

Desarrollo de Precalentadores de Aire para una Caldera de 100 CC de potencia

Ricardo Maciel¹, Georgiy Polupan¹, Ignacio Carvajal Mariscal¹, Florencio Sánchez Silva¹, Yevgen Pysmenny², Aleksander Gershuni².

¹ Instituto Politécnico Nacional, ESIME IPN, México

maciel5911@yahoo.com.mx

² Universidad Técnica Nacional de Ucrania, Kyiv, Ucrania

gpolupan@ipn.mx

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo principal el ahorro de energéticos, utilizando la energía contenida en los gases de escape de calderas industriales. Para obtenerlo se utiliza esta energía para calentar el aire que llega a la cámara de la combustión de la caldera por medio de un precalentador de aire compuesto de termosifones bimetálicos aletados.

Se desarrolló el procedimiento y el programa del cálculo de 14 precalentadores de aire, que incluyen el diseño térmico el cual considera las ecuaciones fundamentales de transferencia de calor, mecánica de fluidos, balance de energía, etc.

Se trabajo con una serie de 14 precalentadores de aire para calderas industriales con potencia desde 30 CC hasta 800 CC. El ejemplo de aplicación comprende el análisis térmico de precalentadores de aire para una caldera de 100 CC.

ABSTRACT

The present development has as primary target the saving of power, using the energy contained in exhaust gases of industrial boilers. In order to obtain this energy is used it to warm up the air that arrives at the camera of the combustion of the boiler by means of an air preheater composed of finned bimetallic thermosiphons. It was developed to the procedure and the program of the calculation that include the thermal design which considers the equations fundamental of heat transference, mechanics of fluids, balance of energy, etc. A series of air preheaters was developed for industrial boilers with power from 30 CC to 800 CC. The application example includes/understands the thermal analysis of air preheaters for a boiler of 100 CC.

NOMENCLATURA

\bar{h}_{conv}	Coef. prom. de trans. de calor por conv. $[W/m^2K]$	$[W/m^2 \circ K]$
h_{1rel}^g	Coef. de conv. rel. prom. en gases. $[W/m^2K]$	$[W/m^2 \circ K]$
h_{1rel}^a	Coef. de conv. rel. prom. en aire. $[W/m^2K]$	$[W/m^2 \circ K]$
h_{eb}	Coef. de conv. en ebullición. $[W/m^2K]$	$[W/m^2 \circ K]$
h_{cond}	Coef. de conv. en condensación. $[W/m^2K]$	
E	Coeficiente de eficiencia teórica de aleta.	
Pr	Número de Prandtl.	
Q	Calor transferido. $[W]$	
R_{cond}	Resistencia térmica por conducción. $[K/W]$	$[\circ K / W]$
R_{conv}	Resistencia térmica por convección. $[K/W]$	$[\circ K / W]$
R_{cont}^*	Resistencia de contacto específica. $[K/W]$	
Re	Número de Reynolds.	
ΔT_{ml}	Diferencia de temp. media logarítmica. $[K]$	
λ	Conductividad del fluido. $[W/mK]$	$[W/m \circ K]$
μ_A	Coeficiente de ensanchamiento de la aleta.	
ν	Viscosidad cinemática. $[m^2/s]$	

ρ	Densidad.	$[kg/m^3]$	$[kg/m^3]$
ρ_n	Densidad de vapor.	$[kg/m^3]$	
ψ_E	Coef. de corrección para el coef. de eficiencia de aleta.		
k_p	Coeficiente k_p .		

