



Faculdade de Engenharia Mecânica e Produção

## Exergia - Parte 1

Thiago Esterci Fernandes



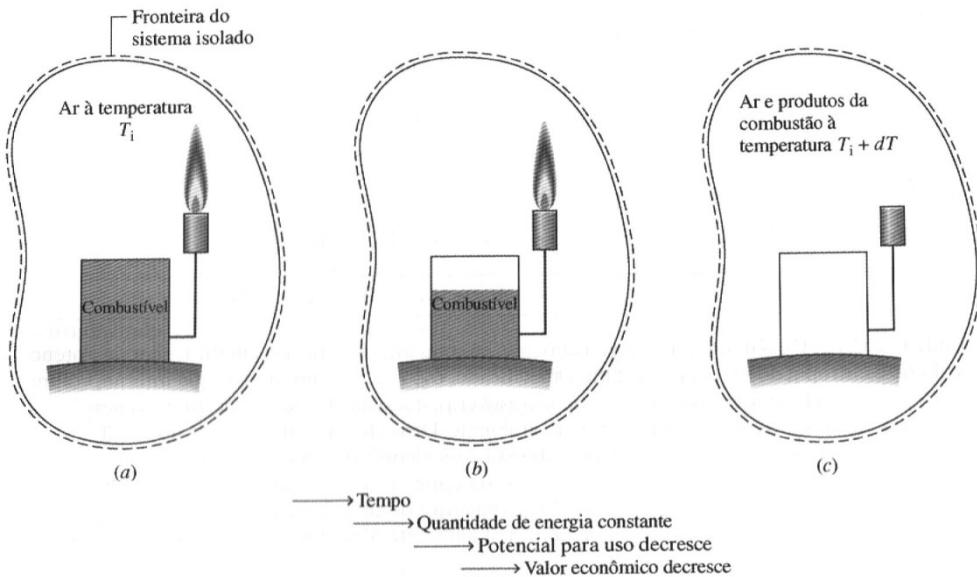
# Conteúdo

<b>1 Apresentação da Exergia</b>	<b>2</b>
<b>2 Conceituação de Exergia</b>	<b>3</b>
2.1 Ambiente . . . . .	3
2.2 Estado Morto . . . . .	4
2.3 Definição de Exergia . . . . .	4
<b>3 Exergia de um sistema</b>	<b>4</b>
3.1 Balanço de Energia . . . . .	5
3.2 Aspectos da Exergia . . . . .	7
3.2.1 Exergia Específica . . . . .	8
3.3 Variação de Exergia . . . . .	8
3.4 Variação de Exergia . . . . .	9
<b>4 Balanço de Exergia para um sistema</b>	<b>9</b>
4.1 Conceituação de Transferência de Exergia . . . . .	11
4.2 Exercício . . . . .	12
4.3 Balanço da Taxa de Exergia para Sistemas . . . . .	15
4.4 Destrução e Perda de Exergia . . . . .	16
4.5 Avaliação da destruição de exergia na parede de um forno . . . . .	16
4.6 Balancete de exergia para uma caixa de redução . . . . .	18
4.7 Balancete de exergia para uma caixa de redução . . . . .	19
<b>5 Balanço de exergia para volumes de controle</b>	<b>19</b>
5.1 Regime permanente . . . . .	19
5.1.1 Avaliação da Exergia Específica de Fluxo . . . . .	21
5.2 Comparação entre Energia e Exergia para Volumes de Controle em Regime Permanente . . . . .	22
<b>6 Eficiência energética</b>	<b>23</b>
6.1 Adequação do Uso Final à Fonte . . . . .	23
6.2 Turbinas . . . . .	25
6.3 Compressores e Bombas . . . . .	26
6.4 Trocador de Calor sem Mistura . . . . .	26
6.5 Trocador de Calor de Contato Direto . . . . .	27
6.6 Uso das eficiências energéticas . . . . .	28

# 1 Apresentação da Exergia

Utiliza os princípios de conservação da massa e da energia, juntamente com a segunda lei da termodinâmica para o projeto e análise de sistemas térmicos.

Maximiza a utilização de recursos energéticos a partir da determinação da localização, o tipo e os valores reais de rejeitos e perdas.



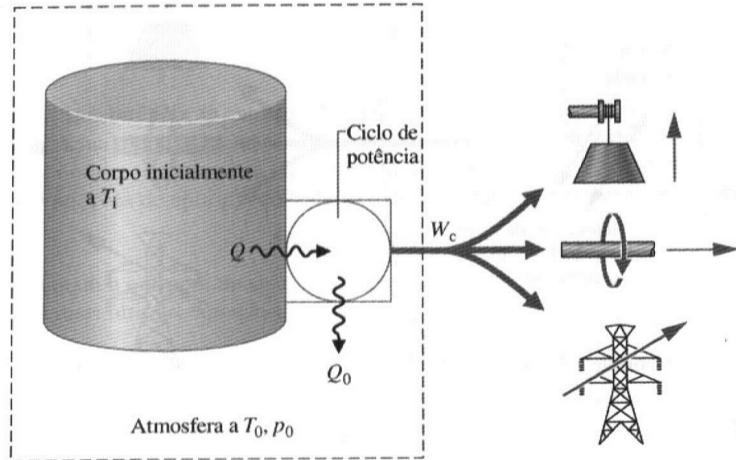
A quantidade total de energia do sistema é constante. Porém a condição (a) é mais útil que a condição (c). O sistema tem um potencial de uso maior na condição (a). Na condição (c) o potencial de uso foi desperdiçado. Potencial foi destruído por causa da natureza irreversível do processo. Exergia é a propriedade que quantifica o potencial de uso. Energia é conservada e exergia é destruída por meio de irreversibilidades.

Exergia não somente pode ser destruída por meio de irreversibilidades, mas também pode ser transferida PARA e DE sistemas. A exergia transferida de um sistema para sua vizinhança e que não é utilizada representa uma perda. Utiliza-se melhor os recursos energéticos reduzindo-se a destruição de exergia no interior de sistemas e/ou reduzindo-se as perdas. Um objetivo na análise de exergia é identificar locais em que ocorrem destruição e perdas de exergia e classificá-los em ordem de importância. A atenção estará centrada nos aspectos que oferecem maiores custo/benefício. (a) incorpora valor econômico, ao passo que (c) tem pouco valor. Conclusão: existe uma ligação entre exergia e o valor econômico.

## 2 Conceituação de Exergia

Observações:

- Existe um potencial para desenvolvimento de trabalho sempre que dois sistemas em diferentes estados são colocados em contato.
- Pode-se desenvolver trabalho quando se permite que dois sistemas atinjam o equilíbrio.



A figura mostra um sistema global com três elementos: o corpo; o ciclo de potência; e a atmosfera a  $T_0$  e  $p_0$ . Se a transferência de calor  $Q$  durante o resfriamento for transmitida para o ciclo de potência, o trabalho  $W_c$  é desenvolvido, enquanto  $Q_0$  é descarregado na atmosfera. O corpo esfria até  $T_0$  e nenhum trabalho a mais pode ser desenvolvido. No equilíbrio, corpo e atmosfera possuem energia, mas já não há qualquer potencial para realização de trabalho a partir dos dois, pois não pode ocorrer interação entre eles.

Trabalho poderia ser desenvolvido se a temperatura inicial do corpo fosse menor que a atmosfera. Os sentidos das transferências de calor seriam invertidos. Pode-se desenvolver trabalho a medida em que o corpo aquece em direção à atmosfera. O trabalho é realizado somente porque o estado inicial do corpo é diferente do estado da atmosfera. Exergia é o valor teórico máximo de tal trabalho.

O trabalho é realizado somente porque o estado inicial do corpo difere do estado da atmosfera. Exergia é o valor máximo de tal trabalho.

### 2.1 Ambiente

Para a análise do conceito de exergia, é necessário modelar a atmosfera usada no exemplo anterior. O modelo é chamado ambiente de referência da exergia, ou simplesmente ambiente. O ambiente é considerado um sistema compressível simples que é grande em extensão e uniforme em temperatura,  $T_0$  ( $25^\circ\text{C}$ ) e pressão,  $p_0$  (1 atm). As propriedades intensivas do ambiente não variam significativamente como resultado de algum processo e o ambiente é livre de irreversibilidades.

## 2.2 Estado Morto

Quando um sistema de interesse está a  $T_0$  e  $p_0$ , e em repouso com relação ao ambiente, dizemos que o sistema está no estado morto. No estado morto não pode haver interação entre o sistema e o ambiente, e desse modo não há potencial para se desenvolver trabalho.

## 2.3 Definição de Exergia

Exergia é o máximo trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global, composto por um sistema e o ambiente, conforme este entra em equilíbrio com o ambiente (atinge o estado morto).

Exergia (Origem: Wikipédia, a enciclopédia livre). Exergia é o trabalho máximo que pode ser obtido através do processo mais adequado de um sistema que se encontre em um estado inicial até que atinja o estado final, caracterizado pelo equilíbrio termodinâmico com o ambiente. Essa grandeza pode ser definida também como potencial máximo de trabalho de uma substância ou trabalho mínimo para fazer o sistema sair do estado morto. O termo foi definido por Zoran Rant, chamando de “exergia” a parte da energia disponível para produzir trabalho útil e de “anergia” a quantidade de energia não disponível para o mesmo fim. Ao contrário da energia, a exergia não pode ser conservada, já que é destruída por processos irreversíveis em razão do aumento de entropia.

A exergia se torna uma propriedade de combinação entre o sistema e o ambiente, uma vez definida como o trabalho máximo que um sistema pode desenvolver para chegar ao equilíbrio térmico, mecânico e químico com o ambiente. Dessa forma, uma vez que se define o ambiente, a exergia pode ser considerada propriedade do sistema. Historicamente, exergia foi o primeiro conceito a começar a ser proposta na termodinâmica, quando Carnot afirmou que “para transformar calor em energia cinética, utiliza-se uma máquina térmica, porém esta não é 100% eficiente na conversão”.

