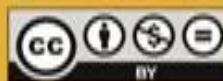


# TERMODINÁMICA

## Térmicas III

Este material de autoestudio fue creado en el año 2005 para la asignatura Térmica III del programa Ingeniería Electromecánica y ha sido autorizada su publicación por el (los) autor (es), en el Banco de Objetos Institucional de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.



## TERMICAS III

### PROGRAMA

#### UNIDAD 1

Ciclos:

- Ciclo de Carnot
- Ciclo Otto
- Ciclo Diesel
- Ciclo Dual
- Ciclo Ericsson
- Ciclo invertido para refrigeración y calefacción

#### UNIDAD 2

Generación de energía a partir de gases:

- Ciclo Joule o Brayton
- Diversas formas del ciclo para uso con turbinas de gas
- Calentamiento intermedio
- Refrigeración intermedia

#### UNIDAD 3

Generación de energía a partir del vapor:

- Ciclo Rankine
- Ciclo Rankine con recalentamiento intermedio
- Ciclo Rankine con regeneración de una o varias etapas

#### UNIDAD 4

Rendimientos:

- Rendimiento térmico
- Rendimiento de máquina o de motor
- Rendimiento mecánico
- Diagrama del indicador

## UNIDAD 5

### Turbinas:

- Principio de la turbina
- Ecuación de continuidad
- Teorema del transporte de Reynolds
- Ecuación de cantidad de movimiento
- Ecuación de momento cinético
- Ecuación de energía
- Toberas
- Turbinas de acción
- Diagramas de velocidad
- Turbinas de expansión de curtis
- Turbinas de reacción

## UNIDAD 6

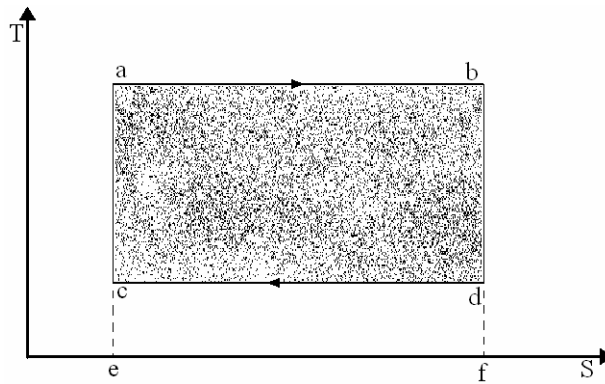
- Bombas
- Compresores
- Calderas
- Propulsión a chorro
- Cohetes

### Bibliografía:

- Termodinámica: Virgil M. Faires
- Termodinámica: Reynolds – Perkins
- Termodinámica: Van Wylen
- Termodinámica teórica: R. Vichievsley
- Centrales de vapor: Gaffert
- Calderas: G. Pull
- Steam: Backcock – Wilcox

## CICLO DE CARNOT

Formados por dos procesos a temperatura constante o isotérmicos y dos procesos a entropía constante o isentrópicos.



Procesos:            a - b  
                          c - d

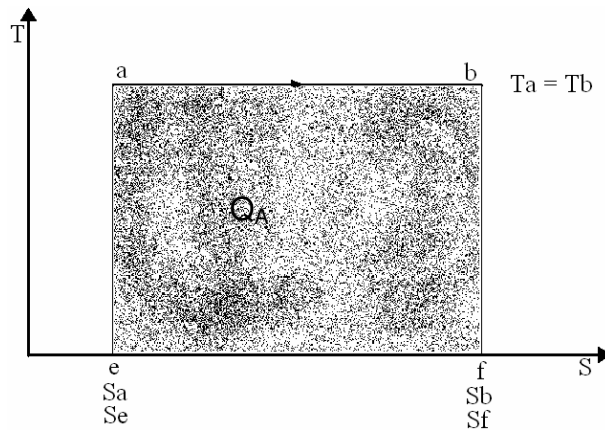
Son procesos isotérmicos donde:

$$T = \text{Cte.} \qquad T_a = T_b \qquad T_c = T_d \qquad \Delta t = 0 \quad dt = 0$$

Procesos:            b - c  
                          d - a

Son procesos isentrópicos donde:

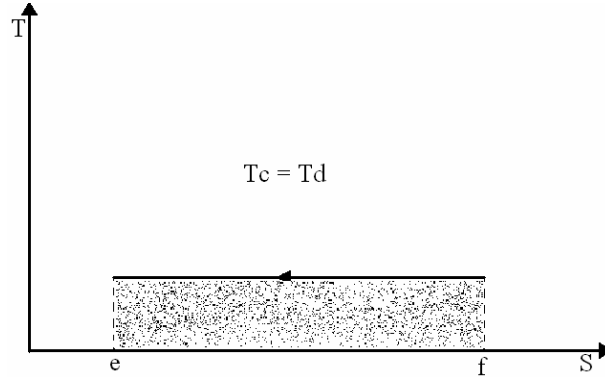
$$S = \text{Cte.} \qquad \Delta s = 0 \quad ds = 0 \qquad S_b = S_c \quad S_d = S_a$$



$Q_A = \text{Calor a\u00f1adido} = \text{\u00c1rea bajo la curva del proceso a-b}$   
 $Q_A = \text{\u00c1rea e, a, b, f.}$

$$Q_A = (S_b - S_a)T_a$$

[Kcal / Kgr] \u2264 [Btu / lb]



$Q_R = \text{Calor rechazado} = \text{\u00c1rea bajo la curva del proceso c-d}$   
 $Q_R = \text{\u00c1rea e, d, c, f}$

$$Q_R = (S_d - S_c)T_b = -(S_c - S_d)T_b$$

$$W = \Sigma Q = Q_A + Q_R$$

$$W = (S_b - S_a)T_a - (S_c - S_d)T_d$$

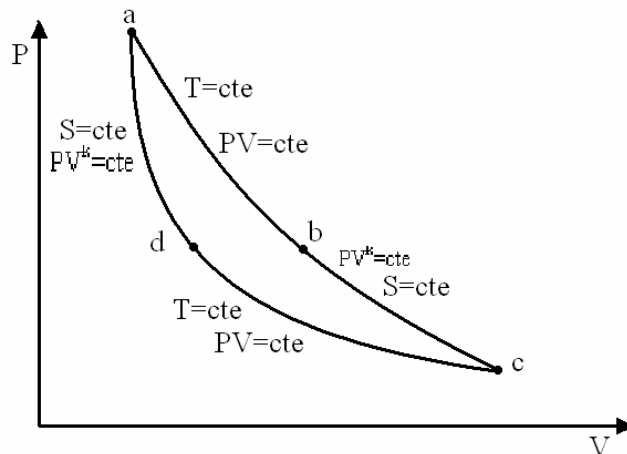
$$W = (S_B - S_a)(T_a - T_d) = \Delta s * \Delta T$$

$e = \text{Rendimiento t\u00e9rmico}$

$e = \text{Trabajo obtenido} / \text{Energ\u00eda cargable}$

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{(S_b - S_a)(T_a - T_d)}{(S_b - S_a)T_a}$$

$$e = \frac{T_a - T_d}{T_a} = 1 - \frac{T_d}{T_a}$$



Gas ideal:  
Proceso a-b:

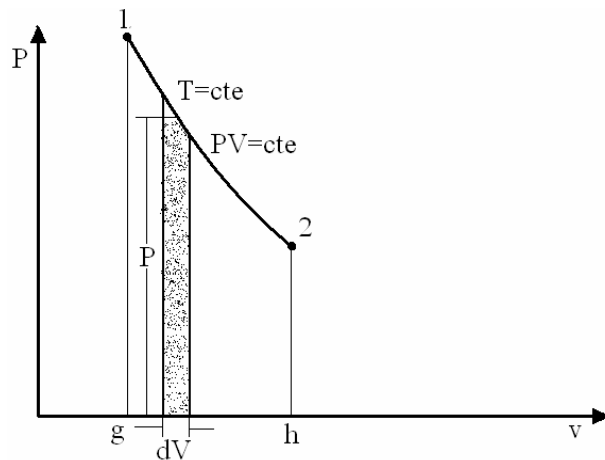
$$\begin{aligned} T &= \text{cte} \\ PV &= mRT \\ PV/m &= RT \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PV &= \text{cte} \\ \text{Ecuación de estado} \\ Pv &= RT = \text{cte} \end{aligned}$$

Procesos b-c y d-a a  $S = \text{cte}$

$$PV^k = \text{cte}$$

$$\text{Donde: } K = C_p/C_v$$



$dW = PdV$  entonces:

$$W = \int_1^2 dW = \int_1^2 Pdv = \int_1^2 \frac{C}{v} dv = C \int_1^2 \frac{dv}{v} = C \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$W = mRT_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$\begin{aligned} PV &= mRT \\ P_1V_1 &= mRT_1 \\ P_1V_1 &= P_2V_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2V_2 &= mRT_2 \\ \text{Entonces:} \end{aligned}$$

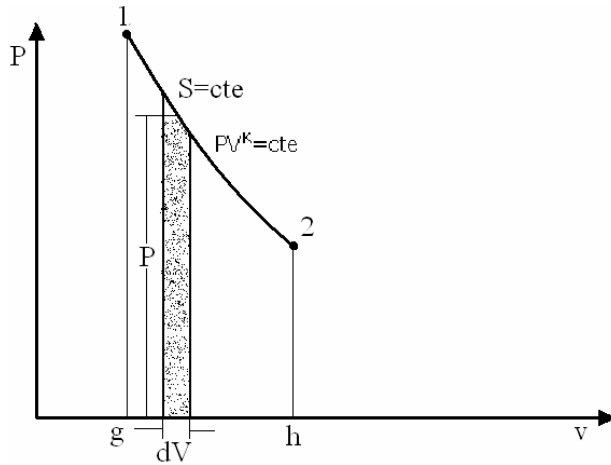
$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \\ V_2/V_1 &= P_1/P_2 \end{aligned}$$

$$W = P_1V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1V_1 \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$$W = mRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_2V_2 \ln \frac{P_1}{P_2} \quad [\text{Kg-m, lb-ft, N-m}]$$

