TERMODINAMICA.-

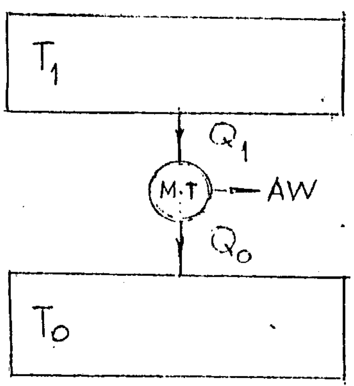
EXERGIA.-

Concepto:

Este concepto se origina en Francia en 1893 a través de los trabajos del profesor GOUY, posteriormente ampliados por DARRIEUS. En 1953 RANT publica trabajos sobre el mismo tema introduciendo las denominaciones alemanas "Exergie" y "Anergie" para la energía transformable en trabajo útil y la no transformable respectivamente. De estas denominaciones derivan las palabras castellanas "EXERGIA" y "ANERGIA".-

Calor utilizable o EXERGIA DEL CALOR.-

Si se dispone de una fuente de calor a una temperatura T_1 mayor que la temperatura ATMOSFERICA T_o será posible, tomando de la fuente caliente una cantidad de calor Q_1, obtener un trabajo W si se intercala entre la FUENTE y la ATMOSFERA una máquina térmica. La atmósfera hará de fuente fría de la máquina y por lo tanto el trabajo obtenido será solamente una fracción del calor Q_1.-



Dicho trabajo valdrá:

$A\,W = \eta\, Q_1$ siendo η el rendimiento de la máquina térmica.-

El trabajo obtenido a partir de la cantidad de calor Q_1 dependerá del tipo de máquina y del rendimiento de la misma. De acuerdo con el teorema de Carnot, el trabajo que se obtendrá será el máximo posible si la máquina instalada es una MAQUINA TERMICA REVERSIBLE.-

$$\boxed{A\,W_{máx.} = \eta_R\, Q_1}$$

El rendimiento de la máquina térmica reversible es : $\boxed{\eta_R = 1 - \frac{T_o}{T_1}}$

Por lo tanto, el trabajo máximo obtenible será:

$$\boxed{A\,W_{máx.} = \left(1 - \frac{T_o}{T_1}\right) Q_1}$$

A este trabajo máximo que podrá obtenerse de la cantidad de calor Q_1 lo llamaremos "CALOR UTILIZABLE" Q_u o "EXERGIA" del calor:

$$\boxed{Q_u = Q_1 - T_o \frac{Q_1}{T_1}} \longrightarrow \boxed{Q_1 = Q_u + T_o \frac{Q_1}{T_1}}$$

$Q_M = Q_1\left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right)$

$Q_1 = Q_M - Q_M \frac{T_1}{T_0}$

Esta ecuación nos indica que podemos descomponer una cierta cantidad de calor proveniente de una fuente a T_1 en dos partes:

Q_u = calor utilizable o EXERGIA que es la que teoricamente podrá transformarse en trabajo.-

Exergía debida a DESEQUILIBRIOS MECANICOS.-

Si se dispone de un sistema sometido a una presión p_1 mayor que la presión p_o que reina en la atmósfera, aunque el mismo se encuentre a igual temperatura que la atmósfera, se puede obtener un trabajo mecánico haciendo que dicho sistema evolucione hasta alcanzar la presión atmosférica. Será suficiente para ello que se intercale una máquina neumática, expandiendo el sistema hasta el equilibrio mecánico con la atmósfera. El trabajo obtenido dependerá del tipo de transformación que experimente el sistema y será máximo si la transformación es reversible.-

$$d_{QR} = d_u + A\, d_{wR} \longrightarrow d_u = d_{QR} - A\, d_{wR}$$

$$d_{QI} = d_u + A\, d_{wI} \longrightarrow d_u = d_{QI} - A\, d_{wI}$$

$$d_{QR} - A\, d_{wR} = d_{QI} - A\, d_{wI} \qquad (2)$$ y recordando:

$$d_s = \frac{d_{QR}}{T} \longrightarrow d_{QR} = T\, d_s$$

$$d_s > \frac{d_{QI}}{T} \longrightarrow d_{QI} < \underbrace{T\, ds}_{d_{QR}}$$

$$\boxed{d_{QI} < d_{QR}}$$

Entonces: para que se cumpla la igualdad (2):