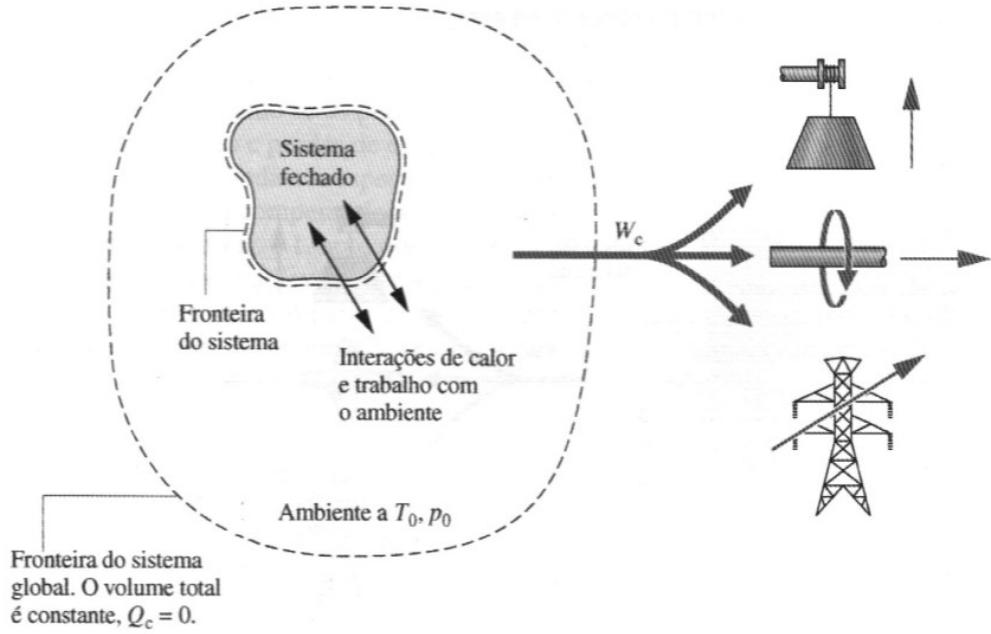
## 3 Exergia de um sistema

A exergia de um sistema,  $E$ , em um estado especificado é dada por:

$$E = (U - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + E_C + E_P \quad (1)$$

onde  $U$ ,  $E_C$ ,  $E_P$ ,  $V$  e  $S$  denotam, respectivamente, energia interna, energia cinética, energia potencial, volume e entropia do sistema no estado especificado.  $u_0$ ,  $V_0$  e  $S_0$  denotam energia interna, volume e entropia, respectivamente, do sistema quando está em estado morto. As energias cinética e potencial são avaliadas em relação ao ambiente. Dessa forma, quando está no estado morto, o sistema está em repouso em relação ao ambiente e os valores das energias cinética e potencial são zero. A unidade de exergia é a mesma da energia.

A Equação pode ser deduzida pela aplicação dos balanços de energia e entropia ao sistema global mostrado na Figura.



A exergia é o valor teórico máximo do trabalho  $W_c$  que poderia ser alcançado se o sistema entrasse em equilíbrio com o ambiente — sistema entrasse em estado morto. O sistema somado ao ambiente forma o sistema completo ou global. A fronteira do sistema global está localizada de modo que não haja transferência de energia por transferência de calor através dela:  $Q_C = 0$ . A fronteira do sistema global está localizada de forma que o volume total permaneça constante, mesmo que os volumes do sistema e do ambiente possam variar. O trabalho  $W_c$  é a única transferência de energia através da fronteira do sistema global e está totalmente disponível para levantar um peso, girar um eixo ou produzir eletricidade nas proximidades.

### 3.1 Balanço de Energia

Considere um processo em que o sistema e o ambiente entram em equilíbrio. O balanço de energia para o sistema global é:

$$\Delta E_c = (U_0 - E) = \Delta U_{amb} \quad (2)$$

$\Delta E_c$  é a variação da energia do sistema global: a soma das variações de energia do sistema e do ambiente. A energia do sistema inicialmente inclui a energia cinética, a energia potencial e a energia interna do sistema. Uma vez que as energias cinética e potencial são avaliadas em relação ao ambiente, a energia do sistema no estado morto é simplesmente sua energia interna  $u_0$ .

Consequentemente,  $\Delta E_c$  pode ser expresso por:

$$\Delta E_c = (U_0 - E) + \Delta U_{amb} \quad (3)$$

Ainda que  $T_0$  e  $p_0$  sejam constantes, as variações da energia interna  $U_{amb}$ , da entropia  $S_{amb}$  e do volume do ambiente estão relacionadas através da Equação:

$$\Delta U_{amb} = T_0 \Delta S_{amb} - p_0 \Delta V_{amb} \quad (4)$$

$$\Delta E_c = (U_0 - E) + \Delta U_{amb} \rightarrow (U_0 - E) + (T_0 \Delta S_{amb} - p_0 \Delta V_{amb}) \quad (5)$$

$$\Delta E_c = -W_c \rightarrow W_c = (E - U_0) = (T_0 \Delta S_{amb} - p_0 \Delta V_{amb}) \quad (6)$$

O volume total é constante. Portanto, a variação de volume do ambiente é igual em magnitude e oposta em sinal à variação de volume do sistema:

$$W_c = (U - U_0) - (T_0 \Delta S_{amb} - p_0 \Delta V_{amb}) \quad (7)$$

$$\Delta V_{amb} = -(V_0 - V) \quad (8)$$

$$W_c = (E - U_0) - p_0(V_0 - V) - (T_0 \Delta S_{amb}) \quad (9)$$

Essa equação fornece o trabalho para o sistema global à medida que o sistema passa ao estado morto. O trabalho teórico máximo é determinado utilizando-se o balanço de entropia como se segue.

O balanço de entropia para o sistema global reduz-se a:

$$\Delta S_c = \sigma_c \quad (10)$$

O termo da transferência de entropia é omitido porque nenhuma transferência de calor atravessa a fronteira do sistema global. O termo  $\sigma_c$  leva em conta a produção de entropia devido às irreversibilidades à medida que o sistema entra em equilíbrio com o ambiente.

Balanço de Entropia. A variação da entropia  $\delta S_c$  é o somatório das variações de entropia do sistema e do ambiente, respectivamente. Isso é:

$$\delta S_c = (S_0 - S) + \Delta S_{amb} \quad (11)$$

onde  $S$  e  $S_0$  denotam a entropia do sistema em um dado estado e no estado morto, respectivamente. Combinando as duas últimas equações, temos:

$$(S_0 - S) + \delta S_{amb} = \sigma_c \quad (12)$$

$$W_c = (E - U_0) - p_0(V_0 - V) - (T_0 \Delta S_{amb}) \quad (13)$$

$$W_c = (E - U_0) - p_0(V_0 - V) - T_0(S - S_0) - T_0 \sigma_c \quad (14)$$

$$W_c = (U - U_0) - p_0(V_0 - V) - T_0(S - S_0) + E_C + E_P - T_0\sigma_c \quad (15)$$

O valor do termo sublinhado é determinado pelos dois estados extremos do sistema - o estado dado e o estado morto - e é independente dos detalhes do processo que liga esses estados. O valor do termo  $T_0\sigma_c$  depende da natureza do processo à medida que o sistema evolui para o estado morto. De acordo com a segunda lei,  $T_0\sigma_c$  é positivo quando irreversibilidades estão presentes e se anula quando não há ocorrência da irreversibilidades. O valor do termo  $T_0\sigma_c$  não pode ser negativo. Por isso, o valor teórico máximo para o trabalho do sistema global  $W_c$  é obtido fazendo-se  $T_0\sigma_c$  igual a zero. Por definição, esse valor máximo é a exergia, E.

### 3.2 Aspectos da Exergia

1. Exergia é uma medida do desvio do estado de um sistema quando comparado ao do ambiente. É, portanto, um atributo do sistema e do ambiente em conjunto. Uma vez que o ambiente é especificado, pode-se atribuir um valor à exergia em termos de valores de propriedades apenas do sistema, e então a exergia pode ser considerada uma propriedade do sistema. Exergia é uma propriedade extensiva.
2. O valor da exergia não pode ser negativo. Se um sistema estiver em qualquer estado diferente do estado morto, este será capaz de mudar sua condição espontaneamente na direção do estado morto; essa tendência irá cessar quando o estado morto for alcançado. Nenhum trabalho deve ser feito para causar essa variação espontânea. Em consequência, qualquer mudança no estado de um sistema em direção ao estado morto deve ser realizada com pelo menos zero trabalho sendo desenvolvido e, desse modo, o trabalho máximo (exergia) não pode ser negativo.
3. A exergia não é conservada, mas pode ser destruída pelas irreversibilidades. Um caso-limite ocorre quando a exergia é completamente destruída, o que pode acontecer se um sistema for submetido a uma variação espontânea até o estado morto sem possibilidade de obtenção de trabalho. O potencial para o desenvolvimento de trabalho que existia originalmente será completamente desperdiçado nesse processo espontâneo.
4. A exergia até agora tem sido vista como o trabalho teórico máximo possível de ser obtido de um sistema global, constituído de um sistema mais o ambiente à medida que o sistema passa de um dado estado para o estado morto. Como alternativa, a exergia pode ser considerada o módulo do valor teórico mínimo de fornecimento de trabalho necessário para levar o sistema do estado morto para um dado estado. Usando os balanços de energia e entropia já vistos, podemos facilmente desenvolver a Equação a partir desse ponto de vista.
5. Quando um sistema está no estado morto, ele está em equilíbrio térmico e mecânico com o ambiente, e sua exergia tem valor zero. Mais precisamente, a contribuição termomecânica para a exergia é zero. Este termo distingue o conceito de exergia termomecânica de uma outra contribuição para a exergia, onde se permite que os conteúdos de um sistema no estado morto entrem em reação química com os componentes do ambiente e então se desenvolva um trabalho adicional. Esta contribuição para a exergia é chamada exergia

química. Apesar de o conceito de exergia química ser importante na análise da segunda lei de sistemas que envolvam misturas reagentes, incluindo combustão, o conceito de exergia termomecânica satisfaz uma ampla gama de avaliações termodinâmicas.

