

Energia, Entropia, Exergia - Conceitos úteis e eficiências

Luís Carrilho Gonçalves¹, Pedro Dinis Gaspar²

^{1,2}Universidade da Beira Interior, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Electromecânica

¹carrilho@ubi.pt, ²dinis@ubi.pt

Área Científica - CT 9

Resumo

Os conceitos de energia, entropia e exergia estão de um modo geral introduzidos no quotidiano das pessoas e assimilados por elas, sendo hoje em dia fontes de informação. Este trabalho pretende tornar mais acessíveis estes conceitos e obter expressões simplificadas de eficiência. A ligação dos conceitos a processos termodinâmicos é expressa pelos princípios de base e pelas equações propostas. A eficiência da conversão de energia é determinada e comparada entre a eficiência à 1ª Lei e a eficiência à 2ª lei. A utilidade da comparação entre estes parâmetros visa afirmar que o conceito de eficiência à 2ª lei é o mais racional de entre os conceitos de eficiência usualmente utilizados

Palavras-chave: Energia, Entropia, Exergia, Eficiência

1. Introdução

A análise de sistemas que convertem energia, transformam matéria e comunicam informação, i.e., a sociedade, um processo industrial, o ser vivo, ... , determina uma observação qualitativa e conceptual dos sistemas de modo a:

- permitir uma ligação ou separação entre quantidade e qualidade da energia
- acrescentar maior utilidade e significância às variações da entropia
- calcular e distinguir de modo mais efectivo a eficiência energética e a eficiência exergetica.

A energia como conceito básico e fundamental da 1ª Lei da Termodinâmica, está generalizado, entra na comunicação oral e é aceite. A sua relação com os fenómenos do dia a dia é usual, possuindo um significado e utilização como instrumento do pensamento e da comunicação. A energia traduz a capacidade para a mudança [1].

A entropia, significando etimologicamente transformação interna, é um conceito que para se universalizar necessita que entre no pensamento e na comunicação do quotidiano através de vários fenómenos com múltiplos significados:

- desorganização de sistemas (combustão, expansão, dissolução, ...);
- alterações de conteúdos energéticos (fusão, vaporização, filtração, ...);
- mudanças de capacidades exergeticas (calor, trabalho, reacção química,...);
- probabilidade de ocorrência de estado e/ou processo (organização atómica e molecular, reacção química,...);
- conhecimento e ignorância (informação, surpresa, comunicação escrita, teoria de Shanon...).

Será que poderemos considerar a energia e a entropia como o objecto e a sua sombra? E a energia e a exergia que relação de imagem projectual terão? [1]

A exergia, sendo a capacidade de transformar energia em trabalho (ou exergia), traduz uma nova imagem da energia e dos sistemas de conversão de matéria. O conceito, apesar de antigo, tem despertado o interesse da ciência no âmbito da utilização de tecnologias mais eficientes de conversão energética.

A exergia está sempre envolvida nos processos onde se operam conversões de energia, como:

- a irreversibilidade dos processos reais;
- a transformação de energia térmica em trabalho (energia organizada);
- a indicação do limite até onde a energia pode ser útil.

Exergia constitui pois, um conceito resultante de um problema de engenharia ou de um problema relacionado com a capacidade de transmitir informação.

A sociedade, o processo industrial, o ser vivo, constituem sistemas estruturados que requerem formas de energia de qualidade diferenciada para se auto-sustentarem. O século XXI terá de prestar mais atenção, fazer discriminação positiva e realizar uma análise individualizada a estas formas diferenciadas da qualidade da energia, à disponibilidade dos recursos físicos (energia, materiais e informação) e sua conversão mais otimizada em sistemas industriais, societários, geofísicos, ecológicos,... [2].

Há necessidade de sensibilizar os alunos dos cursos de engenharia para a influência e relevância que a componente conceptual tem na criação de conhecimento, na adaptabilidade à melhoria das aplicações tecnológicas, à redução do desperdício e na activação de mecanismos para a comunicação utilizável e eficaz.

A energia é um bem essencial à sociedade e ao seu bem-estar. Racionalizar o seu consumo é uma responsabilidade individual e colectiva. Utilizar as diferentes formas acessíveis da energia nas necessidades normais da sociedade é um *must* com algumas condicionantes. Diminuir os consumos actuais de energia utilizando a racionalidade do homem, deve ser prioritário no curto, médio e longo prazo.

A Termodinâmica está ligada de raiz a todas as formas de energia. Por isso se define Termodinâmica como a ciência da energia e das suas interacções com a matéria. Explicitando os conceitos de Energia, Entropia e Exergia de uma forma mais objectiva temos:

ENERGIA (E,U,...) é:

- capacidade (ou força) para a mudança;
- conceito básico da 1ª Lei da Termodinâmica;
- não destrutível, mas a sua qualidade é transformável;
- instrumento do pensamento e da comunicação [6,9].

