

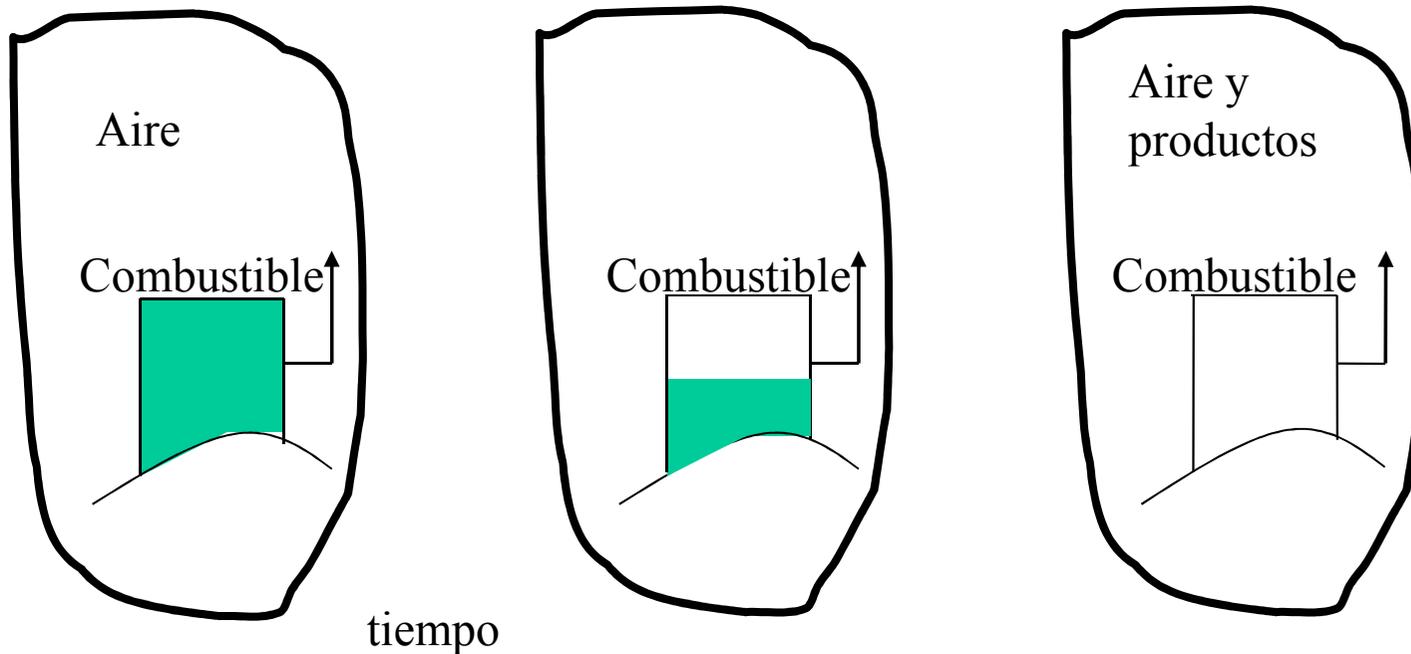
# Exergía

Profesor:

Joaquín Zueco Jordán

Área de Máquinas y Motores Térmicos

## Introducción: Utilidad potencial



**Cantidad de energía constante (no se destruye)  
Disminuye la utilidad potencial (se destruye)**

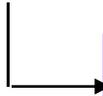
**Utilidad potencial = EXERGIA (propiedad que no se conserva)**

**Sin embargo la energía si se conserva**

$$\mathbf{ENERGÍA = EXERGÍA + ANERGÍA}$$



## Concepto de exergía



Máximo trabajo teórico que se puede obtener hasta alcanzar el estado de equilibrio cuando interaccionan un sistema cerrado y el ambiente

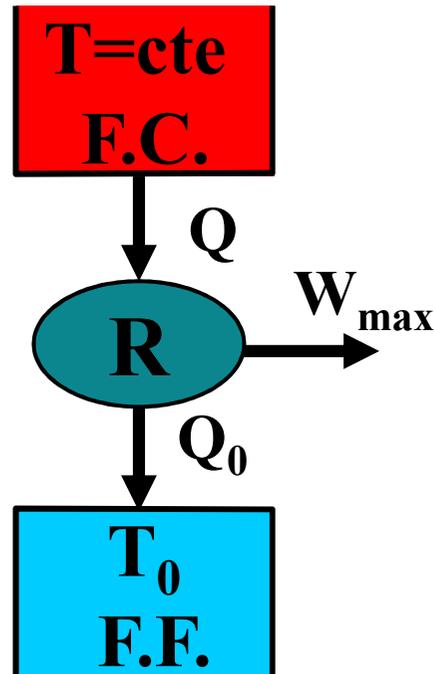
**Ambiente:** Libre de irreversibilidades, sus propiedades intensivas no varían

