SIMULACION DE PROCESOS TERMICOS PARA MEJORA DEL SUMINISTRO DE VAPOR DE UNA FABRICA DE TRIPLAY

JOSE ARTURO PEREZ GALINDO[1] , IGNACIO R. MARTIN DOMINGUEZ[1]
CIIDIR - IPN, Unidad Durango. Sigma s/n, Fracc. 20 de noviembre, 34220, Durango, Dgo.

RESUMEN

Se describe el equipo utilizado para la fabricación de triplay en una fábrica ubicada en la ciudad de Durango. Se analiza el sistema existente para la producción de vapor, consistente en una caldera que utiliza combustible Diesel. Se describen los problemas de operación del equipo, así como su elevado costo de operación. Se plantea la alternativa de substituir la caldera por un evaporador que utilice aceite térmico, derivado de otro proceso de secado existente en la misma planta. Se describe el desarrollo de un pequeño simulador en computadora del sistema térmico, y su utilización como herramienta para la toma de decisiones técnico - económicas durante el concurso y adquisición del nuevo equipo.

INTRODUCCION

La operación óptima de las fábricas requiere de mejorar continuamente los sistemas de producción que las componen. Esto es de particular importancia en sistemas que utilizan energía, ya que los costos de ésta son mayores cada día. Las fábricas de triplay son grandes usuarios de energía, que se utiliza tanto en forma de combustible como de energía eléctrica. Es también común que los equipos que constituyen la fábrica sean antiguos y en muchos casos obsoletos.

Para mejorar la operación de fábricas de triplay es común, en la región de Durango, el uso de calderas que utilizan aserrín y desperdicios de la misma planta. En algunas instalaciones, con el objetivo de minimizar riesgos, se sustituye el medio de trabajo del sistema de calentamiento, de vapor a aceite térmico. Cuando se requiere modificar las instalaciones de una fábrica de triplay, los productores ocurren a proveedores que, en general, no realizan análisis detallados del comportamiento de los sistemas y basan sus recomendaciones en la "*experiencia*". Este procedimiento de trabajo origina que los sistemas resultantes operen, aunque no sea de forma óptima técnico-económica. Esto es cierto, por ejemplo, en el caso de una prensa de pegado de triplay en la cual el cambio de vapor a aceite como medio de calentamiento no es correcto, debido a que el aceite se enfría continuamente al ceder su energía al triplay y el curado del pegamento no ocurre a temperatura uniforme.

Una prensa de triplay consiste de dos o más placas de acero con canales internos a los que se suministra vapor. En medio de las placas se coloca el ensamble de chapa de madera que será convertido en triplay. Este ensamble se forma por tres láminas delgadas de madera de tamaño un poco mayor que el del triplay comercial (4 ft x 8 ft), de las cuales la central se engoma por ambas caras. Para un pegado correcto, la goma debe sujetarse a condiciones fijas de temperatura y presión, que se obtienen prensando el ensamble entre las dos placas de acero. A su paso por los canales de las placas el vapor se condensa, cede su energía al ensamble para obtener la temperatura requerida y sale finalmente como líquido. Por ser un proceso a temperatura constante, se logra que el curado de la goma sea uniforme a lo largo y ancho de la hoja de triplay.

En este trabajo se presenta el análisis que se realizó para evitar el uso de aceite en una prensa de triplay. La prensa operaba con vapor producido por una caldera antigua que causaba muchos problemas de operación y que utilizaba aproximadamente 300 litros diarios de diesel. Dado que en la fábrica ya se había sustituido el sistema de vapor para secado de chapa por uno a base de aceite, los proveedores de equipo recomendaban igual sustitución para las placas de la prensa. Análisis previos, Pérez *et al.* (1994) y Pérez (1995) mostraron que el sistema de aceite podía proveer un flujo máximo de 60,000 lb_m/h de aceite a una temperatura de 392°F con la bomba, a un máximo de 30 psi de diferencia de presión.

[1] Becarios de COFAA - IPN

DESCRIPCION DE SISTEMAS

Sistema Anterior

En la Figura 1 se muestra un diagrama esquemático de la prensa y su sistema de suministro de vapor. Como se observa, de la caldera sale una mezcla de agua y vapor que se separa en el tanque localizado arriba de la caldera. El vapor se dirige hacia la prensa y el agua se recircula con la bomba hacia la caldera. El vapor producido pasa por la prensa, cede su energía a la madera y sale condensado hacia la trampa de vapor. En esta, se asegura que haya condensación total en la prensa y que solamente salga agua hacia el tanque de condensado.

