

# TERMODINÂMICA

## GERAÇÃO DE ENTROPIA - DESTRUIÇÃO DE EXERGIA

R. Sobral

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

rodolfo.sobral@cefet-rj.br

## Programa do Curso - Avaliação 02

- 3<sup>o</sup> Lei da Termodinâmica
- **Geração de Entropia e Destruição de Exergia**
- Ciclos de Potência
- Ciclos de Refrigeração
- Psicrometria
- Relações Termodinâmicas

# Ementa

- 1 Conceitos
  - Fundamentos Básicos
- 2 Análise Exergética

# Fundamentos

A primeira lei trata da quantidade de energia e afirma que a mesma não pode ser criada nem destruída. A segunda lei lida com a qualidade da energia no que diz respeito à degradação de energia durante um processo, a geração de entropia e às oportunidades perdidas de se realizar trabalho.

# Estado Morto

Quando há equilíbrio térmico, mecânico e químico com o ambiente, sem tensões magnéticas, elétricas e superficiais.

Um sistema tem exergia nula no estado morto

## Estado Morto

A atmosfera ao nosso redor contém uma quantidade imensa de energia, entretanto a atmosfera está no estado morto e a energia que ela contém não tem potencial de trabalho. A atmosfera contém uma quantidade imensa de energia, mas nenhuma exergia.



# Exergia

Um sistema fornece o máximo possível de trabalho ao passar por um processo reversível do estado inicial especificado para o estado de seu ambiente, ou seja, o estado morto. Isso representa o potencial de trabalho útil do sistema especificado e é chamado de exergia.

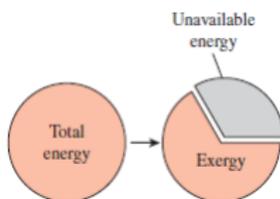
# Limite Superior

Note a exergia não representa a quantidade de trabalho que um dispositivo que produz trabalho realmente fornecerá após sua instalação. Em vez disso, representa o limite superior da quantidade de trabalho que um dispositivo pode produzir sem violar nenhuma das leis da termodinâmica.

Os engenheiros mecânicos são responsáveis pela redução entre a diferença entre o trabalho real e o de limite superior

# Exergia - Cinética e Potencial

Tanto a energia cinética quanto a potencial são formas de energia mecânica podendo ser convertida integralmente em trabalho, portanto o potencial de trabalho ou exergia referente a estas energias será a própria energia, independentemente da temperatura e pressão.



A energia interna e a entalpia de um sistema não são totalmente disponíveis para conversão em trabalho.

# Exergia - Cinética e Potencial

- Exergia de Energia Cinética

$$x_{ke} = \frac{v^2}{2}$$

- Exergia de Energia Potencial

$$x_{pe} = gz$$

# Exergia

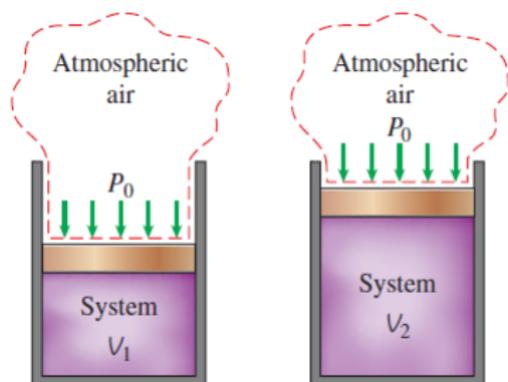
Disponibilidade ou energia disponível é o potencial de trabalho útil de determinada quantidade de energia em um estado especificado, já trabalho reversível é o máximo trabalho útil que pode ser obtido enquanto um sistema passa por um processo entre dois estados especificados.

Trabalho reversível é a quantidade máxima de trabalho útil que pode ser produzido ou mínimo fornecido à medida que um sistema passa por um processo entre os estados inicial e final especificados, quando o estado final é o estado morto, o trabalho reversível é igual a exergia.