Irreversibilidades estarán: Sistema (internas) o en su entorno inmediato (externas)

Las propiedades extensivas si pueden modificarse en el ambiente debido a interacciones con otros sistemas

**Estado muerto:** Estado de equilibrio mecánico y térmico con el ambiente, o sea en condiciones térmicas de  $T_o$  y  $p_o$  ambientales, en donde la exergía es nula

# Concepto de exergía, anergía y exergía destruida



$$\eta = \frac{W_{\max}}{Q} = 1 - \frac{T_0}{T}$$

$$W_{\max} = Q - Q_0$$

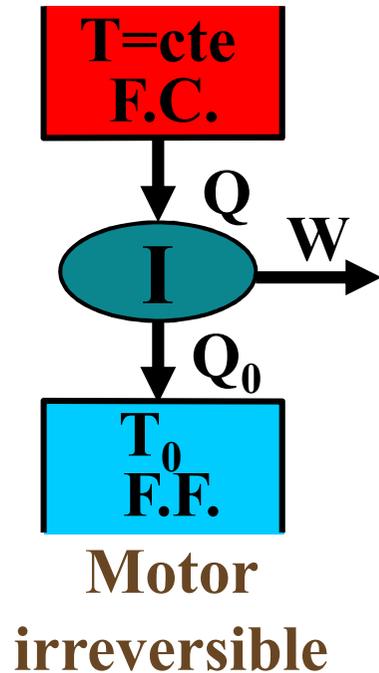
<b>Exergía</b>	$W_{\max} = Q \left[ 1 - \frac{T_0}{T} \right]$
<b>Anergía</b>	$Q_0 = Q - W_{\max} = Q \frac{T_0}{T}$
<b>Exergía destruida</b>	$I = W_{\max} - W_{\text{irreversible}} \geq 0$

**Exergía destruida en un motor térmico**

**Motor irreversible**

**Motor reversible**

## Ecuación de Guy-Stodola



Balance de entropía:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} - \frac{Q_0}{T_0} + S_G$$

$$\left. \begin{aligned} \bullet \Delta S = \frac{Q}{T} - \frac{Q_0}{T_0} + S_G = 0 \\ \bullet W = Q - Q_0 \end{aligned} \right\}$$

$$W = \underbrace{Q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right)}_{W_{\max}} - T_0 S_G$$

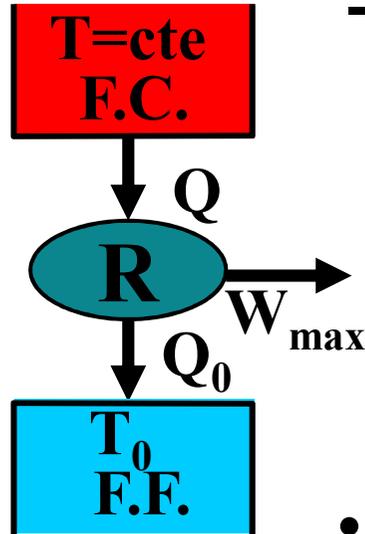
$$I = W_{\max} - W \geq 0$$

$$I = W_{\max} - W_{\max} + T_0 S_G \geq 0$$

$$W = W_{\max} - T_0 S_G$$

$$I = T_0 S_G \geq 0$$

# Exergía destruida en un motor reversible



**Motor reversible**

**Balance de entropía:**

$$\Delta S = \frac{Q}{T} - \frac{Q_0}{T_0}$$

$$\bullet \Delta S = \frac{Q}{T} - \frac{Q_0}{T_0} = 0$$

$$\bullet W = Q - Q_0$$

$$\left. \begin{array}{l} W = Q \left[ 1 - \frac{T_0}{T} \right] - T_0 S_G \\ W = W_{\max} \end{array} \right\}$$