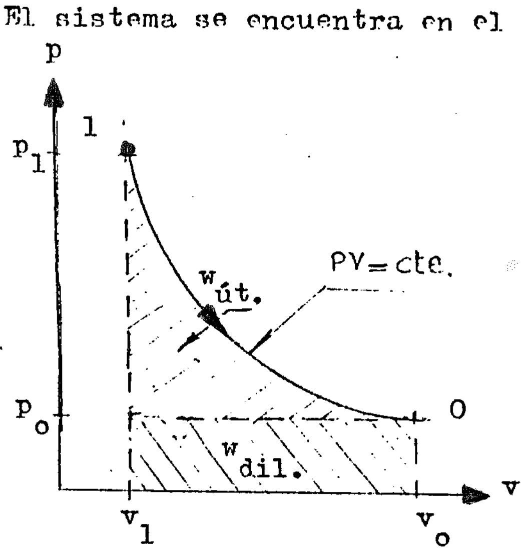
$$A\, d_{wR} > A\, d_{wI}$$

$$\boxed{d_{wR} > d_{wI}}$$

Es decir que pasando de un estado a otro por el camino reversible se obtendrá un trabajo mayor que por el irreversible.-

Se puede, entonces, definir como EXERGIA debida a un desequilibrio mecánico, al máximo trabajo útil que es posible obtener llevando el sistema al equilibrio mecánico con la atmósfera.-

Para calcular esta exergía se representará la transformación en un diagrama p - v .- El sistema se encuentra en el estado 1 a la presión p_1 y a la temperatura T_o y se expande en forma isotérmica reversible (máximo trabajo) hasta llegar al estado 0 a la presión p_o. En la expansión el sistema realiza un trabajo: $w = \int_1^0 p\, d_v$.-



Este trabajo está representado por la curva representativa de la transformación las ordenadas extremas y el eje de las abcisas (área v_1 1 0 v_o). De este trabajo una parte debe emplearse en vencer la presión atmosférica ya que el sistema pasa a ocupar un volumen v_o mayor que el volumen inicial v_1 .-

la atmósfera.-

El trabajo desarrollado por el sistema será: $w_{1-2-0} = w_{1-2} + w_{2-0}$

En la adiabática reversible el trabajo será igual a la diminución de energía interna:

$$Q_{1-2} = u_2 - u_1 + A\, w_{1-2} \longrightarrow A\, w_{1-2} = u_1 - u_2$$

En la isotérmica reversible:

$$Q_{2-0} = u_o - u_2 + A\, w_{2-0}$$

$$A\, w_{2-0} = Q_{2-0} - u_o + u_2$$

Reemplazando:

$$A\, w_{1-2-0} = u_1 - \cancel{u_2} + Q_{2-0} - u_o + \cancel{u_2}$$

$$A\, w_{1-2-0} = u_1 + Q_{2-0} - u_o$$

El calor cambiado en la isotérmica Q_{2-0} será: $Q_{2-0} = T_o (s_o - s_1)$, área $2\ 0\ s_1\ s_o$. Reemplazando:

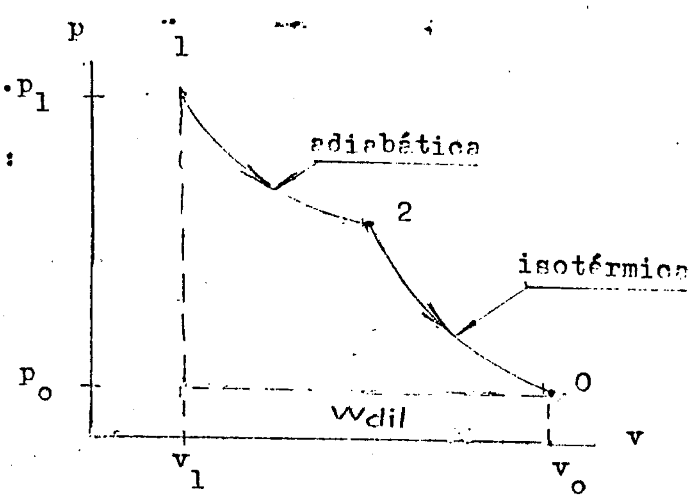
$$A\, w_{1-2-0} = u_1 + T_o (s_o - s_1) - u_o$$