La caldera es marca Clayton, modelo WO-50, con una capacidad de producción de vapor de 1,880 lb_m/h a la presión y temperatura de operación requeridas en la prensa. Dado que las condiciones de operación distaban de ser óptimas, debido a la edad del equipo, se llevaron a cabo un conjunto de mediciones de consumo de vapor en la prensa. Los resultados fueron que la capacidad mínima que debería tener la caldera es de 1,550 lb_m/h, ya que el pegado del triplay de 5/8" requiere de ese flujo.

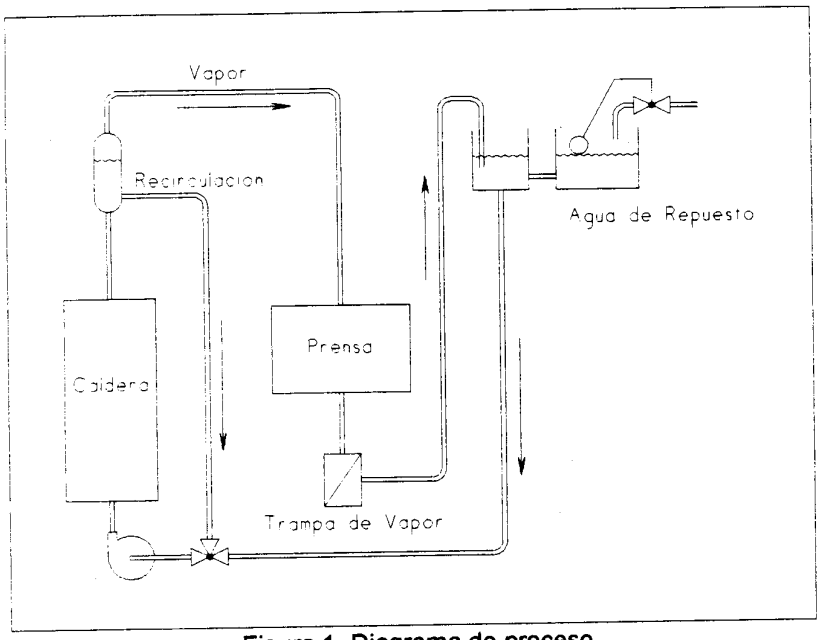


Figura 1. Diagrama de proceso

Considerando que la caldera tiene una capacidad de 1,880 lb_m/h, se puede calcular un factor de seguridad de (1,880/1,550 - 1)*100 = 21.3%. Dado la importancia de disponer de algo de capacidad extra se decidió mantener la producción de vapor en ese valor. Otro objetivo de las mediciones fue obtener la presión y temperatura de operación requeridas en la prensa. La calidad de la instrumentación disponible no permitió medir con certidumbre las variables y se estimó que la presión del vapor suministrado a la prensa debería ser entre 20 y 60 psig, y su temperatura de alrededor de 250°F.

Sistema Propuesto

Como ya se mencionó, no es conveniente la sustitución del vapor por aceite en la prensa, y sin embargo, se dispone de aceite térmico a alta temperatura. Con esto en consideración, la opción a seguir fue el diseño de un evaporador que utilizara aceite caliente para producir vapor. Este tipo de equipos se denominan calderetas en las centrales termoeléctricas, aunque en éstas se utiliza vapor a alta presión para producir vapor a baja presión. También se les llama rehervidores en plantas químicas, donde se aplican a la destilación de fluidos varios.

La Figura 2 muestra un diagrama esquemático de un equipo de este tipo. En estos equipos, el fluido caliente viaja por adentro de los tubos y cede su energía al fluido frío, que se encuentra en la coraza y hierve al absorber la energía. El vapor generado se extrae por la brida de la parte superior de la coraza. Con esto en consideración, se propuso utilizar el aceite caliente disponible como fluido de calentamiento

alimentándolo a los tubos y producir el vapor necesario por ebullición del agua que se suministraría a la coraza del equipo.