ENTROPIA (S,...) é:

- transformação interna;
- desorganização dos sistemas onde ocorrem processos (combustão, expansão, aquecimento, arrefecimento,...);
- alteração dos conteúdos de energia de estado e processo (fusão, vaporização, solidificação,...);
- probabilidade de ocorrência de estados ou processos (organização atómica);
- conhecimento e ignorância (informação, surpresa, comunicação,...) [6,9].

EXERGIA (Ex, W, Φ , ...) é:

- a capacidade de transformar energia em trabalho (forma organizada da energia);
- a disponibilidade da energia para realizar mudanças;
- a diferenciação da qualidade da energia (a energia contém sempre exergia, mas a exergia é apenas uma fracção) [3].

2. Conceitos Básicos Avançados

A energia apresenta várias formas utilizáveis de transformação:

- energias em trânsito observáveis na fronteira do sistema (Q, W, ...);
- energias integradas associadas à energia interna em termos físicos;
- energias ligadas associadas a ligações atómicas e moleculares.

A sociedade actual e a civilização ocidental convertem energia, transformam matéria e comunicam informação, sendo necessário ganhar mais racionalidade sobre:

- a diferença entre qualidade e quantidade de energia que opera na transformação da matéria;
- a relevância da conversão exergética e do consumo de exergia na sociedade;
- a comparabilidade física entre eficiência energética e eficiência exergética.

A entropia e a informação estão associadas a um estado macroscópico de equilíbrio que corresponde a um grande número de compleições que o realizam [4,6]:

- a entropia segundo Boltzman é uma medida da desordem microscópica do estado físico, $S = \log \Omega = k \log \omega / \omega_0$;
- a variação de entropia é proporcional à variação do conhecimento da configuração molecular associada ao estado macroscópico.

Nota: $\Omega = \omega / \omega_0 = n^\circ \text{ de compleições} / n^\circ \text{ total de compleições} = \text{probabilidade termodinâmica}$, sendo $k = 1,372 \times 10^{-16} \text{ erg/K}$, a constante de Boltzman.

A energia, entropia, exergia e os processos que determinam as suas variações, permitem concluir:

- o conceito de energia associado ao conceito de entropia nas suas formas generalistas, permitem quantificar diferenciadamente a qualidade da energia;
- a conexão da entropia com a configuração molecular ligada ao estado ou ao processo termodinâmico é relevante para a sua generalização conceptual, do macro para o microscópico e vice-versa [9].

Os espaços de Caratheodory e outros diagramas termodinâmicos são formas credíveis e acessíveis para entender a Termodinâmica tridimensional e bidimensional [5]. Os processos termodinâmicos reais apresentam sempre geração de entropia; o significado físico consequente ao fenómeno é a destruição da exergia, que se traduz em lixo energético ou desperdício. Os ciclos termodinâmicos exergéticos são sequências organizadas de processos, que produzem exergia para a sociedade, convertem energia para utilização em processos industriais e transformam matéria, geram desperdícios instáveis, cujas concentrações energética e mássica no espaço e no tempo são excessivas, devendo diminuir-se as quantidades e atenuar os seus efeitos no ambiente [5].

3. Leis da Termodinâmica - Energia, Entropia, Exergia

A energia é um conceito primário ou básico que determina a capacidade para a mudança do sistema que a contém. Assim só existindo energia no sistema é possível haver mudança do estado ou evolução. Por outro lado a energia é a constância no meio da mudança. Assim a energia é transformável mas não é destrutível [8]. A energia é também uma propriedade do sistema. A 1ª lei da termodinâmica determina que:

- a soma algébrica das interações energéticas de um sistema (fechado) e sua vizinhança é nula;
- para um sistema fechado que permuta através da sua fronteira calor (Q) e trabalho (W), há sempre variação da energia total do sistema (ΔE).

$$\Delta E - (Q - W) = 0 \text{ ou } Q - W = \Delta E \quad (1)$$

- para um sistema aberto que permuta calor (Q) e trabalho (W) pela fronteira do sistema e também energia associada ao caudal mássico através do volume de controlo, o balanço energético é expresso por,

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{E}_{vc} + \dot{m}_s (h + V^2/2 + gz)_s - \dot{m}_e (h + V^2/2 + gz)_e \quad (2)$$

As equações anteriores mostram que as formas e transformações de energia são intermutáveis e sempre possíveis. A entropia é uma propriedade do sistema. Por isso é uma característica do estado.

A 2ª lei da termodinâmica determina que:

- a variação de entropia de um sistema fechado é devida a duas causas, i.e., à permuta de calor através da fronteira e à irreversibilidade interna (ou geração de entropia)

$$\Delta S = \sum Q_i/T_i + S_g \quad (3)$$

- Para um sistema aberto e um volume de controlo (vc):

$$\dot{S}_{g,vc} = \dot{S}_{vc} + \sum_s (\dot{m}s)_s - \sum_e (\dot{m}s)_e - \sum \dot{Q}_{i,vc}/T_i \quad (4)$$

- A variação de entropia num sistema aberto resulta da permuta de calor através da sua fronteira ou superfície de controlo, da variação de energia associada ao caudal mássico e das irreversibilidades internas.

