

SIMULACIÓN DE UNA CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR UTILIZANDO EL SOFTWARE HYSYS

Leiby Montes de Oca Rodríguez, Félix Juan Domínguez Alonso, Yudelkis Díaz Reyes,
Yoney López Hervis, Ángel Tápanez Ramírez
Universidad de Matanzas

El trabajo muestra los detalles de la implementación en el simulador de procesos HYSYS de un modelo de una caldera de recuperación de calor, y la utilización de dicho modelo para analizar la influencia de parámetros de operación y diseño sobre la eficiencia energética de la misma.

Palabras clave: calderas recuperadoras de calor, simulación.

The work shows the details of the implementation in the HYSYS Process Simulator of a model of a heat recovery boiler, and the use of this model to analyze the impact of design and operating parameters on the energy efficiency of the same.

Key word: heat recovery boiler, simulation.

Introducción

Los preciados recursos energéticos de la tierra, se han acumulado por procesos extremadamente largos a través de la historia geológica del planeta, y el hombre ha explotado esas fuentes de energía para su beneficio de forma indiscriminada, lo que ha hecho que se agoten en un corto período de tiempo.

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 ésta la actividad en la que se consumen la mayor cantidad de recursos energéticos.

Para la producción de electricidad, el hombre ha utilizado plantas termoeléctricas tradicionales basadas en ciclo Rankine, plantas nucleares y plantas de turbinas de gas basadas en ciclo Brayton. Más recientemente, se han incorporado las plantas de potencia de ciclo combinado (CCPP), que buscan incrementar la eficiencia de generación combinando una turbina de gas (ciclo Brayton) con una caldera recuperadora y una turbina de

vapor (ciclo Rankine) para la producción de energía eléctrica. Para unir eficientemente el ciclo Rankine de vapor con las turbinas de gas de altas temperaturas, nuevos generadores de vapor se han tenido que desarrollar, surgiendo así las calderas de recuperación de calor. Su eficiencia ha motivado que el mercado para las plantas de potencia de ciclo combinado experimente un rápido crecimiento en los últimos años. /9/

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. /2, 12/

Este trabajo tiene como objetivo fundamental la utilización del simulador de procesos HYSYS para modelar y estudiar una caldera recuperadora de calor, conocida en el mercado con las siglas HRSG (Heat Recovery Steam Generator). La solución de problemas usando simuladores de procesos industriales, se ha incrementado en la misma medida en que éstos se han mejorado, comercializándose hoy

en día un gran número de ellos, que permiten realizar una solución rigurosa de problemas en estado estacionario, y algunos en estado dinámico. Por estas razones, se escoge como herramienta de simulación para este trabajo.

Desarrollo

Caracterización del caso de estudio

La caldera recuperativa estudiada maneja 487 000 t/h de gases de escape de turbina a 544 °C, cuenta con quemado adicional usando 2 000 m³ normales, por hora, de gas natural limpio que permite elevar la temperatura de la corriente gaseosa hasta 656 °C, y produce

vapor sobrecalentado a 522 °C y 86 bar, con una alimentación de agua a 70 °C y 116 bar.

El generador de vapor cuenta con cuatro etapas de economización, un evaporador y cuatro etapas de sobrecalentamiento, estas últimas divididas en dos por un atemperamiento del vapor para cumplir con las condiciones de trabajo de la turbina de vapor. En la sección de evaporación existe una purga o *blowdown* de aproximadamente 1 % del vapor producido.

El gas de escape de caldera a bajas temperaturas (149 °C) es enviado a la atmósfera a través de la chimenea.

En la figura 1 se muestra un esquema de la caldera señalando las secciones de transferencia principales, y se reflejan los datos que se tienen de diseño en la tabla 1.