Para el caso:

$$W_{a-b} = wRT_a \ln \frac{V_b}{V_a} = P_aV_a \ln \frac{P_a}{P_b}$$



$$dW_{1-2} = Pdv \quad \text{Entonces:} \quad W_{1-2} = \int_1^2 dW = \int_1^2 Pdv$$

$$W_{1-2} = \int_1^2 \frac{C}{v^K} dv = C \int_1^2 v^{-K} dv = \left[ \frac{Cv^{-K+1}}{-K+1} \right]_1^2$$

$$W_{1-2} = \frac{C}{1-K} [v_2^{1-K} - v_1^{1-K}]$$

$$W_{1-2} = \frac{1}{1-K} [P_2 v_2^K v_2^{1-K} - P_1 v_1^K v_1^{1-K}]$$

$$W_{1-2} = \frac{1}{1-K} [P_2 v_2 - P_1 v_1]$$

$$W_{1-2} = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-K}$$

$$W_{1-2} = \frac{P_1 v_1 - P_2 v_2}{K-1}$$

Para  $T = \text{cte}$  y gas ideal,  $Pv = \text{cte}$ ,  $Pdv + vdP = 0$

Entonces:  $Pdv = -vdP$

$$\int_1^2 Pdv = -\int_1^2 vdP$$

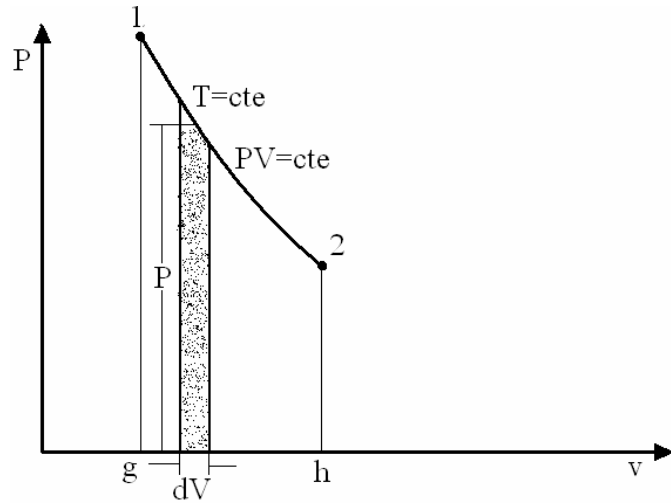
$$\Delta U = 0 \quad \Delta H = 0 \quad \Delta T = 0$$

$$Q = \Delta U + \int_1^2 Pdv \quad Q = \int_1^2 Pdv$$

$$Q = \Delta H - \int_1^2 vdP \quad Q = -\int_1^2 vdP$$

$$Pv = \text{cte} \quad P_1 v_1 = P_2 v_2 \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{P_1}{P_2} \quad Pv = mRT$$

$$\int_1^2 P dv = P_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = P_2 v_2 \ln \frac{P_1}{P_2} = mRT_1 \ln \frac{P_1}{P_2} \text{ [Kcal, Btu, Joule, Kg-m, lb-ft, N-m]}$$



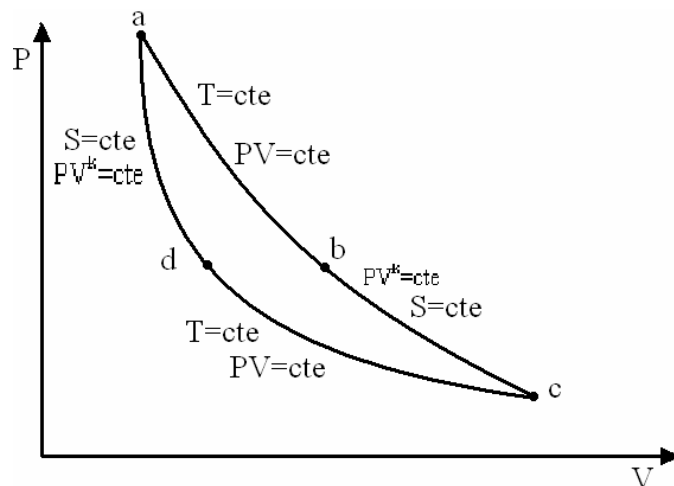
$$Q_A = \frac{1}{j} \int_1^2 P dv$$

a-b:

$$Q_A = \frac{P_a v_a}{j} \ln \frac{v_b}{v_a} = \frac{P_b v_b}{j} \ln \frac{P_a}{P_b} = \frac{mRT_a}{j} \ln \frac{P_a}{P_b}$$

c-d:

$$Q_R = \frac{P_c v_c}{j} \ln \frac{v_d}{v_c} = \frac{P_d v_d}{j} \ln \frac{P_c}{P_d} = \frac{mRT_d}{j} \ln \frac{P_c}{P_d} = -\frac{mRT_d}{j} \ln \frac{P_d}{P_c}$$





$$P_a v_a = P_b v_b \quad \frac{P_a}{P_b} = \frac{v_b}{v_a} \quad \frac{P_d}{P_c} = \frac{v_c}{v_d}$$

$$W = \Sigma Q = \frac{P_a v_a}{j} \ln \frac{v_b}{v_a} + \frac{P_c v_c}{j} \ln \frac{v_d}{v_c}$$

Cambio de entropía en un proceso isotérmico:

$$\Delta s = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 dQ$$

$$\Delta s = \frac{Q}{T}$$

Proceso a-b:

$$\Delta s = \frac{mR}{j} \ln \frac{P_a}{P_b} \quad [\text{Kcal/}^\circ\text{K, Btu/}^\circ\text{R}]$$

$$\frac{\Delta S}{w} = \Delta s = \frac{R}{j} \ln \frac{P_a}{P_b} \quad [\text{Kcal/Kg-}^\circ\text{K, Btu/lb-}^\circ\text{R}]$$

Proceso c-d:

$$\Delta s = \frac{mR}{j} \ln \frac{P_c}{P_d}$$

$$\frac{\Delta S}{w} = \Delta s = \frac{R}{j} \ln \frac{P_c}{P_d} \quad w = m$$

$$W_T = P_a V_a \ln \frac{P_a}{P_b}$$

$$W_s = \frac{P_c V_c - P_b V_b}{1-K}$$

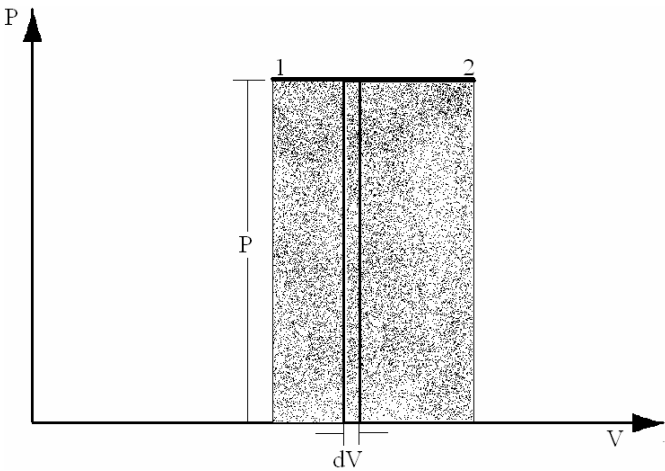
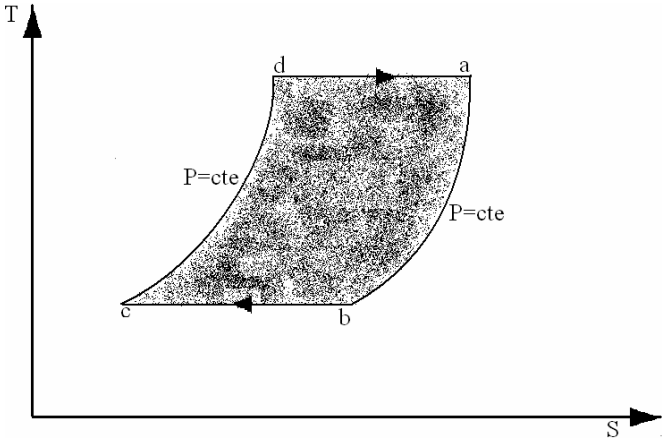
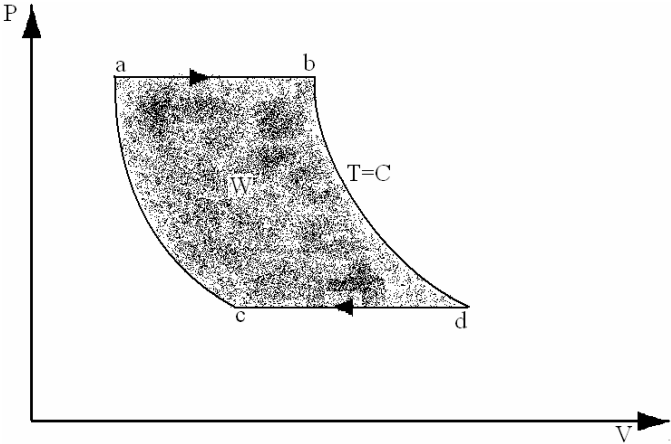
$$W = P_a V_a \ln \frac{P_a}{P_b} + \frac{P_c V_c - P_b V_b}{1-K} + P_c V_c \ln \frac{P_c}{P_d} + \frac{P_a V_a - P_d V_d}{1-K}$$

$$W = P_a V_a \ln \frac{P_a}{P_b} + P_c V_c \ln \frac{P_c}{P_d} + \frac{P_c V_c - P_b V_b + P_a V_a - P_d V_d}{1-K}$$

$$e = 1 - \frac{T_d}{T_a}$$

# CICLO ERICSSON

Formado por dos procesos a temperatura constante o isotérmicos y dos procesos a presión constante o isobáricos.



$$dW = Pdv$$

$$W_{1-2} = \int_1^2 dW = \int_1^2 Pdv$$

$$W = P \int_1^2 dv = \left[ Pv \right]_1^2 = P(v_2 - v_1)$$

Proceso de b-c:

$$W_{b-c} = P_b v_b \ln \frac{v_c}{v_b} = wRT_b \ln \frac{P_b}{P_c}$$

Proceso de d-a:

$$W_{d-a} = P_d v_d \ln \frac{v_a}{v_d} = wRT_d \ln \frac{P_d}{P_a}$$

Proceso de a-b:

$$W_{a-b} = P_a (v_b - v_a)$$

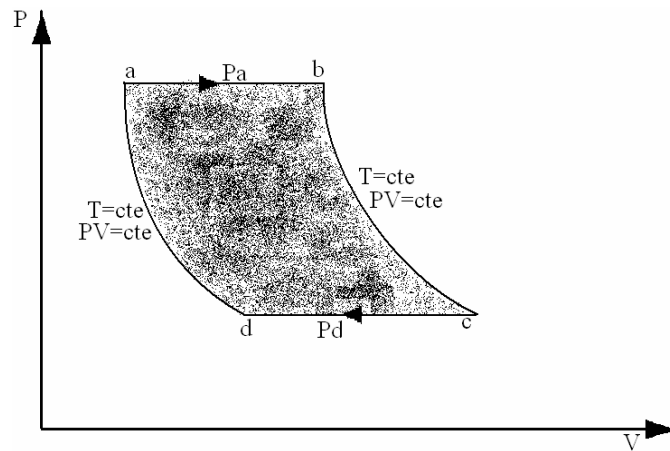
Proceso de c-d:

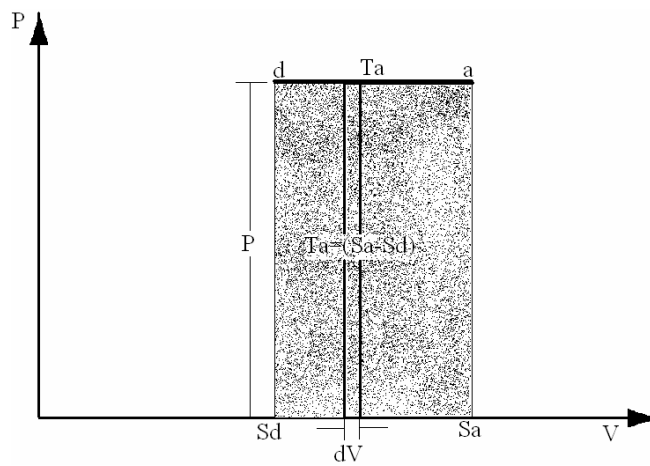
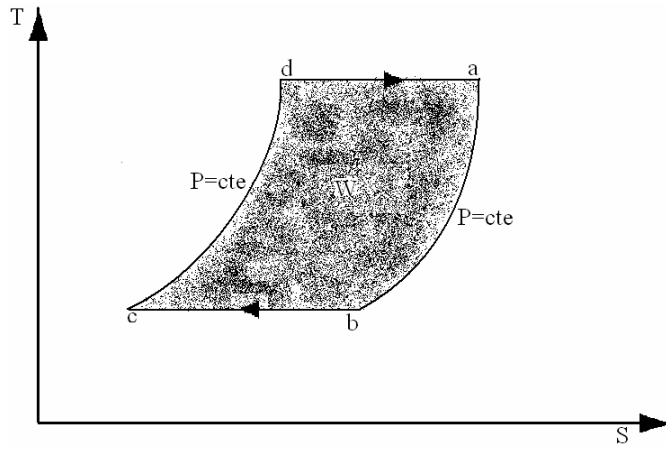
$$W_{c-d} = P_d (v_d - v_c)$$

Entonces:

$$W = W_{b-c} + W_{d-a} + W_{a-b} + W_{c-d}$$

$$W = wRT_b \ln \frac{P_b}{P_c} + wRT_d \ln \frac{P_d}{P_a} + P_a (v_b - v_a) + P_d (v_d - v_c)$$





$$Q_A = wRT_a \ln \frac{v_d}{v_a}$$

[Kcal ó Btu]

$$dQ = dh = C_p dT$$

dh: Para cualquier sustancia

$$Q_{d-a} = T_a (S_a - S_d)$$

Para cualquier sustancia

$$Q_{d-a} = wRT_a \ln \frac{v_d}{v_a}$$

Para gas ideal

$$Q_{a-b} = \int_a^b C_p dT$$

Para cualquier sustancia

$$Q_{a-b} = C_{Pa-b} (T_b - T_a)$$

Para gas ideal

$$Q_{b-c} = T_b (S_c - S_b)$$

Para cualquier sustancia

$$Q_{b-c} = wRT_b \ln \frac{v_b}{v_c}$$

Para gas ideal

$$Q_{c-d} = \int_c^d dQ = \int_c^d C_p dT = C_{Pc-d} \int_c^d dT = C_{Pc-d} (T_d - T_c) = C_{Pc-d} (T_a - T_b)$$

$$W = \Sigma Q = Q_{d-a} + Q_{a-b} + Q_{b-c} + Q_{c-d}$$

$$W = T_a (S_a - S_d) + \int_a^b C_p dT + T_b (S_c - S_b) + \int_c^d C_p dT \quad \text{Para cualquier sustancia}$$

$$W = T_a (S_a - S_d) + C_{Pa-b} (T_b - T_a) + T_b (S_c - S_b) + C_{Pc-d} (T_a - T_b) \quad \text{Para gas ideal}$$

$$C_{Pa-b} = C_{Pc-d}$$

$$W = T_a (S_a - S_d) + T_b (S_c - S_b) \quad \text{Para gas ideal}$$

$$W = Q_A + Q_R$$

$$W = wRT_a \ln \frac{v_d}{v_a} + wRT_c \ln \frac{v_b}{v_c}$$

d-a:  $T = T_a = \text{cte}$  Para un proceso isotermico se cumple que:

$$P_d v_d = P_a v_a \quad \frac{v_d}{v_a} = \frac{P_a}{P_d}$$

b-c:  $T = T_b = \text{cte}$  Para un proceso isotermico se cumple que:

$$P_b v_b = P_c v_c$$

$$\frac{v_c}{v_b} = \frac{P_b}{P_c} = \frac{P_a}{P_d} \quad \frac{v_d}{v_a} = \frac{v_c}{v_b}$$

$$W = wRT_a \ln \frac{v_d}{v_a} + wRT_b \ln \frac{v_b}{v_c}$$

$$W = wRT_a \ln \frac{v_d}{v_a} - wRT_b \ln \frac{v_c}{v_b}$$

$$W = wRT_a \ln \frac{v_d}{v_a} - wRT_b \ln \frac{v_d}{v_a}$$

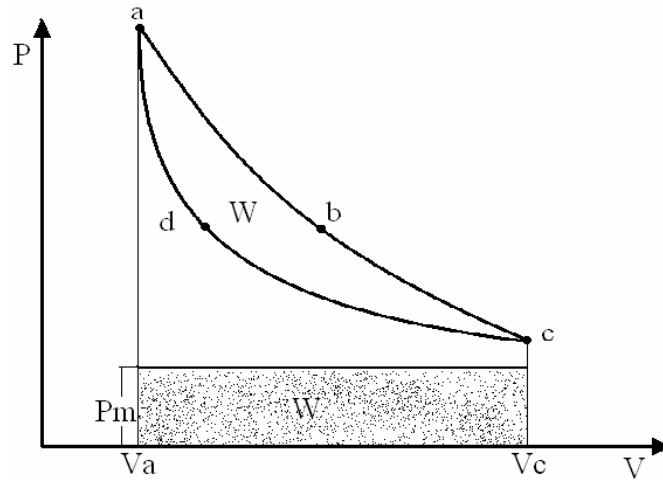
$$W = wR(T_a - T_b) \ln \frac{v_d}{v_a}$$

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{wR(T_a - T_b) \ln \frac{v_d}{v_a}}{wRT_a \ln \frac{v_d}{v_a}} \quad \text{Para gas ideal}$$

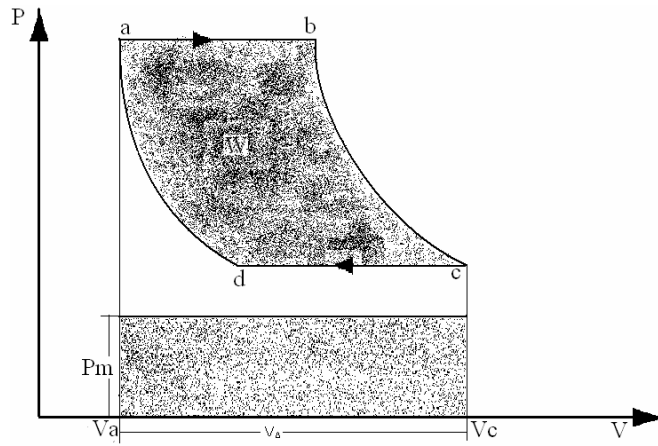
$$e = \frac{T_a - T_b}{T_a} \quad e = 1 - \frac{T_b}{T_a}$$

## PRESIÓN MEDIA

CICLO CARNOT:



CICLO ERICSSON:



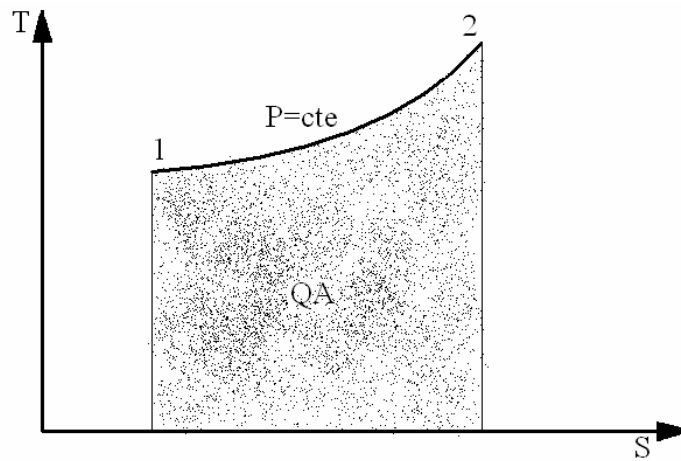
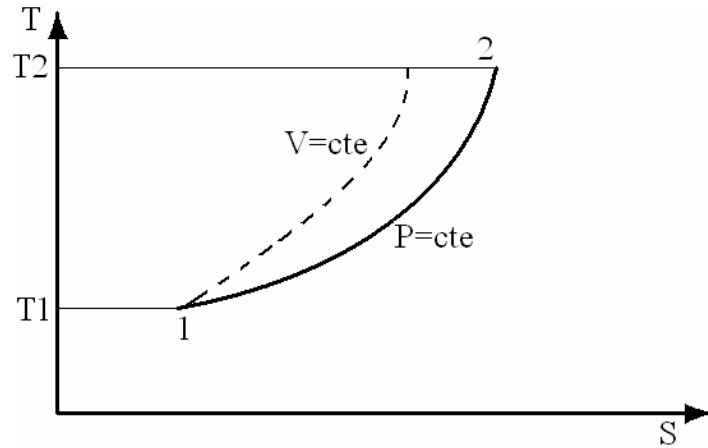
$$V_{\Delta} = V_c - V_a \quad [\text{m}^3, \text{ft}^3]$$

$$W = P_m V_{\Delta}$$

$$P_m = \frac{W}{V_{\Delta}} = \frac{W}{V_c - V_a} \quad [\text{Kg/cm}^2, \text{lb/in}^2, \text{N/m}^2]$$

## CICLO STIRLING:

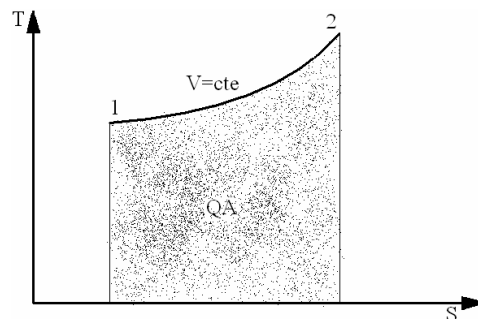
Formados por dos procesos a temperatura constante o isotérmicos y dos procesos a volumen constante o isométricos.



