el paquete de ecuaciones Peng Robinson ya que este es el paquete mas empleado en la simulación de procesos, por la veracidad de los resultados que se obtienen.
- Como se tienen reciclos en el proceso, será necesario usar un paquete lógico para determinar los cálculos de forma iterativa hasta alcanzar convergencia en el sistema. En HYSYS este modulo se conoce como reciclo. El reciclo instala un bloque teórico en la corriente de proceso. HYSYS emplea un método de aproximaciones sucesivas para alcanzar la convergencia del sistema con la tolerancia especificada.
- Como en la mayoría de los sistemas muchas corrientes de materia se combinan para producir una simple corriente de salida. Para este caso se empleara mediante HYSYS la operación de mezclado, como se conocen las condiciones de presión, flujo y temperatura se realiza un balance de materia y energía entre las corrientes a combinar, en consecuencia la corriente de salida será calculada automáticamente de forma rigurosa.
- Se asumió que la distribución de la corriente de agua a la salida del economizador se distribuye 0.95 para C15 y 0.05 para C20;

corrientes que se introducen al separador y la corriente que alimenta al sobrecalentador (SH 1-2).

- En la segunda distribución se considera una purga del vapor del 1% que se desaloja de la caldera. La diferencia se recircula al separador. Flow ratios no asignados, ya que se usa la operación lógica Set el cual cumple con la ecuación de una línea recta, la cual se expresa a continuación:

$$Y=a+X.b \quad \text{Ec (3.1)}$$

Donde:

Y: valor de la variable dependiente en este caso la el flujo másico de la corriente BLW el cual será el 1% del valor del flujo másico de la corriente agua de alimentación.

X: flujo másico de la corriente agua de alimentación.

Quedando así la ecuación:

$$Y=0+0.01*X \quad \text{Ec (3.2)}$$

Con esto se asegura automáticamente siempre un 1% de ese flujo de entrada sea cual sea su valor.

3.5.2. Datos empleados para realizar la simulación de la caldera recuperadora de calor.

Para el modelar este sistema se introdujeron al simulador condiciones de presión, temperatura, composición y flujo; en diferentes corrientes estos valores se encuentran en las siguientes tablas:

Tabla 3.1. Condiciones de presión, flujo y temperatura de las corrientes de interés, introducidas en el modelo de simulación de la caldera.

Variable	Gas de Escape	Gas Natural	Agua
Temperatura (°C)	544	30	70
Presión (Psia)	70	70	1682
Flujo Másico (lb/h)	$1.07 \cdot 10^6$	3968	$1.98 \cdot 10^5$

Tabla 3.2. Composición del gas natural.

Compuesto	Composición
Metano	0,8001
Etano	0,0608
Propano	0,0456
i-Butano	0,0213
n-Butano	0,0020
i-Pentano	0,0020
n-Pentano	0,0010
Hexano	0,0010
Heptano	0,0001
Octano	0,0001
Nonano	0,0001
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,0658

Tabla 3.3. Composición del gas de escape de turbinas.

Compuesto	Composición
Monóxido de Carbono (CO)	0,0042
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,1138
Oxígeno (O ₂)	0,1122
Agua (H ₂ O)	0,7698

Tabla 3.4. Temperaturas introducidas en las diferentes corrientes del sistema.

Corriente	Temperatura °C
C17	294,4
C18	149,9
C6	522
C13	526
CE	318
C9	305,4

3.6. Identificación de algunos parámetros que afectan la eficiencia energética de la caldera

Para determinar los parámetros que afectan las eficiencias de la caldera recuperadora, es necesario, determinar primeramente la eficiencia del sistema en estudio. La eficiencia térmica de un generador de vapor puede ser expresada como la energía que es aprovechada para producir vapor; según esto, este valor viene dado por la relación entre la energía que sale y la energía que entra al sistema.

3.6.1. Determinación de la eficiencia térmica del ciclo combinado

La energía que entra a la caldera de un ciclo combinado no es más que el calor proveniente del combustible, que involucra el valor calórico neto del mismo, en este caso, el gas natural. En este caso se tienen dos combustibles en la alimentación: los gases de escape proveniente de una turbina de gas y una corriente adicional de gas natural. Empleando la Ec. (2.1) del capítulo II, se determinara la eficiencia de la caldera recuperadora en estudio de la forma siguiente:

$$\eta_{En_HRSG} = \frac{F_{VSC} \times (H_{VSC} - H_{AA})}{(F_{GT} \times VCN - N_{GT}) + (F_{DB} \times VCN)} \times 100$$

A través de la simulación es posible conocer algunos parámetros, como lo son la entalpía del agua de alimentación, la entalpía del vapor sobrecalentado, además del flujo de vapor sobrecalentado que se genera en la caldera a las condiciones de diseño. Sin embargo, para efectos de estos cálculos es necesario conocer el flujo de gas quemado en la turbinas, como también la potencia entregada por esta en el proceso.

3.6.1.1. Determinación del flujo de gas quemado en la turbina.

Para estos fines fue necesario realizar un balance de masa en la turbina de gas, de acuerdo con el gas de escape generado y empleado en la caldera de recuperación. Considerando que el oxígeno que entra a la turbina es igual al oxígeno que reacciona mas el oxígeno en exceso se tiene la siguiente expresión:

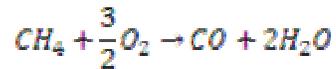
$$O_2 \text{ Entra} = O_2 \text{ Reacciona} + O_2 \text{ Exceso} \quad \text{Ec (3.3)}$$

Asumiendo que el combustible que entra a las turbinas está compuesto solo por Metano y que las reacciones de combustión del mismo, que ocurren en las turbinas a gas en combustión completa e incompleta, se expresan como sigue:

Para combustión completa:



Para combustión incompleta:



Como la relación de CH₄: CO₂ es 1 y CH₄:CO es 1; entonces el balance para las reacción para reacción completa, se tiene que:

- Todo el carbón presente en el CO₂ es proveniente del metano en combustión completa, por lo tanto, la cantidad de CO₂ presente en los gases de escape de la turbina, viene dada por la siguiente relación:

$$kg\ CO_2 = 487000 \frac{kg}{hr} * 0,221442$$

$$Kg\ CO_2 = 107842,25 \frac{kg}{hr}\ CO_2$$

Conociendo el peso molecular del CO₂ igual a 44 kg/kgmol y el peso atómico del carbón de 12 lb/lbmol; por relación estequiométrica se obtiene que la cantidad de carbón presente en 107842,25 kg/hr de CO₂, se obtiene a partir de:

$$kg\ C = 107842,25\ kg\ CO_2 * \frac{12\ kg\ C}{44\ kg\ CO_2}$$

$$kg\ C = 29411,52\ kg\ C$$

Por lo que, para producir 107842,25 Kg/hr CO₂, se necesitan quemar de CH₄ en combustión completa lo siguiente:

$$Kg\ CH_4 = 29411,52\ kg\ C * \frac{16\ kg\ CH_4}{12\ kg\ C}$$

$$kg\ CH_4 = 39215,36\ kg\ CH_4$$

- En combustión incompleta, primeramente se determina la cantidad de CO presente en los gases de escape, como se muestra a continuación:

$$kg\ CO = 487000 \frac{kg}{hr} * 0,006819$$

$$kg\ CO = 3320,25 \frac{kg\ CO}{hr}$$

Conociendo el peso molecular del CO igual a 28 kg/kgmol y el peso atómico del carbón de 12 lb/lbmol; por relación estequiométrica se obtiene que la cantidad de carbón presente en 3320,25 kg/hr de CO, se obtiene a partir de:

$$kg\ C = 3320,25\ kg\ CO, \frac{12\ kg\ C}{28\ kg\ CO}$$

$$kg\ C = 1423,22\ kg\ C$$

Con relación a esto, la cantidad de CH₄ consumido en combustión incompleta será de:

$$Kg\ CH_4 = 1423,22\ kg\ C * \frac{16\ kg\ CH_4}{12\ kg\ C}$$

$$kg\ CH_4 = 1897,63\ kg\ CH_4$$

Por lo tanto el flujo de combustible quemado en la turbina se obtendrá mediante la siguiente expresión:

Kg CH₄ consumidos = kg de CH₄ comb. Comp + kg de CH₄ com. Incomp

Ec (3.4)

Donde:

Kg CH₄ consumidos: flujo de gas quemado en la turbina (kg).

kg de CH₄ comb. Comp: flujo de combustible quemado en combustión completa (Kg).

kg de CH₄ com. Incomp: flujo de combustible quemado en combustión incompleta (Kg).

Sustituyendo los valores de los flujos de gas en la ecuación 3.4, para ambos casos se obtiene que el flujo de gas quemado en la turbina es de:

Kg CH₄ consumidos= Flujo gas quemado en la turbina = 41113,00 kg/hr.

Este valor se sustituye en la Ec (2.1) para el cálculo de la eficiencia de la caldera.

3.6.1.2. Potencia generada por la turbina.

Para el cálculo de la eficiencia es necesario conocer además la potencia generada por la turbina de gas. Empleando la literatura se selecciono una turbina que cumpliera con los requerimientos exigidos para la caldera recuperadora de calor. Estos valores de referencia se muestran en la tabla 3.4. (Anexo B; tabla B.1)

Tabla 3.5. Parámetros de la turbina empleados para seleccionar la potencia necesaria para determinar la eficiencia de la caldera recuperadora de calor.

Parámetro	Valor de referencia
Caudal de gases de escape	487000 kg/hr
Temperatura de gases de escape	544 °C

De acuerdo con estos valores se selecciono una turbina que presenta las siguientes características: (Anexo B)

Con la potencia eléctrica de 47 MW y la eficiencia eléctrica de la turbina de 37.5 % se determinara la potencia consumida por el generador, mediante la siguiente expresión real:

$$Potencia = \frac{Potencia\ Eléctrica}{Eficiencia\ Eléctrica} \quad Ec (3.5)$$

Tabla 3.6. Especificaciones de la turbina seleccionada

Parámetro	Valor de referencia
Modelo	SGT-800 SIEMENS
Combustible	Gas Natural
Frecuencia	50/60 Hz
Eficiencia Eléctrica	37,50%
Potencia eléctrica	47 MW

Sustituyendo los valores de la tabla 3.5 en la ecuación 3.5 se obtiene lo siguiente:

$$Potencia = \frac{47\ MW}{0.375} = 125.333\ MW \cong 4,512 * 10^8\ KJ/h$$

Entonces la potencia de la turbina viene dada por la siguiente expresión:

$$Potencia = \frac{Potencia\ Entregada}{Eficiencia\ Térmica} * 100 \quad Ec (3.6)$$

Conociendo que la eficiencia térmica de las turbinas a gas se encuentra en un rango entre [45-55], para este caso de estudio, se asumió un valor de

eficiencia de 45 % para la turbina. Sabiendo que la potencia consumida será igual a la potencia entregada entonces, al sustituir estos valores, se obtiene al sustituir en la ecuación 3.6 que la potencia de la turbina será:

$$Potencia = \frac{125,33 \text{ MW}}{45 \text{ MW}} * 100$$

Entonces la potencia de la turbina será igual a 278,51 MW $\approx 1.003 * 10^9$ kJ/h.

3.6.1.3. Determinación de la eficiencia de la caldera recuperadora de calor en el ciclo combinado

De la simulación y con los datos de diseño de la caldera recuperadora, para un flujo de agua de 90000 kg/hr de agua y temperatura de los gases de escape a la salida del sistema se 149 °C, los datos que se muestran en la tabla 3.10 y al sustituir los valores de la potencia y flujo de gas quemado en la turbina; obtenidos anteriormente, en la ecuación 2.1, se obtiene el valor de la eficiencia como se muestra a continuación:

$$\eta^{E_{HRSG}} = \frac{1,464 * 10^5 \text{ kg/h} \left(-1,249 * \frac{10^4 \text{ KJ}}{\text{Kg}} - (-1,564 * 10^4) \right)}{\left(41113 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * \frac{50200 \text{ KJ}}{\text{Kg}} - 1,003 * 10^9 \text{ kJ/h} \right) + \left(\frac{1,357 \text{ Kg}}{\text{h}} * 50200 \text{ KJ/Kg} \right)} * 100$$

$$\eta^{E_{HRSG}} = 40,84 \%$$

Tabla 3.7. Valores empleados para determinar la eficiencia de la caldera:

Parámetro	Valor
Flujo de vapor sobrecalentado FVSC (kg/h)	1,46E+05
Flujo de gas quemado en la turbina FGT (kg/h)	41113
Valor calorífico neto del gas natural VCN (KJ/Kg)	50200
Entalpia de vapor sobrecalentado HVSC(KJ/Kg)	-1,25E+04
Entalpia de agua de alimentación HAA (KJ/Kg)	-1,56E+04

3.6.2. Determinación de la eficiencia térmica de la caldera recuperadora.

La eficiencia térmica de la caldera recuperadora de calor se obtiene a través de la relación de calor trasferido por los gases de escape quemados en la cámara de combustión y el flujo de calor absorbido por la masa de agua. Esto sería, considerando la variación de la entalpia de estos fluidos.^[11]

Empleando este criterio se tiene la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{F_{\text{gases esc.sal CB}} \cdot (H_{\text{g Esc.sal CB}} - H_{\text{g Esc.sal caldera}})}{F_{\text{vsc}} \cdot (H_{\text{vsc}} - H_{\text{aa}})} \cdot 100 \quad \text{Ec (3.7)}$$

Donde:

$F_{\text{gases esc.sal CB}}$: Flujo de gases de escape a la salida de la cámara de combustión (kg/hr)

$H_{\text{g Esc.sal CB}}$: Entalpia de los gases a la salida de la cámara de combustión (kJ/kg)

$H_{\text{g Es.sal caldera}}$: Entalpia de los gases a la salida de la caldera (kJ/kg)

F_{vsc} : Flujo de vapor sobrecalentado (kg/hr)

H_{vsc} : Entalpia del vapor sobrecalentado (kJ/kg)

HAc: Entalpia del agua de alimentación (kJ/kg)

Empleando el modelo de simulación se obtienen los valores de entalpias requeridos, como también el flujo de vapor sobrecalentado y del flujo de gases de escape a la salida de la cámara de combustión. Los mismos se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Valores requeridos para el cálculo de la eficiencia térmica de la caldera recuperadora.

Parámetro	Valor
Fgases esc.sal CB (kg/h)	4,88E+05
HgEsc.sal CB (kJ/kg)	-9364
Hg Es.sal caldera (kJ/kg)	1,02E+04
Fvsc (kg/h)	1,46E+05
Hvsc (kJ/kg)	-1,25E+04
HAc (kJ/kg)	-1,56E+04

Al sustituir los valores de la tabla 3.8 en la ecuación 3.7; se obtiene la eficiencia térmica de la caldera recuperadora, como se evidencia a continuación:

$$\eta = \frac{4,884 \times 10^5 \text{ kg/h} \times \left(-\frac{9364 \text{ kJ}}{\text{kg}} - (-1,022 \times 10^4 \text{ kJ/kg}) \right)}{1,464 \times 10^5 \text{ kg/h} \times \left(-1,249 \times \frac{10^4 \text{ kJ}}{\text{kg}} - (-1,564 \times 10^4 \text{ kJ/kg}) \right)} \times 100$$

$$\eta = 86,5\%$$

3.6.3. Determinación de los parámetros que afectan la eficiencia de la caldera.

Existen algunos factores que afectan la eficiencia de una caldera recuperadora; con el fin de determinar y analizar estos factores se

desarrollaron diferentes casos estudios, donde el flujo de agua de alimentación es la variable independiente:

● **Caso de estudio 1:**

Con la ayuda del simulador de procesos HYSYS se efectuó la variación del flujo másico de agua, mediante la herramienta DATABOOK, en la cual se especificaron las variables dependientes e independientes de este caso. De esta forma la variable independiente se fijo como el flujo de alimentación del agua a la caldera y las variables dependientes la temperatura en la corriente C18 (gases exhaustos de la caldera) y la temperatura en la corriente C3 (Gas a la salida del sobrecalentador 1-2).

Mediante este caso se busca estudiar la variación de la temperatura de estas corrientes y analizar el comportamiento de la eficiencia de la caldera recuperadora.

● **Caso de estudio 2:**

Empleando la herramienta del caso anterior (DATABOOK), se procedió a verificar la variación del coeficiente de transferencia de calor del sobrecalentador (SH-3-4) y el economizador (EC) respecto a la variación del flujo másico de agua. De igual manera se analizo el comportamiento de la eficiencia de la caldera.

3.7. Estimación de los costos aplicados a la caldera recuperadora de calor

Para estimar el costo de la inversión aplicado a la caldera recuperadora de calor, fue necesario consultar páginas encargadas de la estimación de costos de equipos utilizando datos específicos de los mismos, los cuales se pueden observar en la tabla 3.4. Se realizó un sondeo de precios para los intercambiadores de tubo y coraza, la cámara de combustión, el enfriador, rehervidor y el separador, obteniéndose precios estimados para el año 2007 los cuales son reflejados en la tabla 3.5. Para posteriormente realizar una estimación de Costos Clase V se considero la inflación que con frecuencia experimenta la economía de los países por la que los costos de los bienes y servicios aumentan de un año a otro, de esta manera el costo actual de los equipos viene dado por la siguiente ecuación□

$$CF = CP (1 + F)^n$$

Ec (3.8)

Donde:

CF: Costo Futuro.

CP: Costo Presente.

F: Inflación.

n: número de años.

Los valores de inflación para los años requeridos son reflejados en la tabla 3.6.

Tabla 3.9. Equipos involucrados en la caldera recuperadora de calor.

Equipos	Especificaciones					
	Tipo de material	Presión (Psi)	Área (ft ²)	Duty (Btu/hr)	Diám. (Pulg)	Caudal. (G/min)
Sobrecalentador 1-2	Acero al carbono	1247.3	641.1			
Sobrecalentador 3-4	Acero al carbono	1247.3	649.3			
Economizador	Acero al carbono	1682.4	641.1			
Enfriador	Acero al carbono	70		165*10 ⁶		
Calentador	Acero al carbono	1247		165*10 ⁶		
Cámara de Combustión	Acero inoxidable	70				2226.09
Separador	Acero al carbono	1247			80.316	

Tabla 3.10. Precios estimados de equipos para el año 2007

Equipos	Costo USD (\$)
Sobrecalentador 1-2	54.400
Sobrecalentador 3-4	55.000
Economizador	54.400
Enfriador	291.900
Calentador	251.900
Cámara de Combustión	205.700
Separador	91.900

Tabla 3.11. Variación de la inflación en USA (EEUU)