A 2ª Lei da Termodinâmica expressa pelas equações 3 e 4 determina que qualquer processo só ocorre se a geração de entropia for positiva ($\dot{S}_{g,vc} > 0$) para um processo irreversível, e nula ($\dot{S}_{g,vc} = 0$) se o processo é reversível.

As variações de entropia em processos reais determinam a sua natureza termodinâmica; a possibilidade ou não de ocorrência do processo, determina a geração ou não de entropia.

A exergia é um conceito básico e constitui a capacidade de transformar energia em trabalho ou seja em energia organizada. Este conceito traduz uma nova imagem da energia e dos sistemas de conversão de matéria. A exergia é portanto:

- A capacidade de transformar energia em energia organizada
- A disponibilidade da energia operar as mudanças
- A capacidade de conservar a qualidade de energia nessas mudanças
- A diferenciação da qualidade da energia.

3.1. Teorema da Exergia do Estado

A exergia ou energia disponível ou disponibilidade ou trabalho útil máximo associado a um estado termodinâmico do sistema, depende das propriedades do estado do sistema e das propriedades do estado padrão do universo complementar ou vizinhança do sistema, i.e., a função disponibilidade ϕ , para o estado é determinada por

$$\phi = e_x = W_{\text{útil,máx}} = (u + p_0 v - T_0 s) - (u_0 + p_0 v_0 - T_0 s_0) \quad (5)$$

em que p_0 , v_0 , T_0 , s_0 , e u_0 são propriedades do estado padrão característico. O valor associado a e_x constitui a energia de qualidade, convertível em qualquer forma de energia ligada à energia interna do estado do sistema [3].

3.2. Teorema da Exergia do Processo

A exergia ou energia disponível ou disponibilidade ou trabalho útil máximo associado a um processo termodinâmico é determinada pela diminuição da exergia do estado inicial (1) para o estado final (2), i.e., a variação da função disponibilidade é dada por

$$\phi_{21} = e_{x,21} = W_{\text{útil,máx},21} = e_{x,01} - e_{x,02} = (u_1 + p_0 v_1 - T_0 s_1) - (u_2 + p_0 v_2 - T_0 s_2) \quad (6)$$

$$\text{Em que: } \phi_{01} = (u_1 + p_0 v_1 - T_0 s_1) - (u_0 + p_0 v_0 - T_0 s_0) \quad \text{e} \quad \phi_{02} = (u_2 + p_0 v_2 - T_0 s_2) - (u_0 + p_0 v_0 - T_0 s_0) \quad (7)$$

São as exergias ou valores da função disponibilidade relativas ao estado 1 e ao estado 2. O valor associado a $e_{x,21}$ constitui a energia de qualidade, convertível em qualquer forma de energia ligada às transferências de energia ocorridas em processo isobárico.

3.3. Balanço Exergético em sistema fechado - Equação de Gouy-Stodola

Da aplicação da 1ª e 2ª Leis da termodinâmica a um sistema fechado, que transfere calor e trabalho através da fronteira e tendo por base o princípio da degradação da energia i.e., a qualidade da energia não é conservativa, podemos expressar o balanço da exergia por [3,5],

$$\{ \text{Exergia que entra} \} - \{ \text{Exergia que sai} \} - \{ \text{Exergia destruída} \} = \{ \text{Variação da exergia acumulada} \}$$

i.e.,

$$\int (1 - T_0/T) dq - (W_{12} - p_0(V_2 - V_1)) - T_0 S_g = \phi_{02} - \phi_{01} = e_{x,02} - e_{x,01} \quad (8)$$

sendo o significado físico dos vários termos, expresso do seguinte modo,

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Exergia transferida} \\ \text{devido à permuta} \\ \text{de calor} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Exergia transferida} \\ \text{devido à permuta} \\ \text{de trabalho} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Exergia} \\ \text{destruída} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Variação} \\ \text{da exergia} \end{array} \right\}$$

Não são considerados os termos de energia cinética e de energia potencial, por não haver deslocação nem mudança de posição vertical do sistema, sendo portanto nulos.

3.4. Teorema da exergia do estado e do processo de escoamento de um fluido

A exergia associada ao estado de escoamento de um fluido é expressa pela função de Darrius (ψ) e pela sua diminuição ($\psi_1 - \psi_2$) associada ao processo [3], i.e.,

$$\Psi = e_{xD} = W_{\text{útil,max}} = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (9)$$

$$\Psi_{01} - \Psi_{02} = e_{xD,21} = (h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2) \quad (10)$$

O valor associado a e_{xD} constitui a energia de qualidade, convertível em qualquer forma de energia ligada à energia entálpica do estado do sistema.