Irreversibilidade, destruição de exergia ou trabalho perdido é o potencial de trabalho desperdiçado durante um processo devido às irreversibilidades. A ocorrência de qualquer irreversibilidade (geração de entropia) num processo provoca a destruição de exergia (disponibilidade)

# Irreversibilidade

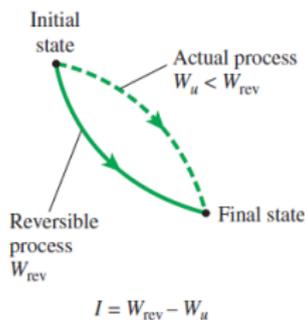
Quando o gás de um arranjo pistão cilindro se expande, parte do trabalho realizado pelo gás é utilizado para deslocar o ar atmosférico sobre o pistão, tal trabalho não pode ser recuperado e utilizado com qualquer propósito útil



$$W_{\text{viz}} = P_0 (V_2 - V_1)$$

$$W_u = W - W_{\text{viz}}$$

# Irreversibilidade



Qualquer diferença entre o trabalho reversível e o trabalho útil deve-se às irreversibilidades presentes durante o processo, expressa como

$$I = X_{destruída} = T_0 S_{ger}$$

$$I = W_{rev} - W_u$$

ou

$$I = W_u - W_{rev}$$

# Eficiência

Como apresentado previamente no âmbito da primeira e segunda leis da termodinâmica e suas respectivas eficiências, para uma máquina térmica, por exemplo:

$$\eta_I = \frac{W_{\text{líq}}}{Q_H}$$

$$\eta_{II} = \frac{E_W}{E_{W_{\text{rev}}}}$$

## Eficiência de Segunda Lei

A eficiência de segunda lei deve servir como medida de aproximação para a operação reversível e, portanto, seu valor deve variar de zero no pior caso no qual há destruição completa de exergia, até um no melhor caso no qual não há nenhuma destruição de exergia.

$$\eta_{II} = \frac{\text{Exergia recuperada}}{\text{Exergia fornecida}} = 1 - \frac{\text{Exergia destruída}}{\text{Exergia fornecida}}$$

Em uma operação reversível, recupera-se totalmente a exergia fornecida durante o processo, e a irreversibilidade é nula. A eficiência de segunda lei é zero quando não recupera-se nenhuma parte da exergia fornecida ao sistema.

# Análise Exergética

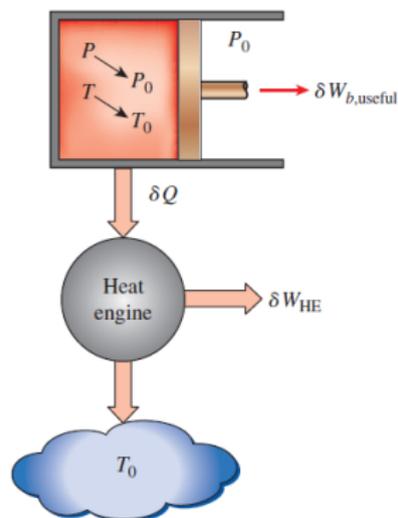
Utilização da primeira e segunda lei com o propósito de analisar o desempenho e limites reversíveis de equipamentos e máquinas.

# Exergia de Sistemas Fechados

A energia interna consiste nas energias sensível, latente, química e nuclear, entretanto na ausência de reações químicas ou nucleares, a energia interna pode ser representada apenas pelas energias sensível e latente que podem ser transferidas de/para um sistema como calor, sempre que existir diferencial de temperatura através da fronteira do sistema. Como a segunda lei denota que calor não pode ser convertido totalmente em trabalho, conclui-se que o potencial de trabalho da energia interna deve ser menor do que a energia interna.

# Exergia de Sistemas Fechados

Considere um arranjo pistão cilindro cuja massa, temperatura, pressão, volume, energia interna e entropia sejam variáveis conhecidas. O sistema passa por uma variação diferencial de volume proveniente de uma transferência de calor  $\delta Q$



A exergia de uma certa quantidade de massa em um estado especificado é o trabalho útil que pode ser produzido à medida que a massa sofre um processo reversível até o estado do ambiente