AÑO	% INFLACIÓN
2008	0.09
2009	2.72
2010	1.50
2011/3	1.96

Para el sobrecalentador1-2 cuyo costo aproximado para el año 2007 era de \$ 54.400 según la Ec. (3.8) tenemos que el costo para el año 2008 se obtiene de la siguiente manera:

$$CF = 54.400 * (1 + 0.0009)^1$$

$$CF = \$ 54.448$$

De igual manera se realizan los cálculos con el aumento de la inflación para los demás años en cualquiera de los equipos, los datos son reflejados en la tabla 3.12:

Tabla 3.12. Aumento de los costos de equipos por años según la inflación

Equipo	\$ 2008	\$ 2009	\$ 2010	\$ 2011
Sobrecalentador 1-2	54.448	55.928	56.766	57.878
Sobrecalentador 3-4	55049	56.546	57.394	58.518
Economizador	54.448	55.928	56.766	57.878
Enfriador	292.162	300.108	304.609	310.579
Calentador	252.126	258.983	262.867	268.019
Cámara de Combustión	205.885	211.485	214.657	218.864
Separador	91.982	94.483	95.900	97.779

Los costos de los equipos utilizados en la caldera recuperadora de calor en Bolívares actuales con el resultado para la estimación de costos final serán reportados en el capítulo IV.

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Funcionamiento de un sistema de recuperación de calor mediante una caldera

Después de obtener una información clara del funcionamiento de las calderas recuperadoras, los resultados mostraron que para que la demanda de vapor sea suficiente para alimentar a las turbinas de vapor es necesario someter a los gases de escape a un calor suplementario. Esto justifica la presencia de la cámara de combustión a la entrada del recuperador de calor. De esta forma se logra elevar la temperatura de estos gases a temperaturas requeridas por diseño para la caldera, aprox. 1212°F. Vale decir, que el límite superior de la temperatura a la salida de la cámara en un proceso de recuperación no debe superar los 1300 °F.

La cámara de combustión de esta caldera emplea una corriente adicional de gas natural que permitirá el quemado adicional de los gases de escape a la salida de la turbina de gas y además aprovecha el oxígeno presente en su composición para estos fines. Por lo que no requiere una inyección adicional de aire para la combustión.

En el domo de vapor se considero que a la salida de los líquidos hay una purga del 1% del vapor, cuyo porcentaje representa un valor entre los límites, ya que las pérdidas por purgas no deben exceder el 3%.

El valor de la corriente de los gases a la salida de la caldera se encuentran a una temperatura de 300,2 °F esta temperatura no debe exceder la temperatura de rocío acida del gas, en vista de que estos gases son desalojados hacia la atmosfera. Esta temperatura de rocío acido es de 215,6 °F aprox. Lo que quiere decir que la caldera recuperadora de calor cumple con esta especificación.

Esta caldera está diseñada para evaporar 90000 kg/h de agua y entregar vapor sobrecalentado a las turbinas de vapor a una temperatura de 971,6 °F, mediante la corriente gases de escape de turbinas a una temperatura de 1212,8 °F. Empleando el principio de transferencia de calor, a través de equipos como dos sobrecalentadores (intercambiadores de tubo y coraza), evaporizadores, economizadores y así aprovechar toda la energía térmica que posee el gas.

El sistema aparte cuenta con un separador donde se separa la mezcla de agua en dos fases (líquido y vapor). Una de las corrientes es aprovechada para transferir calor en el sobrecalentador 1-2, la otra en recirculación al separador y una purga mencionada anteriormente de 1%.

La caldera recuperadora de calor funciona de manera más eficiente que un horno productor de vapor o una caldera común, además de que representa menos costos que las anteriores en vista de que manejan menos volúmenes de gas natural quemado.

La desventaja que presenta esta caldera recuperadora es que depende en mayor grado de la temperatura de los gases de escape, si esta es menor entonces en la cámara de combustión, se requerirá de mayor esfuerzo para compensar dicha disminución.

4.2. Simulación de la caldera de recuperación de calor

Mediante la simulación efectuada con HYSYS v3.2, a las condiciones de diseño el modelo de la caldera recuperadora de calor, se obtuvieron los siguientes resultados para la composición de gas a la salida de la cámara de combustión, caídas de presión en los intercambiadores, entre otros:

Tabla 4.1. Composición del gas a la salida de la cámara de combustión

Compuesto	Composición
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,2795
Oxígeno (O ₂)	0,1216
Agua (H ₂ O)	0,5990

La tabla 4.1 evidencia que el porcentaje de oxígeno presente en la mezcla de gases cumple con la condición de que este debe estar por encima del 12%. Esto satisface los requerimientos de la cámara de combustión, puesto que para lograr la elevación de la temperatura de los gases de escape a la salida de la cámara la composición de los gases

Tabla 4.2. Caídas de presión, coeficientes de transferencia de calor (DUTY) y el coeficiente global de transferencia de calor de los intercambiadores que conforman el sistema de recuperación obtenidas mediante el simulador

Variable	SH 1-2	SH 3-4	EC	COOLER	HEATER
Caídas de presión (psi)	0	0	10	0	0
Duty (KJ/H)	7,91E+07	2,29E+06	1,34E+08	1,74E+08	1,74E+08
U (KJ/°C*H)	3,00E+05	1,02E+04	2,917	0,245	0,245

En la tabla 4.2 se observa que tanto el Economizador, como en el Cooler y el Heater, el Duty (coeficiente de transferencia de calor) es mayor en comparación a los sobrecalentadores esto se debe a que en el calor transferido es mucho menor entre los fluidos en estos últimos dos equipos. Sin embargo, el coeficiente global de transferencia para los sobrecalentadores es mayor, esto indica que estos equipos están dimensionados para transferir mayor cantidad de energía.