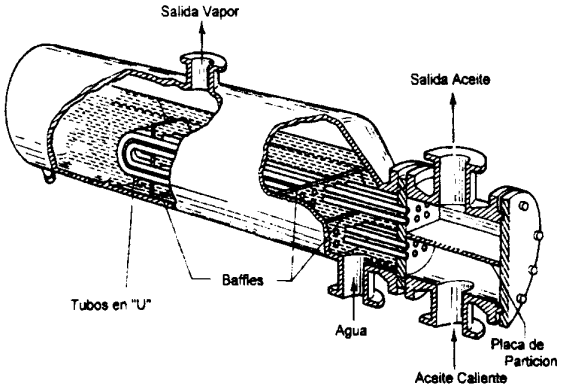


Figura 2. Esquema del evaporador

Las condiciones de diseño del evaporador deben satisfacer las necesidades de operación del sistema. Por lo tanto, el flujo máximo disponible es de 60,000 lb_m/h de aceite a una temperatura de 392°F, y se deben producir 1,880 lb_m/h de vapor entre 20 y 60 psig de presión y a 250°F. Adicionalmente, una "*regla de dedo*" de control específica que el 60% de la diferencia de presión de la bomba debe ser para control, lo cual deja un máximo de 12 psi para caída de presión en el evaporador. Este conjunto de restricciones que se deberían cumplir hicieron necesario el tener que evaluar un conjunto muy grande de alternativas, lo que sólo puede realizarse eficientemente mediante la simulación del proceso en computadora.

DISEÑO DEL SIMULADOR

Transferencia de Calor

Con los valores de temperaturas y la presión se obtiene el balance térmico del evaporador a través de la ecuación:

$$Q = M_v C_{pl}(T_v - T_a) + M_v h_{fg} = M_o(T_{eo} - T_{so}) \qquad (1)$$

Esta ecuación establece que el calor requerido, Q, para calentar el flujo de vapor, M_v, desde la temperatura del agua del tanque T_a, hasta la del vapor T_v, más el requerido para convertir el agua en vapor, calor de evaporación h_{fg}, debe ser suministrado por el enfriamiento del flujo de aceite M_o, desde la temperatura a la que entra T_{oe}, hasta su temperatura de salida T_{os}. Esta ecuación debe ser satisfecha para cualquier combinación de flujo de aceite y presión de vapor.

La ecuación de transferencia de calor es la segunda que debe ser satisfecha por el diseño, y relaciona el calor transferido Q, con las condiciones de geometría del equipo (a través del aérea de transferencia de calor A_t, y del coeficiente de transferencia de calor U) así como con las temperaturas del aceite y del vapor (por la diferencia media logarítmica de temperatura Q_m):

$$Q = U A_t \Theta_m \qquad (2)$$

La diferencia media logarítmica de temperatura se calcula a partir de las temperaturas del aceite y del vapor por medio de:

$$\Theta_m = \frac{(T_{oe} - T_v) - (T_{os} - T_v)}{\ln\left(\frac{T_{oe} - T_v}{T_{os} - T_v}\right)} \qquad (3)$$

El área de transferencia de calor es función del número de tubos N_t , del diámetro externo D_e , y la longitud L:

$$A_t = \pi D_e N_t L \tag{4}$$

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor se requiere evaluar tres resistencias al flujo de calor, la primera es entre el fluido de dentro de los tubos y la pared del tubo, la segunda es la que ofrece el espesor de la pared del tubo y la última es la del agua que esta siendo evaporada en el exterior de los tubos. La resistencia interna, R_i , es función de la temperatura (a través de la variación de las propiedades físicas en función de ésta), y del flujo y geometría (porque la combinación de éstas produce cambios de la velocidad del fluido), y se calcula del coeficiente interno de transferencia de calor h_i, a través de:

$$\frac{1}{R_i} = h_i = 0.023\left(\frac{k}{D}\right)\left(\frac{\rho VD}{\mu}\right)^{0.8}\left(\frac{\mu c_p}{k}\right)^{0.4} \tag{5}$$

bien, si el flujo es laminar:

$$\frac{1}{R_i} = h_i = 1.86\left(\frac{k}{D}\right)\left(\frac{\rho VD}{\mu}\right)^{0.33}\left(\frac{\mu c_p}{k}\right)^{0.33}\left(\frac{D}{L}\right)^{0.33} \tag{6}$$