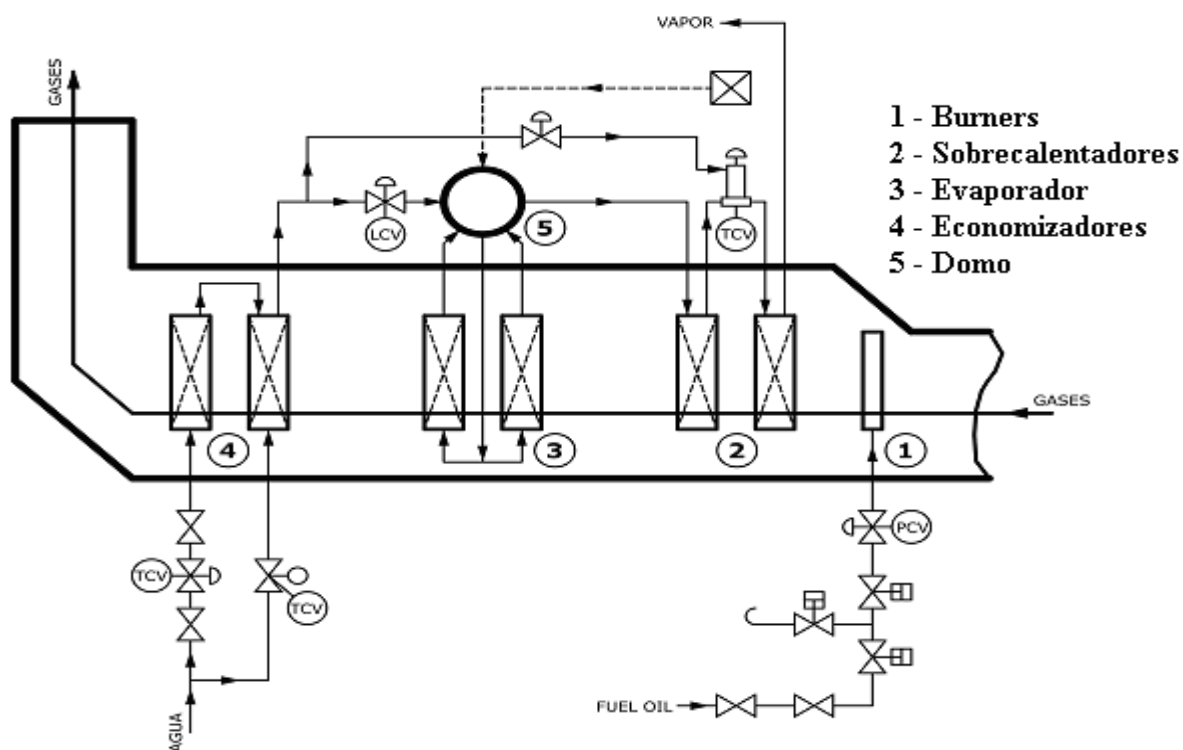


Fig. 1 Esquema de la caldera recuperadora de calor.

Tabla 1
 Datos de diseño aportados por el fabricante de la caldera recuperadora

DATOS DE DISEÑO		
CALDERA RECUPERADORA DE CALOR DE SIMPLE PRESIÓN OPERACIÓN A CARGA BASE		
FIRED		
Temperatura ambiente	°C	30
Flujo de gas escape de turbina	kg/h	487 000
Temperatura gas escape de turbina __ entrada de quemadores	°C	544
__ salida de quemadores	°C	656
Presión del vapor sobrecalentado	barg	85
Temperatura del vapor sobrecalentado	°C	522
Temperatura agua alimentación	°C	70
Presión agua alimentación	barg	115
Evaporación	kg/h	90 000
Temperatura gas entrada sobrecalentador	°C	656
Temperatura gas entrada evaporador	°C	526
Temperatura gas entrada economizador	°C	318
Temperatura gas salida economizador	°C	149
Temperatura agua entrada economizador	°C	70
Temperatura agua salida economizador Sin by-pass	°C	294,4
Temperatura de operación evaporador	°C	305,4
Temperatura entrada agua sobrecalentador	°C	305,4
Contrapresión	mmW G	295
Consumo de calor en los quemadores	kW	19 530

Metodología de simulación

El primer paso para efectuar la simulación con la ayuda de un simulador de proceso es la elaboración de un diagrama de flujo de información, que no es más que un diagrama donde los flujos de masa o energía del proceso son equivalentes a flujos de

información (valores numéricos de las variables de las corrientes y parámetros necesarios), y los equipos del proceso equivalentes a modificaciones de la información que fluye entre ellos. Los datos necesarios para definir una corriente de proceso son flujo, composición, temperatura y presión; y para los equipos, sus parámetros característicos.

El diagrama de flujo de información de la caldera que se estudia se muestra en la figura 2.