Este valor no es todo trabajo útil, pues si el sistema ocupa en "0" un volumen mayor que el que ocupaba en "1", parte del mismo se consumirá como trabajo de dilatación:

$$w_{1-2-0\,\text{út.}} = w_{1-2-0} - w_{\text{dil.}p_1}$$

El trabajo de dilatación valdrá:

$$w_{\text{dil.}} = p_o (v_o - v_1)$$



Reemplazando:

$$w_{1-2-0\ \text{út.}} = u_1 + T_o (s_o - s_1) - u_o - p_o (v_o - v_1);$$

que puede ser escrita tambien:

$$w_{1-2-0\ \text{út.}} = (u_1 - T_o s_1 + p_o v_1) - (u_o - T_o s_o + p_o v_o)$$ sin importar las unidades.

Observando esta ecuación se puede ver que el trabajo calculado está dado por la diferencia de valores de una misma función a la que llamaremos "b":

$b = u - T_o\, s + p_o\, v$ (o bien: $b = u - T_o\, s + A\, p_o\, v$ con sus correspondientes unidades).

Esta función es una combinación de tres elementos del sistema (u,s,v) y de dos parámetros que definen el estado de la atmósfera (p_o ; T_o).-

$$Q_{2-0} = T_o\ (s_o - s_2) = T_o\ (s_o - s_1) \qquad \text{porque:}\ s_2 = s_1$$

Reemplazando:

$$Aw_{c_{2-0}} = T_o\ (s_o - s_1) - h_o + h_2$$

El <u>trabajo máximo</u> para pasar de "1" a "0", será:

$$Aw_{c\ \text{máx.}} = Aw_{c_{1-2}} + Aw_{c_{2-0}}$$

$$Aw_{c\ \text{máx.}} = h_1 - h_2 + T_o\ (s_o - s_1) - h_o + h_2$$

$$Aw_{c\ \text{máx.}} = h_1 - \cancel{h_2} + T_o\ s_o - T_o\ s_1 - h_o + \cancel{h_2}$$

$$Aw_{c\ \text{máx.}} = (h_1 - T_o\ s_1) - (h_o - T_o\ s_o) \qquad (1)$$

El valor que proporciona esta ecuación es totalmente TRABAJO UTIL porque la variación de volumen está incluida en las entalpías y por lo tanto, es el valor de la EXERGIA DEL SISTEMA ABIERTO CIRCULANTE debida a los desequilibrios térmicos y mecánicos con la atmósfera.-

Aparece una nueva función de estado del <u>sistema y de la atmósfera</u> que designaremos "b´" y que recibe el nombre de "segunda función de GOUY o de DARRIEUS".-

$$b' = h - T_o\ s$$

Es lógico: $b = u - T_o\ s + A\ p_o\ v$

Reeordenando: $b = \underbrace{u + A\ p_o\ v}_{h} - T_o\ s$

La ecuación (1) podrá escribirse:

$$e_{x_{c1}} = b' - b'_o$$

exergía del sistema abierto para un estado "1".-

Para un estado cualquiera, se tendrá:

$$\boxed{e_{x_c} = b' - b'_o}$$

<u>Rendimiento exergético o EFECTIVIDAD TERMICA.-</u>

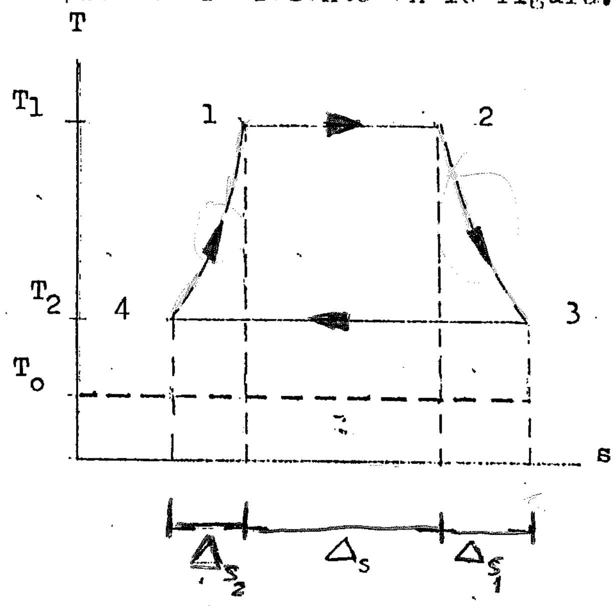
El rendimiento térmico de una máquina térmica fue definido como:

$$\eta_t = \frac{A\ w}{Q_1}$$

Este rendimiento es una relación de ENERGIAS: el numerador es el TRABAJO GENERADO POR LA MAQUINA TERMICA y, por lo tanto, es "<u>exergía pura</u>", mientras que el denominador es la cantidad de calor que ha suministrado a la máquina la fuente caliente. Es una mezcla de EXERGIA y de ANERGIA en proporción que variará con la tempera-

$$\eta_{ex} = \frac{(T_1 - T_2)\,\Delta_s}{\left|(T_1 - T_o) - (T_2 - T_o)\right|\Delta_s} = \boxed{\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_2} = 1}$$

El rendimiento resulta 1 porque en la máquina térmica IDEAL toda la energía consumida se transforma en trabajo. Veamos que ocurre si se tiene una máquina térmica en que se desarrolla un ciclo de CARNOT, pero con IRREVERSIBILIDADES, en la expansión y en la compresión adiabáticas. La representación del ciclo en un diagrama entrópico se representa en la figura.-



La transformación 2-3 es adiabática IRREVERSIBLE; por lo tanto la entropía del sistema debe aumentar o sea que en estado 3 el sistema tendrá una entropía mayor que en el estado 2 . La transformación 4-1 es adiabática IRREVERSIBLE. Luego, en el estado 1 el sistema tendrá mayor entropía que en el estado 4.-

La cantidad de calor que entregará la fuente caliente, será:

$$\boxed{Q_1 = T_1 \Delta_s}$$

La que recibirá la fuente fría, será:

$$\boxed{Q_2 = T_2 (\Delta_{s_1} + \Delta_s + \Delta_{s_2})}$$

El trabajo w que producirá la máquina (sin considerar unidades) será

$$\boxed{w = Q_1 - Q_2}$$

$$w = T_1 \Delta_s - T_2 (\Delta_{s_1} + \Delta_s + \Delta_{s_2}) = T_1 \Delta_s - T_2 \Delta_{s_1} - T_2 \Delta_s - T_2 \Delta_{s_2}$$

$$w = (T_1 - T_2)\,\Delta_s - T_2 (\Delta_{s_1} + \Delta_{s_2})$$

La exergía proporcionada por la fuente caliente será:

$$Q_{u_1} = (T_1 - T_o)\,\Delta_s$$

La que recibirá la fuente fría, será:

$$Q_{u_2} = (T_2 - T_o)(\Delta_{s_1} + \Delta_s + \Delta_{s_2})$$

La exergía consumida por la máquina, será:

$$\boxed{e_x\ \text{cons.} = Q_{u_1} - Q_{u_2}}$$

Para un estado vivo 1 :

$$e_{x_1} = (u_1 - T_o s_1 + p_o v_1) - (u_o - T_o s_o + p_o v_o)$$

$$e_{x_1} = u_1 - T_o(s_1 - s_o) - u_o + p_o(v_1 - v_o);$$

De acuerdo a lo dicho:

$$e_{x_1} = (u_1 + e_{c_1} + e_{p_1}) - T_o(s_1 - s_o) - u_o + p_o(v_1 - v_o)$$

Reordenando y para un estado vivo cualquiera:

$$e_x = \left| (u + e_c + e_p) - u_o \right| - T_o(s - s_o) + p_o(v - v_o)$$

Con sus unidades:

$$e_x \frac{kcal}{kg} = \left| \left(u + A \frac{c^2}{2\, g_c} + A\, Z\right) - u_o \right| + A\, p_o(v - v_o) - T_o(s - s_o)$$

o bien: $e_x \dfrac{kJ}{kg} = \left| \dfrac{kcal}{kg} \right| \cdot 4{,}186 \left| \dfrac{kJ}{kcal} \right|$ siendo: c velocidad en $\dfrac{m}{s}$

Z altura en m.

En definitiva, para UN SISTEMA CERRADO:

$$\boxed{e_x \frac{kcal}{kg} = (u - u_o) + A\, p_o(v - v_o) - T_o(s - s_o) + A\frac{c^2}{2g} + AZ}$$

II.- Sistemas abiertos.-

Para un sistema abierto, a partir de la (1) de pág. 07 y para un estado "vivo cualquiera y considerando: $h = u + p\, v$; $h_o = u_o + p_o\, v_o$

La ecuación anterior se transforma, desarrollando y sumando las otras energías:

$$\boxed{e_x \frac{kcal}{kg} = h - h_o - T_o(s - s_o) + \frac{Ac^2}{2\,g} + AZ}$$

III.- Integración de procesos.-

Tareas como el acondicionamiento de aire, el tratamiento térmico de materiales en hornos industriales y la generación de vapor de proceso requieren comunmente la combustión de carbón, derivados del petroleo o gas natural. Cuando los productos de la combustión se encuentran a una temperatura significativamente mayor que la requerida para la tarea, el uso final no estará bien integrado con la fuente de energía y se obtendrá, como resultado, un uso ineficiente del combustible consumido.-

Para ilustrar esto de manera simple, se hará referencia a la figura 7.7 que muestra un sistema cerrado que recibe calor Q_f a la temperatura de la fuente T_f y entrega el flujo de calor Q_u a la temperatura de "uso" T_u .-

La ecuación (3) muestra que la exergía introducida al sistema por el flujo de calor Q_f es transferida desde el sistema acompañando a los flujos de calor Q_u y Q_p o destruído por irreversibilidades internas I .-

Esto puede describirse a través de una eficiencia exergética que relacione los flujos de exergía según el concepto productos/recursos para dar:

$$\eta_{ex.} = \frac{\text{productos}}{\text{recursos}} = \frac{\left[1 - \frac{T_o}{T_u}\right] Q_u}{\left[1 - \frac{T_o}{T_f}\right] Q_f} = \frac{\left[1 - \frac{T_o}{T_u}\right]}{\left[1 - \frac{T_o}{T_f}\right]} \eta$$

$$\boxed{\eta_{ex._{proceso}} = \frac{(1 - T_o / T_u)}{(1 - T_o / T_f)} \eta} \qquad (5)$$

Obsérvese que tanto η como $\eta_{ex._{proceso}}$ miden la efectividad de la conversión de recursos en productos. El parámetro η mide esta relación en términos energéticos, mientras que el parámetro $\eta_{ex._{proceso}}$ lo hace en términos exergéticos, es decir, que al parámetro η definido respecto del concepto de EXERGIA, se lo denomina eficiencia exergética.-

La ecuación (5) nos indica que un valor de η tan próximo a la unidad como sea posible en la práctica es importante para una utilización adecuada de la exergí transferida desde los gases de combustión calientes al sistema. Pero esto por sí solo no nos garantiza una utilización efectiva. Las temperaturas T_f y T_u tambien son importantes, pues el uso eficiente de la exergía aumentará al aproximarse la temperatura T_u a la temperatura de la fuente T_f . Para una utilización apropiada de la EXERGIA, por tanto, resulta deseable conseguir un valor para η tan próximo a la unidad como sea posible y tambien una "integración" adecuada de las temperaturas de la fuente y de uso.-