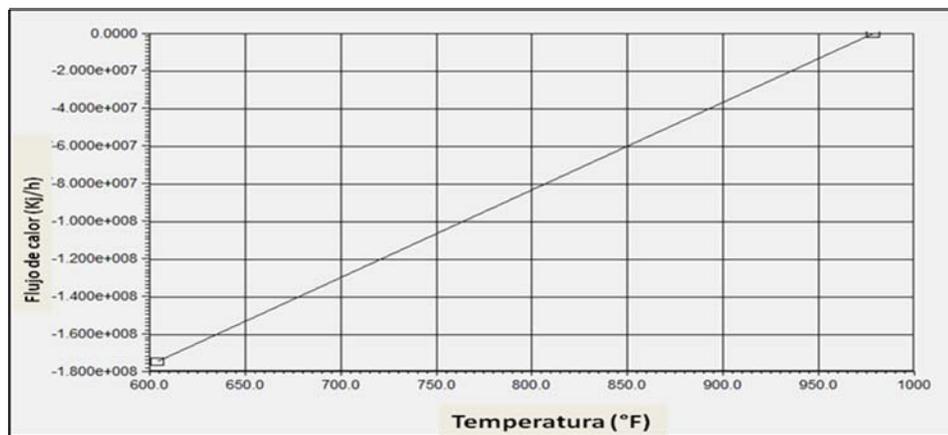


Figura 4.1. Variación del flujo de calor con respecto a la temperatura en el enfriador (cooler).

Al observar la figura 4.1, se evidencia que el flujo de calor en el enfriador se incrementa de forma casi constante con el aumento de la temperatura a la salida del intercambiador, vale decir que mientras menor sea la temperatura a la salida del enfriador entonces el flujo de calor será mayor. Hay que considerar que los valores reportados en la figura para el flujo de calor son valores negativos representando el calor transferido por el gas en este equipo hacia el agua mediante el calentador.

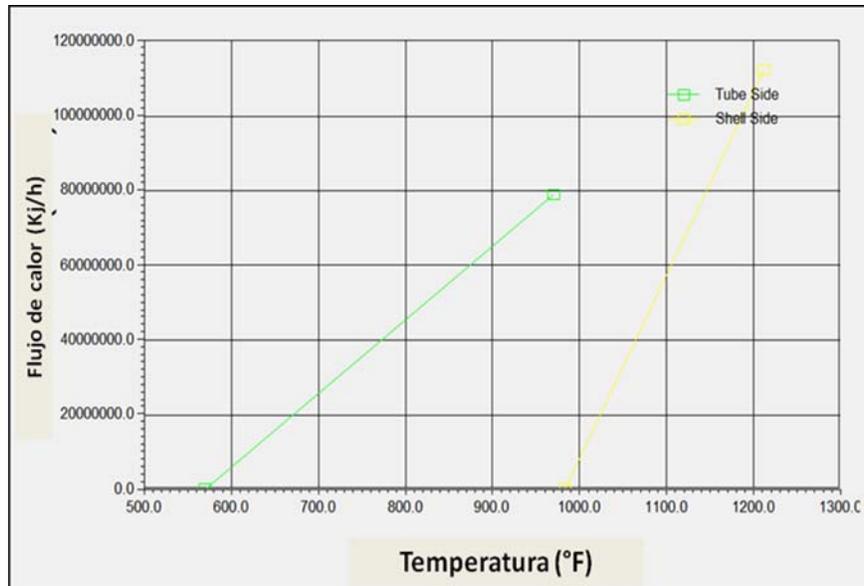


Figura 4.2. Variación del flujo de calor con respecto a la temperatura en el sobrecalentador (SH1-2)

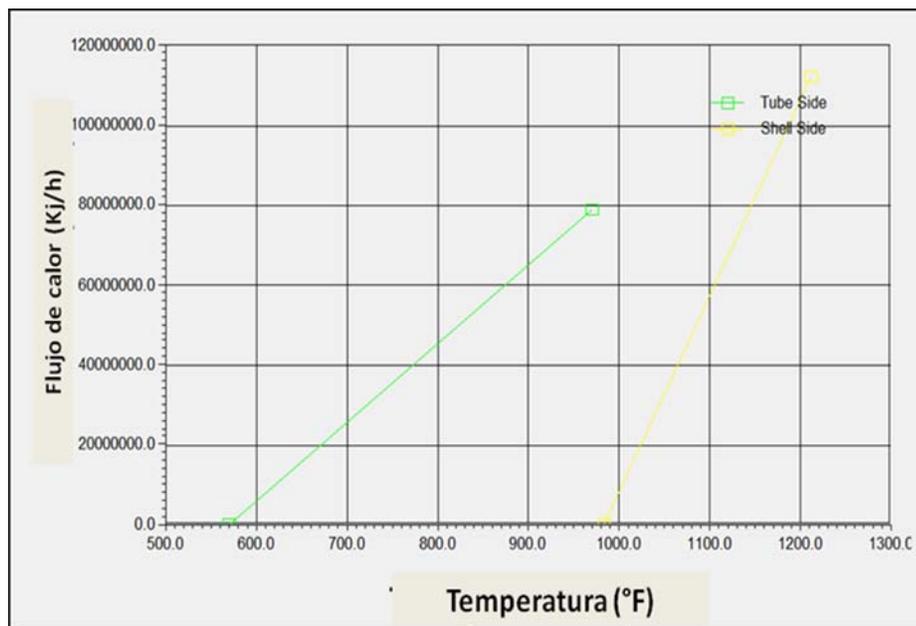


Figura 4.3. Variación del flujo de calor con respecto a la temperatura en el sobrecalentador (SH 3-4)

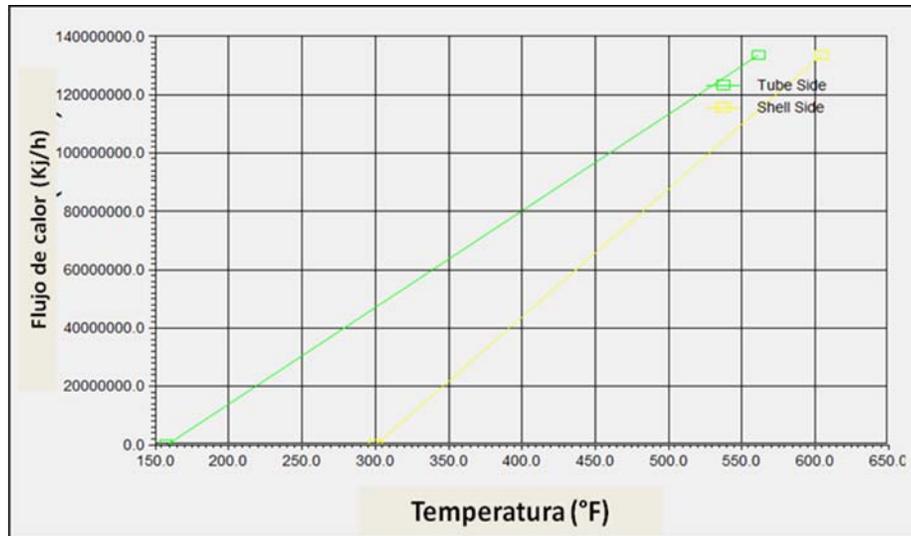


Figura 4.4. Variación del flujo de calor con respecto a la temperatura en el Economizador (EC)

