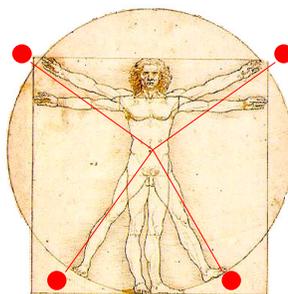


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN I. AÑO 2003

SEPARATA



ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN DE CAMBIADORES DE CALOR EN PROCESOS DE RECUPERACIÓN DE CALOR DE CORRIENTES RESIDUALES

Juan Herranz Arribas



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior

Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Juan Herranz Arribas
Junio, 2003

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECTIN03_003.pdf

© De la edición: *Revista Tecnologi@ y Desarrollo*
Escuela Politécnica Superior.
Universidad Alfonso X el Sabio.
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).
ISSN:
Editor: Julio Merino García tecnología@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

Tecnologi@ y Desarrollo. Revista de ciencia, tecnología y medio ambiente. Vol. 1. 2003.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN DE CAMBIADORES DE CALOR EN PROCESOS DE RECUPERACIÓN DE CALOR DE CORRIENTES RESIDUALES

Juan Herranz Arribas

Doctor en Ciencias Químicas,
Departamento de Tecnología Industrial, Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio,
Avda. de la Universidad nº 1, Villanueva de la Cañada, 28691 Madrid. Spain. Tlf.: 918109140, e-mail:
juherr@uax.es

RESUMEN

Al margen del diseño térmico de un cambiador de calor, que establece, para la cantidad de calor a intercambiar y las características del flujo, cuál es la superficie de transferencia de calor que se necesita, y del diseño mecánico, que indica el tipo de cambiador más conveniente (disposición de los tubos) en función de la caída de presión permisible por el interior y el exterior de los tubos, en el presente artículo se lleva a cabo el análisis económico de la oportunidad de instalar un cambiador de calor con el objetivo de recuperar calor de una corriente de desecho a elevada temperatura, y se aplica a un ejemplo práctico para el caso de un cambiador de "corrientes equilibradas".

PALABRAS CLAVE: *Cambiador de calor, recuperación de calor, análisis económico, corrientes equilibradas.*

ABSTRACT

Independently of the heat exchanger thermal design, which establish, for a given amount of heat to be exchanged and the flow characteristics, which is the heat transfer surface area needed, and independently of the mechanical design, which point out the most convenient exchanger type (tubes disposition) as a function of permissible pressure drop inside and outside the tubes, in this paper an economic analysis is made about the opportunity of a heat exchanger installation with the objective of heat recovery from a hot rejected stream, and a practical case is solved for a heat exchanger of balanced streams.

KEY-WORDS: *Heat exchanger, heat recovery, economic analysis, balanced streams.*

1. Introducción

La decisión de instalar o no un cambiador de calor para recuperar calor de una corriente de desecho, dependerá de un análisis económico que considere la relación coste/beneficio. La recuperación de calor significará un ahorro energético para el proceso y, por otra parte, la instalación del cambiador implicará afrontar unos costes de

inversión y mantenimiento. Un diseño óptimo exige maximizar la cantidad en la que los beneficios excedan a los costes.

2. Nomenclatura

C_I = Coste inicial, €.

C_{AE} = Coste anual equivalente, €.

C_R = Valor de recuperación, €.

C_{IF} = Coste inicial fijo, €.

C_A = Coste anuales de mantenimiento, €.

C_{AF} = Costes anuales fijos, €.

C_{AT} = Coste anual total, €.

C_{OP} = Costes de operación anuales, €.

C_{OPF} = Costes de operación anuales fijos, €.

c_i = Coste por unidad de área de transmisión de calor, €/m².

c_a = Coste anual variable, €/m².

c_b = coste unitario de la potencia de bombeo, €/W.h

c_{op} = Coste anual de la energía de bombeo por unidad de longitud del cambiador

r = Anualidad

i = Tasa de interés anual

n = Periodo de amortización de un préstamo, en años.

t = Tiempo de operación, h/año.

m = Velocidad de flujo másico, kg/s.

ρ = Densidad del fluido, kg/m³.

ΔP = Caída de presión

B = Valor anual del beneficio, €/año.

V = valor del calor recuperado, €/W.h

ε = Eficacia del cambiador.