### 3.2.1 Exergia Específica

Expressando a Exergia em termos de unidade de massa, temos para a exergia específica, e:

$$e = (u - u_0) + p_0(v - V_0) - T_0(s - S_0) + V^2/2 + gz \quad (16)$$

u, v, s,  $V_2/2$  e gz são a energia interna específica, o volume, a entropia, a energia cinética e a energia potencial, respectivamente, no estado de interesse;  $u_0$ ,  $V_0$  e  $S_0$  são propriedades específicas no estado morto.

A exergia específica em um estado determinado requer propriedades nesse estado e no estado morto. Neste caso a Equação será usada para se determinar a exergia específica do vapor d'água saturado a 120°C, com uma velocidade de 30 m/s e a uma altura de 6 m, cada qual relativa a um ambiente de referência de exergia, onde  $T_0 = 298K(25°C)$ ,  $p_0 = 1atm$  e  $g = 9,8m/s^2$ . Para a água como vapor saturado a 120°C, a Tabela fornece  $v = 0,8919m^3/kg$ ,  $u = 2529,3kJ/kg$ ,  $s = 7,1296kJ/kgK$ . No estado morto, em que  $T_0 = 298K(25°C)$  e  $p_0 = 1atm$ , a água é um líquido. Desta forma,  $V_0 = 1,0029 \times 10^{-3}m^3/kg$ ,  $u_0 = 104,88kJ/kg$ ,  $S_0 = 0,3674kJ/kgK$ . Resposta:  $e = 500kJ/kg$

Um cilindro de um motor de combustão interna contém 2450 cm<sup>3</sup> de produtos gasosos de combustão a uma pressão de 7 bar e a uma temperatura de 867°C, pouco antes da abertura da válvula de descarga. Determine a exergia específica do gás, em kJ/kg. Ignore os efeitos de movimento e gravidade, e modele os produtos da combustão como ar na situação de gás ideal. Admita  $T_0 = 300 K (27°C)$  e  $p_0 = 1,013bar$ .

$$s - s_0 = c_v \ln \frac{T}{T_0} + R \ln \frac{v}{v_1} \quad (17)$$

$$s - s_0 = c_p \ln \frac{T}{T_0} + R \ln \frac{p}{p_1} \quad (18)$$

$$e = (666,28 + (-38,75) - 258,62) \text{ kJ/kg} = 368,91 \text{ kJ/kg}$$

Se os gases forem descarregados diretamente nas vizinhanças, o potencial para o desenvolvimento de trabalho quantificado pelo valor da exergia determinado na solução será desperdiçado. Entretanto, expelindo-se os gases para uma turbina, pode-se produzir algum trabalho. Este princípio é utilizado pelos turbo-alimentadores adicionados a alguns motores de combustão interna.

### 3.3 Variação de Exergia

Um sistema em um dado estado pode alcançar novos estados de várias maneiras, inclusive por interações de trabalho e calor com a vizinhança. O valor da exergia associado a um novo estado geralmente difere do valor da exergia do estado inicial. Utilizando a Equação podemos determinar a variação de exergia entre dois estados. No estado inicial,

$$E_1 = (U_1 - U_0) + p_0(V_1 - V_0) - T_0(S_1 - S_0) + E_{C1} + E_{P1} \quad (19)$$

No estado final,

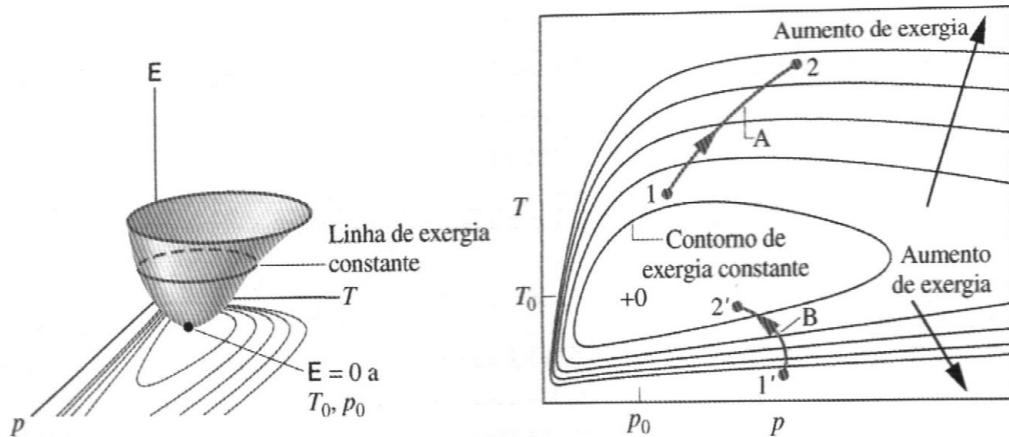
$$E_2 = (U_2 - U_0) + p_0(V_2 - V_0) - T_0(S_2 - S_0) + E_{C2} + E_{P2} \quad (20)$$

Subtraindo esses termos obtemos a variação de exergia

$$E_2 - E_1 = (U_2 - U_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + (E_{C2} - E_{C1}) + (E_{P2} - E_{P1}) \quad (21)$$

### 3.4 Variação de Exergia

A variação de exergia pode ser ilustrada pela Figura que mostra a superfície exergia-temperatura-pressão para um gás junto com um contorno de exergia constante projetado nas coordenadas temperatura-pressão. Para um sistema sujeito ao Processo A, a exergia aumenta à medida que o estado se distancia do estado morto (de 1 para 2). No Processo B, a exergia diminui à medida que o estado se aproxima do estado morto (de 1' para 2').



## 4 Balanço de Exergia para um sistema

Assim como a energia, a exergia pode ser transferida através da fronteira de um sistema. A variação de exergia de um sistema durante um processo não é necessariamente igual à exergia líquida transferida, porque a exergia pode ser destruída se estiverem presentes irreversibilidades no sistema durante o processo. Os conceitos de variação de exergia, transferência de exergia e destruição de exergia estão relacionados com o balanço de exergia para um sistema. O conceito de balanço de exergia será depois estendido para volumes de controle. Os balanços de exergia são expressões da segunda lei da termodinâmica e fornecem a base para a análise de exergia. O balanço de exergia para um sistema é dado por:

$$E_2 - E_1 = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q - [W - p_0(V_2 - V_1)] - T_0 \sigma \quad (22)$$

Para os estados finais especificados e os valores de  $p_0$  e  $T_0$  dados, a variação de exergia  $E_2 - E_1$  pode ser avaliada por:

$$E_2 - E_1 = (U_2 - U_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + (EC_2 - EC_1) + (EP_2 - EP_1) \quad (23)$$

Os termos sublinhados no lado direito dependem da natureza do processo. Esses termos são interpretados mais adiante.

O balanço de exergia para um sistema é desenvolvido combinando-se os balanços de energia e entropia para o sistema. As formulações dos balanços de energia e entropia são:

$$\Delta U + \Delta EC + \Delta EP = \left( \int_1^2 \delta Q \right) - W \quad (24)$$

$$\Delta S = \left( \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \right)_b - \sigma \quad (25)$$

Onde  $W$  e  $Q$  representam, respectivamente, trabalho e transferência de calor entre o sistema e a vizinhança. No balanço de entropia,  $T_b$  denota a temperatura nas fronteiras do sistema onde  $\delta Q$  ocorre. O termo  $\sigma$  leva em conta a entropia produzida dentro do sistema pelas irreversibilidades internas.

Multiplicando o balanço de entropia pela temperatura  $T_0$  e subtraindo a expressão resultante do balanço de energia obtém-se:

$$(\Delta U + \Delta EC + \Delta EP) - T_0 \Delta S = \left( \int_1^2 \delta Q \right) - T_0 \left( \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \right)_b - W - T_0 \sigma \quad (26)$$

Reunindo os termos que envolvem  $\delta Q$  no lado direito e introduzindo a equação

$$E_2 - E_1 = (U_2 - U_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + (EC_2 - EC_1) + (EP_2 - EP_1) \quad (27)$$

$$(\Delta U + \Delta EC + \Delta EP) - T_0 \Delta S = (E_2 - E_1) - p_0(V_2 - V_1) \quad (28)$$

no lado esquerdo, tem-se:

$$(E_2 - E_1) - p_0(V_2 - V_1) = \left( \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q \right) - W - T_0 \sigma \quad (29)$$

$$E_2 - E_1 = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q - [W - p_0(V_2 - V_1)] - T_0 \sigma \quad (30)$$

O primeiro termo sublinhado no lado direito da Equação está associado à transferência de calor de ou para o sistema durante o processo. Pode ser interpretado como a transferência de exergia associada ao calor.

$$E_q = \text{Variacao de exergia associada ao calor} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q \quad (31)$$

O segundo termo sublinhado no lado direito da Equação está associado ao trabalho. Pode ser interpretado como a transferência de exergia associada ao trabalho.

$$E_q = \text{Variacao de exergia associada ao trabalho} = [W - p_0(V_2 - V_1)] \quad (32)$$

O terceiro termo sublinhado no lado direito da Equação leva em conta a destruição de exergia (Ed) em virtude das irreversibilidades no interior do sistema.

$$E_d = T_0 \sigma \quad (33)$$

Portanto:

$$E_2 - E_1 = E_2 - E_d \quad (34)$$

## 4.1 Conceituação de Transferência de Exergia

Na análise da exergia, a transferência de calor e o trabalho são expressos em termos de uma medida comum: trabalho totalmente disponível para levantar um peso, ou, de forma equivalente, como trabalho elétrico ou trabalho de eixo. Essa é a importância das expressões de transferência de exergia dadas pelas Equações acima.

Interpreta-se as magnitudes dessas transferências de exergia como o trabalho teórico máximo que pode ser desenvolvido caso o sistema interaja com o ambiente, como se segue:

Reconhecendo o termo  $(1 - T_0/T_b)$  como a eficiência Carnot, a quantidade  $(1 - T_0/T_b)\delta Q$  é interpretada como o trabalho desenvolvido por um ciclo de potência reversível recebendo a energia  $\delta Q$  por transferência de calor a uma temperatura  $T_b$  e descarregando energia por transferência de calor no ambiente a uma temperatura  $T_0 < T_b$ . Quando  $T_b$  é inferior a  $T_0$ , consideramos que o trabalho desenvolvido por um ciclo de potência reversível recebe uma transferência de calor do ambiente a  $T_0$  e descarregando  $\delta Q$  a uma temperatura  $T_b < T_0$ . A outra transferência de exergia é o trabalho  $W$  do sistema menos o trabalho requerido para se deslocar o ambiente cuja pressão é  $p_0$ . Em outras palavras:

$$p_0(V_2 - V_1) \quad (35)$$

Em suma, em cada uma de suas formas, as equações expressam que a variação de exergia em um sistema fechado ocorre em virtude da transferência de exergia e pela destruição de exergia em virtude das irreversibilidades no interior do sistema.