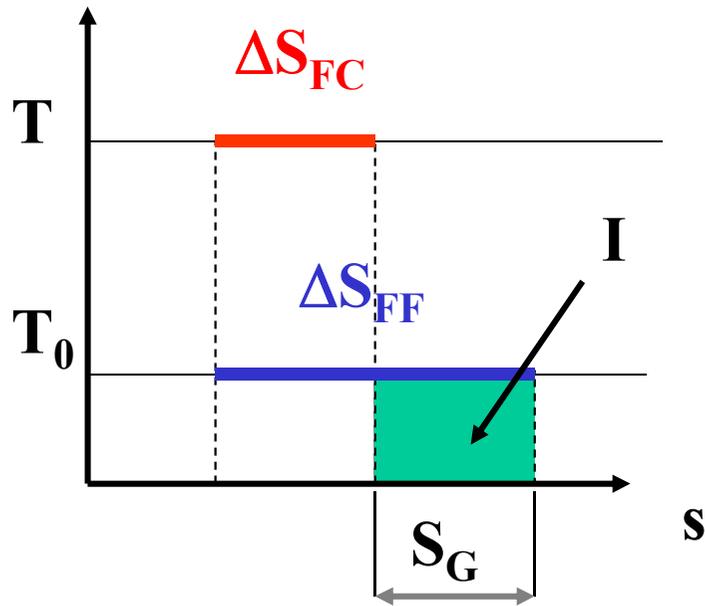
-  $\Delta s_{(\text{CICLO})} = 0$  (para ambos ciclos)  $\rightarrow$

*Los diferentes aumentos de entropía se compensan con la disminución de entropía en la cesión de calor en la fuente fría*

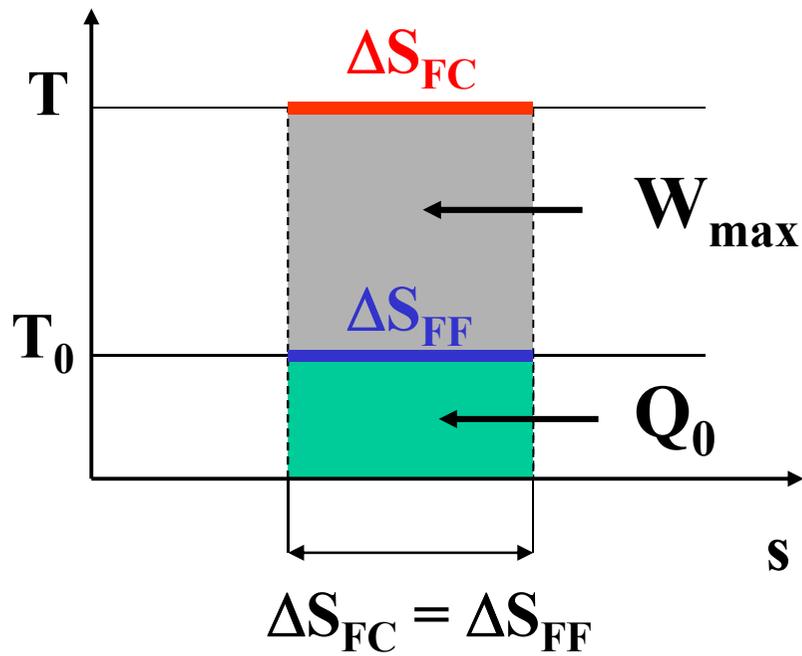
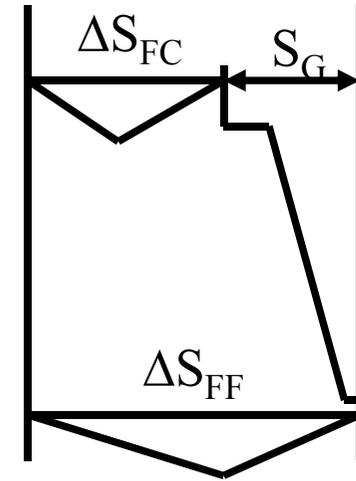
$$I = W_{\max} - W$$