Análogamente se estudio el comportamiento del flujo de calor con respecto a la temperatura en los sobrecalentadores y el economizador, donde se observo en que en el SH1-2 el flujo de calor tanto en los tubos como en la coraza se incrementa con la temperatura, este mismo comportamiento se mantiene en el economizador; sin embargo en el SH 3-4, se observa que el flujo de calor se incrementa con cambios mínimos en la temperatura de los fluidos. Esto se debe a que el delta de temperatura es menor en comparación a los anteriores intercambiadores. Esta tendencia se puede evidenciar en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3. Resultados obtenidos por el simulador para las diferentes corrientes de gas involucradas en el sistema de recuperación de calor.

PROPIEDADES	C1	C3	C13	CE	C18
Presión (psia)	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Temperatura (°F)	1213,00	983,60	978,80	604,40	300,20
Flujo Másico (lb/h)	1,08E+06	1,08E+06	1,08E+06	1,08E+06	1,08E+06
Densidad Másica (lb/ft ³)	0,0031	0,1025	0,1028	0,1397	0,1986
Peso Molecular (lb/lbmol)	22,62	22,62	22,62	22,62	22,62
Entalpia (BTU/lb)	-4026,00	-4124,00	-4126,00	-4280,00	-4397,00

Tabla 4.4. Resultados obtenidos por el simulador para las diferentes corrientes de gas involucradas en el sistema de recuperación de calor.

	AGUA				
PROPIEDADES	C17	C15	C20	S12	SLIQ
Presión (Psia)	1247,00	1247,00	1247,00	1247,00	1247,00
Temperatura (°F)	561,90	561,90	561,90	570,60	570,60
Flujo Másico (lb/h)	2,73E+05	2,59E+05	1,36E+04	2,59E+05	1,78E+07
Densidad Másica (lb/ft ³)	45,63	45,63	45,63	2,77	45,01
Peso Molecular (lb/lbmol)	18,02	18,02	18,02	18,02	18,02
Entalpia (BTU/lb)	-6258,00	-6258,00	-6258,00	-5621,00	-6244,00

Comparando los resultados arrojados por el simulador Hysys, para las corrientes involucradas en el sistema, en cuanto a los parámetros reportados en las tablas 4.3 (lado gas) y 4.4 (lado Agua), se puede apreciar que la entalpia de ambos fluidos aumenta con respecto al disminución de la temperatura.

Tabla 4.4. Resultados obtenidos por el simulador para las diferentes corrientes involucradas en el sistema de recuperación de calor (continuación).

AGUA						
PROPIEDADES	SMIX	REC	C9	C7	C6	BLW
Presión (Psia)	1247,00	1247,00	1247,00	1247,00	1247,00	1247
Temperatura (°F)	570,60	570,60	581,70	570,60	971,60	570,60
Flujo Másico (lb/h)	1,78E+07	1,78E+07	2,59E+05	2,73E+05	2,73E+05	2,72E+03
Densidad Másica (lb/ft3)	36,67	36,67	2,69	2,87	1,58	36,67
Peso Molecular (lb/lbmol)	18,02	18,02	18,02	18,02	18,02	18,02
Entalpia (BTU/lb)	-6234,00	-6234,00	-5612,00	-5645,00	-5369,00	-6234

El gas al disminuir la temperatura en el sistema su entalpia aumenta debido a que este transfiere mayor cantidad de energía al agua. En el caso del agua esta tendencia se debe a que a medida de que su temperatura aumenta este cederá menos energía para cambiar de fase.

4.3. Parámetros que afectan la eficiencia de la caldera recuperadora de calor

4.3.1. Eficiencia termica de la caldera recuperadora de calor en ciclo combinado.

Evidentemente el valor de la eficiencia de la caldera en el ciclo combinado de 40,84 % obtenida, de acuerdo con los datos de diseño de la caldera y considerando todos los aspectos descritos en el Capítulo 3; es menor en comparación con la eficiencia de investigaciones previas de 75,56%. Esto se le puede retribuir a los siguientes factores:

- Se asumió la composición de los gases de escape de la turbina, debido a que el análisis Orsat de estos gases se desconoce.
- Para determinar el flujo de gas quemado en la turbina, se considera que la composición de este flujo es de 100% Metano.
- Se desconoce con exactitud los parámetros que nos permitan describir las características de la turbina, empleada en el ciclo combinado. Por ende, se empleo una turbina que cumpliera con los requerimientos de los gases de escape y así conocer la potencia generada por la turbina de 278,51 Mw.

Por estas posibles razones los cálculos de la eficiencia de la caldera recuperadora en ciclo combinado arrojan un valor de eficiencia por debajo de lo esperado considerando el rango que esta debe oscilar entre [35-82] %.

4.3.2. Eficiencia térmica de la caldera recuperadora

La eficiencia obtenida para la caldera de recuperación de calor motivo de este estudio, arrojó un valor de 86,5%. Esto indica que es una caldera que

recupera una buena parte del calor transferido por los gases de escape, en vista de que se relaciona la cantidad de calor cedido por el gas y transferido por la masa de agua. Una eficiencia de este tipo indica que hubo un mayor aprovechamiento energético y que el vapor sobrecalentado producido por esta caldera es posible en mayor grado que cumpla con las especificaciones de una turbina a vapor.

4.3.3. Parámetros que afectan la eficiencia térmica de la caldera recuperadora de calor

Existen muchos factores que afectan la eficiencia de la caldera recuperadora de calor, como por ejemplo el flujo de agua de alimentación al proceso, el perfil de temperatura del gas en los intercambiadores, la composición del gas de escape que se introduce en la cámara de combustión; todos estos, en conjunto o de forma independiente influirán de forma directa sobre el rendimiento de la caldera.

Sin embargo, dentro de los parámetros más relevantes se encuentra el flujo de agua de alimentación, puesto que si ocurre una variación de este flujo de agua, la temperatura de los gases exhaustos se ve afectada directamente y por ende la entalpia y el flujo de vapor sobrecalentado que son parámetros que influyen significativamente en el cálculo de la eficiencia de la caldera.