en donde influyen las propiedades: conductividad térmica, k, calor específico c_p y viscosidad m; el diámetro interno y longitud del tubo, D y L; y el flujo de aceite, M_o , puesto que la velocidad se calcula de:

$$V = \frac{4 M_o}{\rho N_t \pi D^2} \tag{7}$$

La resistencia del tubo R_t , se calcula dividiendo el espesor del mismo, t, entre su conductividad térmica k_t . Dado que en la ebullición para formar vapor, la resistencia al flujo de calor es mucho menor que en los otros dos conceptos, es común tomar un valor constante de R_o = 0.001 h-ft^2-°F / BTU.

Así, el coeficiente de transferencia de calor se obtiene de:

$$U = \left(R_i + \frac{t}{k_t} + R_o + F_s\right)^{-1} \tag{8}$$

en la cual el factor de ensuciamiento F_s , sirve para tomar en cuenta la operación al futuro, cuando por las condiciones de servicio se genere adherencia de partículas en las paredes de los tubos. Este factor se estima en base a las temperaturas de operación y a los líquidos manejados. El valor estimado para este evaporador fue de F_s = 0.002.

La selección del diámetro de los tubos del evaporador se realizó en base a los materiales que pueden utilizarse para manejar el aceite, cobre y acero, y a la facilidad de conseguir tubos de esa medida. De ahí, se seleccionaron tubos con un diámetro exterior de 3/4", e interior de 0.584".

Con propiedades del aceite obtenidas del fabricante, y como función de la velocidad de flujo, se calcularon coeficientes de transferencia de calor a varias velocidades. Para facilitar su uso en el

simulador, se obtuvo la siguiente correlación, por medio de un ajuste por mínimos cuadrados, para el rango de velocidades de aceite esperadas.

$$U = -177.3 + 170.17V - 26.17V^2 + 1.46V^3 \tag{9}$$

Caída de Presión

La caída de presión se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \frac{f\rho V^2 Ln}{2gD_i} \tag{10}$$

donde el factor de fricción para tubos de este tipo se obtuvo de la literatura, Kern (1978), y fue de f = 0.0003. D_i es el diámetro interno de los tubos, g = 32.2 lb_m-ft / lb_f-s^2 y n es el número de pasos del aceite a través del evaporador. Se requiere que el aceite pase varias veces para evitar diseños de longitud exagerada.

También debido al número de pasos se produce otro componente de caída de presión por retornos, al dar vuelta el aceite para volver a pasar por el evaporador:

$$\Delta P_r = \frac{4n\rho V^2}{2g} \tag{11}$$

Sumando las dos caídas de presión se obtendrá la caída de presión total en el evaporador, que debe ser menor a 12 psi en cualquier diseño.

Simulación en Computadora

Se desarrollo un código de cómputo en un paquete de Hoja de Cálculo, en el cual se incorporaron los modelos descritos antes. El objetivo de la simulación debería ser el poder observar gráficamente el comportamiento del evaporador bajo diferentes parámetros de diseño, para con ello poder definir las bases de diseño del evaporador y convocar un concurso para cotizaciones de diversos fabricantes de intercambiadores de calor. Así mismo, utilizando el simulador fue posible evaluar objetivamente los diseños propuestos por los diferentes fabricantes, para determinar si se estaban ofreciendo equipos capaces de satisfacer el servicio requerido, o si bien se trataba de equipos sobrediseñados y por ende demasiado caros.