3.5. Balanço Exergético em Sistema Aberto - Equação de Gouy-Stodola

Do mesmo modo que se fez para o sistema fechado, é válida a análise e o esquema de balanço exergético para sistema aberto [3,5], i.e.,

$$\sum_i (1 - T_0/T_i) dQ_i - W_{sc,\text{útil}} + \sum_e \dot{m}_e (\psi + V^2/2 + gz)_e - \sum_s \dot{m}_s (\psi + V^2/2 + gz)_s - T_0 \dot{S}_g = \dot{E}_{x,vc,02} - \dot{E}_{x,vc,01} \quad (11)$$

em que, $\psi = \Psi = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0)$, é a função de Darrius.

Sendo o significado físico dos vários termos expresso do seguinte modo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Exergia transferida} \\ \text{devido à permuta} \\ \text{de calor} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Exergia transferida} \\ \text{devido à permuta} \\ \text{de trabalho} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Exergia transferida} \\ \text{devido à permuta} \\ \text{de massa} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Exergia} \\ \text{destruída} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Variação} \\ \text{da exergia} \\ \text{acumulada} \end{array} \right\}$$

Expressando a equação (11), na forma de taxa, i.e., *rate equation*,

$$\sum_i (1 - T_0/T_i) d\dot{Q}_i - \dot{W}_{sc,\text{útil}} + \sum_e \dot{m}_e (\psi + V^2/2 + gz)_e - \sum_s \dot{m}_s (\psi + V^2/2 + gz)_s - T_0 \dot{S}_g = \dot{E}_{x,vc,02} - \dot{E}_{x,vc,01} \quad (12)$$

- 1 - A conceptualização da exergia associada ao estado e ao processo termodinâmicos é apresentada sob a forma de três teoremas ou proposições.
- 2 - A equação de Gouy-Stodola, resultante da aplicação da 1ª e da 2ª Leis a processos, quantifica a destruição da exergia, incorporada na equação de balanço exergético, para sistemas fechados e abertos [3,5].
- 3 - A qualidade da energia é assumida pela sua total convertibilidade noutras formas de energia. A anergia incorpora a energia não convertível, i.e., a exergia que é destruída [7].
- 4 - Energia, Entropia e Exergia são propriedades qualitativas e quantitativas, que caracterizam, a “capacidade para a mudança”, a degradação em processos naturais das estruturas organizativas e o custo energético em manter “qualidade ou qualidades” nos sistemas industriais, societários, ecológicos, de uma forma continuada e sustentada.

4. As máquinas termodinâmicas - Eficiências

As máquinas termodinâmicas são máquinas ou sistemas que em geral operam entre dois reservatórios ou fontes de energia térmica e cujo objectivo final é realizar uma conversão apropriada de energia. Generalizadamente, a eficiência energética ou exergética de um processo, é definida pelo cociente,

$$\eta_{\text{processo}} = \varepsilon_{\text{processo}} = \frac{\text{O objectivo que se pretende atingir}}{\text{O "input" necessário para cumprir o objectivo}} \quad (13)$$

4.1. Eficiência Energética (1ª Lei) - η_I ou ε_I

Para um processo ou sistema conversor de energia, a eficiência energética ou eficiência à 1ª Lei (η_I), é, por analogia com a equação anterior de definição, traduzida pela equação,

$$\eta_I = \frac{\text{Energia convertida ou transferida}}{\text{"Input" de energia}} \quad (14)$$

a) Motor Térmico (MT)

O objectivo do motor térmico é produzir exergia.

$$\eta_I = \frac{\text{Exergia/ Trabalho fornecido pelo MT}}{\text{"Input" de energia térmica}} = \frac{E_{x,MT,out}}{Q_{in}} = \frac{W_{MT,out}}{Q_{in}} \leq \frac{T_M - T_m}{T_M} \quad (15)$$

Sendo T_M e T_m as temperaturas máxima e mínima dos reservatórios de calor (RC) que interagem com o MT; Q_{in} é a energia térmica proveniente do RC à temperatura máxima, T_M .

b) Máquina Frigorífica (MF)

O objectivo da máquina frigorífica é transferir energia térmica de um reservatório de calor (RC) a uma temperatura, para outro RC a temperatura mais elevada. As temperaturas dos RC podem ser variáveis (hipótese mais generalizada).

$$\varepsilon_{I,MF} = \frac{\text{Energia Térmica Transferida do RC}}{\text{"Input" de Exergia ou de Energia Térmica}} = \frac{Q_{RC(out)}}{E_{x,in}} = \frac{Q_{in}}{W_{in}} = \frac{Q_{in}}{E_{in}} \leq \frac{T_m}{T_M - T_m} \quad (16)$$

T_M e T_m têm os mesmos significados que para o MT; Q_{in} é a energia térmica proveniente do RC à temperatura mínima, T_m . A eficiência da MF pode ter valores maiores que a unidade.

c) Bomba de Calor (BC)

O objectivo da bomba de calor é transferir energia térmica do reservatório de calor (RC) a uma temperatura, para outro reservatório de calor (RC) a temperatura mais elevada. As temperaturas dos RC podem ser constantes ou variáveis (hipótese mais generalizada).