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de empresas se expone que hay conciencia sobre el uso eficiente de la energía y la disminución de contaminación ambiental, pero también es frecuente que carezcan de tecnología, personal técnico o equipo para instalar métodos de ahorro de energéticos y disminución de contaminación. El presente trabajo tiene como objetivo el crear esta tecnología en las calderas industriales que son equipos con un alto consumo de combustible, y sus elevados costos así como la problemática de la contaminación ambiental, nos han llevado a buscar métodos que permiten el uso racional y eficiente de la energía, cuya temperatura de los gases de escape son mayores a 150 °C. Para recuperar esta energía se utilizan precalentadores de calor convencionales pero se tiene el inconveniente de que sus dimensiones son extremadamente grandes. Para solucionar este problema se pueden desarrollar precalentadores de aire en base de termosifones bimetalicos aletados para aprovechar energía de gases de escape de calderas industriales altamente eficientes, los cuales recuperan la energía de desecho de las calderas, se recomienda utilizar como combustible gaseosos, gas natural ya que disminuye los óxidos de azufre. En la actualidad existe una gran variedad de metodologías de cálculo y diseño de intercambiadores de calor convencionales. Para el diseño de precalentadores de calor en base a termosifones aletados bimetalicos, no existen estándares que sean del dominio público. Este trabajo propone el procedimiento de cálculo de los intercambiadores de calor en base a termosifones aletados con la finalidad de aprovechar al máximo el calor contenido por los gases de la combustión en calderas industriales, para de esta forma, incrementar su eficiencia y por consecuencia reducir el consumo de combustible y sus emisiones contaminantes utilizando como combustible gas natural.

DESARROLLO

Construcción del termosifón:

El precalentador de aire está formado por termosifones, los cuales se componen en forma general de un recipiente sellado con aletas que opera con agua como fluido de trabajo con un 25% de su volumen interior Fig. (1). Esta construcción permite un excelente rango de temperaturas de operación de 30 °C hasta 235 °C, y se conforman de tubos bimetalicos (figura 2). La parte interna del tubo bimetalico es hecha de acero (1), cuyo grosor soporta presiones internas hasta 70 bar y temperaturas del metal hasta 300 °C. La parte externa del tubo bimetalico es hecha de aluminio. El tubo de aluminio (2) cuenta con aletas espirales transversales con el objetivo de aumentar la superficie de transferencia de calor Fig. (2). La longitud del termosifón esta dividida en tres partes, sección del evaporador, sección adiabática y sección del condensador. El calor es suministrado en la sección del evaporador (3), donde se encuentre el líquido saturado, transformando al vapor. El vapor asciende (4), por la existencia de una diferencia de presión existente y se conduce a lo largo de la sección adiabática, hacia la sección del condensador (5). En el condensador, el vapor se condensa, entrega su calor latente y regresa al evaporador en forma de una película de líquido descendente, debido al efecto de la fuerza de gravedad. El ciclo se repite continuamente mientras la fuente de calor permanezca constante.

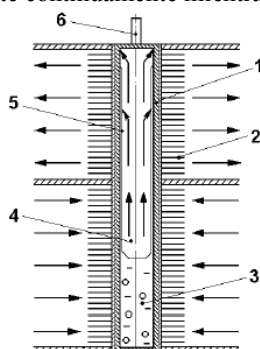


Fig. 1. Termosifón aletado en un intercambiador de calor del tipo gas-gas [2]

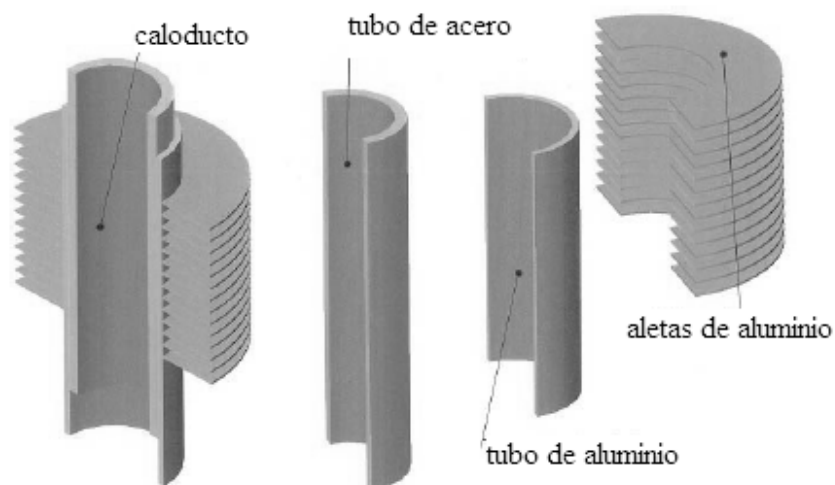


Fig.2. Construcción del tubo de termosifón bimetalico aletado [2]

Construcción del precalentador de aire:

Los calentadores de aire compactos compuestos de termosifones aletados, cuentan con dos zonas, la zona inferior es llamada zona de ebullición, a través de la cual, fluyen los gases calientes productos de la combustión Fig. (3). La zona superior es llamada zona de condensación a través de la cual fluye el aire que se suministra a la combustión. Los gases calientes a temperaturas mayores de 150 °C, fluyen a través de la zona de ebullición, transfiriendo el calor desde dicha zona hacia la zona de condensación a través de los tubos termosifones. El aire a temperatura ambiente, fluye en sentido contrario a través de la zona de condensación absorbiendo el calor disipado por los termosifones.