Tabla 2. Variables del simulador

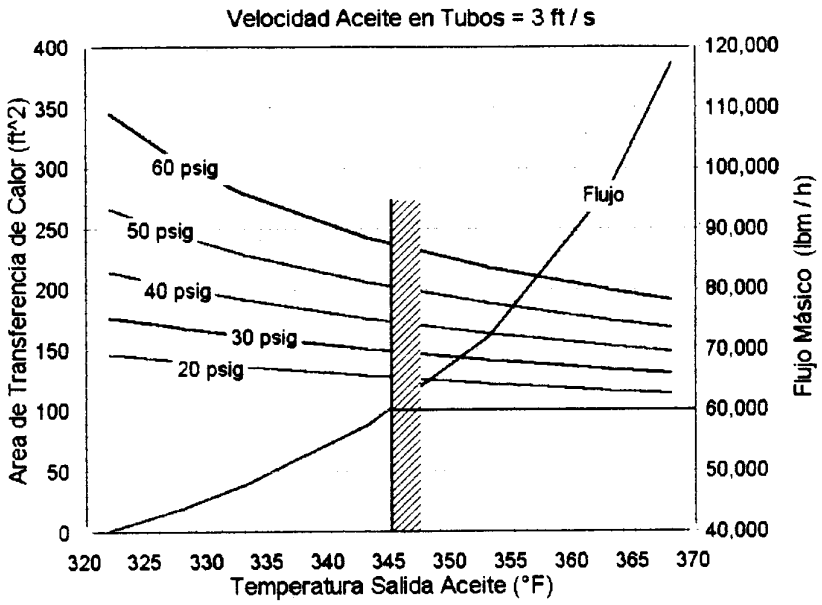
Variables Independientes	Variables Dependientes
Temperatura salida aceite (T_{os})	Flujo de aceite (M_o)
Velocidad flujo aceite (V)	Caída presión en aceite (DP)
Presión del vapor (P_v)	Aérea de transf. calor (A_t)

El diseño del evaporador está acotado como se muestra en la tabla 1. La restricción en la velocidad de flujo del aceite surge de las prácticas recomendadas por los fabricantes de este tipo de equipos, debido a que para valores inferiores a 3 ft/s se tienen coeficientes de transferencia de calor muy bajos, mientras que a valores superiores

a 7 ft/s se tienen perdidas de presión muy considerables. El simulador se estructuró para analizar el diseño del evaporador dividiendo las variables importantes como se muestra en la tabla 2. Si bien no se muestra en este reporte, también se estableció como independiente el número de pasos del aceite por el evaporador, para con ello gobernar la longitud del equipo y mantenerla dentro de límites recomendados.

RESULTADOS DE LA SIMULACION

La primera característica de funcionamiento del equipo es que el flujo de aceite requerido es prácticamente independiente de la presión de operación del vapor, mientras que depende básicamente de la temperatura del aceite que se tenga en la salida del equipo. Esto se puede apreciar en las figuras 3 y 4. De comparar estas dos figuras también se aprecia gráficamente la importante reducción que se tiene en el aérea de transferencia de ft/s (figura 3) a otra de 7 ft/s (figura 4), (nótese que son escalas diferentes).



De las figuras mencionadas se observa también que la limitante de flujo de aceite menor igual a 60,000 lb_m/h establece que, a cualquier velocidad de flujo de aceite, la temperatura de salida del aceite deberá ser menor a 345°F, lo cual establece un límite inferior al aérea de transferencia de calor (costo) requerida para cada presión de operación del vapor. También se observa por lo tanto que a mayor presión del vapor se requiere más área de transferencia de calor. Con la información anterior se puede a continuación observar la figura 5, en la cual se muestra el efecto de la velocidad de flujo del aceite sobre la caída de presión en el mismo y sobre el área de transferencia de calor requerida, todo esto para una presión del

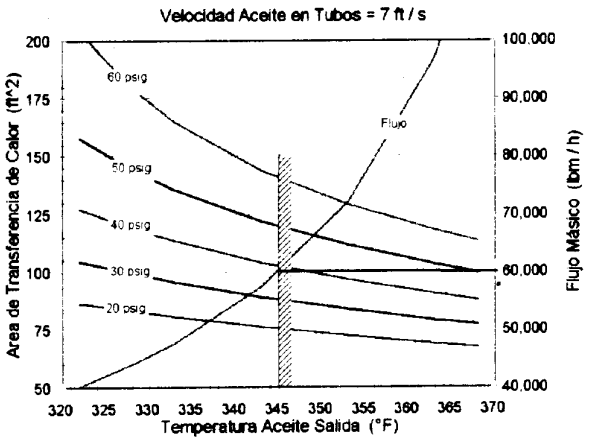


Figura 4. Simulación a 7 ft/s

vapor de 60 psig. Al introducir la restricción de una caída máxima de presión en el flujo de aceite de 12 psi, se delimitan finalmente los rangos factibles de operación para las variables de diseño, y se tiene que el rango de velocidades del flujo de aceite se esperaría entre 5.8 y 7 ft/s, mientras que las áreas de transferencia de calor correspondientes serían entre 220 y 140 ft^2. Si el objetivo del estudio fuese el de diseñar el evaporador, el siguiente paso sería el de modelar los costos del área de transferencia de calor y de bombeo, para con ello buscar el punto óptimo de diseño en cuanto a costos, que a su vez cumpliera con satisfacer el servicio requerido.