Para hacer hincapié en el importante papel que juega la temperatura en la eficiencia exergética, la ecuación (5) muestra graficamente en la figura 7.8, lo dicho. Esta figura muestra la eficiencia exergética en función de la temperatura de uso T_u para un valor fijo de la temperatura de la fuente igual a T_f = 2200 K. La figura 7.8 nos indica que la eficiencia exergética tiende a la unidad (100 %) cuando la temperatura de uso se aproxima a T_f. En muchos casos, sin embargo, la temperatura de uso está sustancialmente por debajo de T_f. En el gráfico se indican las eficiencias de tres aplicaciones: acondicionamiento de aire a T_u = 320K generación de vapor de proceso a T_u = 480 K y tratamiento térmico en un horno industrial a T_u = 700 K. Los valores de las eficiencias sugieren que el combustible tiene un uso más efectivo en las aplicaciones industriales a elevada temperatura que en el acondicionamiento de aire a baja temperatura.

IV.- Eficiencia exergética de equipos.-

La expresión de la "eficiencia exergética" puede tomar muchas formas diferentes. En cada caso la eficiencia se deducirá utilizando el balance de exergía. La aproximación aquí realizada servirá como modelo para el desarrollo de la eficiencia exergética de otros equipos. Cada uno de los casos considerados se refiere a un SISTEMA ABIERTO (volumen de control) en estado estacionario y considerando que no existe intercambio de calor entre el sistema abierto y sus alrededores.-

Considerando un balance de exergía en el cual se ha contabilizado tambien las transferencias de exergía que acompañan a los flujos de masa y los trabajos de flujo en las entradas y salidas, se tiene:

$$\underbrace{\frac{d_{ex.}}{d_{tiempo}}}_{\substack{\text{variación de}\\ \text{la exergía p/}\\ \text{unidad de tiempo.-}}} = \underbrace{\sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) Q_j - \left(W_{v.c.} - p_o \frac{dV_{v.c.}}{d_{tiempo}} \right) + \sum_e m_e b'_e - \sum_s m_s b'_s}_{\substack{\text{Transferencia de exergía por}\\ \text{unidad de tiempo.-}}} - \underbrace{I_{v.c.}}_{\substack{\text{exergía}\\ \text{destruida}\\ \text{p/unidad}\\ \text{de tiempo.-}}}$$

ecuación (6)

v.c. : volumen de control – Sub "e" : entrada – Sub "s" : salida.-

En la ecuación (6) el término $d_{ex.}/d_{tiempo}$ refleja la variación por unidad de tiempo de la exergía acumulada en el volumen de control. El término Q_j representa la velocidad de transferencia de calor a través de una parte de la frontera (límite) del sistema donde la temperatura instantánea es T_j. La transferencia de exergía del calor está dada por $(1 - T_o/T_j)\, Q_j$. El término $W_{v.c.}$ representa la velocidad de intercambio de energía por trabajo EXCLUYENDO EL TRABAJO DE FLUJO. La transferencia de exergía viene dada por $(W_{v.c.} - p_o\, dV/d_{tiempo})$ donde $dV_{v.c.}/d_{tiempo}$ es la variación de volumen por unidad de tiempo del volumen de control. El término $m_e b'_e$ representa la transferencia de exergía por unidad de tiempo que acompaña a la masa y al TRABAJO DE FLUJO en la entrada "e". De forma similar, $m_s b'_s$ representa lo mismo correspondiente a la masa y al TRABAJO DE FLUJO en la salida "s".-

Las exergías de flujo b'_e y b'_s corresponden a las mismas de los sistemas abiertos que aparecen en la página 11.- Finalmente, el término $I_{v.c.}$ representa la destrucción de exergía por unidad de tiempo a causa de las irreversibilidades INTERNAS del volumen de control.-

Como gran parte de los análisis en ingeniería se realizan sobre sistemas abiertos o "volúmenes de control" en ESTADO ESTACIONARIO resulta conveniente desarrollar las formas correspondientes al balance de exergía para esta forma particular.-