$$\varepsilon_{i,BC} = \frac{\text{Energia Térmica Transferida para o RC}}{\text{"Input" de Exergia e/ou de Energia Térmica}} = \frac{Q_{RC(in)}}{E_{x,in}} = \frac{Q_{out}}{W_{in}} = \frac{Q_{out}}{E_{in}} \leq \frac{T_M}{T_M - T_m} \quad (17)$$

T_M e T_m têm os mesmos significados que para o MT; Q_{out} é a energia térmica transferida para o RC à temperatura máxima, T_M ; e sendo, $\varepsilon_{i,BC} = \varepsilon_{i,MF} + 1$, sempre maior que a unidade.

d) Turbina (T)

O objectivo de uma turbina é produzir exergia ou trabalho resultante da conversão de energia entálpica ou de energia potencial.

$$\eta_{i,T} = \frac{\text{Exergia da turbina adiabática}}{\text{Exergia da turbina isentrópica}} = \frac{\text{Trabalho da turbina adiabática}}{\text{Trabalho da turbina isentrópica}} = \frac{E_{x,T,ad}}{E_{x,T,isent}} = \frac{W_{T,ad}}{W_{T,isent}} \quad (18)$$

O conceito de eficiência isentrópica da turbina é semelhante ao de eficiência termodinâmica (2ª Lei) da turbina.

e) Bomba ou Compressor (B, C)

O objectivo de uma bomba ou de um compressor é aumentar a pressão de um fluido, através de um "input" de exergia.

$$\eta_{i,B,C} = \frac{\text{Exergia da bomba/compressor isentrópico}}{\text{Exergia da bomba/compressor adiabático}} = \frac{E_{x,B,C,isent}}{E_{x,B,C,ad}} = \frac{W_{B,C,isent}}{W_{B,C,ad}} \quad (19)$$

O conceito de eficiência isentrópica da bomba ou compressor é semelhante ao de eficiência termodinâmica (2ª Lei) da bomba ou compressor.

f) Tubeira Convergente (Tub)

O objectivo de uma tubeira convergente é realizar a aceleração do fluido por conversão de energia entálpica em energia cinética ou exergia.

$$\eta_{i,Tub,isent} = \frac{\text{Energia cinética à saída, na tubeira adiabática}}{\text{Energia cinética à saída, na tubeira isentrópica}} = \frac{E_{c,Tub,ad}}{E_{c,Tub,isent}} = \frac{V_{s,Tub,ad}^2}{V_{s,Tub,isent}^2} \quad (20)$$

O conceito de eficiência isentrópica da tubeira convergente é semelhante ao de eficiência termodinâmica (2ª Lei) da tubeira convergente.

4.2 - Eficiência Exergética ou Termodinâmica (2ª Lei) - η_{II}

A eficiência exergética é definida, em termos conceptuais, pela mesma equação generalizada que definiu a eficiência energética. Em termos exergéticos, a equação, envolve a energia de qualidade máxima, i.e., a energia convertível em qualquer outra forma de energia.

A eficiência exergética ou termodinâmica para um processo é a razão entre a exergia recuperada no processo (objectivo) e a exergia introduzida no processo (o input para cumprir o objectivo), sendo expressa pela equação [3,5]:

$$\eta_{II} = \varepsilon_{II} = \frac{\text{Exergia recuperada no processo}}{\text{Exergia introduzida no processo}} = \frac{E_{x,Recup}}{E_{x,in}} \quad (21)$$

em que,

$$E_{x,Recup} = E_{x,in} - (E_{x,perda} + E_{x,dest}) \quad (22)$$

Operando a substituição e fazendo a manipulação, obtém-se a nova equação da eficiência, i.e.,

$$\eta_{II} = 1 - \frac{E_{x,perda} + E_{x,dest}}{E_{x,in}} \quad (23)$$

1 - O valor da eficiência exergética (η_{II} , ε_{II}) a calcular, pressupõe o conhecimento das componentes exergéticas à entrada ($E_{x,in}$), de perda ($E_{x,perda}$) e destruída ($E_{x,dest}$) no processo, em sistema fechado ou aberto.

2 - A equação anterior pode ser apresentada com as taxas das grandezas, i.e., sob a forma de “rate variables”,

$$\eta_{II} = 1 - \frac{\dot{E}_{x,perda} + \dot{E}_{x,dest}}{\dot{E}_{x,in}} \quad (24)$$

No sentido de confrontar a compatibilidade física entre os dois conceitos, eficiência energética e eficiência exergética, consideram-se os mesmos exemplos ou casos adoptados para a determinação da eficiência energética 1ª Lei (η_I , ε_I), de a) a f).

a) Motor Térmico (MT)

O objectivo de um motor térmico é produzir exergia ou trabalho.

$$\begin{aligned} \eta_{II,MT} &= \frac{\text{Exergia ou Trabalho fornecido pelo MT}}{\text{"Input" de Exergia}} \\ &= \frac{E_{x,MT,out}}{E_{x,MT,in}} = \frac{W_{MT,out}}{E_{x,MT,in}} ; \text{ ou } \eta_{II,MT} = \frac{\eta_{I,MT}}{\eta_{I,MT,Carnot}} \text{ para } T_m = T_0 \end{aligned} \quad (25)$$