$$Q_A = \int_1^2 C_p dT$$

$$Q_A = C_{p1-2} (T_2 - T_1)$$

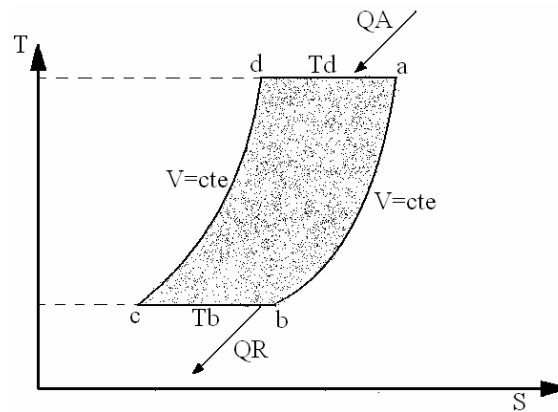
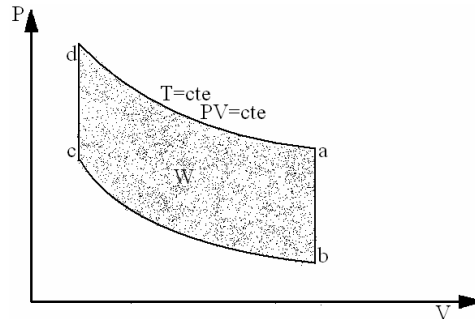
Para gas ideal



$$Q_A = \int_1^2 C_V dT$$

$$Q_A = C_{V1-2} (T_2 - T_1)$$

Para gas ideal



$$W_{d-a} = P_a V_a \ln \frac{V_a}{V_c}$$

$$W_{a-b} = 0 = \int_a^b P dv$$

$$V_a = V_b = V = cte$$

$$dv = 0$$

$$W_{b-c} = P_b V_b \ln \frac{V_c}{V_b} = -P_b V_b \ln \frac{V_b}{V_c} = -WRT_b \ln \frac{V_b}{V_c} = -WRT_b \ln \frac{V_a}{V_d}$$

$$V_a = V_b \quad V_c = V_d$$

$$W_{c-d} = 0$$

$$W = W_{d-a} + W_{a-b} + W_{b-c} + W_{c-d}$$

$$W = W_{d-a} + W_{c-d}$$

$$W = WRT_a \ln \frac{V_a}{V_d} - WRT_b \ln \frac{V_a}{V_d}$$

$$W = WR(T_a - T_b) \ln \frac{V_a}{V_d} \rightarrow \text{Gas Ideal}$$



Para el diagrama  $T - S$   $W = \sum Q$

$$Q_{da} = Q_A = T_a(S_a - S_d) \rightarrow C.S.$$

$$Q_{da} = Q_A = WRT_a \ln \frac{V_a}{V_d} \rightarrow \text{Gas Ideal}$$

$$Q_{ab} = \int_a^b dQ = \int_a^b c_v \cdot dt = C_{v_{ab}}(T_d - T_c) = C_{v_{ab}}(T_a - T_b)$$

$$W = Q_{da} + Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{cd}$$

$$W = Q_{da} + Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{cd}$$

$$W = T_a(S_a - S_d) + \int_a^b dQ + T_b(S_c - S_b) + \int_c^d dQ \quad C.sust.$$

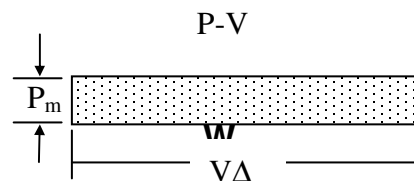
$$W = WRT_a \ln \frac{V_a}{V_d} + C_{v_{ab}}(T_b - T_a) + WRT_b \ln \frac{V_c}{V_b} + C_{v_{ca}}(T_a - T_b)$$

$$W = WRT_a \ln \frac{V_a}{V_d} - WRT_b \ln \frac{V_b}{V_c} \quad C_{v_{ab}} = C_{v_{cd}}$$

$$W = WR(T_a - T_b) \ln \frac{V_a}{V_d}$$

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{WR(T_a - T_b) \ln \frac{V_a}{V_d}}{WRT_a \ln \frac{V_a}{V_d}}$$

$$e = \frac{T_a - T_b}{T_a} = 1 - \frac{T_b}{T_a}$$



$$W = PmV_{\Delta}$$

$$Pm = \frac{W}{V_{\Delta}} = \frac{W}{V_a - V_d}$$

$$e = 1 - \frac{T_{mín}}{T_{máx}}$$

## CICLO DE 4 TIEMPOS

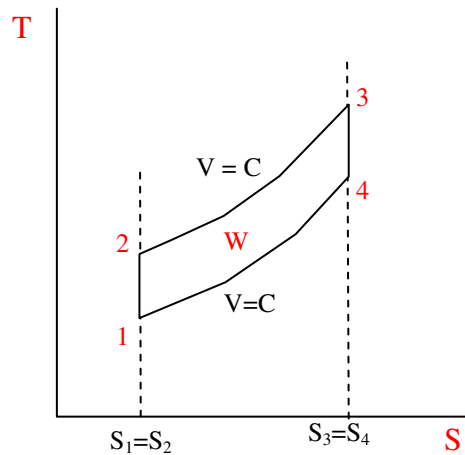
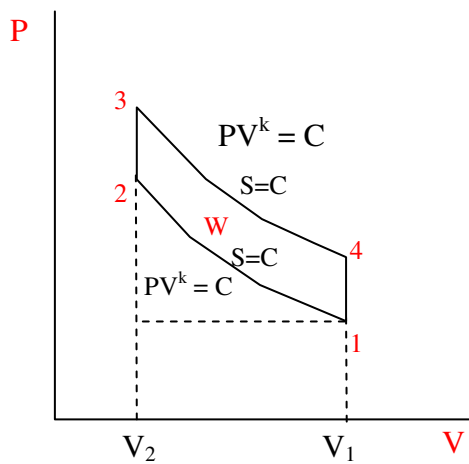
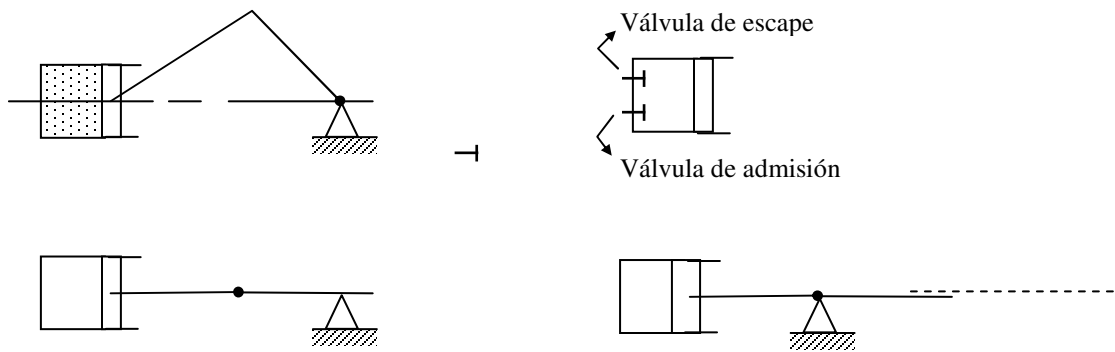
Es aquel en el que se requieren cuatro carreras del émbolo, a dos revoluciones, para completar el ciclo.

En la secuencia de sucesos son la mismas para cualquier motor de combustión interna de 4 tiempos, es decir:

1. Una carrera de aspiración, que introduce combustible y aire en un motor otto, o solo aire en un motor diesel.
2. Una carrera de compresión de la mezcla combustible – aire en el motor otto o del aire en el motor diesel.
3. El sentido del combustible que ya está dentro del cilindro, gracias a una bujía o bien, por auto ignición del combustible, el cual idealmente se inyecta dentro del cilindro, al final de la carrera de compresión en el motor diesel. La combustión desprende la energía que consume y utiliza el sistema.
4. Una carrera de expansión o carrera de potencia durante la cual se efectúa un trabajo positivo.
5. Una carrera de escape o expulsión durante la cual la mayor parte de los productos de combustión se sacan del cilindro y a continuación se repite el ciclo.

## CICLO OTTO

Prototipo ideal de la mayoría de los pequeños mototes de combustión interna. Es aquel en el que se supone que el proceso de combustión tiene lugar instantáneamente, en el punto muerto superior para producir una combustión a volumen constante, es decir un procesos en el que se agrega calor a volumen constante en el ciclo de aire equivalente. El motor otto se puede analizar como un sistema abierto o como un sistema cerrado.



Procesos  $1 \rightarrow 2$   $s = cte$   $\Delta s = 0$   $dt = 0$  ; para gas ideal  $PV^k = c$   
 $PV^k = c$

Procesos  $2 \rightarrow 3$   $v = cte$   $\Delta v = 0$   $dv = 0$   
 $v = cte$   $\Delta v = 0$   $dv = 0$

Procesos  $3 \rightarrow 4$   $s = cte$   $\Delta s = 0$   $ds = 0$

Procesos  $3 \rightarrow 4$   $v = cte$   $\Delta v = 0$   $dv = 0$

$$Q_A = U_3 - U_2 = \int_2^3 wCv \cdot dT = wCv_{23}(T_3 - T_2) [Kcal \text{ o } Btu]$$

$$q_A = u_3 - u_2 = \int_2^3 C_v \cdot dT = C_{v_{23}}(T_3 - T_2) \left[ \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \quad \text{o} \quad \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right]$$

$$Q_R = U_1 - U_4 = \int_4^1 W \cdot C_v \cdot dT = W C_{v_{41}}(T_1 - T_4) [\text{Kcal} \quad \text{o} \quad \text{Btu}]$$

$$q_R = u_1 - u_4 = \int_4^1 C_v \cdot dT = W C_{v_{41}}(T_1 - T_4) \left[ \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \quad \text{o} \quad \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right]$$

$$W = \sum Q = (U_3 - U_2) + (U_1 - U_4) = (U_3 - U_2) + (U_1 - U_4)$$

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{(U_3 - U_2) + (U_1 - U_4)}{(U_3 - U_2)} = \frac{(U_3 - U_2) - (U_4 - U_1)}{(U_3 - U_2)}$$

$$e = 1 - \frac{U_4 - U_1}{U_3 - U_2} = 1 - \frac{C_{v_{41}}(T_4 - T_1)}{C_{v_{23}}(T_3 - T_2)} \quad \text{Gas ideal}$$

$$e = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

$r_k$  =relación de compresión

$$r_k = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

$$\text{Estado } 1. P_1 V_1 = R T_1 \quad k = \frac{C_p}{C_v}$$

$$1 \rightarrow 2 \quad P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$$

$$2. P_2 V_2 = R T_2$$

$$\frac{1.}{2.} \cdot \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Del proceso:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^k$$

$$\left( \frac{V_2}{V_1} \right)^k \cdot \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \cdot \frac{1}{\left( \frac{V_2}{V_1} \right)^k}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{1-k}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{1}{\frac{V_1}{V_2}} \right)^{1-k} = \left[ \frac{1}{r_k} \right]^{1-k}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = r_k^{k-1}$$