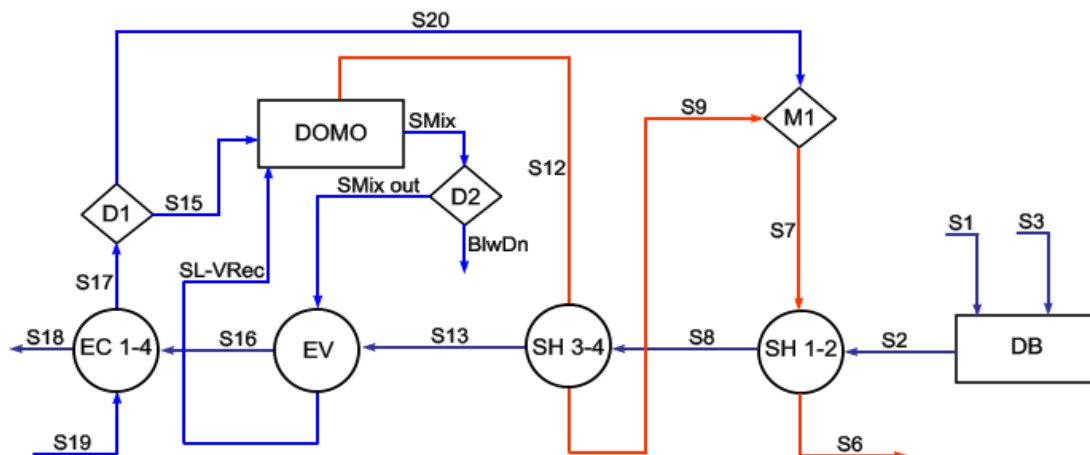


Fig. 2 Diagrama de flujo de información de la caldera recuperadora.

En la figura 2 se representan los módulos necesarios para simular la caldera recuperadora. En esta figura se han agrupado varias zonas de intercambio de calor con el objetivo de facilitar la simulación, siendo los principales módulos los siguientes:

SH 1-2: Sobrecalentadores 1 y 2.

SH 3-4: Sobrecalentadores 3 y 4.

EV: Evaporador.

EC 1-4: Economizadores 1 al 4.

DB: *Duct Burners* (Cámara de combustión).

D1 y D2: Divisores de corriente.

M1: Mezclador de corriente.

El símbolo S_i representa las corrientes de materia que forman parte de este proceso.

Si se analiza la información del diagrama mostrado en la figura 2, se observa que el proceso tiene un reciclo, que viene dado por la circulación natural de la mezcla líquido-vapor entre el domo y el evaporador.

Cuando aparecen reciclos en un proceso, se deben determinar cuántas y cuáles serán las corrientes necesarias por asumir, ya que en estos casos, no es posible realizar la simulación directamente porque esas corrientes serán a su vez salidas y entradas de un mismo módulo. Como se tiene un solo ciclo, se asume la corriente $SL_V\ Rec$ (Reciclo de la mezcla agua/vapor), y se podrán calcular todos los módulos del proceso.

Basado en ello, el orden de cálculo definido es:

1. Conocidas las corrientes S_1 y S_3 , se debe calcular el módulo DB.
2. Definir las corrientes S_{19} y S_{16} y calcular los módulos EC 1- 4 y D1.
3. Asumir la corriente $SL_V\ Rec$; lo que permitirá calcular los módulos DOMO; D2; EV; y se chequea la convergencia usando un módulo de convergencia (R).
4. Una vez obtenida la convergencia en el ciclo anterior pueden ser calculados los restantes módulos que forman la caldera, de acuerdo con el siguiente orden: SH 3- 4; M1; SH 1-2.

Con el orden de cálculo determinado, se pasa a la simulación con ayuda del software seleccionado.

El diagrama de flujo de información modificado se muestra en la figura 3.

En la figura 3, se aprecia que la caldera de recuperación de calor, no es más que una serie de intercambiadores de calor con flujo a contracorriente, divisores y mezcladores de flujo, un domo (separador de fase) y una cámara de combustión.