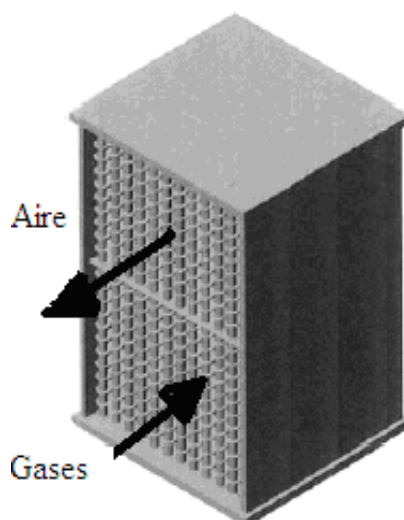


Fig.3. Precalentador de aire formado de termosifones bimetalicos aletados [2]

El diseño geométrico del precalentador de aire consiste en determinar los pasos longitudinales y transversal Fig. (4), el número de hileras, número de termosifones por hileras, número de aletas, superficies de transferencia de calor. A continuación, se presenta la secuencia de cálculo.

Cálculo de las dimensiones del precalentador.

Cálculo del área transversal del precalentador mínima libre para el paso de los fluidos de trabajo.

Cálculo del área total de transferencia de calor.

Cálculo del área de contacto acero-aluminio de los tubos bimetalicos.

Cálculo del área interna de los tubos de termosifones.

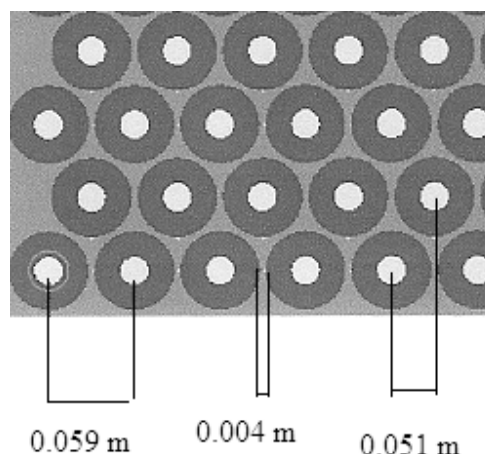


Fig.4. Vista superior de un precalentador de aire formado de termosifones bimetalicos aletados [2]

Línea de precalentadores de aire:

Se diseño una línea de 14 precalentadores de aire que pueden utilizarse en calderas industriales con potencias de 15 CC. Hasta 800 CC.

Las características geométricas de los precalentadores de aire se muestran en la tabla # 1.

Tabla 1 Características geométricas de una línea de 14 precalentadores de aire.

	Numero tubos p/hilera	Numero de hileras	Ancho (m)	Profundidad (m)	Altura zona gases (m)	Atura zona aire(m)	Area zona gas (m2)	Area zona aire (m2)	Numero de tubos
1	5	5	0.304	0.272	0.304	0.211	9.338	6.489	23
2	6	7	0.364	0.376	0.364	0.253	18.971	13.183	39
3	7	9	0.424	0.48	0.424	0.295	33.444	23.241	59
4	8	9	0.484	0.48	0.484	0.336	43.961	30.549	68
5	9	9	0.544	0.48	0.544	0.378	55.971	38.895	77
6	9	11	0.544	0.584	0.544	0.378	68.328	47.482	94
7	10	11	0.604	0.584	0.604	0.42	84.768	58.906	105
8	11	11	0.664	0.584	0.664	0.461	102.885	71.496	116
9	11	13	0.664	0.688	0.664	0.461	121.51	84.439	137
10	12	13	0.724	0.688	0.724	0.503	145.103	100.834	150
11	13	13	0.784	0.688	0.784	0.545	170.786	118.682	163
12	13	15	0.784	0.792	0.784	0.545	196.981	136.885	188
13	14	15	0.844	0.792	0.844	0.587	229.022	159.151	203
14	15	15	0.904	0.792	0.904	0.628	263.303	182.973	218