$$I = W_{\max} - W_{\max} = 0$$

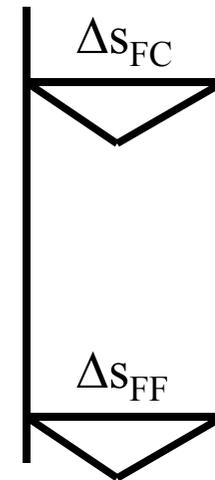
$$I = 0$$



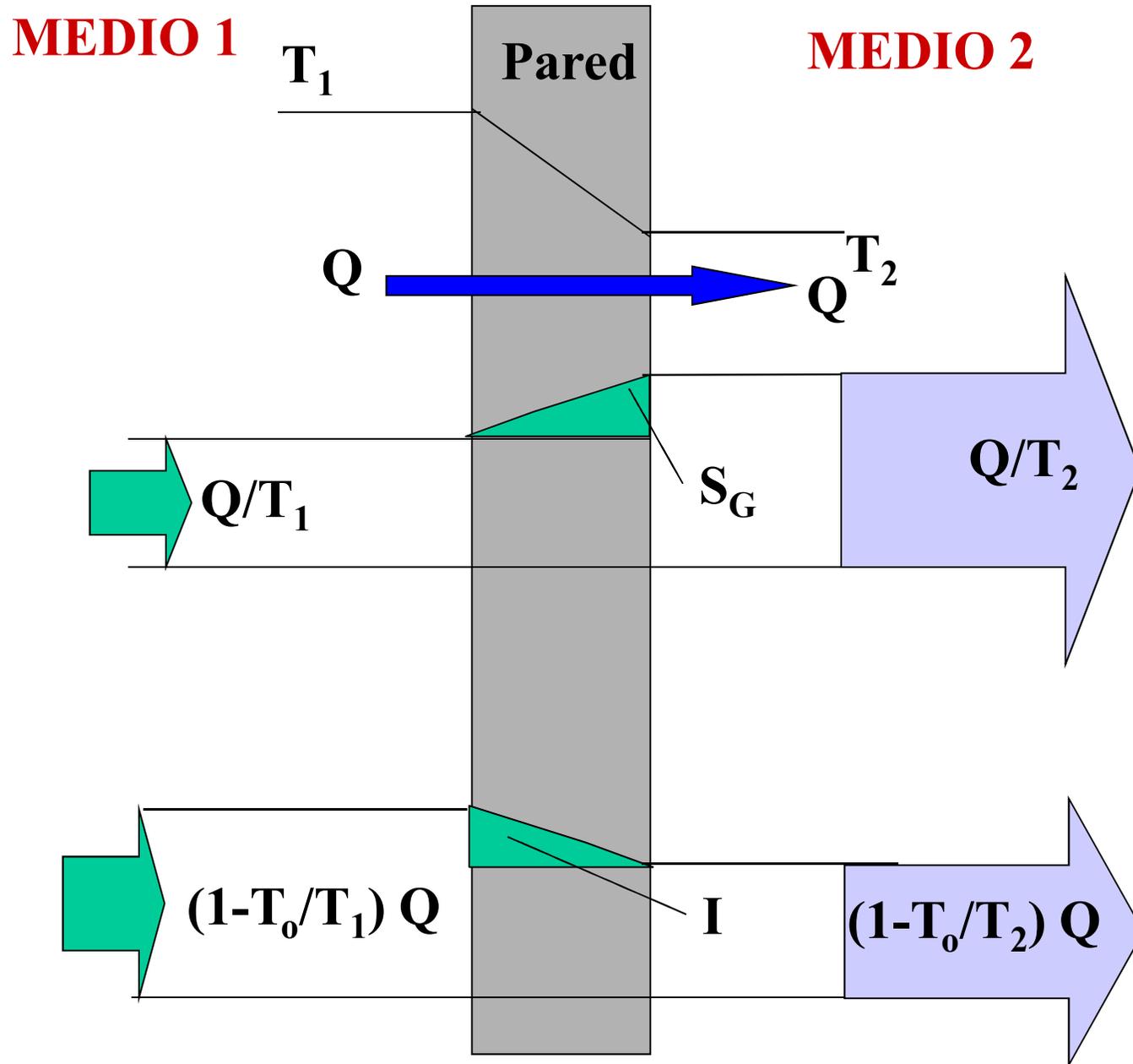
**Ciclo irreversibile**

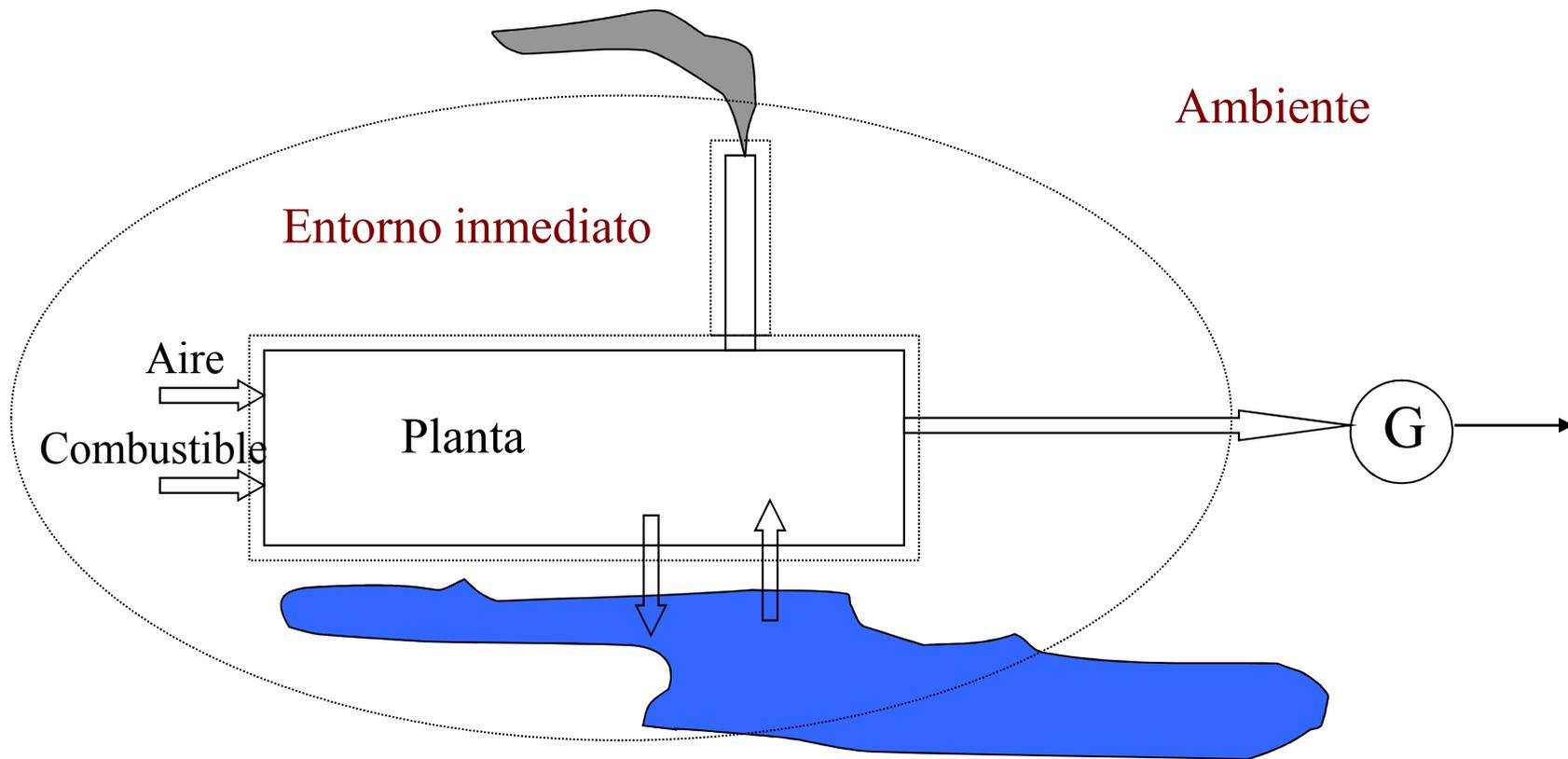


**Ciclo reversibile**



# Destrucción de exergía asociado a un flujo de calor

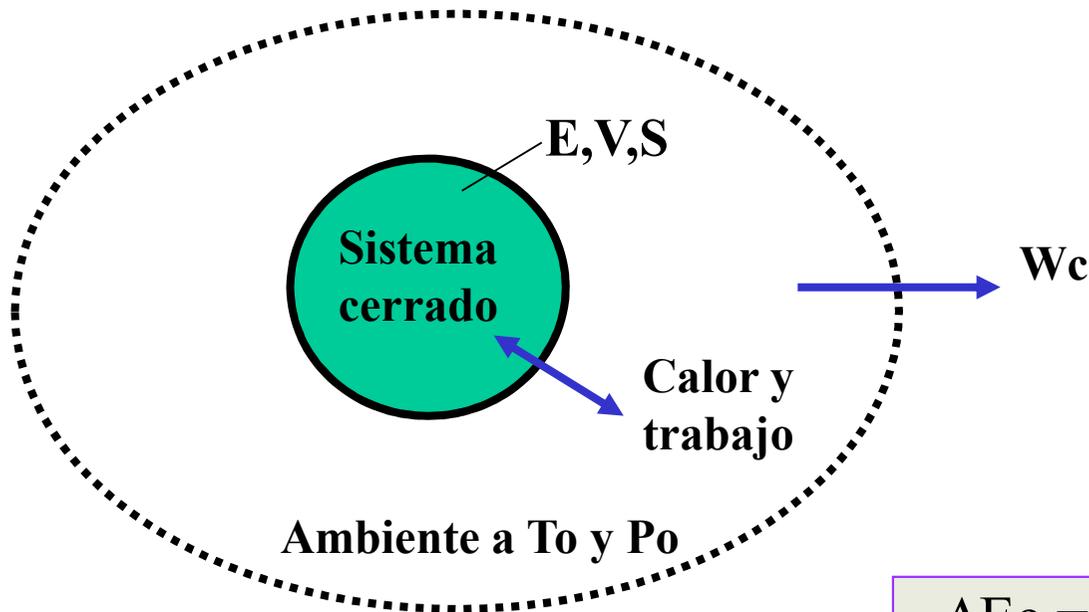




**Ecuación Tds:**  $\Delta U_a = T_o \Delta S_a - P_o \Delta V_a$

**Cálculo de la exergía**