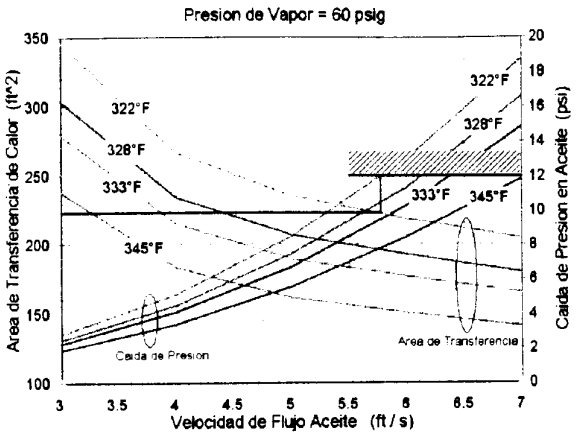


Figura 5. Simulación a 60 psig

Con la información obtenida hasta este punto se procedió a solicitar cotizaciones para el suministro del evaporador a varios fabricantes de equipo. La información que se les suministró consistió en: tipo de aceite, temperatura y flujo másico disponible, así como producción requerida de vapor y rango de presiones requeridas.

ANALISIS DE PROPUESTAS

Los datos más importantes de las propuestas recibidas se muestran en la tabla 3, en ella se aprecia que los proveedores B, C, D y E ofrecieron equipos con características que caen dentro de los rangos predichos por el simulador. El proveedor A, sin embargo, ofreció un equipo sobradamente grande, a un tamaño y costo de más del doble del proveedor E. El proveedor A resultó ser una de las compañías con más renombre en el país, lo cual podría haber inclinado la decisión a su favor, sin embargo, basándose en los resultados del simulador se escogió al proveedor E, que cumplía sobradamente según los resultados del simulador. Las pruebas de operación del equipo, una vez instalado, confirmaron su operatividad satisfactoria.

Tabla 3. Comparación de ofertas

	A	B	C	D	E
Diámetro coraza (in)	37	28	24	48	22
Diámetro haz de tubos (in)	25	18	--	18	16
Número de tubos	--	51	--	52	68
Area transf. calor (ft^2)	846	303	320	249	236
Caída de presión (psi)	8.35	--	6.2	5.5	6.16
Costo ($ Mex)	89,460	64,400	87,975	54,768	41,400

COSTO BENEFICIO

Un análisis simple de costo beneficio se obtuvo de considerar el costo del combustible ahorrado, al utilizar el evaporador en lugar de la caldera a Diesel. El gasto que se tenía por concepto de combustible era de aproximadamente $750 diarios, mismos que prácticamente se ahorraron por completo, puesto que el combustible del calentador de aceite térmico es aserrín y desperdicios de la planta. Se estimó que la inversión se amortizó en tan sólo 8 meses de operación. Además debe mencionarse que la operación y el mantenimiento se simplificaron grandemente, debido a que el nuevo equipo es mucho más simple en ambos conceptos.