Método de cálculo:

Para el diseño térmico se requieren las dimensiones del precalentador, se proponen las temperaturas de salida del aire, y gases de la combustión y se procede al cálculo de la cantidad de calor transferido, que depende de la diferencia de temperaturas promedio logarítmica y la sumatoria de las resistencias térmicas a través del termosifón, con la ecuación 1.

$$Q = \frac{\Delta T_{ml}}{\sum_{i=1} R_i} \quad (1)$$

Donde la resistencia térmica total de un termosifón, que opera bajo condiciones promedio, se compone de la siguiente manera:

$$\sum R_i = \frac{1}{h_g A_g} + \frac{1}{h_a A_a} + \frac{1}{h_{eb} A_{eb}} + \frac{1}{h_{condens} A_{condens}} + \left(R'_{cont} + \frac{\delta_{ac}}{\lambda_{ac}} + \frac{\delta_{al}}{\lambda_{al}} \right) \left[\left(\frac{1}{A_{cont}} \right)_{eb} + \left(\frac{1}{A_{cont}} \right)_{condens} \right] \quad (2)$$

$\delta_{ac/al}$ es el espesor del acero o el aluminio.

$\lambda_{ac/al}$ es la conductividad térmica del acero o aluminio según el caso.

$1/(h_{g/a})(A_{g/a})$ es la resistencia térmica exterior por convección en la zona para el aire o en la zona para los gases.

R'_{cont} es la resistencia térmica específica por contacto entre el tubo de acero y el de aluminio.

$1/(h_{eb/condens})(A_{eb/condens})$ es la resistencia térmica interior por convección en la zona de ebullición o condensación.

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección relativo en la zona para el aire o en la zona para los gases, ecuación (3), [1]

$$h_{rel}^g = \left(\frac{A_A^g}{A_{TOT}} \cdot E \cdot \mu_A \cdot \psi_E + \frac{A_i^g}{A_{TOT}} \right) h_{conv}^g \quad (3)$$

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección de la ebullición, ecuación (4), [1]

$$h_{eb} = 0.0123 \left(\frac{\lambda}{l_*} \right) \left[\left(\frac{q}{\tau(\rho_n)v} \right) (l_*) \right]^{0.5} * Pr^{0.35} k_p^{0.54} (d/l_*)^{0.17} \quad (4)$$

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección de la condensación, ecuación (5), [2]

$$h_{condens} = \frac{(Nu_{condens})(\lambda)}{\left(\frac{(v)^2}{g \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho} \right)} \right)^{0.33}} \quad (5)$$

Con la cantidad de calor transferido calculado por la ecuación (1), se obtienen las temperaturas de salida del aire y gases de la combustión y se comparan con las temperaturas propuestas, si estas son iguales termina el calculo térmico en caso contrario el ciclo se repite hasta igualar las temperaturas.

El programa de cálculo esta escrito en el lenguaje de programación Visual Basic versión 6.0. Esta diseñado para instalarse y/o distribuirse en cualquier computadora personal. El programa se fundamenta en las expresiones matemáticas y térmicas observadas en la metodología desarrollada anteriormente, por lo tanto, es muy importante resaltar que su objetivo se limita a determinar el diseño geométrico, térmico y económico de precalentadores de aire.

La presentación visual del programa consta de 4 interfases como se describe a continuación:

Calculo geométrico y térmico.

Calculo de eficiencia.

Calculo de ahorro de combustible.

Calculo del peso y costo del equipo.

En la primera interfase del programa se realizan los cálculos geométricos y térmicos, el programa tiene como combustible gas natural, ya que este combustible evita emisiones de óxidos de azufre.

Se requieren como datos de entrada potencia de la caldera, gasto de la caldera, exceso de aire y temperaturas de entrada del aire y de los gases de la combustión.

Se obtienen como resultados el diseño geométrico del precalentador y las temperaturas de salida del aire y gases de la combustión.