# Exergia de Sistemas Fechados

Balço de energia:

$$\delta E_e - \delta E_s = dE_{sistema}$$

como apenas há energia interna

$$-\delta Q - \delta W = dU$$

referente ao trabalho da fronteira do sistema

$$\delta W = PdV$$

sendo  $P$  a pressão absoluta medida a partir do zero absoluto, todo trabalho útil fornecido pelo arranjo deve-se à pressão acima do nível atmosférico

$$\delta W = PdV = (P - P_0) dV + P_0 dV = \delta W_{b,útil} + P_0 dV$$

# Exergia de Sistemas Fechados

Referente a desigualdade de Clausius para máquinas reversíveis

$$dS = \delta Q/T$$

$$\eta = 1 - T_0/T$$

logo o trabalho diferencial produzido por essa máquina como resultado dessa transferência de calor

$$\delta W_{MT} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q = \delta Q - \frac{T_0}{T} \delta Q = \delta Q - (-T_0 dS)$$

daí

$$\delta Q = \delta W_{MT} - T_0 dS$$

## Exergia de Sistemas Fechados

Rearranjando  $\delta Q$  e  $\delta W$  na equação do balanço da energia, tem-se:

$$-\delta Q - \delta W = dU$$

$$\delta W = -dU - \delta Q$$

$$\delta W_{total \text{ útil}} = \delta W_{MT} + \delta W_{b, \text{útil}} = -dU - \delta W_{MT} + T_0 dS = -dU - P_0 dV + T_0 dS$$

integrando do estado inicial até o estado morto (sub escrito 0)

$$W_{total \text{ útil}} = (U - U_0) + P_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0)$$

sendo o  $W_{total \text{ útil}}$  produzido enquanto o sistema passa por um processo reversível do estado especificado até o estado morto, denominação de exergia.

# Exergia de Sistemas Fechados

Como um sistema fechado também pode possuir energias cinética e potencial, a exergia de um sistema fechado de massa  $m$

$$X = (U - U_0) + P_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0) + m \frac{v^2}{2} + mgz$$

# Exergia de Sistemas Fechados

Para massa unitária, a exergia de um sistema fechado  $\phi$  pode ser expressa

$$\phi = (u - u_0) + P_0 (\nu - \nu_0) - T_0 (s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz$$

logo

$$\phi = (e - e_0) + P_0 (\nu - \nu_0) - T_0 (s - s_0)$$

com

$$\Phi = m \phi$$

## Variação de Exergia de Sistemas Fechados

A variação de exergia de um sistema fechado durante um processo é simplesmente a diferença entre as exergias final e inicial do sistema

$$\begin{aligned}\Delta X &= X_2 - X_1 = m(\phi_2 - \phi_1) = (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) \\ &= (U_2 - U_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + m\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + mg(z_2 - z_1)\end{aligned}$$

para uma massa unitária

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \phi_2 - \phi_1 = (u_2 - u_1) + P_0(\nu_2 - \nu_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \\ &= (e_2 - e_1) + P_0(\nu_2 - \nu_1) - T_0(s_2 - s_1)\end{aligned}$$

# Ponderações

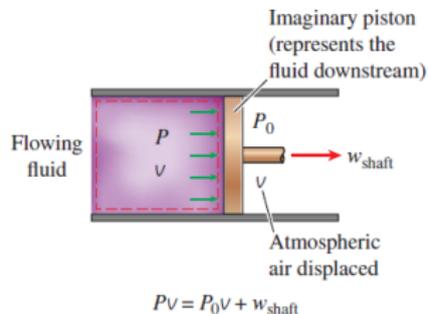
- Quando as propriedades de um sistema não forem uniformes, a exergia do sistema deverá ser determinada pela integração apresentada

$$x = \int \phi \delta m = \int \phi \rho \delta V$$

- A exergia de um sistema fechado é sempre positiva ou nula, nunca negativa, mesmo em meios a baixas temperaturas  $T < T_0$  ou baixas pressões  $P < P_0$

# Exergia de Escoamento

A exergia associada ao trabalho de fronteira é definida como o trabalho de fronteira subtraído do trabalho realizado pelo ar atmosférico a  $P_0$  no deslocamento de certo volume  $V$



A exergia associada à energia de escoamento é o trabalho útil que seria realizado por um pistão imaginário na seção transversal do escoamento

## Exergia de Escoamento

A exergia associada à energia de escoamento é expressa por

$$x_{esc} = P\nu - P_0\nu = (P - P_0)\nu$$

Por inferência observa-se que

$$x_{fluido\ escoando} = x_{fluido\ inerte} + x_{esc}$$

logo a equação acima nada mais é do que a exergia de um sistema fechado adicionada a exergia de escoamento

$$x_{fluido\ escoando} = (u - u_0) + P_0(\nu - \nu_0) - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz + (P - P_0)\nu$$