**¿Cuál es la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener del sistema combinado?**



$$\Delta E_c = Q_c - W_c$$

$$\Delta E_c = (U_o - E) + \Delta U_a$$

$$\Delta E_c = (U_o - E) + (T_o \Delta S_a - p_o \Delta V_a)$$

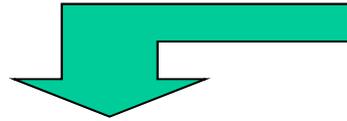
$$W_c = (E - U_o) - (T_o \Delta S_a - p_o \Delta V_a)$$

**Sistema combinado**

$$\Delta V_a = - (V_o - V)$$

$$W_c = (E - U_o) + p_o (V - V_o) - T_o \Delta S_a$$

**Balance de entropía  
al sistema cerrado**



$$\Delta S_c = S_{G,c}$$

$$\Delta S_c = (S_o - S) + \Delta S_a$$

$$(S_o - S) + \Delta S_a = S_{G,c}$$

$$\Delta S_a = (S - S_o) + S_{G,c}$$

$$W_c = (E - U_o) + p_o (V - V_o) - T_o \Delta S_a$$

$$W_c = (E - U_o) + p_o (V - V_o) - T_o (S - S_o) - T_o S_{G,c}$$

$$A = W_{c,MAX} = (E - U_o) + p_o (V - V_o) - T_o (S - S_o) \quad \text{EXERGIA}$$