NUT = Número de unidades de transferencia.

U = Coeficiente global de transmisión de calor.

3. Análisis económico

La adquisición del cambiador significará la necesidad de disponer de un capital para realizar la inversión (como para la compra de cualesquiera bienes de equipo), que puede considerarse que se obtiene por medio de un préstamo a través de una entidad financiera que deberá amortizarse durante n años a un interés anual acordado, i . De esta manera, el coste inicial del cambiador, C_I , se puede transformar en un "coste anual equivalente", C_{AE} .

Para realizar la transformación indicada anteriormente, conviene recordar de las tablas financieras cuál es el valor de la "anualidad" a satisfacer para devolver un préstamo de 1 € en n años, otorgado a un interés anual, i :

$$r = i/1 - [1/(1+i)]^n \quad (\text{Ec. 3.1})$$

y por lo tanto, el coste anual equivalente atribuible al coste inicial vendrá expresado como :

$$C_{AE} = r.C_I \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Ahora bien, si se considera que el cambiador tendrá un valor de recuperación al final de su vida útil, C_R (valor residual del equipo), será necesario trasladar dicho valor futuro a un valor presente para sustraerlo del coste de capital inicial. Recordando que "el valor presente" de 1 € recibido en el futuro, dentro de n años, vendrá dado a fecha de hoy por la cantidad:

$$[1/(1+i)]^n \quad (\text{Ec. 3.3})$$

es fácil deducir finalmente que el coste anual equivalente atribuible al coste inicial viene dado por:

$$C_{AE} = r. [C_I - (1/1+i)^n.C_R] \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Además del coste anual equivalente debido al coste inicial (precio de compra del equipo), hay que tener presentes otros costes también anuales:

- a) Costes de mantenimiento, impuestos, seguros, C_A .
- b) Costes de operación (básicamente debido al bombeo de los fluidos), C_{OP} .

Si se supone, lo que es razonable, que el coste inicial del cambiador, C_I , es proporcional a su superficie de transferencia de calor, $A = P.L$, donde P representa el perímetro y L la longitud, el citado coste inicial puede expresarse como la suma de un coste fijo y un coste variable:

$$C_I = C_{IF} + c_i PL \quad (\text{Ec. 3.5})$$

donde el coste inicial fijo incluye los gastos de instalación y montaje, y c_i representa el coste variable por unidad de área de transmisión de calor.

Sustituyendo la Ec. 3.5 en la Ec. 3.4, se obtiene:

$$C_{AE} = r. [C_{IF} + c_i PL - (1/1+i)^n \cdot C_R] \quad (\text{Ec.3.6})$$

Los costes anuales de mantenimiento, impuestos, seguros, etc., suelen guardar relación con el coste inicial de adquisición, por lo que también pueden suponerse proporcionales a la superficie de transferencia de calor :

$$C_A = C_{AF} + c_a. PL \quad (\text{Ec.3.7})$$

donde C_{AF} representa los costes anuales fijos y c_a el coste anual variable, en €/m², de donde el coste anual total (que incluye el coste anual equivalente atribuible al coste inicial y los gastos anuales) viene dado por la siguiente expresión:

$$C_{AT} = C_{AE} + C_A$$

es decir, sumando Ec.3.6 y Ec.3.7 se llega a que:

$$C_{AT} = [r.C_{IF} - r.(1/1+i)^n.C_R + C_{AF}] + (r.c_i + c_a).PL \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Los costes de operación anuales, mayoritariamente asociados a la potencia necesaria para el bombeo de las corrientes de fluido, pueden expresarse como se indica a continuación:

$$C_{OP} = (c_b.t/\eta_b).(m.\Delta P/\rho) \quad (\text{Ec.3.9})$$

donde η_b representa el rendimiento de la bomba y el resto de los parámetros se encuentran indicados en la nomenclatura.