Na aplicação do balanço de exergia, é essencial observar os requisitos impostos pela segunda lei na destruição de exergia: de acordo com a segunda lei, a destruição de exergia é positiva quando há irreversibilidades presentes no interior do sistema durante o processo e desaparecem no caso-limite, em que não há irreversibilidades.

Ou seja:

- $E_d > 0$  irreversibilidades presentes no sistema
- $E_d = 0$  ausência de irreversibilidades no sistema.

O valor da destruição de exergia não pode ser negativo. A destruição de exergia não é uma propriedade. A exergia é uma propriedade e, assim como outras propriedades, a variação de exergia de um sistema pode ser positiva, negativa ou nula.

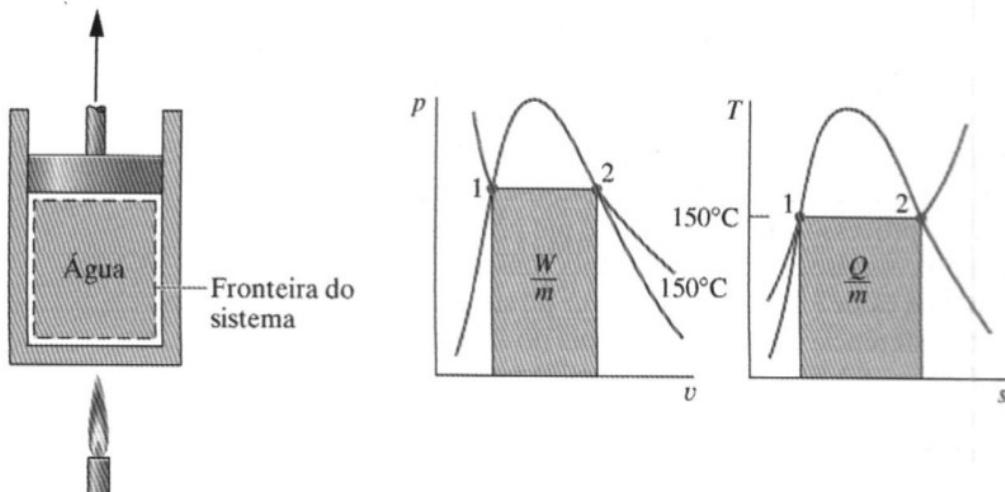
$$E_2 - E_1 : \begin{cases} >0 \\ =0 \\ <0 \end{cases}$$

Para um sistema isolado, não ocorrem interações de calor ou trabalho com a vizinhança, e portanto não ocorrem transferências de exergia entre o sistema e a vizinhança. Consequentemente, o balanço de exergia se reduz a:

$$\Delta E \parallel_{isolado} E_d \parallel_{isolado} \quad (36)$$

Visto que a destruição de exergia deve ser positiva em qualquer processo real, os únicos processos de um sistema isolado que ocorrem são aqueles para os quais a exergia de um sistema isolado diminui. Para a exergia, essa conclusão é a equivalência do princípio do aumento de entropia e, assim como o princípio do aumento de entropia, pode ser considerada um enunciado alternativo da segunda lei.

## 4.2 Exercício



Água, inicialmente como líquido saturado a 150°C (423,15 K) está contida em um conjunto cilindro-pistão. A água é submetida a um processo que a leva ao estado correspondente de vapor saturado, durante o qual o pistão se move livremente ao longo do cilindro. Considerando que a mudança de estado acontece em virtude do aquecimento da água à medida que esta percorre um processo internamente reversível a pressão e temperatura constantes, determine o trabalho e a quantidade de calor transferida por unidade de massa, em kJ/kg.

**Análise:** para pressão constante, o trabalho se torna

$$\frac{W}{m} = \int_1^2 p \, dv = p(v_2 - v_1)$$

Com os valores obtidos na Tabela A-2 para 150°C

$$\begin{aligned} \frac{W}{m} &= (4,758 \text{ bar})(0,3928 - 1,0905 \times 10^{-3}) \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \left| \frac{10^5 \text{ N/m}^2}{1 \text{ bar}} \right| \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \\ &= 186,38 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Uma vez que o processo é internamente reversível e a temperatura constante, a Eq. 6.23 fornece

$$Q = \int_1^2 T \, dS = m \int_1^2 T \, ds$$

ou

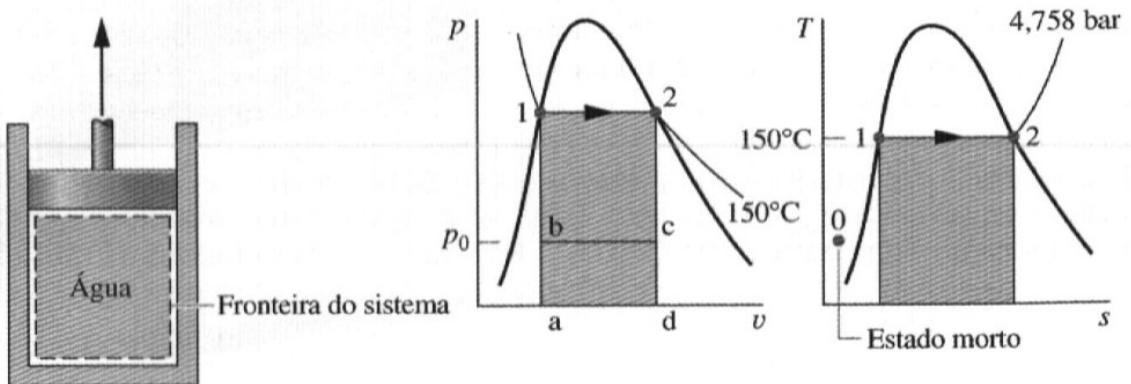
$$\frac{Q}{m} = T(s_2 - s_1)$$

Com os valores da Tabela A-2

$$\textcircled{1} \quad \frac{Q}{m} = (423,15 \text{ K})(6,8379 - 1,8418) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 2114,1 \text{ kJ/kg}$$

Como mostrado na figura que acompanha a solução, o trabalho e a transferência de calor podem ser representados por áreas nos diagramas  $p-v$  e  $T-s$ , respectivamente.

Um conjunto cilindro-pistão contém água inicialmente a 150°C (423,15 K). A água é aquecida até o estado de vapor saturado correspondente em um processo internamente reversível a temperatura e pressão constantes. Para  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  (293,15 K),  $p_0 = 1$  bar e ignorando os efeitos de movimento e da gravidade, determine, em kJ/kg, (a) a variação de exergia, (b) a transferência de exergia associada ao calor, (c) a transferência de exergia associada ao trabalho e (d) a destruição de exergia.



Dados do Exemplo 6.1:

$$W/m = 186,38 \text{ kJ/kg}, Q/m = 2114,1 \text{ kJ/kg}$$

Estado	$v$ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )	$u$ ( $\text{kJ/kg}$ )	$s$ ( $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ )
1	$1,0905 \times 10^{-3}$	631,68	1,8418
2	0,3928	2559,5	6,8379

$$e_2 - e_1 = u_2 - u_1 + p_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1)$$

$$\begin{aligned}
 e_2 - e_1 &= (2559,5 - 631,68) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left(1,0 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) (0,3928 - (1,0905 \times 10^{-3})) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \\
 &\quad - 293,15 \text{ K} (6,8379 - 1,8418) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\
 &= (1927,82 + 39,17 - 1464,61) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 502,38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

$$\frac{E_q}{m} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \frac{Q}{m}$$

$$\frac{E_q}{m} = \left(1 - \frac{293,15 \text{ K}}{423,15 \text{ K}}\right) \left(2114,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = 649,49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{E_w}{m} &= \frac{W}{m} - p_0(v_2 - v_1) \\
 &= (186,38 - 39,17) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 147,21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

**(d)** Visto que o processo é internamente reversível, a destruição de exergia é necessariamente zero. Isto pode ser checado pela inserção dos resultados dos itens (a) a (c) em um balanço de exergia. Dessa forma, resolvendo a Eq. 7.4b para a destruição de exergia por unidade de massa, avaliando os termos e permitindo o arredondamento, obtemos

$$\begin{aligned}
 \frac{E_d}{m} &= -(e_2 - e_1) + \frac{E_q}{m} - \frac{E_w}{m} \\
 &= (-502,38 + 649,49 - 147,21) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 0
 \end{aligned}$$

- ➊ Reconhecendo o termo  $(1 - T_0/T)$  como a eficiência de Carnot (Eq. 5.9), podemos interpretar o lado direito da Eq. (b) como o trabalho que *pode* ser desenvolvido por um ciclo de potência reversível ao receber a energia  $Q/m$  à temperatura  $T$  e descarregar energia por transferência de calor no ambiente a  $T_0$ .
- ➋ O lado direito da Eq. (c) mostra que, se o sistema estiver interagindo com o ambiente, todo o trabalho  $W/m$ , representado pela área 1-2-d-a-1 no diagrama  $p-v$  da Fig. E7.2 não estará totalmente apto a levantar um peso. Uma porção seria gasta em pressionar em parte o ambiente à pressão  $p_0$ . Essa parcela é dada por  $p_0(v_2 - v_1)$ , e é representada pela área a-b-c-d-a no diagrama  $p-v$  da Fig. E7.2.

### 4.3 Balanço da Taxa de Exergia para Sistemas

Tal como ocorre para os balanços de massa, energia e entropia, o balanço de exergia pode ser expresso de formas variadas que podem ser mais adequadas para determinados tipos de análise. Uma forma conveniente é a taxa do balanço de exergia para um sistema dada por:

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left( \dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt} \right) - \dot{E}_d$$

onde  $dE/dt$  é a taxa temporal de variação de exergia.