## Diferentes aspectos sobre la exergía

$$a = (e - e_o) + p_o (v - v_o) - T_o (s - s_o)$$

$$a = (u + c^2/2 + gz - u_o) + p_o (v - v_o) - T_o (s - s_o)$$

$$a = (u - u_o) + p_o (v - v_o) - T_o (s - s_o) + c^2/2 + gz$$

**Entre dos estados:**

$$a_2 - a_1 = (e_2 - e_1) + p_o (v_2 - v_1) - T_o (s_2 - s_1)$$

**En el estado muerto la componente termomecánica de la exergía es nula**

- **Método de análisis exergético**

**La exergía puede destruirse por:**

- Pérdidas por irreversibilidades**
- Pérdidas de calor**

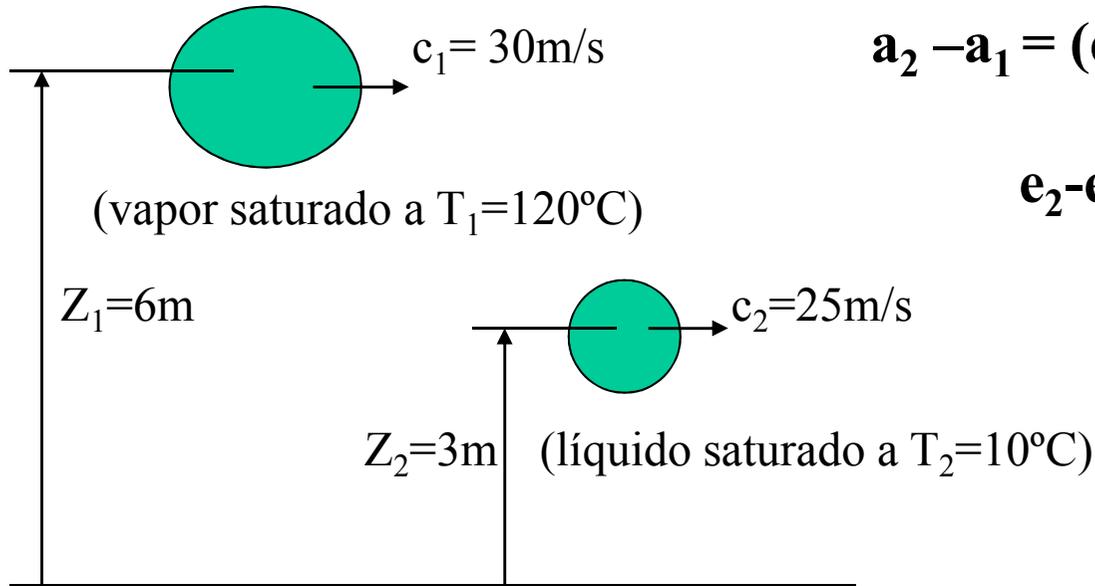
Es capaz de detectar el tipo, magnitud real y localización de la pérdida energética que se está produciendo en cualquier equipo de la instalación, **pérdidas por irreversibilidades**

El uso eficiente de los recursos energéticos (consumos de combustibles) se conseguirá disminuyendo la destrucción de exergía (irreversibilidad)

**Es un método no demasiado extendido en la industria**

## Ejemplo 1: Proceso de una masa de agua

( $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 1 \text{ atm}$ )



$$a_2 - a_1 = (e_2 - e_1) + p_0 (v_2 - v_1) - T_0 (s_2 - s_1)$$

$$e_2 - e_1 = u_2 - u_1 + c_2^2/2 - c_1^2/2 + g(z_2 - z_1)$$

$$a_1 = 2000,2 \text{ kJ/kg}$$

$$a_2 = 7,8 \text{ kJ/kg}$$

$$a_2 - a_1 = -1992,4 \text{ kJ/kg}$$

### Comentarios:

Exergía es una medida de la separación del ambiente,  $a > 0$  si  $T > T_0$  y  $p > p_0$  o  $T < T_0$  y  $p < p_0$

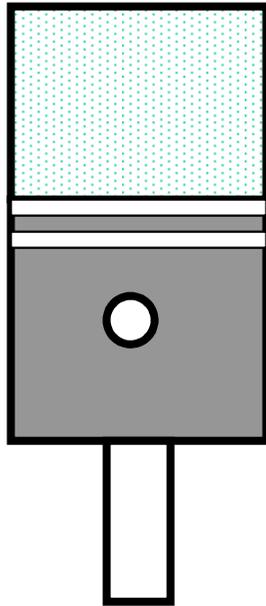
$a_1$

$a_2$

EC y EP contribuyen con su valor total, al ser 100% transformables



## Ejemplo 2: Proceso de escape en un MCIA



**Gas ideal:**  $p=7$  bar,  $T=1040$ K ( $T_o = 300$ K,  $p_o = 1$  bar)

$$a = (u-u_o) + p_o (v-v_o) - T_o (s -s_o) = 368,91 \text{ kJ/kg}$$

$$u-u_o = 666,28 \text{ kJ/kg}$$

$$p_o (v-v_o) = -38,75 \text{ kJ/kg}$$

$$T_o (s -s_o) = 258,72 \text{ kJ/kg}$$

Comentario: Si los gases se descargan directamente al entorno se desperdicia su exergía, esto no ocurre en los motores turbosobrealimentados



## Balance de exergía en sistemas cerrados

$$E_2 - E_1 = \int \delta Q - W$$

**1<sup>er</sup> Principio**

$$S_2 - S_1 = \int (\delta Q/T)_f + S_G$$

**2<sup>o</sup> Principio**

$$(E_2 - E_1) - T_0 (S_2 - S_1) = \int \delta Q - T_0 \int (\delta Q/T)_f - W - T_0 S_G$$