Expresando la caída de presión en función lineal de la longitud del cambiador,

$$\Delta P = \Delta P_0 + f (L/D_h).(\rho v^2/2) \quad (\text{Ec. 3. 10})$$

representando ΔP_0 las pérdidas de presión a la entrada y salida y debidas a los efectos de la aceleración. Sustituyendo la Ec 3.10 en la Ec. 3.9,

$$C_{OP} = (c_b.t/\eta_b).(m.\Delta P_0/\rho) + (c_b.t/\eta_b).f.(L/D_h).(mv^2/2) \quad (\text{Ec.3.11})$$

que también puede expresarse como suma de unos costes fijos y otros variables :

$$C_{OP} = C_{OPF} + c_{op}.L \quad (\text{Ec.3.12})$$

Finalmente, los coste totales pueden calcularse como sigue:

$$C = C_{AT} + C_{OP} \quad (\text{Ec.3.13})$$

o bien,

$$C = C_F + c.L \quad (\text{Ec.3.14})$$

donde C_F representan los costes totales anuales fijos y c los costes totales anuales variables por unidad de longitud de cambiador.

Teniendo presentes Ec.3.8 y Ec.3.12.

$$c = [(r.c_i + c_a).PL + c_{op}.L]/L$$

o bien,

$$c = [r.c_i + c_a + (c_{op}/P)].P \quad (\text{Ec.3.15})$$

Analizados los costes, debe indicarse ahora que el "valor anual del beneficio" debido a la recuperación de calor de la corriente de desecho, puede establecerse como :

$$B = V.Q.t, \text{ €/año} \quad (\text{Ec.3.16})$$

donde Q es el calor recuperado de la corriente de desecho, t el tiempo de operación en h/año y V el valor del calor recuperado en €/W.h.

Se trata ahora de maximizar la diferencia $B - C$, Ec.3.16 – Ec.3.14, es decir, aumentar la longitud del cambiador hasta que el coste anual incremental, dC , sea igual al valor anual incremental del beneficio, dB , ya que a partir de ese momento el valor $B - C$ disminuirá.

El balance térmico entre las corrientes del cambiador permite establecer la cantidad de calor recuperada como,

$$Q = m'C_p'(T_1' - T_2') = m''C_p''(T_2'' - T_1'') \quad (\text{Ec. 3.17})$$

donde el superíndice ' se refiere a la corriente de fluido caliente y el superíndice '' a la corriente de fluido frío.

La eficacia y la transferencia de calor aumentan con la longitud del cambiador, pero también lo hacen el coste inicial y el de operación, por lo que se trata de calcular la longitud de cambiador que maximiza la diferencial beneficio - coste.

De la definición de eficacia de un cambiador de calor, llamando:

$$C' = m'C_p' \text{ y } C'' = m''C_p''$$

se obtiene la expresión:

$$\varepsilon = Q_{\text{real transmitido}}/Q_{\text{máximo posible}} = C''(T_2'' - T_1'')/C_{\text{MIN}}(T_1' - T_1'') \quad (\text{Ec.3.18})$$

dado que el máximo calor que es posible transmitir se corresponde con la corriente que teniendo el menor valor del producto mC_p , experimente el máximo gradiente de temperatura posible, que es $T_1' - T_1''$.

Si se aplica a un cambiador de "corrientes equilibradas", que es aquel en el que se cumple que $m'C_p' = m''C_p''$:

$$\varepsilon = (T_2'' - T_1'')/(T_1' - T_1'') \quad (\text{Ec.3.19})$$

que llevado a la ecuación (16) posibilita obtener:

$$Q = mC_p(T_2'' - T_1'') = mC_p(T_1' - T_1'').\varepsilon \quad (\text{Ec.3.20})$$

y sustituyendo en Ec.3.16:

$$B = V.mC_p (T_1' - T_1'').\varepsilon.t \quad (\text{Ec.3.21})$$

con lo que

$$dB = V.mC_p (T_1' - T_1'').t.d\varepsilon \quad (\text{Ec.3.22})$$

y expresando la eficacia del cambiador en función del número de unidades de transferencia, NUT, se obtiene:

$$d\varepsilon = (d\varepsilon/dNUT)(dNUT/dL)dL$$

y teniendo presente que,

$$NUT = (U.A/C_{MIN}) = (U.A/mC_p) = (U.PL/mC_p) \quad (Ec.3.23)$$

entonces:

$$d\varepsilon = (d\varepsilon/dNUT)(UP/mC_p)dL$$

que llevado a Ec.3.22 conduce a,

$$dB = V(T_1' - T_1'').t.UP(d\varepsilon/dNUT)dL \quad (Ec.3.24)$$

diferenciando ahora Ec.14,

$$dC = c.dL$$

y sustituyendo el valor de c de Ec.15:

$$dC = [r.c_i + c_a + (c_{op}/P)].PdL \quad (Ec.3.25)$$

igualando ahora Ec.3.24 y Ec.3.25, $dB = dC$, se obtiene lo que se conoce como parámetro termoeconómico, ϕ :

$$\boxed{\phi = (d\varepsilon/dNUT) = [r.c_i + c_a + (c_{op}/P)]/[V(T_1' - T_1'').t.U]} \quad (Ec.3.26)$$

parámetro básico a la hora de obtener el óptimo económico que proporciona a su vez el área óptima de transferencia de calor que maximiza B - C.

4. Caso práctico

Un proceso de lavandería industrial necesita utilizar 5000 kg/h de agua limpia a 70 °C durante 12 horas al día, 312 días/año. El flujo de agua está inicialmente a 15 °C y se está empleando un calentador eléctrico para elevar la temperatura hasta los 70 °C requeridos. El coste de la electricidad es de 0,09 €/KW.h.

Actualmente se está vertiendo el agua sucia al desagüe a una temperatura de 67 °C, por lo que un ingeniero, con el objetivo de ahorrar energía eléctrica para el calentamiento del agua limpia, ha propuesto instalar un cambiador de calor de flujo equilibrado en contracorriente para precalentar el agua limpia por medio de la corriente de agua sucia antes de su vertido. De esta manera, al calentador eléctrico le llegará el agua a mayor temperatura y el consumo eléctrico para alcanzar los 70 °C será mucho menor.

El coste inicial del cambiador es proporcional al área de su superficie de transferencia de calor y está constituido por un coste fijo de 20.000 €, que incluye los gastos de instalación y de montaje, más un coste variable de 900 €/m² de superficie de transferencia de calor.

La inversión para la adquisición del cambiador se realiza utilizando un préstamo bancario con una tasa de interés anual del 10 %, que debe amortizarse en 12 años. Se espera que los costes anuales de mantenimiento, impuestos y seguros, presenten un coste fijo de 500 € más un coste variable de 50 €/m² de superficie de transferencia de calor.

Si se estima que el coeficiente global de transferencia de calor del cambiador es de 1000 W/m².K, se pide analizar si debe llevarse adelante la propuesta realizada por el ingeniero. Para ello, deberá calcularse :

- a) El valor óptimo del área de transferencia de calor del cambiador a instalar.
- b) El ahorro anual neto que originaría la propuesta, si es que tal ahorro tiene lugar.

Hay que tener en cuenta que, a efectos del cálculo, se considerarán despreciables tanto el valor de recuperación del cambiador al final de su vida útil, C_R , así como los costes de operación (bombeo de los fluidos), C_{OP} .

4.1. Datos del problema

$U = 1000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
 $t = 12 \text{ h/día. } 312 \text{ días/año} = 3744 \text{ h/año}$
 $m = 5000 \text{ kg/h} = 1,39 \text{ kg/s}$
 $T_1' = 67 \text{ °C}$
 $T_1'' = 15 \text{ °C}$
 $C_{p(\text{agua})} = 4180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
 $V = 0,09 \text{ €/KW}\cdot\text{h} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ €/W}\cdot\text{h}$
 $C_{IF} = 20.000 \text{ €}$
 $c_i = 900 \text{ €/m}^2$
 $i = 10 \%$
 $n = 12 \text{ años}$
 $C_{AF} = 500 \text{ €}$
 $c_a = 50 \text{ €/m}^2$
 $C_R = 0$
 $C_{op} = 0$

4.2. Solución

Para un cambiador en contracorriente de flujo equilibrado ($m'C_p' = m''C_p'' \therefore C_{MIN} = C_{MAX} \therefore C = C_{MIN}/C_{MAX} = 1$), la eficacia viene dada por,

$$\varepsilon = NUT/1+NUT$$

donde:

$$NUT = U \cdot A / C_{MIN} = U \cdot A / mC_p$$

que no puede obtenerse por esta vía, ya que se desconoce el área.