Este comportamiento se demuestra en la siguiente figura 4.5, donde se observa que a medida que la temperatura de los gases exhaustos disminuye la eficiencia de la caldera, debido a que existe una masa de agua mayor a la cual transferirle energía térmica, el sistema se someterá a mayor exigencia en el proceso. (Anexo C; Tabla C.1)

De igual forma si disminuye el flujo de agua de alimentación, entonces aumentara la temperatura de estos gases exhaustos y la eficiencia será mayor.

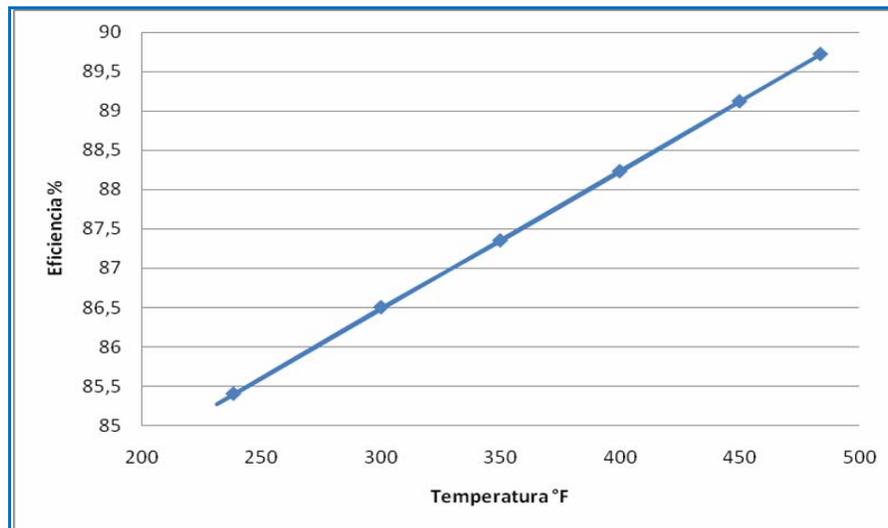


Figura 4.5. Variación de la eficiencia de la caldera con respecto a la temperatura de los gases a la salida de la caldera

A medida que la temperatura de los gases a la salida del evaporador aumentan, la eficiencia térmica disminuye, esto se debe a que la temperatura del gas a la entrada del economizador, será mayor reduciendo la transferencia de calor en el evaporador y en los sobrecalentadores, lo que origina gases de escape de las calderas a mayor temperatura, indicando una baja recuperación de calor en la misma.

4.3.4. Estudio de la como varia la eficiencia en función de la corriente de agua en la alimentación.

Este comportamiento anteriormente expuesto, se puede observar de forma más explícita en los casos de estudio desarrollados mediante la simulación:

Para el primer caso de estudio donde se evaluó la variación de la temperatura de las corrientes de gases de escape de la caldera (C18) y de los gases a la salida de la cámara de combustión (C3) con respecto a la variación del flujo de agua en la alimentación, se obtuvo como se evidencia en la figura 4.6; que a medida que aumenta el flujo de agua en la entrada del sistema la temperatura del gas de escape de la caldera disminuye de forma proporcional, por lo tanto la eficiencia será menor para este caso. Ahora bien, en cuanto a la corriente C3 se observa un comportamiento similar a la corriente C18, no obstante, esta temperatura permanece constante porque depende además del flujo de agua de alimentación y de los gases de escape de la cámara de combustión. (Anexo C; Tabla C.2)

Caso de estudio 1:



Figura 4.6. Variación de la temperatura de las corrientes C18 y C3 con respecto al flujo de agua de alimentación.

Caso de estudio 2:



Figura 4.7. Variación del intercambio de calor (DUTY) en el sobrecalentador 3-4 y el economizador, con respecto al flujo de agua de alimentación.

En el segundo caso de estudio se comprobó que mediante el incremento del flujo de agua de alimentación la transferencia de calor en el economizador será mayor, esto se debe a que la masa de agua requerirá de mayor energía para calentarse.

Para el sobrecalentador 3-4, se observa un comportamiento oscilatorio, en vista de que el perfil de temperatura es menor entonces la transferencia de calor en este caso es poca. Sin embargo el flujo de agua no deja de influir en su comportamiento, es decir, a medida que aumenta este flujo la transferencia de energía es menor. (Anexo C; Tabla C.3)

4.3.5. Influencia de la composición y temperatura de los gases de escape provenientes de la turbina en la eficiencia de la caldera

La eficiencia energética de la caldera aumenta con la temperatura de los gases de entrada, este es un parámetro importante en la operación de la caldera, pues de este valor dependerá la cantidad de energía disponible a la entrada de los sobrecalentadores de la caldera recuperadora, para la producción de vapor. Esta temperatura estará condicionada por la resistencia térmica de los materiales de construcción de la caldera, por la eficiencia de la turbina de gas y por las pérdidas de calor que puedan existir, además de la composición de los gases de escape, puesto que si se cuenta con un porcentaje de oxígeno óptimo [12-20] % los gases generados en la cámara de combustión elevarán en mayor grado la temperatura de dichos gases. Si este porcentaje de oxígeno es mínimo, entonces la reacción exotérmica no generará la suficiente energía para incrementar de forma eficiente dicha temperatura.

4.4 Estimación de costos de los equipos aplicados a la caldera recuperadora de calor

Considerando que el factor de coste puede tener un gran impacto sobre la decisión de compra se debe tener en cuenta que en esta sección se efectúa un pronóstico del costo final de los principales equipos del proceso que conforman la caldera recuperadora de calor en función de datos arrojados por el simulador para el dimensionamiento de los mismos, que pueden no ser los valores reales para dichos equipos por problemas de licencia o por errores de cálculo.

Sin embargo las dimensiones y especificaciones utilizadas para obtener los precios de los equipos mencionados en la tabla 4.5 son bastante cercanas a la realidad y permiten obtener un estimado a grosso modo que puede dar una visión fidedigna de la inversión inicial del proyecto que permita establecer la planificación a mediano plazo o si este reúne los méritos suficientes para proseguir su desarrollo.