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left( \dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt} \right) - \dot{E}_d \quad (37)$$

O termo  $(1 - T_0/T_j)\dot{Q}_j$  representa a taxa temporal de transferência de exergia que acompanha a transferência de calor à taxa  $\dot{Q}_j$  que ocorre nos pontos da fronteira em que a temperatura instantânea é  $T_j$ . O termo  $\dot{W}$  representa a taxa temporal de transferência de energia por trabalho. A taxa de transferência de exergia é dada por  $(\dot{W} - p_0 dV/dt)$ , onde  $dV/dt$  é a taxa de variação temporal do volume do sistema. O termo  $\dot{E}_d$  leva em conta a taxa temporal de destruição de exergia em virtude das irreversibilidades presentes no sistema.

Em regime permanente,  $dE/dt = dV/dt = 0$ , e a Equação se reduz, fornecendo o balanço da taxa de exergia em regime permanente.

$$0 = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W} - \dot{E}_d$$

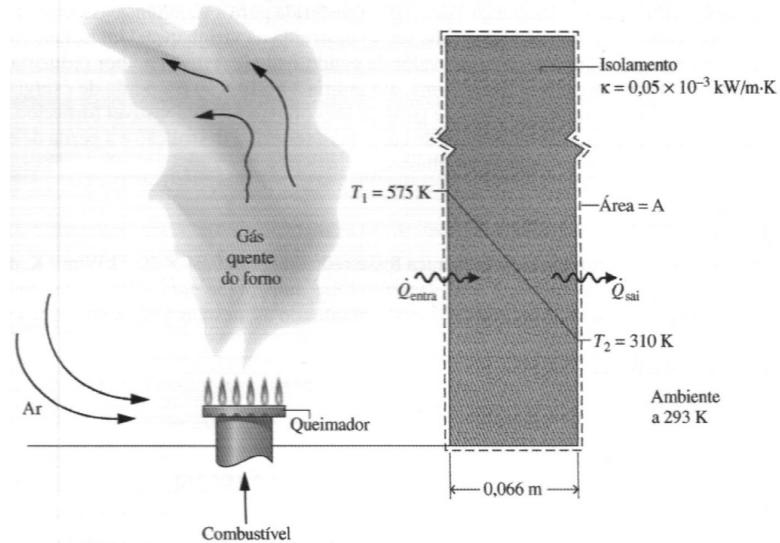
Note que para um sistema em regime permanente, a taxa de transferência de exergia associada a  $\dot{W}$  é simplesmente a potência.

#### 4.4 Destrução e Perda de Exergia

A maioria dos sistemas térmicos é abastecida com influxos de exergia derivados direta ou indiretamente do consumo de combustíveis (fósseis e renováveis). Consequentemente, destruições e perdas evitáveis de exergia representam um desperdício desses recursos. Por meio do desenvolvimento de caminhos para se reduzirem tais ineficiências, pode-se fazer um melhor uso desses combustíveis. O balanço de exergia pode ser aplicado para determinar a localização, os tipos e a verdadeira magnitude do desperdício de recursos energéticos e, assim, pode representar uma parte importante no desenvolvimento de estratégias para um uso mais eficiente dos combustíveis. No Exemplo a seguir as formulações dos balanços das taxas de energia e exergia para um sistema em regime permanente são aplicadas a uma parede de um forno para se avaliarem a destruição e a perda de exergia que são interpretadas em termos de uso de combustíveis fósseis.

#### 4.5 Avaliação da destruição de exergia na parede de um forno

A parede de um forno industrial de secagem é construída utilizando-se 0,066 m de espessura de isolante com condutividade térmica  $k = 0,05 \times 10^{-3} \text{ kW/m} \cdot \text{K}$  entre duas placas finas de metal. Em regime permanente, a placa de metal interna está a  $T_1 = 575\text{K}$  e a placa externa está a  $T_2 = 310\text{K}$ . A temperatura varia linearmente através da parede. A temperatura das proximidades do forno é, em média, 293 K. Determine, em kW por m<sup>2</sup> de área da superfície da parede, (a) a taxa de transferência de calor através da parede, (b) as taxas de transferência de exergia associadas à transferência de calor nas superfícies interna e externa da parede e (c) a taxa de destruição de exergia na parede. Adote  $T_0 = 293\text{K}$ .



**Análise:** (a) Em regime permanente, um balanço da taxa de energia para o sistema se reduz a  $\dot{Q}_{\text{entra}} = \dot{Q}_{\text{sai}}$  — em outras palavras, as taxas de transferência de calor para dentro e para fora da parede são iguais. Admita que  $\dot{Q}$  indica a transferência de calor comum. Usando a Eq. 2.3.1 com a hipótese 2, a taxa de transferência de calor é dada por

$$\begin{aligned} (\dot{Q}/A) &= -\kappa \left[ \frac{T_2 - T_1}{L} \right] \\ &= -\left( 0,05 \times 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right) \left[ \frac{(310 - 575) \text{ K}}{0,066 \text{ m}} \right] = 0,2 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

(b) As taxas de transferência de exergia associadas à transferência de calor são avaliadas por meio da Eq. 7.12. Na superfície interna

$$\begin{aligned} (\dot{E}_{q1}/A) &= \left[ 1 - \frac{T_0}{T_1} \right] (\dot{Q}/A) \\ &= \left[ 1 - \frac{293}{575} \right] \left( 0,2 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right) = 0,1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

Na superfície externa

$$\begin{aligned} \text{① } (\dot{E}_{q2}/A) &= \left[ 1 - \frac{T_0}{T_2} \right] (\dot{Q}/A) \\ &= \left[ 1 - \frac{293}{310} \right] \left( 0,2 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right) = 0,01 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

(c) A taxa de destruição de exergia na parede é avaliada por meio do balanço da taxa de exergia. Como  $\dot{W} = 0$ , a Eq. 7.11b fornece

$$\text{② } (\dot{E}_d/A) = (\dot{E}_{q1}/A) - (\dot{E}_{q2}/A)$$

$$\text{③ } = (0,1 - 0,01) \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} = 0,09 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

As taxas de transferência de calor são as mesmas na parede interna e na parede externa, mas as taxas de transferência de exergia nesses locais são muito diferentes. A taxa de transferência de exergia na parede interna a alta temperatura é 10 vezes a taxa de transferência de exergia na parede externa a baixa temperatura. Em cada um desses locais a transferência de exergia fornece uma medida mais fiel do valor termodinâmico do que a taxa de transferência de calor.

Isto é claramente visto na parede externa, onde a pequena transferência de exergia indica o potencial mínimo para uso e, portanto, o valor termodinâmico mínimo.

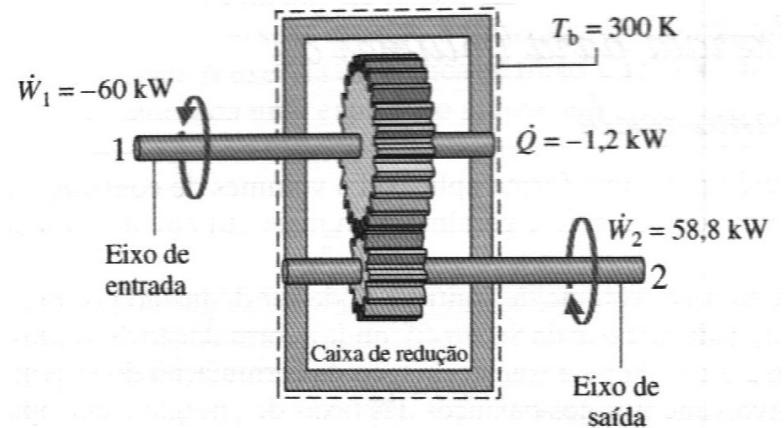
A exergia transferida para a parede a  $T_1 = 575\text{ K}$  ou é destruída no interior da parede devido à transferência de calor espontânea ou é transferida para fora da parede a  $T_2 = 310\text{ K}$ , onde é perdida para a vizinhança. A exergia transferida para a vizinhança associada ao calor perdido, como no presente caso, acaba sendo destruída na vizinhança. Um isolamento mais grosso e/ou um isolamento com um valor de condutividade térmica menor reduziria a taxa de transferência de calor e, dessa forma, diminuiria a destruição e a perda de exergia.

Neste exemplo, a exergia destruída e perdida tem origem no combustível fornecido. Desse modo, medidas eficientes em termos de custo para reduzir a destruição e a perda de exergia gera benefícios na economia de combustível.

## 4.6 Balancete de exergia para uma caixa de redução

Balancete de Exergia – operação onde os diversos termos de um balanço de exergia para um sistema são sistematicamente avaliados e comparados.

$$T_0 = 293\text{ K}$$



$$\dot{E}_q = \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \dot{Q}$$

$$\begin{aligned}\dot{E}_q &= \left(1 - \frac{293}{300}\right)(-1.2\text{ kW}) \\ &= -0.03\text{ kW}\end{aligned}$$

$$\dot{W} = \dot{W}_1 + \dot{W}_2$$

$$\dot{E}_d = \dot{E}_q - \dot{W} = -0,03 \text{ kW} - (-1,2 \text{ kW}) = 1,17 \text{ kW}$$

#### 4.7 Balancete de exergia para uma caixa de redução

Balanceamento de Exergia – operação onde os diversos termos de um balanço de exergia para um sistema são sistematicamente avaliados e comparados.