Haciendo uso del análisis que se ha presentado anteriormente, la optimización del cambiador se logra maximizando la diferencia entre el beneficio obtenido por el ahorro de energía eléctrica y el coste del cambiador, es decir, aumentando la longitud del cambiador hasta que el coste incremental, dC , sea igual al valor anual incremental del beneficio, dB .

$$\text{de (Ec.3.24)} \quad dB = V(T_1' - T_1'') \cdot t \cdot UP(d\varepsilon/dNUT)dL$$

Tecnología y Desarrollo. Revista de ciencia, tecnología y medio ambiente. Vol.1. 2003.

y de (Ec.3.25) $dC = [r.c_i + c_a + (c_{op}/P)].PdL$

$$dB = dC$$

implica que,

$$(d\varepsilon/dNUT) = \phi = [r.c_i + c_a + (c_{op}/P)]/[V(T_1' - T_1'')].t.U$$

como para este tipo de cambiador, tal como se ha indicado, la eficacia viene expresada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = NUT/1+NUT \quad \therefore (d\varepsilon/dNUT) = 1/(1+NUT)^2 = \phi$$

de donde,

$$(1+NUT)^2 = 1/\phi$$

$$(1+NUT) = 1/\phi^{1/2}$$

$$NUT_{OPT} = (1/\phi^{1/2}) - 1$$

$$NUT_{OPT} = (1 - \phi^{1/2})/\phi^{1/2} = U.A_{OPT}/mC_p$$

Por lo tanto, las etapas a seguir son las siguientes:

- 1) Calcular el parámetro termoeconómico, ϕ , para las condiciones del problema.
- 2) Calcular el NUT_{OPT} , y de este valor obtener el área óptima de transferencia de calor.
- 3) Calcular la eficacia del cambiador, ε .
- 4) Calcular el valor anual de la energía ahorrada, B .
- 5) Calcular los costes anuales totales, C .
- 6) Calcular el posible ahorro anual neto, $B - C$.

Teniendo en cuenta Ec.3.26:

$$\phi = [r.c_i + c_a]/[V(T_1' - T_1'').t.U], \text{ dado que } c_{op} = 0$$

$$r = i/[1 - (1/1+i)^n] = 0,1/[1 - (1/1,1)^{12}] = 0,147$$

$$\phi = [(0,147)(900) + 50]/(9 \cdot 10^{-5})(67-15)(3744)(1000) = 0,01$$

$$NUT_{OPT} = [1 - \phi^{1/2}]/\phi^{1/2} = [1 - (0,01)^{1/2}]/(0,01)^{1/2} = 8,8 = U \cdot A_{OPT}/mC_p$$

$$A_{OPT} = (NUT_{OPT})mC_p/U = (8,8)(1,39)(4180)/(1000) = 51,08 \text{ m}^2$$

$$\varepsilon = NUT/1+NUT = 8,8/9,8 = 0,898$$

Teniendo en cuenta Ec.3.21, valor anual de la energía ahorrada:

$$\begin{aligned} B &= V \cdot Q \cdot t = V \cdot mC_p(T_1' - T_1'') \cdot \varepsilon \cdot t = \\ &= (9 \cdot 10^{-5})(1,39)(4180)(67-15)(0,898)(3744) = 91.348,5 \text{ €/año} \end{aligned}$$

A partir de Ec.3.8, pueden calcularse los costes anuales totales

$$\begin{aligned} C_{AT} &= [r \cdot C_{IF} - r(1/1+i)^n \cdot C_R + C_{AF}] + (r \cdot c_i + c_a) \cdot PL = \\ &= [(0,147)(20.000) + 500] + [(0,147)(900) + 50](51,08) = \\ &= 12.751,8 \text{ €/año} \end{aligned}$$

y por lo tanto, el ahorro anual neto es,

$$91.348,5 - 12.751,8 = 78.596,7 \text{ €}$$

por lo que deberá adoptarse la propuesta realizada por el ingeniero.

5. Bibliografía

F. Kreith y M.S. Bohn, (2002). *Principios de Transferencia de Calor*, 6ª Ed. Thomson.

A. J. Chapman, *Transmisión del Calor*, 3ª Ed. Bellisco.

J.P. Holman (1997), *Heat Transfer*, 8ª Ed, Mc Graw-Hill.

Tecnología y Desarrollo. Revista de ciencia, tecnología y medio ambiente. Vol. 1. 2003.