O motor térmico opera entre dois reservatórios de calor a temperaturas diferentes, i.e., $T_m = T_{min}$ e $T_M = T_{Máx}$. Sendo $T_m \geq T_0$, o “input” de exergia é expresso pela equação,

$$E_{x,MT,in} = \left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) Q_M - \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) Q_m \quad (26)$$

Substituindo na equação de definição, obtém-se,

$$\eta_{II} = \frac{W_{MT,out}}{\left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) Q_M - \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) Q_m} = \frac{\eta_{I,MT}}{\left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) - \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) (1 - \eta_{I,MT})} \quad (27)$$

1 - Se $T_m = T_0$, a equação anterior é expressa por,

$$\eta_{II,MT} = \frac{\eta_{I,MT}}{\left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right)} = \frac{\eta_{I,MT}}{\eta_{I,MT,Carnot,T_0,T_M}} \quad (28)$$

2 - Se $T_m > T_0$, sendo $\left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) = \eta_{I,MT,Carnot,T_0,T_M}$ e $\left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) = \eta_{I,MT,Carnot,T_0,T_m}$;

$$\eta_{II,MT} = \frac{\eta_{I,MT}}{\eta_{I,MT,Carnot,T_0,T_M} - \eta_{I,MT,Carnot,T_0,T_m} (1 - \eta_{I,MT})} \quad (29)$$

3 - Porque os valores de $\eta_{I,MT,Carnot,T_0,T_m}$ e de $\eta_{I,MT,Carnot,T_0,T_M}$ são sempre menores que a unidade, então o valor da eficiência exergética é sempre maior que o valor da eficiência energética da mesma máquina térmica, i.e., $\eta_{II,MT} > \eta_{I,MT}$.

b) Máquina Frigorífica (MF)

O objectivo da máquina frigorífica é transferir energia térmica de um reservatório de calor (RC) a uma temperatura para outro RC a temperatura mais elevada. As temperaturas dos RC podem ser variáveis (hipótese mais generalizada).

$$\eta_{II,MF} = \frac{\text{Exergia ou Trabalho mínimo necessário para transferir } Q_m}{\text{Exergia ou Trabalho actual necessário para transferir } Q_m}$$

$$= \frac{E_{x,\min,Q_m,\text{in}}}{E_{x,\text{actual},Q_m,\text{in}}} = \frac{W_{\min,Q_m,\text{in}}}{W_{\text{actual},Q_m,\text{in}}}; \text{ ou } \eta_{II,MF} = \frac{\epsilon_{I,MF,\text{actual}}}{\epsilon_{I,MF,\text{Carnot}}} \text{ para, } T_m = T_0 \quad (30)$$

A máquina frigorífica opera entre dois reservatórios de calor a temperaturas diferentes, i.e., $T_m = T_{\min}$ e $T_M = T_{\text{Máx}}$. Sendo T_M e $T_m \geq T_0$, a exergia introduzida (“input” de exergia) na máquina frigorífica é expressa pela equação,

$$E_{x,\text{in}} = |Q_M| - |Q_m| \quad (31)$$

e a exergia recuperada é determinada por,

$$E_{x,\text{Recup}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right)Q_M - \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right)Q_m \quad (32)$$

Substituindo na equação de definição e simplificando, obtém-se,

$$\eta_{II,MF} = \frac{E_{x,\text{Recup}}}{E_{x,\text{in}}} = \epsilon_{I,BC,T_m,T_M} \left(\left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) - \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) (1 - \eta_{I,MT,T_m,T_M}) \right) \quad (33)$$

1 - Se $T_0 = T_m$, a equação anterior (Eq. 33), transforma-se, de modo a obter,

$$\eta_{II,MF} = \left(\frac{T_M - T_m}{T_m} \right) \epsilon_{I,BC,T_m,T_M} \quad (34)$$

2 - Se $T_m > T_0$, então a eficiência exergética é determinada pela equação (33).

3 - O valor de $\eta_{II,MF}$ é sempre menor que a unidade porque $\epsilon_{I,MF,\text{actual}} < \epsilon_{I,MF,\text{Carnot}}$.

c) Bomba de Calor

O objectivo da bomba de calor é transferir energia térmica do reservatório de calor (RC) a uma temperatura para outro reservatório de calor (RC) a temperatura mais elevada. As temperaturas dos RC podem ser constantes ou variáveis (hipótese mais generalizada).

$$\eta_{II,BC} = \frac{\text{Exergia ou Trabalho mínimo necessário para transferir } Q_M}{\text{Exergia ou Trabalho actual necessário para transferir } Q_M} \quad (35)$$

$$= \frac{E_{x,\min,Q_M,\text{in}}}{E_{x,\text{actual},Q_M,\text{in}}} = \frac{W_{\min,Q_M,\text{in}}}{W_{\text{actual},Q_M,\text{in}}}; \text{ ou } \eta_{II,BC} = \frac{\epsilon_{I,BC,\text{actual}}}{\epsilon_{I,BC,\text{Carnot}}} \text{ para, } T_m = T_0 \quad (36)$$