2.  $P_2 V_2 = WRT_2$

$2 \rightarrow 3: V_2 = V_3$

3.  $P_3 V_3 = WRT_3$

$$\frac{P_2}{P_3} \cdot \frac{V_2}{V_3} = \frac{T_2}{T_3} \Rightarrow \frac{P_2}{P_3} = \frac{T_2}{T_3}$$

$3 \rightarrow 4: P_3 V_3^K = P_4 V_4^K$

4.  $P_4 V_4 = WRT_4$

$$\therefore \frac{P_3}{P_4} = \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^K$$

$$\Rightarrow \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^K \left( \frac{V_3}{V_4} \right) = \frac{T_3}{T_1}$$

$$r_k^K \cdot k_R^{-1} = \frac{T_3}{T_1}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = r_k^{k-1}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} \quad \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad e = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\frac{T_4}{T_1} - 1 = \frac{T_3}{T_2} - 1 \quad \frac{T_4 - T_1}{T_1} = \frac{T_3 - T_2}{T_2}$$

$$\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{r_k^{k-1}}$$

$$e = 1 - \frac{1}{r_k^{k-1}}$$

$$W = W_{34} + W_{12}$$

$$W_{34} = \frac{P_4 V_4 - P_3 V_3}{k-1} \quad W_{12} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{k-1}$$

$$W = \frac{(P_4 V_4 - P_3 V_3)}{k-1} + \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{k-1}$$

$$2 \rightarrow 3 \quad V = C$$

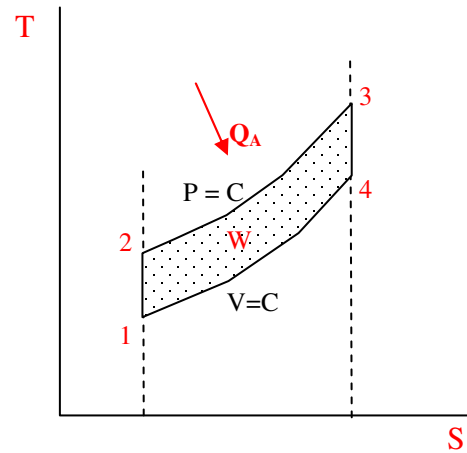
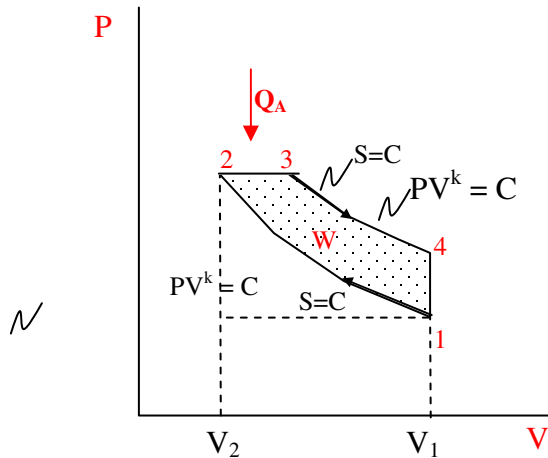
$$\int_2^3 dS = \int_2^3 \frac{dQ}{T}$$

$$S_3 - S_2 = \Delta s = \int_2^3 \frac{C_v dT}{T} = C_v \ln \frac{T_3}{T_2} \left[ \frac{Kcal}{Kg^\circ K} \cdot \frac{Btu}{lb^\circ R} \right]$$

$$S_3 - S_2 = S_4 - S_1$$

## CICLO DIESEL

2 Proceso Isentrópico	$S=cte$	$\Delta s=0$	$ds=0$	gas	ideal
$PV^k=cte$					
1 Proceso Isobárico	$P=cte$	$\Delta p=0$	$dp=0$		
1 Proceso Isentrópico	$V=cte$	$\Delta v=0$	$dV=0$		
	$v=cte$	$\Delta v=0$	$dv=0$		



1→2 Isentrópico

2→4  $p=C$

3→4  $s=C$

4→1  $v=C$

$$Q_A = H_3 - H_2 = \int_2^3 WCp \cdot dT = WCp_{23}(T_3 - T_2)$$

Cualquier Sustancia Gas Ideal

$$q_A = h_3 - h_2 = \int_2^3 Cp \cdot dT = Cp_{23}(T_3 - T_2) \left[ \frac{Kcal}{Kg} \text{ o } \frac{Btu}{lb} \right]$$

$$Q_R = U_1 - U_4 = \int_4^1 WC dT = WCV_{41}(T_1 - T_4)$$

$$q_R = u_1 - u_4 = \int_4^1 CV dT = CV_{41}(T_1 - T_4)$$

$$W = \sum Q = (H_3 - H_2) + (U_1 - U_2) \left[ \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}} \text{ o } \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right]$$

Cualquier Sustancia

$$W = \sum q = (h_3 - h_2) + (u_1 - u_4) \left[ \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}} \text{ o } \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right]$$

$$\text{Gas Ideal : } W = Cp(T_3 - T_2) - Cv(T_4 - T_1) \left[ \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}} \text{ o } \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right]$$

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{Cp(T_3 - T_2) - Cv(T_4 - T_1)}{Cp(T_3 - T_2)}$$

$$e = 1 - \frac{Cv}{Cp} \cdot \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

$$e = 1 - \frac{1}{K} \cdot \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

$$r_K = \text{relación de compresión} = \frac{V_1}{V_2}$$

$$r_C = \text{grado de admisión de combustible} = \frac{V_1}{V_2}$$

$$r_e = \frac{V_3}{V_2} = \text{relación de expansión} = \frac{V_1}{V_3}$$

$$r_K = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_1}{V_3} \cdot \frac{V_3}{V_2} = r_e \cdot r_C$$

$$r_K = r_e \cdot r_C$$



$$(1) P_1 V_1 = WRT_1$$

$$1 \rightarrow 2 \quad P_1 V_1^K = P_2 V_2^K \quad \frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^K$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^K = r_K^K$$

$$(2) P_2 V_2 = WRT_2$$

$$\frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad r_K^K \cdot r_K^{-1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = r_K^{K-1}$$

$$2 \rightarrow 3 \quad P_2 = P_3$$

$$P_3 V_3 = WRT_3$$

$$P_2 V_2 = WRT_2$$

$$\frac{P_3}{P_2} \cdot \frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = V_C$$

$$3 \rightarrow 4 \quad V_4 = V_1$$

$$\frac{V_3}{V_4} = \frac{V_3}{V_1}$$

$$\frac{V_1}{V_3} = R_e = \frac{V_3}{V_4}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = r_e^{K-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = r_e^{K-1} \quad T_2 = T_1 r_e^{K-1}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = r_{C0} \quad T_3 = T_2 r_C = T_1 r_K^{K-1} \cdot r_C$$

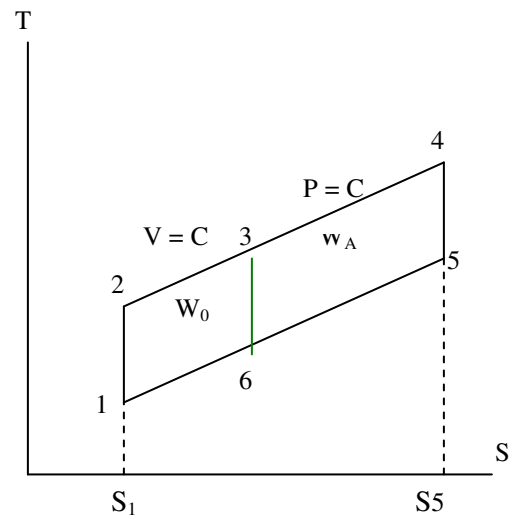
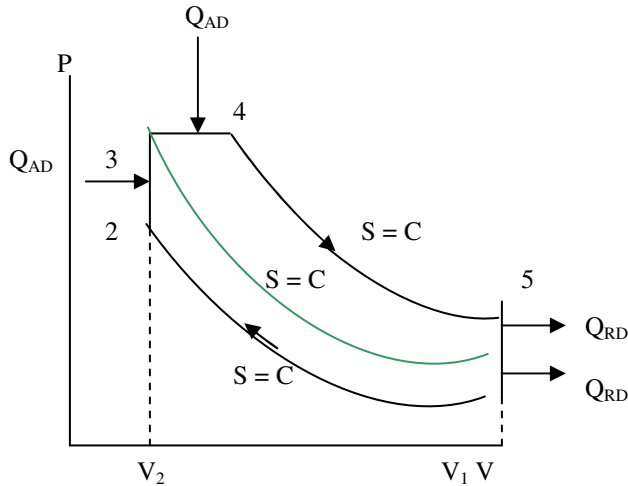
$$\frac{T_3}{T_4} = r_e^{K-1} \quad T_4 = \frac{T_3}{r_e^{K-1}} = \frac{T_C r_K^{K-1}}{r_e^{K-1}} \cdot T_1$$

$$e = 1 - \frac{1}{K} \cdot \frac{\frac{T_1 r_C r_K^{K-1}}{r_C^{K-1}} - T_1}{T_1 r_C r_K^{K-1} - T r_K^{K-1}}$$

$$e = 1 - \frac{1}{K} \cdot \frac{r_C r_K^{K-1} - r_e^{K-1}}{r_K^{K-1} (r_C - 1)}$$

$$e = 1 - \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{r_K^{K-1}} \cdot \frac{r_C \cdot r_K^{K-1} - r_e^{K-1}}{r_e^{K-1} (r_C - 1)} = f(r_K, r_e, r_C)$$