<i>Taxa de exergia entrando:</i>	
eixo de alta velocidade	60,00 kW (100%)
<i>Distribuição da exergia:</i>	
• Taxa de exergia saindo	
eixo de baixa velocidade	58,80 kW (98%)
calor perdido	0,03 kW (0,05%)
• Taxa de destruição de exergia	<u>1,17 kW (1,95%)</u>
	60,00 kW (100%)

## 5 Balanço de exergia para volumes de controle

## 5.1 Regime permanente

O balanço de exergia é estendido para uma forma aplicável a volumes de controle em regime permanente. A formulação de volume de controle é geralmente a mais útil em análises de engenharia.

$$\frac{\frac{dE_{cv}}{dt}}{\text{rate of exergy change}} = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left( \dot{W}_{cv} - p_0 \frac{dV_{cv}}{dt} \right) + \sum_i \dot{m}_i \mathbf{e}_{fi} - \sum_e \dot{m}_e \mathbf{e}_{fe} - \dot{E}_d \frac{\text{rate of exergy destruction}}{\text{rate of exergy destruction}}$$

onde os termos sublinhados representam a transferência de exergia, com massa entrando e saindo do volume de controle, respectivamente. Em regime permanente,  $dE_{vc}/dt = dV_{vc}/dt = 0$ , obtendo-se assim o balanço de exergia para regime permanente em termos de taxa,

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \mathbf{e}_{fi} - \sum_e \dot{m}_e \mathbf{e}_{fe} - \dot{E}_d$$

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \dot{m}(\mathbf{e}_{f1} - \mathbf{e}_{f2}) - \dot{E}_d$$

Onde  $e_{fi}$  denota a exergia por unidade de massa que atravessa a entrada i e  $e_{fe}$  denota a exergia por unidade de massa que atravessa a saída e. Esses termos, conhecidos como exergia específica de fluxo, são expressos por:

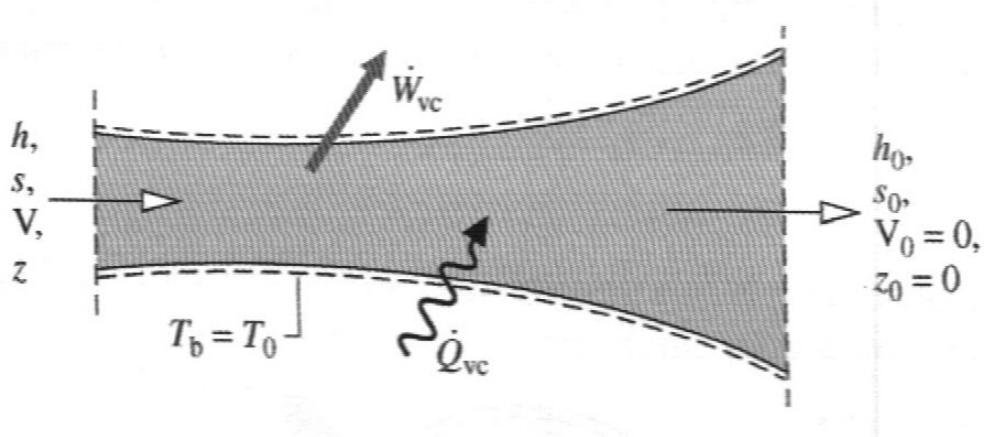
$$e_f = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (38)$$

Onde h e s representam a entalpia e a entropia específicas, respectivamente, na entrada ou na saída consideradas;  $h_0$  e  $S_0$  representam os respectivos valores dessas propriedades quando avaliadas em  $T_0$ ,  $p_0$ . Veja a seguir a dedução da equação.

Se houver uma única entrada e uma única saída, indicadas por 1 e 2, respectivamente, o balanço da taxa de exergia em regime permanente se reduz a

$$\mathbf{e}_{f1} - \mathbf{e}_{f2} = (h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

### 5.1.1 Avaliação da Exergia Específica de Fluxo



A exergia associada a uma corrente de matéria é o trabalho teórico máximo que pode ser obtido conforme a corrente alcança o estado morto, enquanto a transferência de calor só ocorre com o ambiente a  $T_0$ . O trabalho desenvolvido é totalmente disponível para erguer um peso ou, de forma equivalente, como trabalho elétrico ou trabalho de eixo. Para avaliar a exergia associada à corrente no estado dado por  $h$ ,  $s$ ,  $V$  e  $z$ , pense em uma corrente que alimenta o volume de controle que opera em regime permanente conforme mostrado na Figura.

Na saída do volume de controle, as respectivas propriedades são as correspondentes ao estado morto:  $h_0, S_0, V_0 = 0, z_0 = 0$ . Quanto ao volume de controle da Figura, os balanços de energia e entropia são dados, respectivamente, por

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[ (h - h_0) + \frac{(V^2 - (0)^2)}{2} + g(z - 0) \right]$$

$$0 = \frac{\dot{Q}_{vc}}{T_0} + \dot{m}(s - s_0) + \dot{\sigma}_{vc}$$

Eliminando  $\dot{Q}_{vc}$  entre as Equações, o trabalho desenvolvido por unidade de massa em escoamento é

$$\frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} = \left[ (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \right] - T_0 \left( \frac{\dot{\sigma}_{vc}}{\dot{m}} \right)$$

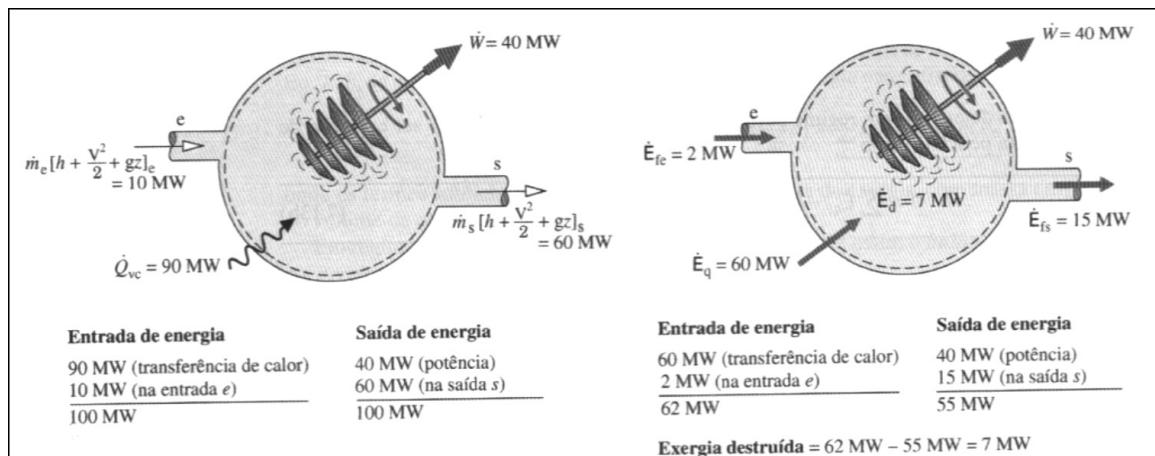
O valor do termo sublinhado é determinado por dois estados: o estado dado e o estado morto. O valor do termo de produção de entropia, que não pode ser negativo, depende da natureza do fluxo. O trabalho máximo teórico que pode ser desenvolvido, por unidade de massa em

escoamento, corresponde ao valor zero para produção de entropia — ou seja, quando o fluxo através do volume de controle da Figura é internamente reversível. A exergia específica de fluxo,  $e_f$  é esse valor máximo do trabalho.

$$e_f = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (39)$$

## 5.2 Comparação entre Energia e Exergia para Volumes de Controle em Regime Permanente

Embora energia e exergia tenham unidades em comum e a transferência de exergia acompanhe a transferência de energia, os conceitos de energia e exergia são fundamentalmente diferentes. A energia e a exergia se relacionam, respectivamente, com a primeira e a segunda lei da termodinâmica: A energia se conserva. A exergia é destruída pelas irreversibilidades. A exergia expressa a transferência de energia por trabalho, calor e fluxo de massa em termos de uma medida comum, relacionada com a disponibilidade — ou seja, o trabalho que está totalmente disponível para o levantamento de um peso ou, de modo equivalente, como trabalho de eixo ou trabalho elétrico.



A primeira Figura mostra as taxas de transferência de energia para um volume de controle em regime permanente com uma entrada e uma saída. Isto inclui as transferências de energia por trabalho e por calor e as transferências de energia para dentro e para fora associadas ao fluxo de massa através da fronteira. A segunda Figura mostra o mesmo volume de controle, mas agora com as taxas de transferência de exergia indicadas. Observe que as magnitudes das transferências de exergia associadas à transferência de calor e ao fluxo de massa diferem das magnitudes das transferências de energia correspondentes. Essas taxas de transferência de exergia são calculadas por meio das Equações anteriores.

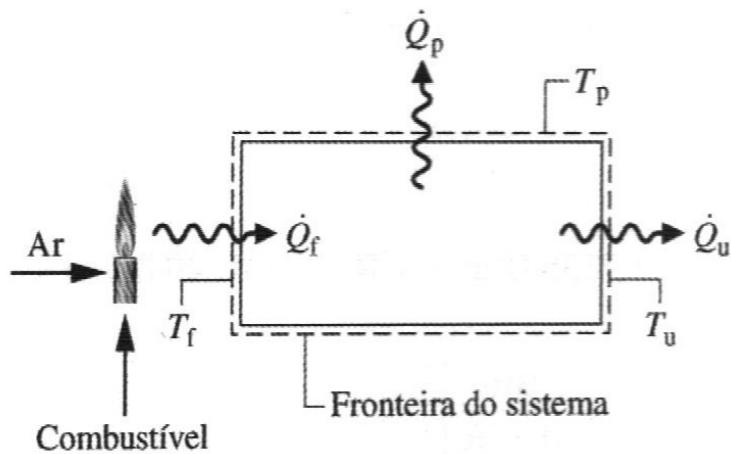
De acordo com o princípio da conservação de energia, a taxa total de entrada de energia no volume de controle é igual à taxa total de saída. Entretanto, a taxa total de exergia que entra no volume de controle excede a taxa à qual a exergia sai. A diferença entre esses valores de exergia é a taxa à qual a exergia é destruída por irreversibilidades, de acordo com a segunda

lei. Resumindo, a exergia fornece uma imagem mais nítida de desempenho do que a energia porque a exergia expressa todas as transferências de energia em uma base comum e considera de forma explícita os efeitos das irreversibilidades através do conceito de destruição de exergia.

## 6 Eficiência energética

### 6.1 Adequação do Uso Final à Fonte

O aquecimento de um ambiente, aquecimento de fornos industriais e processos de geração de vapor costumam envolver a combustão de carvão, óleo ou gás natural. Quando os produtos da combustão encontram-se a uma temperatura significativamente superior à temperatura exigida para uma dada tarefa, o uso final não está bem ajustado à fonte, e o resultado é o uso ineficiente do combustível queimado.