En estado estacionario: $d_{ex.}/d_{tiempo} = 0$ y $d_{v.c.}/d_{tiempo} = 0$

Dividiendo por m : $b_1' - b_2' = \dfrac{W_{v.c.}}{m} + \dfrac{I_{v.c.}}{m}$

El término de la izquierda representa la disminución de exergía de flujo entre la entrada y la salida. La exergía de flujo DISMINUYE porque la turbina produce un trabajo $W_{v.c.} / m$ pero existe una DESTRUCCION de exergía: $I_{v.c.}/m$.-

$$\eta_{ex.\ proceso} = \frac{W_{v.c.} / m}{b_1' - b_2'}$$

Esta expresión de la eficiencia exergética recibe el nombre de "efectividad de la turbina".-

Para un COMPRESOR o una BOMBA funcionando en estado estacionario sin intercambio de calor con sus alrededores, la expresión del balance de exergía puede ponerse de la forma:

$$-\frac{W_{v.c.}}{m} = (b_2' - b_1') + \frac{I_{v.c.}}{m}$$

La exergía consumida por el dispositivo: $W_{v.c.} / m$ es utilizada, en parte, para incrementar la exergía de flujo entre la entrada y la salida, siendo destruída la parte restante a causa de las irreversibilidades internas . La efectividad en la conversión del trabajo consumido para incrementar la exergía de flujo, viene dada por:

$$\eta_{ex.\ proceso} = \frac{b_2' - b_1'}{- W_{v.c.} / m}$$

Intercambiadores de calor de superficie.-

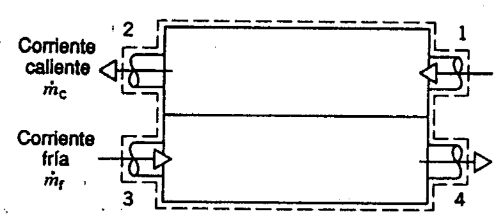


FIGURA 7.9 Intercambiador a contracorriente.

El intercambiador de calor mostrado opera en estado estacionario. No existe transferencia de calor con el entorno. El balance de exergía, será :

$$0 = \cancel{\sum_j (1 - T_o / T_j) Q_j}^{\,0} - \cancel{W_{v.c.}}^{\,0} + (m_c b_1' + m_f b_3') - (m_c b_2' + m_f b_4') - I_{v.c.}$$

m_c : es el flujo másico de la corriente caliente;

m_f : es el flujo másico de la corriente fria.-

Reordenando: $m_c (b_1' - b_2') = m_c (b_4' - b_3') + I_{v.c.}$

El primer miembro representa la disminución de exergía que sufre la corriente

-parando los valores de la eficiencia antes y despues de que la modificación propuesta se lleve a cabo para mostrar el grado de mejora que se ha conseguido. Además, las eficiencias exergéticas pueden emplearse tambien para evaluar el potencial de mejora en las prestaciones de un sistema térmico dado, por comparación de la eficiencia del sistema con la eficiencia de sistemas parecidos. Una diferencia significativa entre dichos valores nos indicará cuando puede conseguirse una mejora de las prestaciones.-

Es importante reconocer que el límite del 100 % para la eficiencia exergética no debe contemplarse como un objetivo práctico. Este límite teórico unicamente se obtendría si no hubiera destrucciones o pérdidas de exergía. Para conseguir procesos tan ideales necesitaríamos tiempos de operación extremadamente largos y dispositivos muy grandes o complicados, siendo ambos factores incompatibles con el objetivo de una operación rentable. En la práctica, las decisiones deben tomarse normalmente sobre la base de los costos totales. Un incremento de la eficiencia reducirá el consumo de combustible, o dicho de otra forma, implicará un mejor aprovechamiento de los recursos, que normalmente irá aparejado con costos adicionales para equipos y/o de operación. De acuerdo con esto y por lo general, una mejora de la eficiencia no se incorporará cuando lleve aparejado un incremento de los costos totales. La competencia entre ahorro de combustible e inversión adicional dicta invariablemente una eficiencia menor que la que podría alcanzarse teoricamente e incluso, a veces, que la que podría alcanzarse con la mejor tecnología disponible.-