**Sabiendo:**

$$A_2 - A_1 = (E_2 - E_1) + p_0 (V_2 - V_1) - T_0 (S_2 - S_1)$$

$$A_2 - A_1 - p_0 (V_2 - V_1) = (E_2 - E_1) - T_0 (S_2 - S_1)$$

$$A_2 - A_1 - p_0 (V_2 - V_1) = \int \delta Q - T_0 \int (\delta Q/T)_f - W - T_0 S_G$$

Reordenando:  $A_2 - A_1 = \int (1 - T_0/T_f) \delta Q - [W - p_0 (V_2 - V_1)] - T_0 S_G$



**Variación  
de exergía**



**Transferencia  
de exergía del  
calor**



**Transferencia  
de exergía del  
trabajo**



**Destrucción  
de exergía**

$$A_2 - A_1 \begin{cases} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{cases}$$

$$I = T_0 S_G$$

- $I=0$  proceso reversible
- $I>0$  proceso irreversible
- $I<0$  proceso imposible

- Otra expresión del balance de exergía

$$dA/dt = \sum (1 - T_o/T_f) \dot{Q} - (\dot{W} - p_o dV/dt) - \dot{I}$$

- Sistema aislado

$$A_2 - A_1 = -I < 0$$

**Disminución de la exergía**

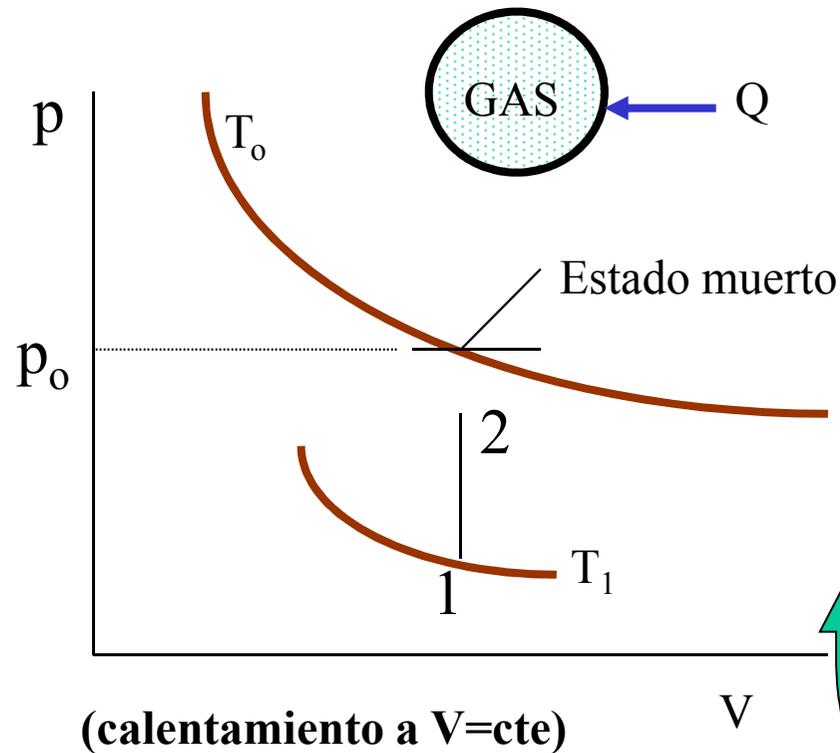
**En contrapartida el Principio de incremento de entropía:**

$$S_2 - S_1 = S_G > 0$$

**Aumento de la entropía**

**(el desorden de un sistema aislado tiende a aumentar)**

## Transferencia de exergía: CALOR (magnitud y dirección)



$$(1 - T_0/T_f) Q$$

**Magnitud:** equivale al trabajo que se produciría en un ciclo de potencia reversible con focos a  $T_f$  y  $T_0$

**Dirección:** exergía y calor

**Si  $T_f > T_0$  misma dirección**  
(positivas o negativas)

**Si  $T_f < T_0$  dirección opuesta**

(aplicación en sistemas de refrigeración y bombas de calor)

Acercamiento al estado muerto  $\Rightarrow$   
disminución de la exergía

## Transferencia de exergía: TRABAJO (magnitud y dirección)