# Exergia de Escoamento

Com simples algebrismo

$$x_{\text{fluido escoando}} = (u + P\nu) - (u_0 + P_0\nu_0) - T_0 (s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz$$

Tal equação é definida como exergia de escoamento e é representada por  $\psi$

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

## Varição da Exergia de Escoamento

A variação da exergia de uma corrente de fluido ao passar por um processo do estado 1 para o estado 2 resulta em

$$\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1 = (h_2 - h_1) - T_0 (s_2 - s_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g (z_2 - z_1)$$

Observe que a exergia de um sistema fechado não pode ser negativa, enquanto a exergia de escoamento pode ser negativa a pressões abaixo da pressão do ambiente  $P_0$

# Transferência de Exergia

A exergia pode ser transferida para ou de um sistema de três formas:

- Calor
- Trabalho
- Fluxo de Massa

## Transferência de Exergia por Calor

Calor é uma fonte de energia desorganizada e, portanto, apenas parte dele pode ser convertido em trabalho, que é uma forma de energia organizada, via segunda lei. A transferência de calor sempre é acompanhada pela transferência de exergia, logo

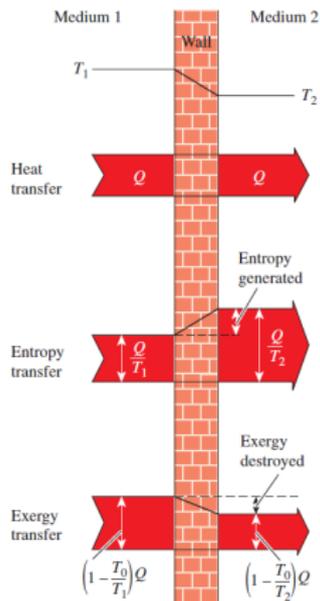
$$X_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q$$

Para propriedades não constantes, a transferência de exergia pode ser determinada pela integração

$$X_{calor} = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q$$

# Transferência de Exergia por Calor

Observe que a transferência de calor com uma diferença finita é irreversível, e que isso resulta na geração de entropia, e esta é sempre acompanhada pela destruição de exergia.

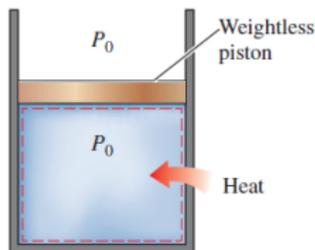


# Transferência de Exergia por Trabalho

A exergia é o potencial de trabalho útil, e a transferência de exergia por trabalho pode ser simplesmente expressa como

$$X_{trabalho} = W - W_{viz} \rightarrow \text{Trabalho de fronteira}$$

$$X_{trabalho} = W \rightarrow \text{Outras formas de trabalho}$$



Não há transferência de trabalho útil associado ao trabalho de fronteira quando a pressão do sistema é mantida constante e igual à atmosfera

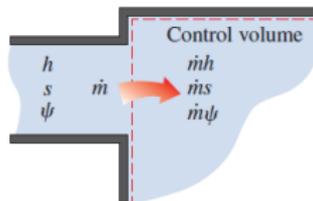
# Transferência de Exergia por Fluxo de Massa

O fluxo de massa é um mecanismo para transportar exergia, entropia e energia pra dentro ou fora de um sistema. A transferência de exergia com a massa é expressa por

$$X_{massa} = m\psi$$

Para propriedades variáveis

$$X_{massa} = \int \psi \delta m = \int_{\Delta t} X_{massa} dt$$



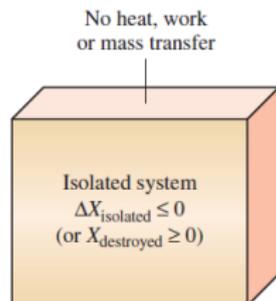
Massa contém energia, entropia e exergia e, portanto, o fluxo de massa para ou de um sistema é acompanhado por transferência de energia, entropia e exergia