Se puede decir observando los costos de los equipos en dólares bolívares actuales que este tipo de sistemas de recuperación de calor son rentables. Puesto que en la actualidad es indispensable el aprovechamiento al máximo de la materia prima para la obtención de energía, en el caso de Venezuela, este tipo de sistemas sería de mucho provecho. La materia prima empleada en la actualidad para generación es el gas natural y aunque es un recurso que se encuentra en grandes cantidades en el país, también es cierto que se le debe aprovechar en el mayor grado.

Si se realiza un balance costo-beneficio, entonces el costo a de la caldera a largo plazo se verá desplazado por el beneficio que se obtendrá a través del aprovechamiento de los gases de escape para alimentar turbinas a vapor en un ciclo combinado y dada la situación mundial donde es indispensable el ahorro energético sería un proyecto sustentable.

Tabla 4.5. Estimación de costos de la caldera recuperadora de calor

Equipo	Costo USD (\$)	Costo VEF (Bs. F)
Sobrecalentador 1-2	57.878	248.257
Sobrecalentador 3-4	58.518	251.625
Economizador	57.878	248.257
Enfriador	310.579	1.332.170
Calentador	268.019	1.149.617
Cámara de Combustión	218.864	938.776
Separador	97.779	419.405
	Total \$: 1.069.515	Total Bs.F: 4.587.484

4.5. CONCLUSIONES

1. A mayor temperatura de los gases de escape de la turbina, mayor será la eficiencia térmica de la caldera recuperadora de calor.
2. Por medio de la simulación se logro alcanzar un dimensionamiento aproximado de los equipos esto facilitó la obtención de los costos.
3. La eficiencia térmica de la caldera recuperadora en el ciclo combinado obtenida fue de 40.89%.
4. La eficiencia térmica de la caldera recuperadora fue de 86,5 %.
5. La eficiencia de la caldera disminuye si la temperatura de los gases exhaustos disminuye.
6. La eficiencia de la caldera disminuye al aumentar el flujo de agua de alimentación
7. La generación de vapor sobrecalentado aumenta con la temperatura de entrada de los gases de escape de la turbina.

8. El costo estimado de los principales equipos que conforman la caldera recuperadora de calor fue de Bs.F: 4.587.484

4.6. RECOMENDACIONES.

- Para realizar este tipo de estudios mediante simulación de proceso se cuenta con la mayor cantidad de datos sobre el sistema para la obtención de mejores resultados.
- Para obtener datos más confiables es requerido un programa de simulación con licencia legal de no ser así es muy probable que los resultados presenten mayor porcentaje de desviación.
- Es necesario contar con un buen dimensionamiento de los equipos con el fin de obtener la estimación de costos más aproximada al valor real.

BIBLIOGRAFÍA

1. Greco M. "Evaluación de la factibilidad de un sistema de cogeneración de vapor y energía eléctrica para una planta de amoníaco". (2009).
2. Sosa M. y Maspoli M. "Factibilidad económica de sistemas de cogeneración con turbinas de gas". (2003). Disponible en:
<http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congresos/CLAGTEE2003/papers/TEIRCS%20B-152.pdf>
3. Jutglar L. "Cogeneración de calor y electricidad". Editorial CEAC. España. (1996).
4. Miranda A. "Turbina de gas". Editorial CEAC. España. (1996).
5. Alba R. "Intercambiadores de calor". (2006) disponible en:
http://www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferecia_de_calor_07_intercambiadores.htm
6. Delgado G. "Intercambiadores de calor". (2001). Disponible en:
<http://es.scribd.com/doc/55591845/tiposintercambiadores>
7. Wikipedia. "Ciclo de Rankine". (2007). Disponible en:
http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_Rankine
8. Química. Es. "Ciclo Brayton". Disponible en:
http://www.quimica.es/enciclopedia/Ciclo_Brayton.html
9. Química. Es. "Ciclo Combinado". Disponible en:
http://www.quimica.es/enciclopedia/Ciclo_combinado.html
10. Perry R. y Green D. "Manual del ingeniero químico". 7ma edición. Editorial McGraw-Hill, México.(2001)
11. Van Ness. "Introducción a la termodinámica en la ingeniería química". 5ta edición. Editorial McGraw-Hill. México. (1997).
12. AspenTech. "Hysysplant". (2008). Disponible en:
<http://www.aspentech.com/>

13. Blank L. y Tarquín A. "Ingeniería Económica". 5ta Edición. Editorial. McGraw-Hill (2004).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	SIMULACIÓN DE UNA CALDERA RECUPERADORA DE CALOR MEDIANTE EL SIMULADOR DE PROCESOS HYSYS v3.2
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Reyes V, Daglimar C.	CVLAC: 15.064.194 E MAIL: daglimarreyes@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Caldera

Recuperadora de calor

Eficiencia

Simulación

Ciclo combinado

Turbinas

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería de Petróleo

RESUMEN (ABSTRACT):

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

La presente investigación se basó en el estudio del funcionamiento de una caldera recuperadora de calor a través de la herramienta de simulación de procesos Hysys v3.2. Dicha caldera es empleada en un ciclo combinado de cogeneración eléctrica; para estos efectos se describió principalmente su funcionamiento y se modelo el sistema seleccionado, empleando los datos de diseño para un flujo de gas de escape de 487000 kg/h y una alimentación de agua de 90000 kg/h. Posteriormente se determinó la eficiencia de la caldera en el ciclo combinado la cual fue de 40,84 % y la eficiencia térmica de la caldera como la carga de calor transferida desde la corriente de gas proveniente de la cámara de combustión hacia la corriente de agua arrojó un valor de 86,5%; lo que indica que la caldera recuperadora de calor es de gran eficiencia, en vista de que se aprovecha el 86,7% de la energía en forma de calor, que se puede transferir desde la corriente de gases de la turbina. Además, se realizaron dos casos de estudio mediante Hysys, donde se estudio el comportamiento de la caldera en cuanto a la eficiencia y el flujo de calor, bajo la variación de la corriente de agua en la alimentación y la temperatura de los gases exhaustos.

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Rondón, José	ROL	CA	AS(X)	TU	JU(X)
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	04	08
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis.Simulacion.Caldera.Hysys3.2.doc	Application/ msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K
L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1
2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero de Petróleo

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería de Petróleo

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario para su autorización”

Reyes V, Daglimar C.

AUTOR

Ing. José Rondón

TUTOR/ JURADO

Ing. Felix Acosta

POR LA SUBCOMISION DE TESIS