CONCLUSIONES

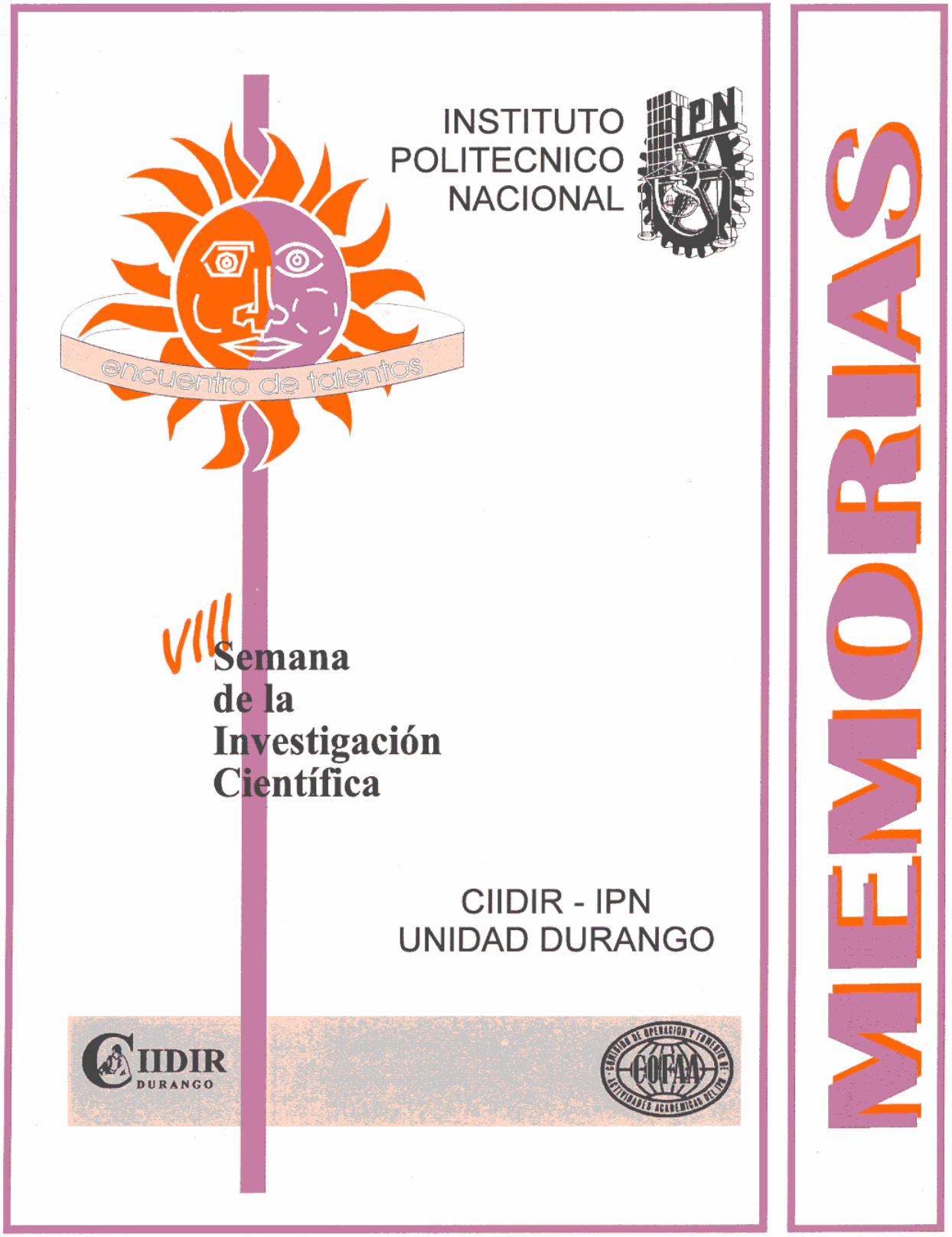
La simulación de procesos térmicos es una herramienta muy poderosa como auxiliar en la toma de decisiones económicas en la industria. Puede utilizarse para analizar el funcionamiento de sistemas ya existentes, para establecer bases de comparación entre propuestas de venta de equipo, o bien para diseñar sistemas nuevos. En el caso aquí presentado sirvió como ayuda indispensable para la toma de una decisión que inclusive, a opinión de proveedores consultados antes del estudio, no era posible llevarse a cabo físicamente.

BIBLIOGRAFIA

1. Kern, D. Q . ***Process Heat Transfer***. McGraw-Hill 1978

2. Pérez-Galindo, J A ***Modificaciones al sistema de calentamiento de aceite de FOTRIMEX***. Reporte de Ingeniería. Instituto Tecnológico de Durango. Julio 1995

3. Pérez-Galindo, J A y Martín Domínguez, I. R. ***Evaluación del comportamiento de un calentador de aceite térmico***. FOTRIMEX - Instituto Tecnológico de Durango. Durango, Dgo. 1995



Memorias de la VIII Semana de la Investigación Científica

Instituto Politécnico Nacional. CIIDIR Unidad Durango

Durango, Dgo. Abril 14-18 (1997)