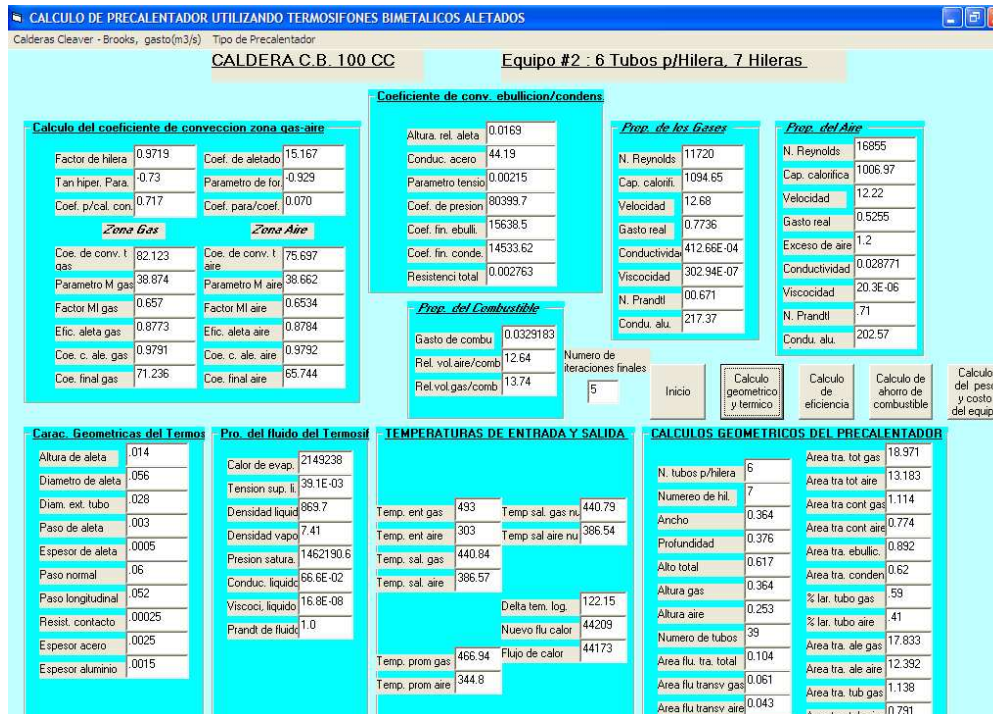


Fig. 5 Primera interfase del programa, calculo geométrico y térmico

En la segunda interfase se calcula la eficiencia de la caldera sin y con precalentador de aire, teniendo como datos de entrada las temperaturas de entrada y salida del aire y gases de combustión.

Como información final se obtiene el incremento de la eficiencia utilizando el precalentador de aire.

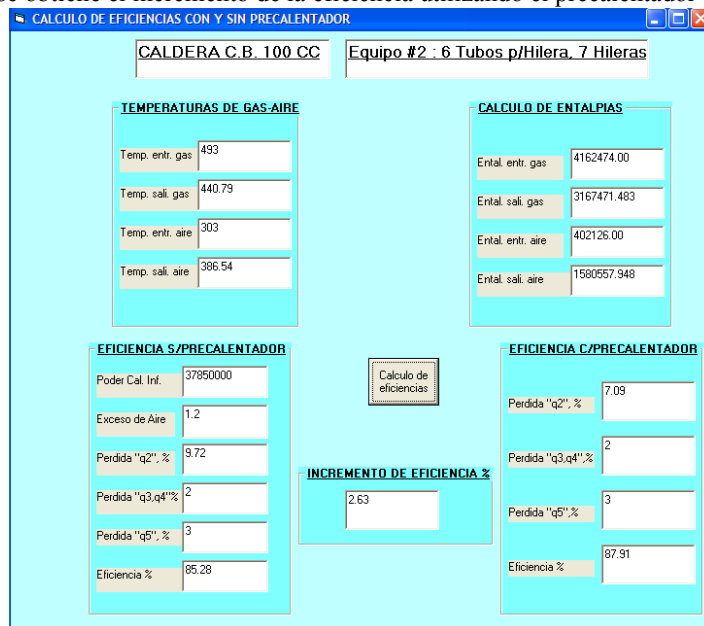


Fig. 6 Segunda interfase del programa, calculo de eficiencias.

En la tercera interfase se calcula el ahorro del combustible debido al incremento de la eficiencia en el precalentador de aire.

Teniendo el costo del combustible y las horas de trabajo de la caldera en un año se calcula el costo del ahorro del combustible.