A bomba de calor opera entre dois reservatórios de calor a temperaturas diferentes, i.e., $T_m = T_{\min}$ e $T_M = T_{\text{Máx}}$. Para $T_m > T_0$, a exergia introduzida na máquina térmica, bomba de calor, é expressa pela equação,

$$E_{x,\text{in}} = |Q_M| - |Q_m| \quad (37)$$

e a exergia recuperada, sob o ponto de vista da bomba de calor, é determinada por,

$$E_{x,Recup} = \left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) Q_M \quad (38)$$

Substituindo na equação de definição (Eq. 36) e simplificando, obtém-se,

$$\eta_{II,BC} = \frac{E_{x,Recup}}{E_{x,in}} = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) Q_M}{|Q_M| - |Q_m|} = \left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) \varepsilon_{I,BC} \quad (39)$$

1 - Se a relação entre as temperaturas mínima e do estado padrão for de $T_0 = T_m$, a equação anterior dá origem a,

$$\eta_{II,BC} = \frac{\varepsilon_{I,BC, actual}}{\varepsilon_{I,BC, Carnot, T_0, T_m}} \quad (40)$$

Esta equação é idêntica à equação da eficiência exergetica para um MT ou para a MF.

2 - Se $T_m > T_0$, a eficiência exergetica é determinada pela equação,

$$\eta_{II,BC} = \left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) \varepsilon_{I,BC} = \eta_{II,MT, Carnot, T_0, T_m} \varepsilon_{I,BC} \quad (41)$$

3 - O valor da eficiência exergetica da bomba de calor é sempre menor que a unidade porque, $\varepsilon_{I,BC, actual} < \varepsilon_{I,BC, Carnot}$

d) Turbina (T)

O objectivo da turbina é produzir exergia ou trabalho resultante da conversão de energia entálpica ou de energia potencial.

$$\eta_{II,T} = \frac{\text{Exergia Recuperada}}{\text{"Input" de Exergia}} = \frac{E_{x,T}}{E_{x,T,in}} = \frac{W_T}{m(\psi_e - \psi_s)} \quad (42)$$

Em que ψ é a função disponibilidade de estado ou função de Darrius para sistemas abertos sendo expressa por, $\psi = \psi - \psi_0 = (h - T_0s) - (h_0 - T_0s_0)$.

A equação anterior (Eq. 42) é válida considerando as seguintes simplificações: $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$; turbina adiabática, $Q_{sc} = 0$; regime permanente; uma entrada (e) e uma saída (s), e sendo,

$$E_{x,T} = H_e - H_s \quad (\text{ou } e_{x,T} = h_e - h_s) \quad (43)$$

Equação que se transforma a partir da função de Darrius (ψ), obtendo-se,

$$W_{sc,T,útil} = E_{x,T} = m(\psi_e - \psi_s) - mT_0s_g \quad (44)$$

Substituindo na equação de definição e expressando por unidade de massa, obtém-se,

$$\eta_{II,T} = \frac{h_e - h_s}{\psi_e - \psi_s} = \frac{(\psi_e - \psi_s) - T_0s_g}{\psi_e - \psi_s} = 1 - \frac{T_0s_g}{\psi_e - \psi_s} \quad (45)$$

1 - A simplificação introduzida para descrever o processo adiabático de expansão na turbina não retira significado físico, mas acrescenta simplicidade de análise nos cálculos e aplicações.

2 - Na expressão da eficiência exergetica da turbina, equação (45), o significado físico é idêntico ao expresso pela Eq. 18 da eficiência isentrópica da turbina.

e) Bomba e Compressor (B,C)

O objectivo da bomba ou do compressor é aumentar a pressão de um fluido, através de um "input" de exergia.

$$\eta_{ll,B,C} = \frac{\text{Exergia Recuperada}}{\text{"Input" de Exergia}} = \frac{E_{x,B,C}}{E_{x,B,C,in}}$$

$$= \frac{\text{Trabalho Útil Mínimo no Processo Reversível}}{\text{Trabalho Útil Utilizado}} = \frac{m(\psi_s - \psi_e)}{|W_{B,C,in}|} \quad (46)$$

Equação válida considerando as seguintes simplificações: $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$; bomba ou compressor adiabático, $Q_{sc} = 0$; regime permanente; uma entrada (e) e uma saída (s), e sendo,

$$E_{x,B,C} = H_s - H_e \text{ (ou } e_{x,B,C} = h_s - h_e) \quad (47)$$

Equação que se transforma a partir da equação de Darrieus (ψ), obtendo-se,

$$W_{sc,B,C,útil} = E_{x,B,C,in} = m(\psi_s - \psi_e) + mT_0s_g \quad (48)$$

Substituindo as expressões anteriores na equação de definição e expressando por unidade de massa, obtém-se,

$$\eta_{ll,B,C} = \frac{(\psi_s - \psi_e)}{h_e - h_s} = \frac{\psi_s - \psi_e}{(\psi_s - \psi_e) + T_0s_g} = \frac{1}{1 + \frac{T_0s_g}{\psi_s - \psi_e}} \quad (49)$$

1 - A expressão obtida para a eficiência exergética da bomba ou compressor (i.e., máquina de compressão) é uma função de tipo inversa, da expressão obtida para a eficiência exergética da turbina (i.e., máquina de expansão).