Para ilustrar esse fato, considere a Figura, que mostra um sistema que recebe uma transferência de calor a uma taxa  $\dot{Q}_f$  de uma fonte a uma temperatura  $T_f$  e fornece  $\dot{Q}_u$  a uma temperatura de uso  $T_u$ . A energia é perdida para a vizinhança através de transferência de calor a uma taxa  $\dot{Q}_p$  ao longo de uma parcela da superfície a  $T_p$ . Todas as transferências de energia mostradas na figura ocorrem nos sentidos indicados pelas setas.

Supondo que o sistema opere em regime permanente, e que não há trabalho, os balanços das taxas de energia e de exergia do sistema são:

$$\begin{aligned}\cancel{\frac{dE}{dt}}^0 &= (\dot{Q}_f - \dot{Q}_u - \dot{Q}_p) - \cancel{\dot{W}}^0 \\ \cancel{\frac{dE}{dt}}^0 &= \left[ \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right) \dot{Q}_f - \left(1 - \frac{T_0}{T_u}\right) \dot{Q}_u - \left(1 - \frac{T_0}{T_p}\right) \dot{Q}_p \right] - \left[ \cancel{\dot{W}}^0 - p_0 \cancel{\frac{dV}{dt}}^0 \right] - \dot{E}_d\end{aligned}$$

Ou:

$$\dot{Q}_f = \dot{Q}_u + \dot{Q}_p$$

$$\left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right)\dot{Q}_f = \left(1 - \frac{T_0}{T_u}\right)\dot{Q}_u + \left(1 - \frac{T_0}{T_p}\right)\dot{Q}_p + \dot{E}_d$$

A Equação indica que a energia transportada pelo calor transferido,  $Q_f$ , ou é utilizada,  $Q_u$ , ou é perdida para a vizinhança,  $Q_p$ . Isso pode ser descrito por uma eficiência em termos de taxas de energia na forma de produto/entrada como:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_f}$$

Em princípio, o valor de  $\nu$  pode ser aumentado através da aplicação de um isolante para reduzir as perdas. O valor-limite, quando  $Q_p = 0$ , é de  $\nu = 1$  (100%).

A Equação mostra que a exergia transportada para o sistema associada à transferência de calor  $Q_f$  ou é transferida a partir do sistema acompanhando as transferências de calor  $Q_u$  e  $Q_p$  ou é destruída pelas irreversibilidades dentro do sistema. Isso pode ser descrito por um rendimento em termos de taxas de exergia em forma de produto/entrada, tal como

$$\epsilon = \frac{(1 - T_0/T_u)\dot{Q}_u}{(1 - T_0/T_f)\dot{Q}_f}$$

Ou:

$$\epsilon = \eta \left( \frac{1 - T_0/T_u}{1 - T_0/T_f} \right)$$

O parâmetro  $\epsilon$ , definido em relação ao conceito de exergia, pode ser chamado de eficiência energética. Tanto  $\nu$  quanto  $\epsilon$  medem a eficácia com que a entrada é convertida em produto. O

parâmetro  $\nu$  realiza isso em uma base de energia, enquanto  $\epsilon$  o faz em uma base de exergia. O valor de  $\epsilon$  geralmente é inferior à unidade, mesmo quando  $\nu = 1$ .

A Equação indica que um valor de  $\nu$  tão próximo da unidade quanto possível é, na prática, importante para a correta utilização da exergia transferida a partir do gás quente da combustão para o sistema. No entanto, isso por si só não garante uma utilização eficiente. As temperaturas  $T_f$  e  $T_u$  também são importantes, já que o uso da exergia melhora à medida que a temperatura de uso  $T_u$  se aproxima da temperatura da fonte  $T_f$ . Para a correta utilização da exergia, por conseguinte, é conveniente ter um valor de  $\nu$  tão próximo da unidade quanto possível na prática e também um bom ajuste entre as temperaturas da fonte e de uso.

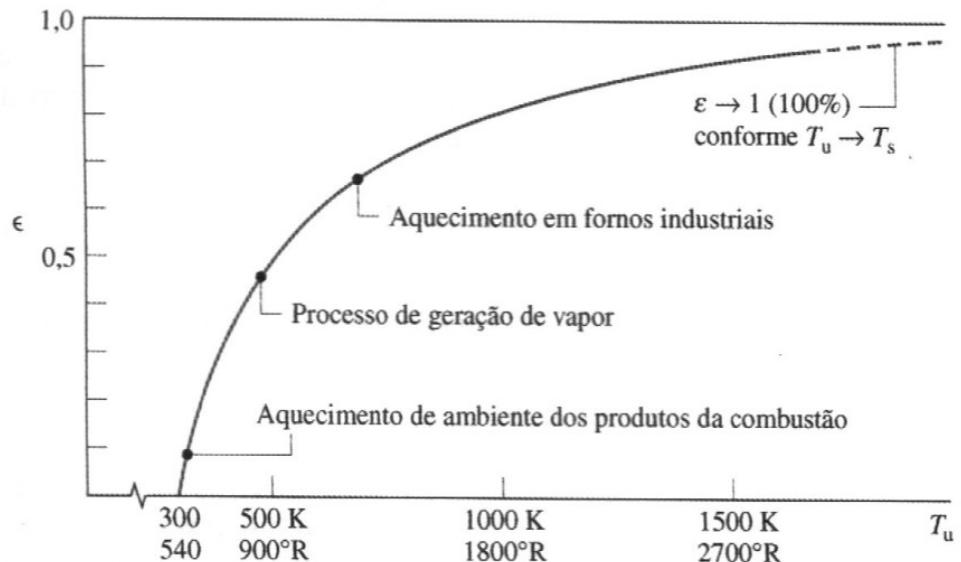


Figura  $\epsilon$  versus a temperatura de uso  $T_u$ ;  $T_f = 2200$  K (3960°R) e  $\nu = 1$ .  $\epsilon$  tende à unidade (100%) à medida que a temperatura de uso se aproxima de  $T_f$ . Na maioria dos casos a temperatura de uso é substancialmente inferior a  $T_f$ . As eficiências para três aplicações estão indicadas no gráfico: o aquecimento de um ambiente a  $T_u = 320$  K (576°R), o processo de geração de vapor a  $T_u = 480$  K (864°R) e o aquecimento de fornos industriais a  $T_u = 700$  K (1260°R). Esses valores de eficiência sugerem que o combustível é utilizado de forma mais eficaz em aplicações industriais que envolvam altas temperaturas de uso. As eficiências estão superestimadas ( $\nu = 1$ ) e a perda de exergia associada a processo de combustão não foi considerada.

## 6.2 Turbinas

Para uma turbina que opera em regime permanente, sem transferência de calor para sua vizinhança, a formulação do balanço da taxa de exergia em regime permanente simplifica-se como a seguir:

$$0 = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right)^0 \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \dot{m}(\mathbf{e}_{f1} - \mathbf{e}_{f2}) - \dot{E}_d$$

Esta equação pode ser reformulada, fornecendo

$$\mathbf{e}_{f1} - \mathbf{e}_{f2} = \frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} + \frac{\dot{E}_d}{\dot{m}}$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_{vc}/\dot{m}}{\mathbf{e}_{f1} - \mathbf{e}_{f2}}$$

### 6.3 Compressores e Bombas

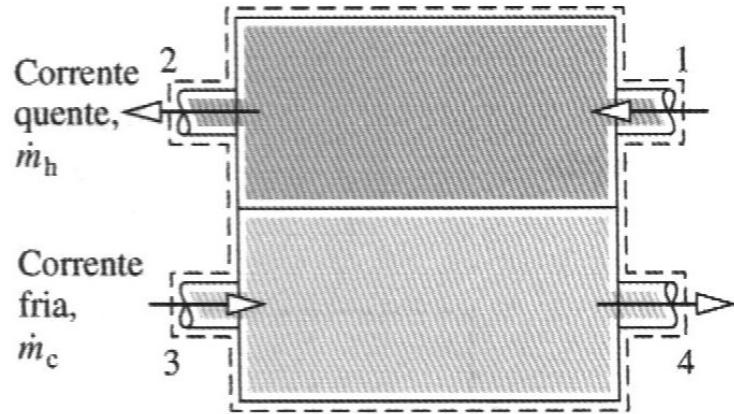
Para um compressor ou bomba que opere em regime permanente, sem transferência de calor com a vizinhança, o balanço da taxa de exergia pode ser colocado na forma

$$\left( -\frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} \right) = \mathbf{e}_{f2} - \mathbf{e}_{f1} + \frac{\dot{E}_d}{\dot{m}}$$

$$\varepsilon = \frac{\mathbf{e}_{f2} - \mathbf{e}_{f1}}{(-\dot{W}_{vc}/\dot{m})}$$

### 6.4 Trocador de Calor sem Mistura

O trocador de calor mostrado na figura opera em regime permanente, sem transferência de calor para a vizinhança e com as duas correntes a temperaturas acima de  $T_0$ . O balanço da taxa de exergia se reduz a



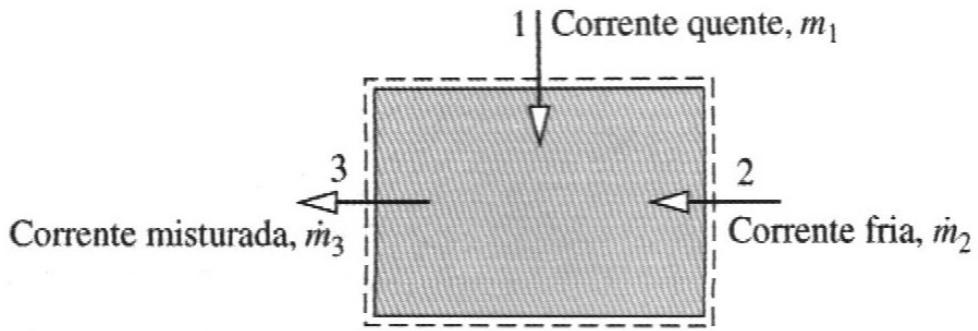
$$0 = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right)^0 \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc}^0 + (\dot{m}_h e_{f1} + \dot{m}_c e_{f3}) - (\dot{m}_h e_{f2} + \dot{m}_c e_{f4}) - \dot{E}_d$$

$$\dot{m}_h (e_{f1} - e_{f2}) = \dot{m}_c (e_{f4} - e_{f3}) + \dot{E}_d$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_c (e_{f4} - e_{f3})}{\dot{m}_h (e_{f1} - e_{f2})}$$