## Diminuição de Exergia e Destruição de Exergia

Considere um sistema isolado sem nenhum calor, trabalho ou massa cruzando as fronteiras, portanto sem transferência de energia e entropia, logo as equações de balanço são:

$$E_e - E_s = \Delta E_{sistema} \rightarrow E_2 - E_1 = 0$$

$$S_e - S_s + S_{ger} = \Delta S_{sistema} \rightarrow S_2 - S_1 = S_{ger}$$



## Diminuição de Exergia e Destruição de Exergia

Multiplicando-se a segunda relação por  $T_0$  e subtraindo da primeira

$$-T_0 S_{ger} = E_2 - E_1 - T_0 (S_2 - S_1)$$

pela equação da variação de exergia em sistemas fechados

$$X_2 - X_1 = (E_2 - E_1) + P_0 (V_2 - V_1) - T_0 (S_2 - S_1)$$

como não fronteira móvel

$$X_2 - X_1 = (E_2 - E_1) - T_0 (S_2 - S_1)$$

## Diminuição de Exergia e Destruição de Exergia

Combinando as equações acima, tem-se

$$-T_0 S_{ger} = X_2 - X_1 \leq 0$$

uma vez que  $T_0$  é a temperatura termodinâmica do ambiente e, portanto, uma quantidade positiva,  $S_{ger} \geq 0$ , então  $-T_0 S_{ger} \leq 0$ , logo

$$\Delta X = (X_2 - X_1)_{isolado} \leq 0$$

Tal equação expressa que a exergia de um sistema isolado durante um processo qualquer sempre diminui ou, no caso-limite de um processo reversível, permanece constante. Em outras palavras, ela nunca aumenta havendo sempre destruição de exergia em processos reais.

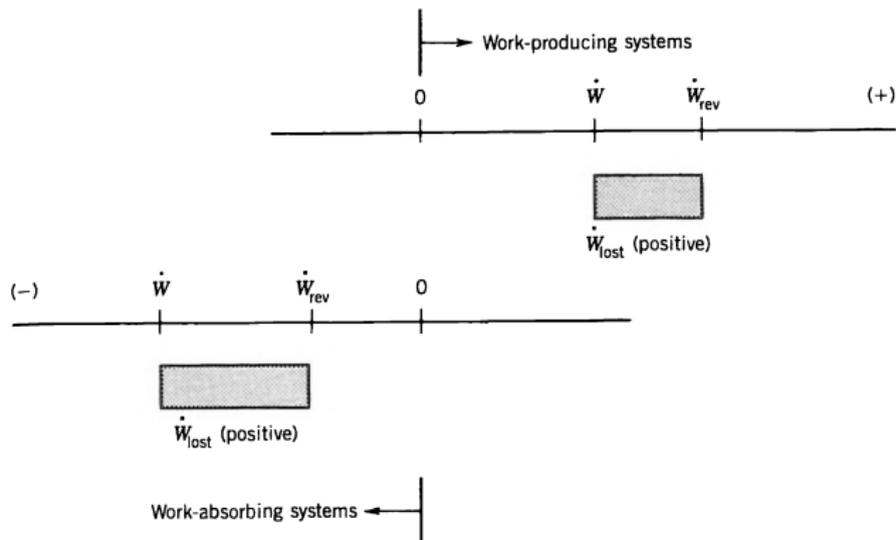
# Destrução de Exergia

Tudo que gera entropia sempre destrói exergia, a exergia destruída é proporcional à entropia gerada

$$X_{destruída} = T_0 S_{ger} \geq 0$$

A exergia destruída representa o potencial de trabalho perdido, também denominada de irreversibilidade.

# Destruição de Exergia



$\dot{W}$  e  $\dot{W}_{rev}$  podem ser positivo ou negativo dependendo do sistema, enquanto que  $\dot{W}_{perdido}$  sempre será positivo

# Mecanismos de Destruição de Exergia

- Transferência de Calor através de diferença finita de temperatura
- escoamento com atrito ou turbulento
- Mistura de componentes
- Reações químicas
- Expansão não resistida

# Balço de Exergia

A equação do balanço de exergia é um fator fundamental na análise de projeto de sistemas termomecânicos, pois permite identificar quais processos devem ser alterados de modo a minimizar a destruição de exergia.