2 - Na expressão da eficiência exergética da bomba ou compressor, (Eq. 49), o significado físico é idêntico ao expresso pela Eq. 19, da eficiência isentrópica da bomba ou compressor.

f) Tubeira Convergente

O objectivo de uma tubeira convergente é realizar a aceleração do fluido por conversão de energia entálpica em energia cinética ou exergia.

$$\eta_{ll,Tub} = \frac{\text{Exergia Recuperada}}{\text{Exergia Introduzida}} = \frac{E_{x,Tub,Recup.}}{E_{x,Tub,in}} \quad (50)$$

$$= \frac{\text{Energia Cinética à saída (tubeira adiabática)}}{\text{Energia Cinética à saída (tubeira isentrópica)}} = \frac{V_{s,Tub,adiab}^2}{V_{s,Tub,isent}^2} \quad (51)$$

Equação válida para as seguintes simplificações: $\Delta E_c = 0$; tubeira adiabática, $Q_{sc}=0$; tubeira de paredes rígidas, $W_{sc,útil}=0$; regime permanente; uma entrada (e) e uma saída (s), e sendo,

$$V_{s,Tub,adiab}^2 = \frac{V_e^2}{2} + (\psi_e - \psi_s) - T_0s_g \quad (52)$$

e

$$V_{s,Tub,isent}^2 = \frac{V_e^2}{2} + (\psi_e - \psi_s) \quad (53)$$

Substituindo as expressões anteriores na equação de definição (Eq. 51) e considerando as grandezas por unidade de massa, obtém-se,

$$\eta_{II, Tub} = \frac{\frac{V_e^2}{2} + (\psi_e - \psi_s) - T_0 s_g}{V_e^2 + (\psi_e - \psi_s)} = 1 - \frac{T_0 s_g}{\frac{V_e^2}{2} + (\psi_e - \psi_s)} \quad (54)$$

1 - O termo que quantifica a destruição de exergia ($T_0 s_g$) é o responsável pela diminuição da eficiência exergetica ($\eta_{II, Tub}$).

2 - No escoamento de um fluido, a dissipação por fricção nas paredes e a natureza da turbulência, determinam a destruição da exergia.

3 - A natureza do fluido (viscosidade, densidade, difusibilidade, ..), a rugosidade das paredes e a geometria da tubeira, são factores aditivos da diminuição da qualidade da energia transferida, em tubeiras convergentes.

5. Conclusões

- Supomos ter ficado claro que os conceitos de eficiência energética e de eficiência exergetica são matematicamente próximos, mas muito diferenciados na sua interpretação física.
- A recuperação de exergia é um factor determinante para realizar a conservação da energia em quantidade e em qualidade, privilegiando esta última.
- A máquina térmica bomba de calor, revela-se um sistema de recuperação de energia e de reposição de uma fracção da sua qualidade (ou exergia).
- Os processos de expansão e de arrefecimento cedem energia e exergia em simultâneo. A determinação da eficiência exergetica é um factor útil de racionalidade para os consumos e desperdícios.
- As transferências de calor são por excelência, processos altamente geradores de entropia. Assim, há que actuar em engenharia, de forma mais estruturada em equipamentos e processos de modo a que, sem diminuir as taxas de transferência mais adequadas aos processos industriais, estes operem com valores menores dos gradientes de temperatura.

Referências

- [1] Peixoto, J.P., Gonçalves, L.C., "A entropia", IPC, Covilhã, 1977.
- [2] Wall, G., "Exergy - a useful concept", PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1986.
- [3] Moran, M., "Availability analysis - A guide to efficient use energy use", Prentice-Hall, 1982.
- [4] Peixoto, J.P., Gonçalves, L.C., "Interpretação mecanicista elementar de alguns aspectos da fenomenologia da termodinâmica", IPC, Covilhã, 1977.
- [5] Gonçalves, L.C., "Energia, Entropia, Exergia - Conceitos úteis em Engenharia", Lição de Síntese das Provas de Agregação, UBI, Novembro de 2002.
- [6] Peixoto, J.P., "Entropia e Informação", Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1972.
- [7] Çengel, Y.A., Boles, M.A., "Termodinâmica", 3ª edición, McGraw-Hill, 2001.
- [8] Pires, L.C., "Análise exergetica de sistemas e processos - Aplicação a uma instalação de refrigeração por compressão de vapor", PAPCC, UBI, Setembro de 2002.
- [9] Peixoto, J.P., Carvalho Rodrigues, F., "Sistemas, Entropia e Coesão", Discórdia, Lisboa, 1991.