Como la simulación se realiza a través del

software HYSYS, a continuación se muestran los fundamentos matemáticos que emplea el simula-

dor para esos módulos, y cómo están definidos cada uno de éstos módulos. /10/

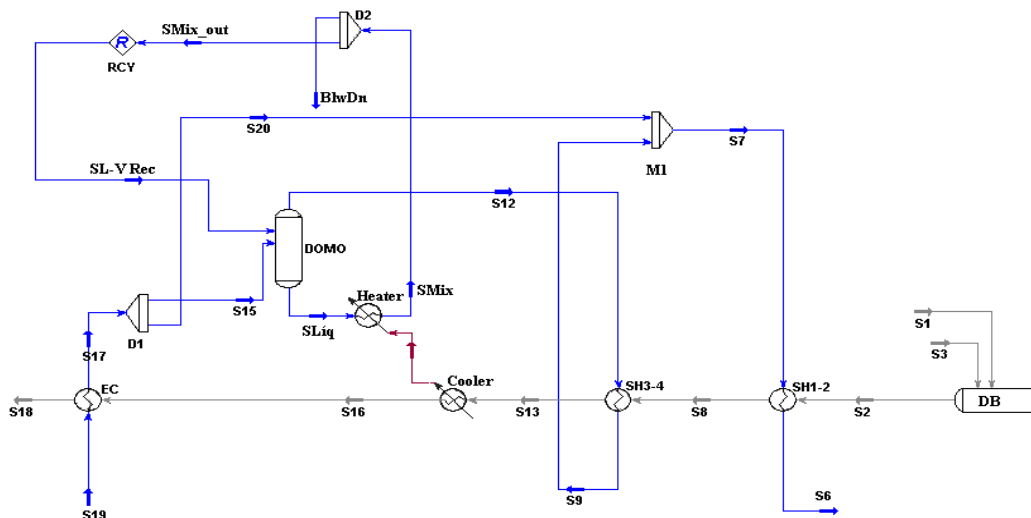


Fig. 3 Diagrama de flujo de información modificado.

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. La expresión general del balance se muestra en la ecuación 1. /10/

$$\left[F_{cold} * (H_{out} - H_{in} / cold) - Q_{leak} \right] - \left[F_{hot} * (H_{out} - H_{in} / hot) - Q_{loss} \right] = 0 \quad (1)$$

donde:

F: flujo másico, kg/s;

H: entalpía, kJ/kg;

Q_{leak} : calor de escape, kW;

Q_{loss} : calor perdido, kW.

Los subíndices *cold* y *hot* designan a los fluidos fríos y calientes, así como *in* y *out* se refieren a las condiciones en la entrada y en la salida, respectivamente.

Para determinar el calor total transferido en el intercambiador de calor de tubo y la coraza, se definen términos como coeficiente global de trans-

ferencia de calor, área superficial disponible y la diferencia media logarítmica de temperatura:

$$Q = U * A * LMTD * F t \quad (2)$$

donde:

U: coeficiente global de transferencia de calor, kW/m² °C;

A: área superficial para la transferencia de calor, m²;

LMTD: diferencia media logarítmica de temperatura, °C;

Ft : factor adimensional de corrección de temperatura.

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

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.

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.

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.

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.

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. /10/

El diagrama de la simulación usando HYSYS se muestra en la figura 4.