A natureza da exergia é oposta à da entropia, uma vez que a exergia pode ser destruída, mas não pode ser criada

## Balço de Exergia - Sistemas Fechados

Axioma do balanço de exergia de sistemas diz que a variação da exergia de um sistema durante um processo é igual a diferença entre a transferência líquida de exergia através das fronteiras do sistema e a exergia destruída dentro das fronteiras do sistema como resultado de irreversibilidades.

$$X_e - X_s - X_{destruída} = \Delta X_{sistema}$$

Note que quando as condições do ambiente  $P_0$ ,  $T_0$  e os estados inicial e final do sistema são especificados, a variação da exergia do sistema pode ser determinada diretamente via equação descrita no slide 24, independente de como o processo é executado. No entanto, a determinação da transferência de exergia por calor, trabalho e fluxo de massa exige o conhecimento dessas interações

## Balço de Exergia - Sistemas Fechados

Supondo sistema fechado, ou seja, sem fluxo de massa e considerando transferência de calor para o sistema e realizaço de trabalho do sistema, tal balanço de exergia pode ser descrito como

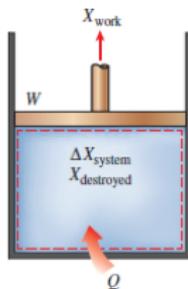
$$X_{calor} - X_{trabalho} - X_{destruída} = \Delta X_{sistema}$$

ou

$$\sum \left( 1 - \frac{T_0}{T_k} \right) Q_k - [W - P_0 (V_2 - V_1)] - T_0 S_{ger} = X_2 - X_1$$

em formato de taxas

$$\sum \left( 1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left[ \dot{W} - P_0 \left( \frac{dV_{sistema}}{dt} \right) \right] - T_0 \dot{S}_{ger} = \frac{dX_{sistema}}{dt}$$

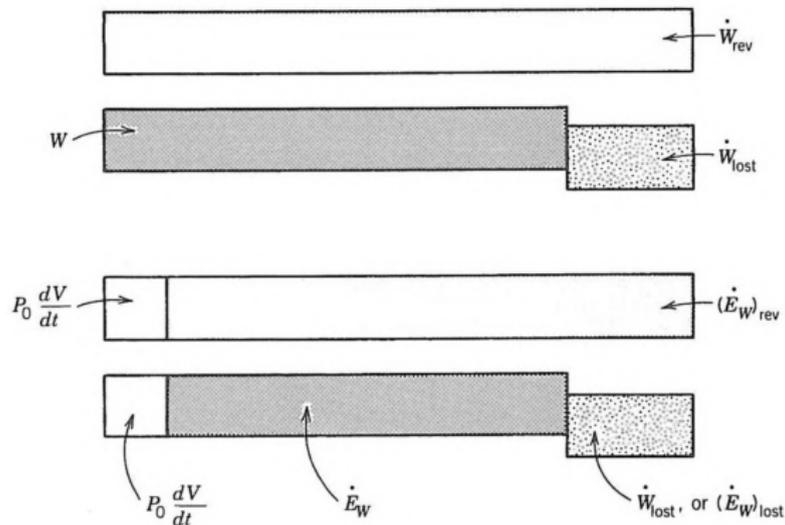


$Q_k$  é a transferência de calor através da fronteira à temperatura  $T_k$  no local  $k$

# Considerações

- A equação de exergia descrita a priori pode ser usada na determinação do trabalho reversível  $W_{rev}$ , fazendo o termo de destruição de exergia nulo, nesse caso o trabalho  $W$  torna-se o trabalho reversível, ou seja,  $W = W_{rev}$  quando  $X_{destruída} = T_0 S_{ger} = 0$
- Para processo reversível, a geração de entropia e, portanto a destruição de exergia são nulos, neste caso a equação do balanço de exergia tornar-se-á análoga à equação do balanço de energia. Ou seja, a variação de exergia do sistema será igual à transferência de exergia
- Para qualquer processo a variação de energia de um sistema é igual à transferência de energia, mas a variação de exergia de um sistema é igual à transferência de exergia apenas em um processo reversível, devido ao aumento de entropia e conseqüentemente diminuição de exergia

## Parcelas de Exergia



Relação entre transferência de trabalho ( $W$ ), trabalho disponível ou exergia  $E_W$ , e trabalho disponível perdido ou destruição de exergia

## Balço de Exergia - Sistemas Abertos

As equações para o balanço de exergia de sistemas abertos diferem daquelas dos sistemas fechados, pois envolvem mais um mecanismo de transferência de exergia: fluxo de massa através das fronteiras.