## 6.5 Trocador de Calor de Contato Direto

O trocador de calor de contato direto mostrado na Figura opera em regime permanente, sem transferência de calor com a vizinhança. O balanço da taxa de exergia se reduz a



$$0 = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right)^0 \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \dot{m}_1 e_{f1} + \dot{m}_2 e_{f2} - \dot{m}_3 e_{f3} - \dot{E}_d$$

$$\dot{m}_1 (e_{f1} - e_{f3}) = \dot{m}_2 (e_{f3} - e_{f2}) + \dot{E}_d$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_2 (e_{f3} - e_{f2})}{\dot{m}_1 (e_{f1} - e_{f3})}$$

## 6.6 Uso das eficiências energéticas

As eficiências energéticas são úteis para distinguirmos os meios de utilização de combustíveis que são termodinamicamente eficazes daqueles que são menos eficazes. Também podemos utilizar as eficiências energéticas para avaliar a eficácia das medidas de engenharia tomadas para melhorar o desempenho de um sistema térmico. Isso é feito através da comparação dos valores de eficiência determinados antes e após as modificações terem sido realizadas para mostrar quanto a melhora foi alcançada. Além disso, eficiências energéticas podem ser utilizadas para medir o potencial das melhorias no desempenho de um determinado sistema térmico, por comparação da eficácia desse sistema com a eficiência de sistemas similares. Uma diferença significativa entre esses valores sugere que é possível melhorar o desempenho.

É importante reconhecer que o limite de 100% de eficiência energética não deve ser considerado um objetivo prático. Vários métodos são utilizados para melhorar a utilização dos recursos energéticos. Todos esses métodos devem atingir seus objetivos de forma economicamente eficiente. Um desses métodos é a co-geração, que produz sequencialmente energia elétrica e energia térmica. Dois outros métodos empregados para melhorar a utilização de recursos energéticos são a recuperação de potência e a recuperação de calor rejeitado. A recuperação da potência pode ser conseguida mediante a inserção de uma turbina em um gás pressurizado ou em uma corrente de líquido, de modo a capturar alguma exergia que de outra forma seria destruída em uma expansão espontânea. A recuperação de calor rejeitado contribui para a eficiência global através da utilização de alguma exergia que de outra forma seria eliminada para a vizinhança, como nos gases de exaustão de grandes motores de combustão interna.

The *exergy of a system*,  $E$ , at a specified state is given by the expression

---


$$E = (E - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (7.2) \quad \blacktriangleleft \text{exergy of a system}$$


---

*specific exergy*

---


$$e = (u - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + V^2/2 + gz \quad (7.9)$$


---

*exergy change*

---


$$E_2 - E_1 = (E_2 - E_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) \quad (7.10)$$


---

---


$$\frac{E_2 - E_1}{\text{exergy change}} = \int_1^2 \left( 1 - \frac{T_0}{T_b} \right) \delta Q - [W - p_0(V_2 - V_1)] - \frac{T_0 \sigma}{\text{exergy destruction}} \quad (7.11) \quad \blacktriangleleft \begin{array}{l} \text{closed system} \\ \text{exergy balance} \end{array}$$


---

---


$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left( \dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt} \right) - \dot{E}_d \quad (7.17)$$

closed system
◀ exergy rate balance

---

control volume
exergy rate balance

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left( \dot{W}_{cv} - p_0 \frac{dV_{cv}}{dt} \right) + \sum_i \dot{m}_i \mathbf{e}_{fi} - \sum_e \dot{m}_e \mathbf{e}_{fe} - \dot{E}_d \quad (7.31)$$

rate of exergy change
rate of exergy transfer
rate of exergy destruction

---

steady-state exergy
rate balance:
control volumes

$$0 = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \mathbf{e}_{fi} - \sum_e \dot{m}_e \mathbf{e}_{fe} - \dot{E}_d \quad (7.32a)$$

---

If there is a single inlet and a single exit, denoted by 1 and 2, respectively, Eq. 7.32a reduces to

---


$$0 = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \dot{m}(\mathbf{e}_{f1} - \mathbf{e}_{f2}) - \dot{E}_d \quad (7.35)$$


---

where  $\dot{m}$  is the mass flow rate. The term  $(\mathbf{e}_{f1} - \mathbf{e}_{f2})$  is evaluated using Eq. 7.20 as

---


$$\mathbf{e}_{f1} - \mathbf{e}_{f2} = (h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \quad (7.36)$$


---

### EXAMPLE 7.5 Exergy Destruction in a Throttling Valve

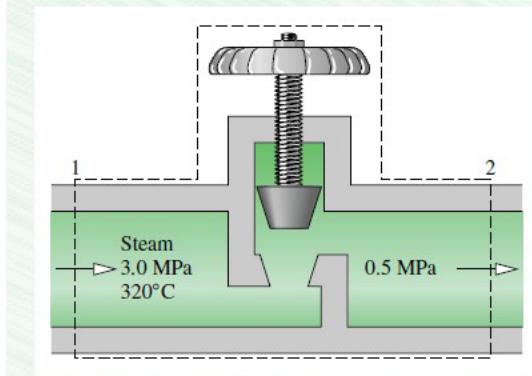
Superheated water vapor enters a valve at 3.0 MPa, 320°C and exits at a pressure of 0.5 MPa. The expansion is a throttling process. Determine the specific flow exergy at the inlet and exit and the exergy destruction per unit of mass flowing, each in kJ/kg. Let  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 1 \text{ atm}$ .

#### SOLUTION

**Known:** Water vapor expands in a throttling process through a valve from a specified inlet state to a specified exit pressure.

**Find:** Determine the specific flow exergy at the inlet and exit of the valve and the exergy destruction per unit of mass flowing.

**Schematic and Given Data:**



#### Assumptions:

1. The control volume shown in the accompanying figure is at steady state.
2. For the throttling process,  $\dot{Q}_{cv} = \dot{W}_{cv} = 0$ , and kinetic and potential energy effects can be ignored.
3.  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 1 \text{ atm}$ .

◀ Figure E7.5

**Analysis:** The state at the inlet is specified. The state at the exit can be fixed by reducing the steady-state mass and energy rate balances to obtain

$$h_2 = h_1$$

Thus, the exit state is fixed by  $p_2$  and  $h_2$ . From Table A-4,  $h_1 = 3043.4 \text{ kJ/kg}$ ,  $s_1 = 6.6245 \text{ kJ/kg}\cdot\text{k}$ . Interpolating at a pressure of 0.5 MPa with  $h_2 = h_1$ , the specific entropy at the exit is  $s_2 = 7.4223 \text{ kJ/kg}\cdot\text{k}$ . Evaluating  $h_0$  and  $s_0$  at the saturated liquid state corresponding to  $T_0$ , Table A-2 gives  $h_0 = 104.89 \text{ kJ/kg}$ ,  $s_0 = 0.3674 \text{ kJ/kg}\cdot\text{k}$ .

Dropping  $V^2/2$  and  $gz$ , we obtain the specific flow exergy from Eq. 7.20 as

$$e_f = h - h_0 - T_0(s - s_0)$$

Substituting values into the expression for  $e_f$ , the flow exergy at the inlet is

$$e_{f1} = (3043.4 - 104.89) - 298(6.6245 - 0.3674) = 1073.89 \text{ kJ/kg}$$

At the exit

$$e_{f2} = (3043.4 - 104.89) - 298(7.4223 - 0.3674) = 836.15 \text{ kJ/kg}$$

With assumptions listed, the steady-state form of the exergy rate balance, Eq. 7.35, reduces to

$$0 = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right)^0 \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv}^0 + \dot{m}(e_{f1} - e_{f2}) - \dot{E}_d$$

Dividing by the mass flow rate  $\dot{m}$  and solving, the exergy destruction per unit of mass flowing is

$$\frac{\dot{E}_d}{\dot{m}} = (e_{f1} - e_{f2})$$

Inserting values

$$\frac{\dot{E}_d}{\dot{m}} = 1073.89 - 836.15 = 237.7 \text{ kJ/kg}$$

A heat pump has a coefficient of performance of 2 using a power input of 2 kW. Its low temperature is  $T_o$  and the high temperature is  $80^\circ\text{C}$ , with an ambient at  $T_o$ . Find the fluxes of exergy associated with the energy fluxes in and out.

First let us do the energies in and out

$$\text{COP} = \beta = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} \Rightarrow \dot{Q}_H = \beta \dot{W} = 2 \times 2 \text{ kW} = 4 \text{ kW}$$

$$\text{Energy Eq.: } \dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 4 - 2 = 2 \text{ kW}$$

$$\text{Exergy flux in: } \dot{\Phi}_L = \left(1 - \frac{T_o}{T_L}\right) \dot{Q}_L = 0 \quad (T_L = T_o)$$

$$\text{Exergy flux in: } \dot{\Phi}_W = \dot{W} = 2 \text{ kW}$$

$$\text{Exergy flux out: } \dot{\Phi}_H = \left(1 - \frac{T_o}{T_H}\right) \dot{Q}_H = \left(1 - \frac{298.15}{353.15}\right) 4 \text{ kW} = 0.623 \text{ kW}$$

Remark: The process then destroys  $(2 - 0.623)$  kW of exergy.

Find the second law efficiency of the heat pump in problem 10.18.

The second law efficiency is a ratio of exergies namely what we want out divided by what we have to put in. Exergy from first term on RHS Eq. 10.36

$$\dot{\Phi}_H = \left(1 - \frac{T_o}{T_H}\right) \dot{Q}_H; \quad \dot{Q}_H = \beta \dot{W} = 2 \times 2 \text{ kW} = 4 \text{ kW}$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{\Phi}_H}{\dot{W}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_H}\right) \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} = \left(1 - \frac{298.15}{353.15}\right) \frac{4}{2} = 0.31$$