AHORRO EN PESOS DEL COMBUSTIBLE C/PRECALENTADOR			
Poder calorífico inferior	37850000	Precio de comb.	4.26
Gasto de combustible s/precalentador	0.03291833	Ahorro de comb.	0.00117
Gasto de combustible c/precalentador	0.03175	Tiempo de oper. anual	6912000
Potencia calorífica transferida	44209	Ahorro en pesos anual	34450.79

Fig. 7 Tercera interfase del programa, calculo de ahorro de combustible.

En esta última interfase se calcula el peso, costo de materiales y mano de obra para fabricar el precalentador de aire.

PESO Y COSTO TOTAL DEL PRECALENTADOR	
Peso del precalentador	85,5557
Costo del precalentador	12915,1890

Fig. 8 Última interfase del programa, calculo de peso y costo del precalentador.

Ejemplo de aplicacion:

Se realizo el cálculo geométrico, térmico y económico del precalentador de aire para una caldera de 100 CC, con ayuda del programa de cálculo. Como puede observarse, se tienen 3 configuraciones de precalentadores de aire que satisfacen los criterios de diseño y operación, y que el programa sugiere para su empleo, sin embargo, es necesario realizar un análisis económico, las características de la caldera son las siguientes:

- ✚ Tipo de caldera: Tubos de humo
- ✚ Potencia: 100 CC.
- ✚ Tipo de combustible: Gas natural

- ✚ El gasto Promedio de combustible: 0.0329 m³/s
- ✚ Temperatura promedio anual del aire de combustión: 30 °C.
- ✚ Exceso de aire de combustión: 27 % - 28 %
- ✚ Temperatura promedio anual de los gases de combustión: 220 °C.
- ✚ Presión en el domo de la caldera: en este caso el rango de trabajo de la caldera es de 110 a 120 psi.
- ✚ Factor de uso de la caldera (tiempo de uso promedio al año de la caldera): 7540 horas/ año.

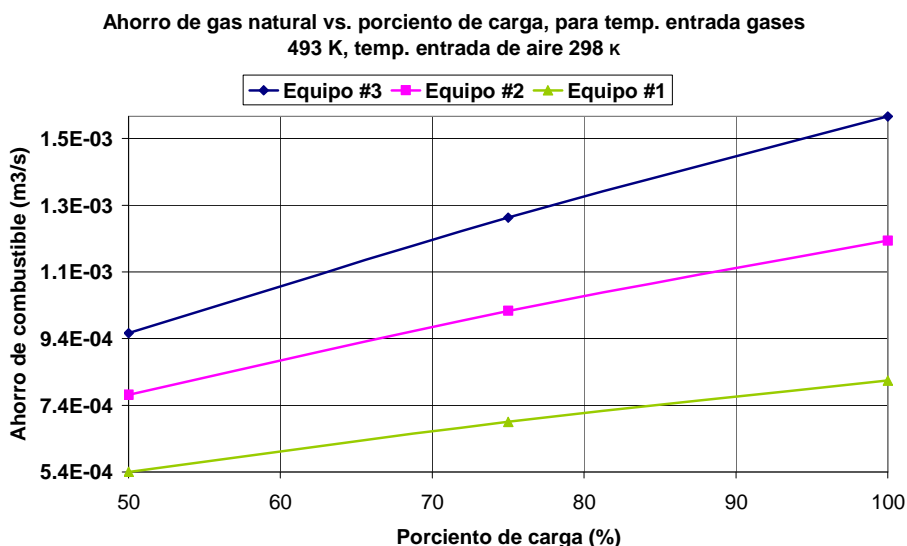


Fig. 9 Ahorro de gas natural para los precalentadores de aire 1, 2 y 3 para temperaturas de entrada del aire 293 K y gases de 493 K, con diferentes cargas térmicas.

En la figura 9 se presenta el ahorro de gas natural para los precalentadores de aire en condiciones de operación de la caldera 100 CC, cargas térmicas desde 50% hasta 100%, temperatura de aire en entrada de precalentadores es 293 K y temperatura de gases en entrada de precalentadores de aire es 493 K. El máximo ahorro de gas natural lo tiene el equipo

numero 3 trabajando con carga 100% con un ahorro máximo de gas natural de $0.00154 \left(\frac{m^3}{s} \right)$. El valor mínimo lo

tiene el equipo #1 con un ahorro mínimo de gas natural de $0.00077 \left(\frac{m^3}{s} \right)$. Para estas condiciones de operación el

equipo #3, ahorra combustible en dos veces más que el equipo #1.