O axioma do balanço de exergia é descrito como a taxa de variação da exergia dentro do volume de controle durante um processo é igual à taxa líquida de transferência de exergia através das fronteiras do volume de controle por calor, trabalho e fluxo de massa subtraída da taxa de destruição de exergia dentro das fronteiras do volume de controle.

Quando os estados inicial e final do volume de controle são especificados, a variação da exergia do volume de controle será determinada por  $X_2 - X_1 = m_2 \phi_2 - m_1 \phi_1$

# Balço de Exergia - Sistemas Abertos

$$X_{calor} - X_{trabalho} + X_{massa_e} - X_{massa_s} - X_{destruída} = (X_2 - X_1)_{\Omega}$$

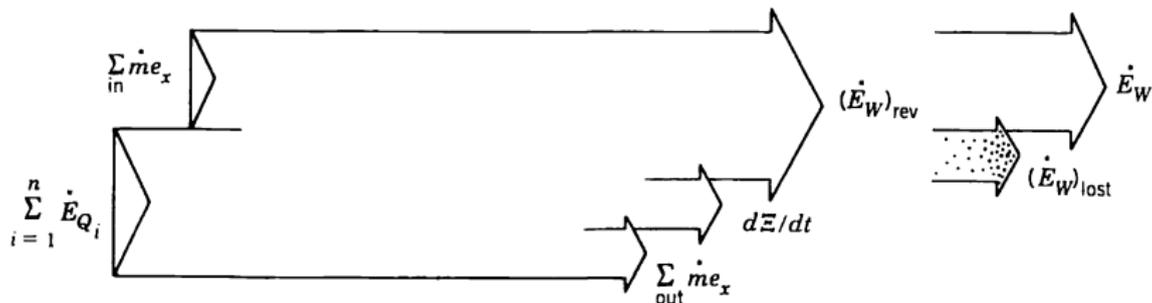
ou

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - [W - P_0 (V_2 - V_1)] + \sum_e m\psi - \sum_s m\psi - T_0 S_{ger} = X_2 - X_1$$

em formato de taxas

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \left[\dot{W} - P_0 \left(\frac{dV_{\Omega}}{dt}\right)\right] + \sum_e \dot{m}\psi - \sum_s \dot{m}\psi - T_0 \dot{S}_{ger} = \frac{dX_{\Omega}}{dt}$$

# Balço de Taxas de Exergia



As irreversibilidades destroem o balanço entre a entrada e saída de exergia

## Balço de Exergia em Regime Permanente

A maioria dos volumes de controle encontrados na prática, como turbinas, compressores, bocais, difusores, trocadores de calor, tubos e dutos operam em regime permanente e, portanto não sofrem variações nas quantidades de massa, energia, entropia e exergia, assim como em seus volumes. Logo,  $dV_{\Omega}/dt = 0$ ,  $dX_{\Omega}/dt = 0$  e a quantidade de exergia que entra em um sistema com escoamento em regime permanente sob todas as formas deve ser igual à quantidade de exergia que sai mais a exergia destruída.

$$\sum \left( 1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_e \dot{m}\psi - \sum_s \dot{m}\psi - X_{destruída} = 0$$

Para que se determine o trabalho reversível faz-se a exergia destruída nula, tornando o trabalho  $W = W_{rev}$

# Considerações

- Minimização da geração de entropia ou otimização termodinâmica, consiste em combinar termodinâmica com princípios de transferência de calor, mecânica dos fluidos, e outros fenômenos de transporte.
- Minimização da geração de entropia é um método de modelagem e otimização de dispositivos e instalações, no qual o analista compõe um modelo realístico para o sistema, analiticamente expressa a geração de entropia real e objetiva a redução de tal valor.

## Recapitulando...

Vídeo 01

Vídeo 02

Vídeo 03

Vídeo 04

*"Someone's sitting in the shade today because someone planted a tree a long time ago"*

Warren Buffett