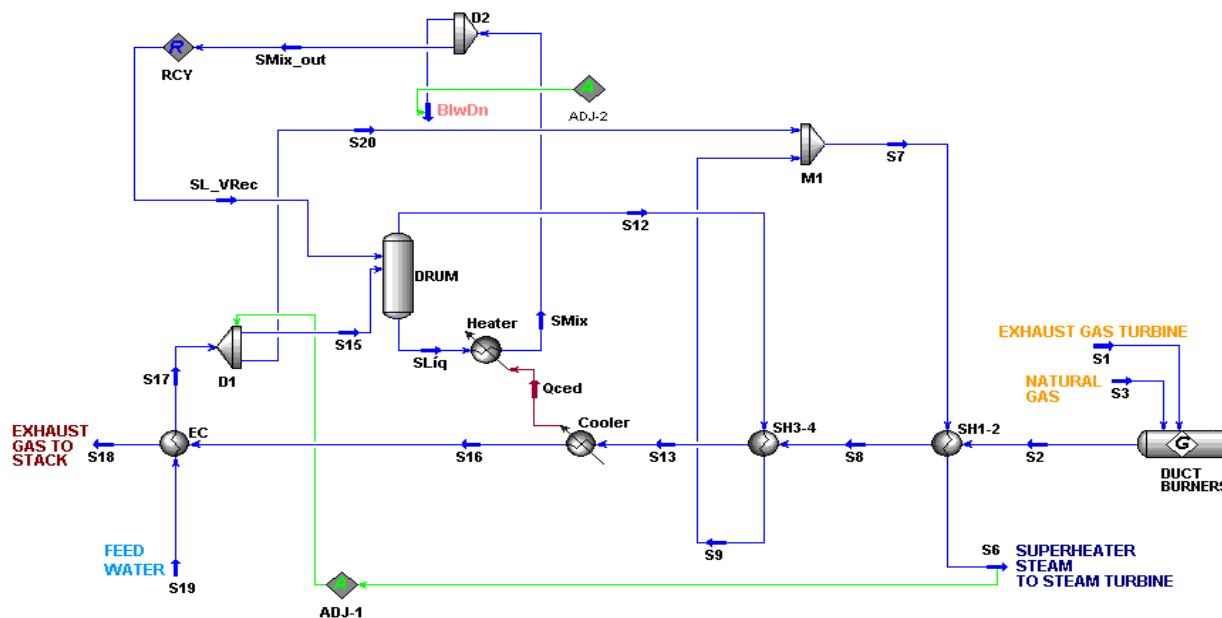


Fig. 4 Diagrama de la simulación en HYSYS de la caldera recuperadora.

Resultados y discusión

Es importante destacar que el análisis del rendimiento de las calderas recuperadoras de calor no necesita, obligatoriamente, el uso de computadoras. Esto puede hacerse por un simple análisis de las leyes termodinámicas. La principal relevancia del uso de simuladores en este análisis es estudiar con detalles el proceso y lograrlo en un período breve de tiempo. Estos softwares incluyen métodos sofisticados de estimación de propiedades, módulos para el diseño de varios equipos, que permiten reducir el tiempo en cálculos engorrosos, y predicen el

comportamiento del proceso bajo determinadas condiciones. Además, solucionan procesos cíclicos que convergen con mucha rapidez. Por estas razones, se estudia una caldera recuperadora de calor a través del uso del simulador de procesos HYSYS.

Para comprobar la efectividad de la simulación se comparan los valores obtenidos por los diferentes módulos con los datos que se tienen del diseño de la caldera (tabla 1). Los valores que se analizan son: temperatura de evaporación, flujo de vapor sobrecalentado y temperatura de salida de los gases. En la tabla 2 se muestran los valores.

Tabla 2
Valores de la simulación en HYSYS

Variables	Diseño	HYSYS	Error (%)
Temperatura de los gases a la salida del economizador (°C)	149,00	145,40	2,48
Temperatura de operación del evaporador (°C)	305,40	305,66	0,09
Evaporación (kg/h)	90 000	89 817,29	0,20

Como se observa en la tabla 2, las diferencias entre los valores de diseño y los que se logran reproducir con el simulador no sobrepasan un 3 % de error. Esto demuestra, que a través del simulador se podrá estudiar el comportamiento de la

caldera recuperadora de calor con una gran confiabilidad. También son utilizados para validar el modelo de simulación de la caldera datos reales de operación de la misma, siendo los resultados obtenidos los que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3
Valores de la simulación de los parámetros reales

Variables	Reales	HYSYS	Error (%)
Temperatura de operación del evaporador (°C)	300,40	300,31	0,03
Evaporación (kg/h)	81 100,00	82 338,40	1,50

En la misma, se puede observar que los errores son muy bajos, indicando que el modelo de simulación implementado en HYSYS representa adecuadamente la operación que ocurre en estos equipos.

Cálculo de la 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 3. /11/

$$\eta_{En_HRSG} = \frac{F_{VSC} * (H_{VSC} - H_{AA})}{(F_{GT} * VCN - N_{GT}) + (F_{DB} * VCN)} * 100 \quad (3)$$

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*;
- VNC: 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*.

Haciendo uso de los datos ofrecidos en la simulación de la caldera recuperadora, y a través de las herramientas de cálculo (*spreadsheet*) del simulador HYSYS, se obtiene que $\eta_{En, HRSG} = 75,59 \%$

Análisis de sensibilidad en la caldera recuperadora caso de estudio

Una vez que se ha verificado que los resultados de la simulación se corresponden con los datos de diseño y con los datos reales, es posible estudiar el comportamiento de la caldera recuperadora ante cambios en determinados parámetros, utilizando las herramientas de estudio de caso del simulador HYSYS.

Análisis del punto de Pinch

El diseño práctico de las calderas recuperadoras está usualmente basado en el concepto termodinámico del Punto de Pinch que regula el perfil de temperatura, tanto del gas como del agua/vapor.