Ciclo Dual, Mixto o Seiliger



$$rk = \frac{V_1}{V_2} = \text{relación compresión}$$

Ciclo otto.1236

Ciclo diesel6345

$$Q_{AD} = \text{Area } a1236b \quad Q_{ad} = \text{areab6345c}$$

$$Q_{RO} = \text{Area } a16b \quad Q_{RD} = \text{areab65c}$$

$$\text{Gas ideal} \quad e = \frac{w}{Q_A}$$

$$Q_{AD} = \int_1^3 wcrdT = U_3 - U_2 = wcv_{23}(T_3 - T_2) \quad [\text{Kcal o Btu}]$$

$$Q_{AD} = H_4 - H_3 = \int_3^4 wcpdT = wcp_{34}(T_4 - T_3)$$

$$Q_{RO} = U_4 - U_6 = \int_6^4 wcvdT = wcv_{64}(T_1 - T_4)$$

$$Q_{RD} = U_6 - U_5 = \int_5^6 wcvdT = wcv_{56}(T_{61} - T_5)$$

$$Q_A = Q_{AO} + Q_{AD} = (U_3 - U_2) + (H_4 - H_3) \quad C.S.$$

$$Q_A = wC_{V2-3}(T_3 - T_2) + wC_{P3-4}(T_4 - T_3) \quad \text{Para gas ideal}$$

$$Q_R = Q_{RO} + Q_{RD} = U_1 - U_6 + U_6 - U_5 = U_1 - U_5 \quad \text{Para cualquier sustancia}$$

$$Q_R = wC_{V6-1}(T_1 - T_6) + wC_{V5-6}(T_6 - T_5)$$

$$C_{V6-1} = C_{V5-6}$$

$$Q_R = wC_V(T_1 - T_5)$$

$$W = \Sigma Q = U_3 - U_2 + H_4 - H_3 + U_1 - U_5$$

$$W = \Sigma Q = wC_V(T_3 - T_2) + wC_P(T_4 - T_3) + wC_V(T_1 - T_5)$$

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{Q_{AO} + Q_{AD} + Q_{RO} + Q_{RD}}{Q_{AO} + Q_{AD}} = \frac{(Q_{AO} + Q_{RO}) + (Q_{AD} + Q_{RD})}{Q_{AO} + Q_{AD}}$$

$$e = \frac{W_O}{Q_{AO} + Q_{AD}} + \frac{W_D}{Q_{AO} + Q_{AD}} = \frac{W_O}{Q_{AO}} \times \frac{Q_{AO}}{Q_{AO} + Q_{AD}} + \frac{W_D}{Q_{AD}} \times \frac{Q_{AD}}{Q_{AO} + Q_{AD}}$$

$$e = e_o \times \frac{Q_{AO}}{Q_{AO} + Q_{AD}} + e_D \times \frac{Q_{AD}}{Q_{AO} + Q_{AD}}$$

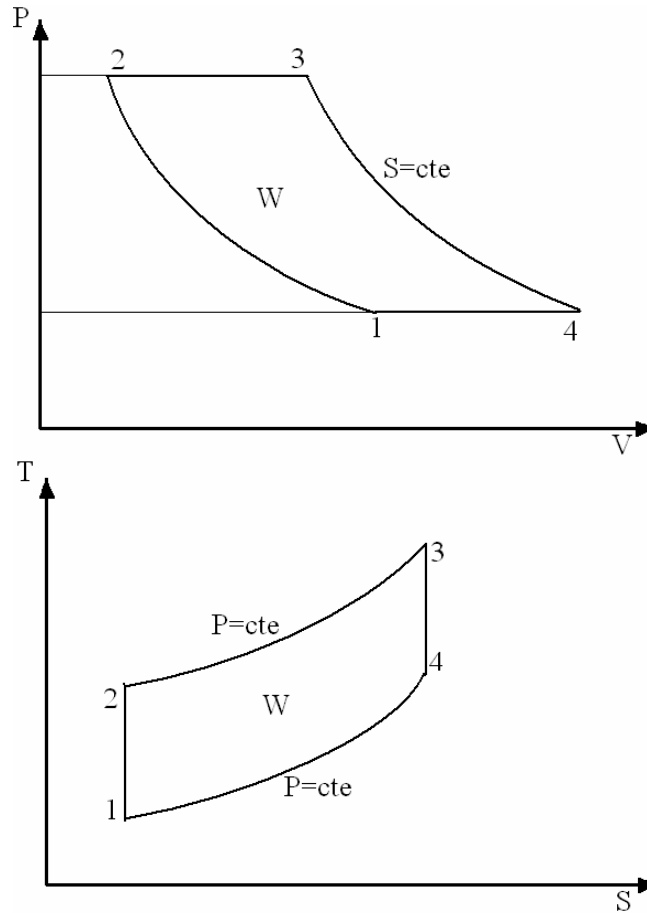
Para gas ideal:

$$e = e_o \times \frac{wC_V(T_3 - T_2)}{wC_V(T_3 - T_2) + wC_P(T_4 - T_3)} + e_D \times \frac{wC_P(T_4 - T_3)}{wC_V(T_3 - T_2) + wC_P(T_4 - T_3)}$$

### CICLO JOULE O BRAYTON

Formado por dos procesos a entropía constante y por dos procesos a presión constante:

$$\begin{array}{lll} s=\text{cte} & \Delta s=0 & ds=\text{cte} \\ P=\text{cte} & \Delta P=\text{cte} & dP=0 \end{array}$$



Procesos:

1-2	s=cte	Para gas ideal	$PV^K=cte$
2-3	P=cte		
3-4	s=cte	Para gas ideal	$PV^K=cte$
4-1	P=cte		

$$r_C = \frac{V_4}{V_3}$$

Relación de expansión

$$r_K = \frac{V_1}{V_2}$$

Relación de compresión

$$r_P = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$$

Relación de presiones

Proceso de 1-2:

$$P_1 V_1 = wRT_1$$

$$P_2 V_2 = wRT_2$$

$$P_1 V_1^K = P_2 V_2^K$$

$$\frac{V_1}{V_2} \times \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1}{V_2} \times \frac{1/P_2}{P_1}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = r_K \frac{1}{r_p} = \frac{r_K}{r_p} \quad \frac{V_1^K}{V_2^K} = \frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^K \quad r_p = r_K^K$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{r_K}{r_K^K} \quad \frac{T_1}{T_2} = r_K^{1-K} \quad r_p^{1/K} = r_K$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( r_p^{1/K} \right)^{1-K} = r_p^{\frac{1-K}{K}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{r_p^{\frac{1-K}{K}}} \quad \frac{T_2}{T_1} = r_p^{\frac{K-1}{K}} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left[ r_K^K \right]^{\frac{K-1}{K}} \quad \frac{T_2}{T_1} = r_K^{K-1}$$

Proceso 2-3:

$$P_2 V_2 = wRT_2 \quad P_3 V_3 = wRT_3 \quad P_2 = P_3$$

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

Proceso 3-4

$$P_3 V_3 = wRT_3 \quad P_4 V_4 = wRT_4 \quad P_3 V_3^K = P_4 V_4^K$$

$$\frac{V_4}{V_3} \times \frac{P_4}{P_3} = \frac{T_4}{T_3} = \frac{V_4}{V_3} \times \frac{1}{P_3/P_4} = r_c \frac{1}{r_p}$$

$$\frac{P_3}{P_4} = \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^K \quad r_p = r_c^K$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{r_c}{r_c^K}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = r_c^{k-1} \quad r_c = r_p^{1/k}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left[ r_p^{1/k} \right]^{k-1} \quad \frac{T_3}{T_4} = r_p^{\frac{k-1}{k}} \quad \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = r_c^{k-1} = \frac{T_2}{T_1} = r_k^{k-1} \quad r_c = r_k$$

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2}$$

Proceso 4-1:

$$P_4V_4 = wRT_4 \quad P_1V_1 = wRT_1 \quad P_4 = P_1$$

$$\frac{V_4}{V_1} = \frac{T_4}{T_1} = \frac{V_3}{V_2}$$

$$e = \frac{W}{Q_A}$$

$$Q_A = H_3 - H_2 = \int_2^3 wC_p dT$$

$$Q_A = wC_p (T_3 - T_2)$$

$$Q_R = H_1 - H_4 = \int_4^1 wC_p dT$$

$$Q_R = wC_p (T_1 - T_4) = -wC_p (T_4 - T_1)$$

$$W = \Sigma Q = (H_3 - H_2) + (H_1 - H_4) = (H_3 - H_2) - (H_4 - H_1)$$

$$e = \frac{(H_3 - H_2) - (H_4 - H_1)}{(H_3 - H_2)} = 1 - \frac{(H_4 - H_1)}{(H_3 - H_2)}$$

$$e = 1 - \frac{(h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

$$e = 1 - \frac{(h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad \text{Para cualquier sustancia}$$

$$e = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad \text{Para gas ideal}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} \quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \quad \frac{T_3}{T_2} - 1 = \frac{T_4}{T_1} - 1$$

$$\frac{T_3 - T_2}{T_2} = \frac{T_4 - T_1}{T_1}$$

$$\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1}} = \frac{1}{r_p^{\frac{K-1}{K}}} = \frac{1}{r_c^{K-1}} = \frac{1}{r_K^{K-1}}$$

$$e = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{K-1}{K}}} = 1 - \frac{1}{r_K^{K-1}} = 1 - \frac{1}{r_c^{K-1}}$$

$e$  Aumenta si  $r_p$  aumenta

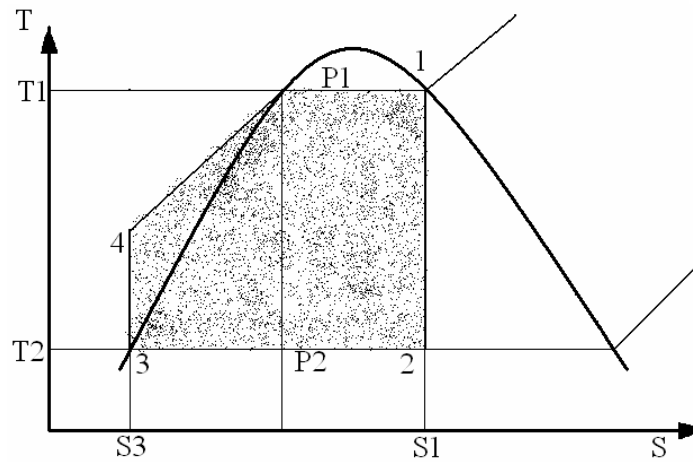
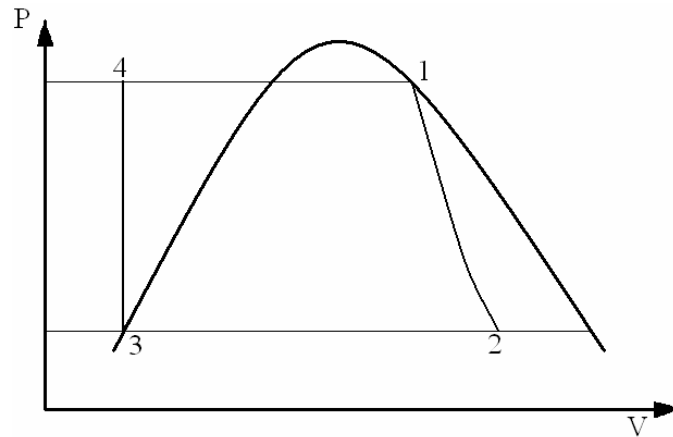
$e$  Aumenta si  $r_K$  aumenta