GRAFICO COSTO Y AHORRO CONTRA TIEMPO

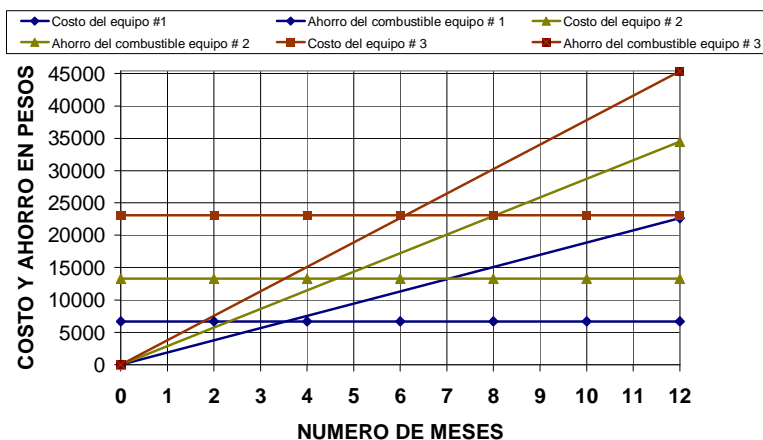


Fig. 10 Grafica del tiempo de recuperación de la inversión para los equipos 1,2 y 3.

En la figura 10 se observa que la recuperación de la inversión a corto plazo la tenemos con el equipo # 1, en un tiempo de 3.5 meses, una ganancia neta anual de \$ 21900 pesos mexicanos. La recuperación de la inversión en el equipo # 3 es a largo plazo con un tiempo de 6.1 meses y una ganancia neta anual de \$ 42500 de pesos mexicanos. Para estas condiciones el equipo # 3 tiene el 50% más de ganancia neta anual.

CONCLUSIONES

- Se desarrollo una línea de 14 precalentadores de aire que pueden utilizarse en calderas industriales con potencia de 15 CC, a 800 CC.
- Se disminuyo en un 30 % las dimensiones del precalentador de aire con termosifones aletados bimetálicos en comparación con los precalentadores convencionales, traduciéndose en una disminución del costo del equipo en relación con los convencionales
- Se desarrollo un programa en lenguaje Visual Basic 6 para el cálculo geométrico, térmico, y económico de una línea de 14 precalentadores de aire.
- Se determino para el ejemplo de aplicación, el uso del precalentador de aire # 3 que aprovecha la energía de los gases de escape de una caldera de 100 CC de potencia. Incremento la eficiencia térmica de la caldera en 3.2%, con un ahorro anual de combustible del 9% y un costo de \$42500 , el costo del equipo \$23000 y tiene un tiempo de recuperación de la inversión de 6.1 meses, de acuerdo a las condiciones de operación de la caldera.

REFERENCIAS

- [1] Pysmennyy Ye., Polupan G., Carvajal Mariscal I. Sánchez Silva F. *Manual para el cálculo de intercambiadores de calor y bancos de tubos aletados*. Editorial REVERTÉ, 2007, 197 p.
- [2] Ayala Tapia E.L. *Desarrollo de precalentadores de aire compactos para recuperar energía de los gases de escape de calderas industriales*. Tesis de Maestría, SEPI-ESIME Zacatenco IPN, México, 2005.
- [3] G. Jarquin, G. Polupan, A. Sánchez Flores, A. Sánchez Rivera, B. Vázquez Benítez. *Calculo de las características termodinámicas de los productos de la combustión del gas natural y del combustoleo*. Memorias del 6º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas del 27 al 30 de Noviembre del 2001, México.
- [4] Aristóteles Sánchez Rivera. *Análisis de cálculos termodinámicos de combustión en los productos de combustibles gaseosos*. Tesis de Ingeniería de ESIME Azcapotzalco IPN, México, 2003.
- [5] Pysmennyy Ye., Gershuni O., Polupan G., Carvajal Mariscal I., Sánchez Silva F., Ayala Tapia E. L. *Desarrollo de intercambiadores de calor en base a termosifones para aprovechar los gases de escape*. Memorias de III Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica, III COBIM, Lima, Perú, del 22 al 24 de Julio del 2003.