Esto no es más que la diferencia de temperatura entre el gas que entra a la sección de

economización y la temperatura de saturación a la presión de trabajo.

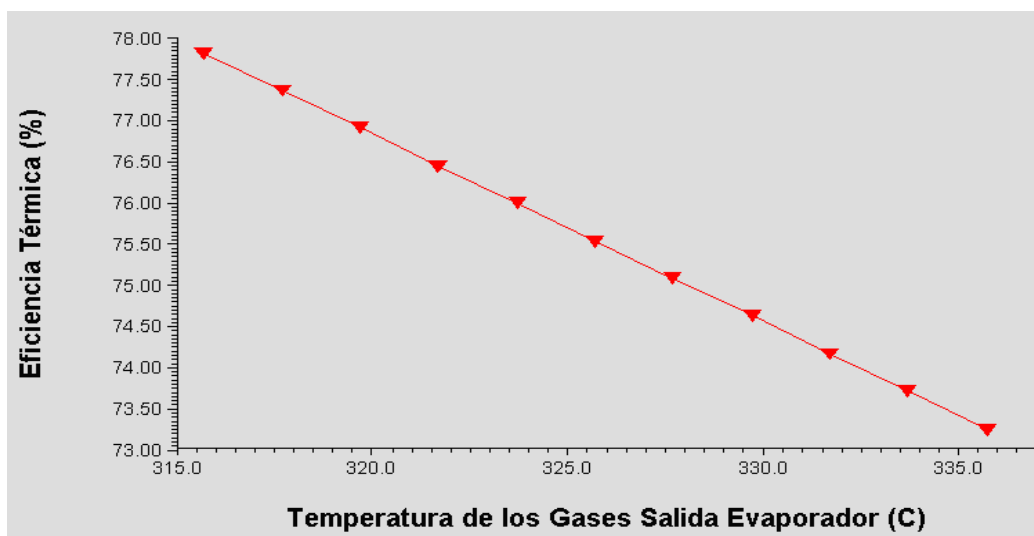


Fig. 5 Comportamiento de la eficiencia térmica con la variación del punto *pinch*.

Es fácil apreciar en la figura 5, que a medida que aumenta el punto *pinch*, 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, obteniéndose un gas de escape de caldera a mayor temperatura, indicando una baja recuperación de calor en la misma.

Es importante señalar que este análisis sólo tiene validez práctica cuando se está diseñando la caldera recuperadora de calor. Del valor de punto de *pinch* depende el área de transferencia de calor de la caldera, y por ende, su tamaño. A medida que esta diferencia de temperatura sea menor, se logra incrementar el calor total recuperado en el evaporador, pero implica un aumento en el área de transferencia, y por ende, en el costo de inversión de la caldera.

Por estos motivos, se hace fundamental un análisis económico que permita buscar un óptimo entre los parámetros termodinámicos que minimicen el costo de inversión y maximicen la eficiencia en la operación.

En la literatura científica /5,6,7/ se plantea que la optimización termoeconómica es la ideal para el diseño de estas calderas recuperadoras.

Temperatura de entrada de los gases

Éste es un parámetro importante en la operación de la caldera, pues de este valor dependerá la energía que se tendrá disponible para la producción de vapor. Por estas razones se estudió el comportamiento de la eficiencia térmica de la caldera recuperadora (para las condiciones de diseño) para estos dos parámetros.

Se observa en la figura 6, que la eficiencia energética aumenta con la temperatura de entrada de los gases, ya que se tiene una cantidad mayor de energía disponible a la entrada de los sobrecalentadores de la caldera recuperadora, posibilitando una mayor producción de vapor. Este valor de temperatura estará condicionado por la resistencia térmica de los materiales de construcción de la caldera, por la eficiencia de las turbinas de gas y por las pérdidas de calor que puedan existir.