$e$  Aumenta si  $r_c$  aumenta

## CICLO RANKINE

Trabaja con vapor y esta compuesto por dos procesos a presión constante o isobaricos y por dos procesos a entropía constante o isentrópicos:

Dos procesos a presión constante:  $P = \text{cte}$        $\Delta P = 0$        $dP = 0$   
 Dos procesos a entropía constante:  $S = \text{cte}$        $\Delta S = 0$        $dS = 0$



Procesos:

1-2:  $S = \text{cte}$        $S_1 = S_2$   
 2-3:  $P = \text{cte}$        $P_2 = P_3$   
 3-4:  $S = \text{cte}$        $S_3 = S_4$   
 4-1:  $P = \text{cte}$        $P_4 = P_1$

$$Q_A = \text{Area } a34k1b$$

$$Q_A = \text{Area } a34kc + \text{area } ck1b$$

$$Q_A = Q_1 + Q_{\text{evaporación}}$$

$$Q_R = \text{Area } a32b$$

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{\Sigma Q}{Q_A} = \frac{Q_A - Q_R}{Q_A} = 1 - \frac{Q_R}{Q_A}$$

$$Q_A = H_1 - H_4 \quad [\text{Kcal ó Btu}]$$

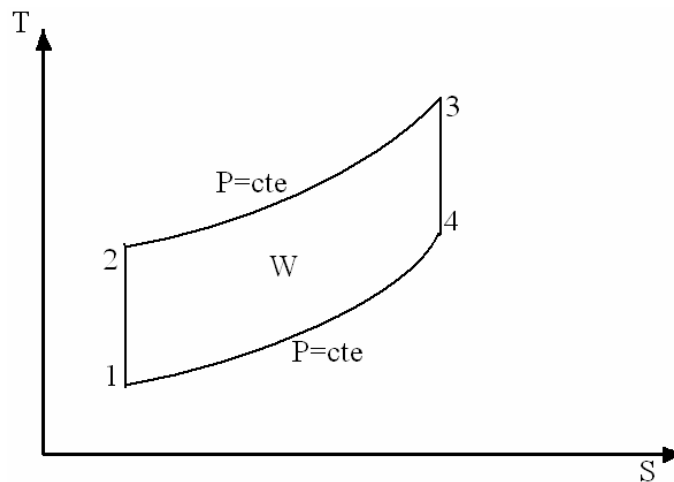
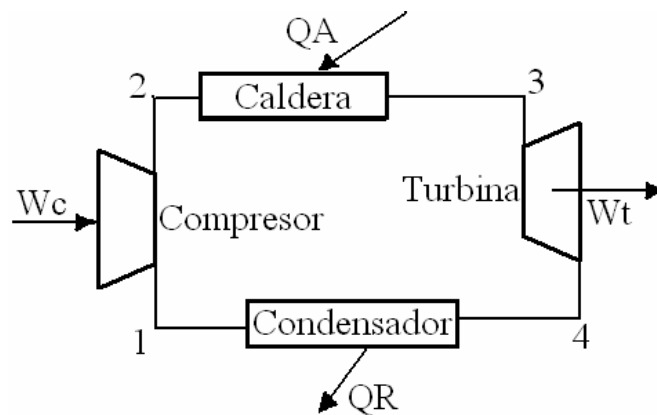
$$Q_A = h_1 - h_4 \quad [\text{Kcal/Kg ó Btu/lb}]$$

$$Q_R = H_2 - H_3$$

$$Q_R = h_2 - h_3$$

$$e = 1 - \frac{H_2 - H_3}{H_1 - H_4} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4}$$

### CICLO JOULE O BRAYTON



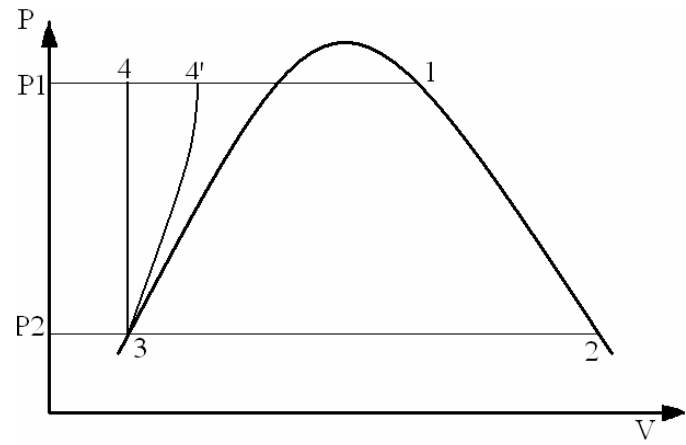
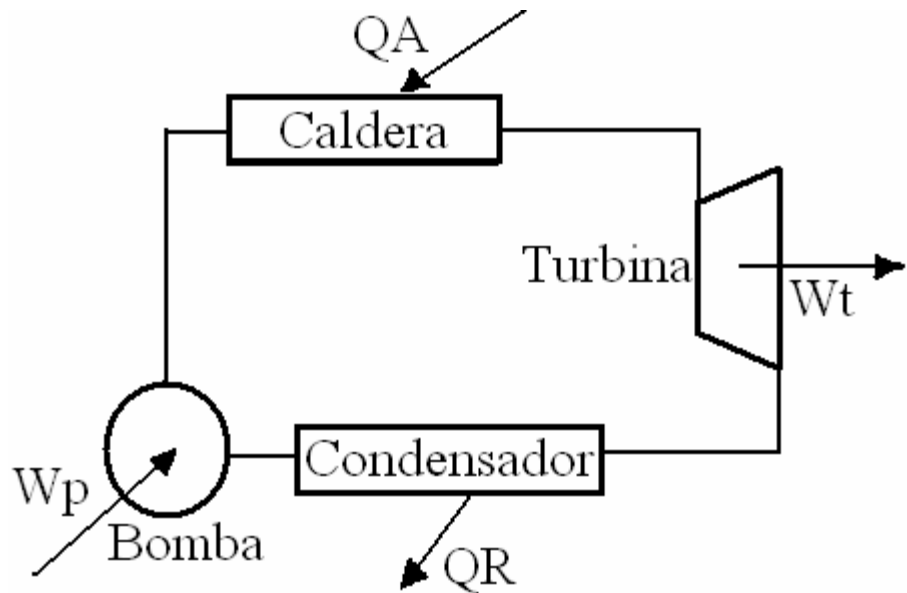
$$W_c + Q_A = W_t + Q_R$$

$$Q_A - Q_R = W_t - W_c$$

$$\Sigma Q = W_n$$



## CICLO RANKINE



$$Q_A + W_p = W_t + Q_R$$

$$Q_A - Q_R = W_t - W_p$$

$$\Sigma Q = W_n$$

Proceso 3-4:       $S = \text{cte}$     $S_4 = S_3$        $V = \text{cte}$

$$W_{3-4} = h_4 - h_3 = - \int_3^4 V dP$$

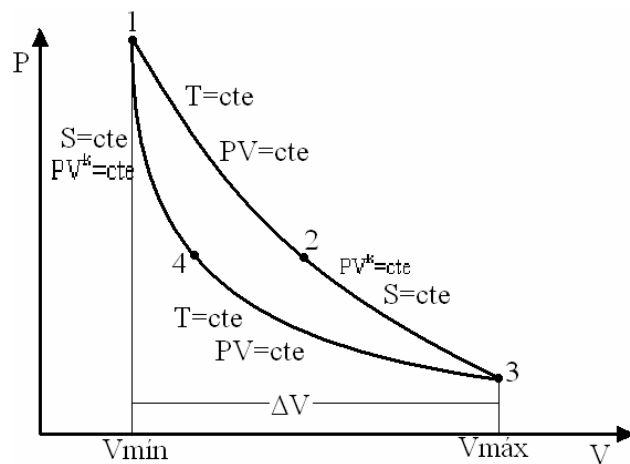
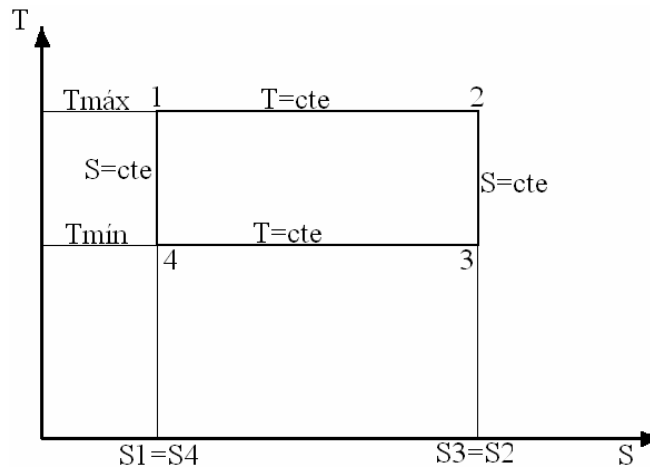
$$W_{3-4} = W_p \approx V_3 (P_4 - P_3) = h_4 - h_3$$

## EJERCICIO

El aire es la sustancia de trabajo en un ciclo carnot y se considera como gas ideal. Al principio de la expansión isotérmica la presión es de 300 [lb/in<sup>2</sup> abs.], el volumen de 5 [ft<sup>3</sup>] y la temperatura de 540 [°F]. La relación de expansión isotérmica  $r_t$  es 2 y la relación de compresión isentrópica es  $r_k = 5$ .

Hallar:

- La temperatura del sumidero y la presión en cada ángulo o punto del ciclo.
- El cambio de entropía en los procesos a temperatura constante.
- El calor suministrado al ciclo.
- El calor rechazado.
- Los HP's desarrollados si el volumen mínimo es 0.14 [m<sup>3</sup>/min].
- Rendimiento térmico  $e$ .
- Presión media efectiva.