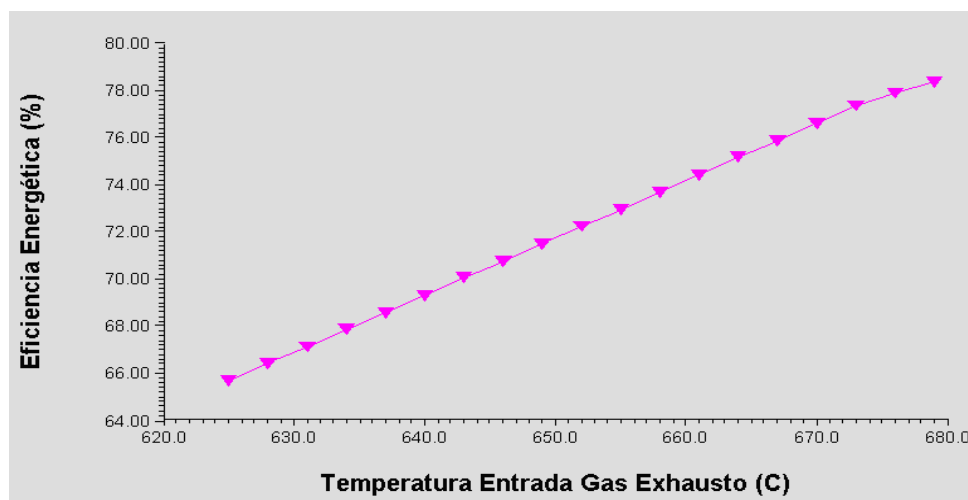


Fig. 6 Comportamiento de la eficiencia térmica con la temperatura del gas exhausto.

Conclusiones

- Con la simulación de la caldera recuperadora de calor usando el software HYSYS, se ha logrado obtener un modelo riguroso que permite predecir el comportamiento de los principales parámetros operacionales, así como los valores de eficiencia térmica de la misma, logrando errores por debajo del 3 % en todos los parámetros analizados.
- La eficiencia térmica de las calderas recuperadoras disminuye con el aumento del punto *pinch*, debido a que la temperatura del gas a la entrada del economizador será mayor reduciendo la transferencia de calor en todas las secciones de la caldera, obteniéndose un gas de escape de caldera a mayor temperatura, lo que indica una baja recuperación de calor en la caldera. Todo esto influye de manera directa en la generación de vapor sobrecalentado en la caldera.
- La generación de vapor sobrecalentado aumenta con la temperatura de entrada de los gases exhaustos, ya que se tiene una mayor energía disponible a la entrada de la caldera recuperadora, y se logra un aumento en la eficiencia energética de la misma. Este valor de temperatura estará condicionado por la resistencia térmica de los materiales de construcción de la caldera.

Bibliografía

1. Benz, S. J.; Francesconi, J., *Introducción al uso del simulador HYSYS*, Rosario (Argentina), 2001.
2. Blood, D.; Simpson, S.; Harries, R., *Heat Recovery Steam Generators for Power Generation and Other Industrial Applications*, Report No. COALR232, 2003.
3. Boehm, R.F., *Developments in the Design of Thermal Systems*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
4. Brenner, S. J. *et al.*, 2003, *Hysys Documentation*, Aspen Technology Inc. (USA), 2003.
5. Butcher, C. J.; Reddy, B. V., *Second law analysis of a waste heat recovery based power generation system*, *International Journal HEAT and Mass Transfer*, 2007.
6. Casarosa, C.; Donatini, F.; Franco, A., "Thermoeconomic optimization of heat recovery steam generators operating parameters for combined plants", *Energy*, 2004.
7. Cenusa, V. E.; Badea, A.; Feidt, M.; Benelmir, R., "Exergetic Optimization of the Heat Recovery Steam Generators by Imposing the Total Heat Transfer Area", *International Journal Thermodynamics*, 2004, vol. VII, No. 3, 2004, págs. 149 - 156.
8. Himmelblau, D. M., *Principios básicos y cálculos en ingeniería química* (6ta ed.), Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 1997.
9. Horlock, J. H., "Chapter 7 The Combined Cycle Gas Turbine (CCGT)". En: Pergamon (Ed.). *Advanced Gas Turbine Cycles*, First edition. Cambridge, U.K., Elsevier Science, 2003, págs. 109 - 129.
10. Hyprotech *HYSYS 3.1 Documentation, Operations Guide*, Hyprotech, a subsidiary of Aspen Technology, Inc., 2002.
11. Montes de Oca Rodríguez, L., Desarrollo de un

modelo de simulación para la evaluación de una caldera recuperadora de calor usando un simulador de procesos, Tesis en opción al grado de Master en Termoenergética Industrial, Matanzas, Cuba, Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", 2007.

12. Teir, S., "Modern Boiler Types and Applications", Steam Boiler Technology Book, Helsinki, University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Energy, Engineering and Environmental Protection, 2002, págs. 1-14.