Estado 1:

$$P_1 = 300 \text{ psia}$$

$$V_1 = 5 \text{ ft}^3$$

$$T_1 = 540 + 460 = 1000^\circ R = T_{m\acute{a}x}$$

Estado 2:

$$r_t = 2 = \frac{V_2}{V_1} \quad V_2 = r_t \times V_1 = 10 \text{ ft}^3$$

$$T_1 = T_2 = 1000^\circ R$$

$$P_1 V_1 = wRT_1 \quad P_2 V_2 = wRT_2 \quad P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} = 2 \quad P_2 = \frac{P_1}{2} = \frac{300}{2} = 150 \text{ psia}$$

Estado 3:

$$S_3 = S_2 :$$

$$P_2 V_2^K = P_3 V_3^K \quad \frac{P_2}{P_3} = \left( \frac{V_3}{V_2} \right)^K$$

$$P_2 V_2 = wRT_2 \quad P_3 V_3 = wRT_3$$

$$\frac{P_2}{P_3} \times \frac{V_2}{V_3} = \frac{T_2}{T_3} = r_k = 5$$

Estado 4:

$$P_4 V_4 = wRT_4$$

$$P_4 V_4 = P_3 V_3$$

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{V_3}{V_4}$$

$$P_4 V_4^k = P_1 V_1^k$$

$$P_1 V_1 = wRT_1$$

$$P_4 V_4 = wRT_4$$

$$\left( \frac{V_4}{V_1} \right)^K = \frac{P_1}{P_4} \quad r_k = \frac{V_4}{V_1} \quad 5^k = \frac{P_1}{P_4}$$

$$P_4 = \frac{P_1}{r_k^k} = \frac{300}{5^{1.4}} = 31.51 \text{ psia}$$

$$\frac{P_1}{P_4} \times \frac{V_1}{V_4} = \frac{T_1}{T_4} \quad r_k^k \left( \frac{P_1}{P_4} \right)^{\frac{1}{k}} = \frac{T_1}{T_4}$$

$$\frac{V_4}{V_1} = \left( \frac{P_1}{P_4} \right)^{\frac{1}{k}} \quad r_k^k r_k^{-1} = \frac{T_1}{T_4} = r_k^{k-1}$$

$$T_4 = \frac{1000}{5^{0.4}} = 525.2^\circ R$$

$$T_{m\acute{a}x} = 1000^\circ R$$

$$T_{m\acute{í}n} = 525.2^\circ R$$

$$\frac{P_2}{P_3} \times \frac{V_2}{V_3} = \frac{1000}{525.2} = 1.9$$

$$\left(\frac{V_3}{V_2}\right)^K \times \frac{1}{\frac{V_3}{V_2}} = \frac{T_2}{T_3} = \frac{T_1}{T_4} \quad \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{K-1} = \frac{T_2}{T_3} = \frac{T_1}{T_4}$$

$$\frac{V_3}{V_2} = \left(\frac{T_1}{T_4}\right)^{\frac{1}{K-1}} = 5 \quad K = \frac{C_c}{C_v} = 1.4$$

$$T_3 = T_4$$

$$\frac{V_3}{V_2} = 5 \quad V_3 = 5 \times 10 = 50 \text{ ft}^3 \quad V_4 = 5V_1 = 5 \times 5 = 25 \text{ ft}^3$$

$$P_1 = 300 \text{ psia}$$

$$P_2 = 150 \text{ psia}$$

$$\frac{P_2}{P_3} \times \frac{V_2}{V_3} = \frac{T_2}{T_3} \quad P_3 = P_2 \times \frac{V_2}{V_3} \times \frac{T_3}{T_2} = \frac{150}{5} \times \frac{525.2}{1000}$$

$$P_3 = 15.75 \text{ psia}$$

$$r_i = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \quad r_k = \frac{V_4}{V_1} = \frac{V_3}{V_2}$$

$$Q_A = Q_{1-2} = \frac{P_1 V_1}{j} \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$Q_A = \frac{300 \text{ lb/in}^2 \times 144 \text{ in}^2 / \text{ft}^2 \times 5 \text{ ft}^3}{778 \text{ lb-ft/Btu}} \ln 2$$

$$Q_A = 192.44 \text{ Btu}$$

$$Q_A = (S_2 - S_1) T_1 = 192.44 \text{ Btu}$$

$$(S_2 - S_1) = \Delta S_{1-2} = \frac{192.44 \text{ Btu}}{1000^\circ \text{ R}} = 0.19244 \text{ Btu/}^\circ \text{ R}$$

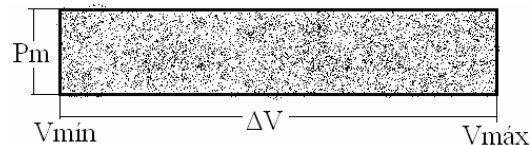
$$Q_R = (S_4 - S_3) T_4 = -(S_2 - S_1) T_4$$

$$Q_R = -0.19244 \text{ Btu/}^\circ \text{ R} \times 525^\circ \text{ R}$$

$$Q_R = -101.1 \text{ Btu}$$

$$W = \Sigma Q = 192.44 - 101.1 = 91.34 \text{ Btu} \times 778 \text{ lb-ft/Btu}$$

$$W = 71085.9 \text{ lb-ft}$$



$$P.m.e = \frac{W}{V_3 - V_1} = \frac{71085.9 \text{ lb-ft}}{(50 - 5) \text{ ft}^3} = 1579.6 \text{ lb/ft}^2$$

$$P.m.e = 1579.6 \text{ lb/ft}^2 \times \frac{1 \text{ ft}^2}{144 \text{ in}^2} = 10.97 \text{ lb/in}^2$$

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{91.34 \text{ Btu}}{192.44 \text{ Btu}} = 0.47$$

$$0.14 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \left( \frac{3.28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} \right)^3 = 5 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

$$W' = 91.34 \text{ Btu} / \text{min} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ HP} \cdot \text{h}}{2.54 \text{ Btu}}$$

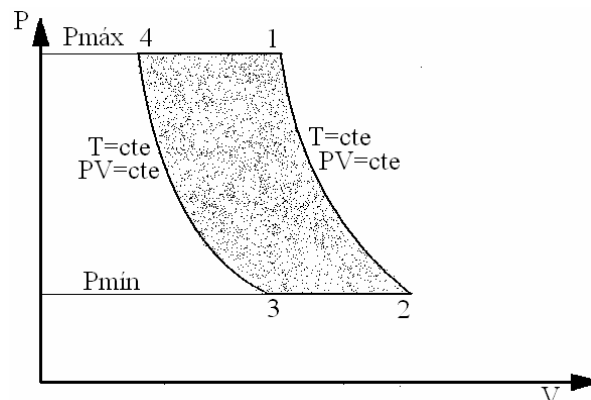
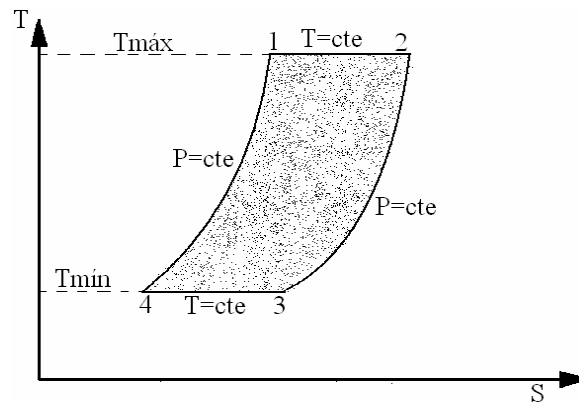
$$W' = 2.15 \text{ HP}$$

## EJERCICIO

Se usa aire como sustancia de trabajo en un ciclo de Ericsson. Las propiedades al principio de la expansión isotérmica son:

$P=100$  [psia],  $V=5$  [ $\text{ft}^3$ ],  $T=540$  [ $^{\circ}\text{F}$ ]. Para una  $r_t$  de 2 y una temperatura mínima de ciclo de  $40$  [ $^{\circ}\text{F}$ ], hallar:

- Cambio de entropía durante el proceso isotérmico.
- Calor añadido.
- Calor rechazado.
- Trabajo.
- Rendimiento térmico.
- Volumen al final de la expansión isotérmica y la relación de expansión general.
- Presión media efectiva.



Estado 1:

$$P_1 = 100 \text{ psia} \quad V_1 = 5 \text{ ft}^3 \quad T_1 = 540 + 640 = 1000^\circ R$$

Proceso 1-2:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$r_1 = \frac{V_2}{V_1} = 2 \quad V_2 = 2 \times 5 = 10 \text{ ft}^3$$

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} = 100 \times \frac{5}{10} = 50 \text{ psia}$$

Estado 2:

$$T_2 = 1000^\circ R \quad P_2 = 50 \text{ psia} \quad V_2 = 10 \text{ ft}^3$$

Proceso de 2-3:  $P_2 = P_3 = 50 \text{ Psia}$

$$P_2 V_2 = wRT_2$$

$$P_3 V_3 = wRT_3$$

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{T_2}{T_3}$$

$$T_{MIN} = 40 + 460 = 500^\circ R = T_3 = T_4$$

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{1000}{500} = 2$$

$$V_3 = \frac{1}{2} * 10 = 5$$

Estado 3

$$T_3 = 500^\circ R$$

$$V_3 = 5 \text{ ft}^3$$

$$P_3 = 50 \text{ Psia}$$

Proceso de 3-4:

$$T_3 = T_4 = 500^\circ R$$

$$P_3 V_3 = P_4 V_4$$

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{V_4}{V_3} = \frac{50}{100} = \frac{1}{2}$$

$$V_4 = 2.5 \text{ ft}^2$$

Estado 4

$$T_4 = 500^{\circ} R$$

$$V_4 = 2.5 \text{ ft}^2$$

$$P_4 = 100 \text{ Psia}$$

$$Q_A = Q_{1-2} = \frac{P_1 V_1}{J} \ln \frac{V_1}{V_2} = \frac{100 * 144 * 5}{778} \ln 2 = 64.14 \text{ BTU}$$

$$Q_{1-2} = (S_2 - S_1) T_1 \Rightarrow S_2 - S_1 = \frac{64.14 \text{ BTU}}{1000^{\circ} R} = 0.06414 \frac{\text{BTU}}{^{\circ} R}$$

$$Q_{3-4} = \frac{P_3 V_3}{J} \ln \frac{V_4}{V_3} = \frac{50 * 144 * 5}{778} \ln \frac{1}{2} = -32.07 \text{ BTU} = Q_R$$

$$Q_{2-3} = \int_2^3 w C_p dT = w C_{p_{2-3}} (T_3 - T_2)$$

$$Q_{4-1} = \int_4^1 w C_p dT = w C_{p_{4-1}} (T_1 - T_4)$$

$$C_{p_{2-3}} = C_{p_{4-1}}$$

$$Q_{2-3} = w C_p (T_3 - T_2)$$

$$Q_{4-1} = w C_p (T_4 - T_1) = w C_p (T_2 - T_3) = -w C_p (T_3 - T_2)$$

$$Q_{2-3} + Q_{4-1} = 0$$

$$W = \sum Q = Q_A + Q_R$$

$$W = 32.07 \text{ BTU}$$

$$e = \frac{W}{Q_A} = 50\%$$

$$r_C = \frac{V_1}{V_2} = 2$$

$$r_K = \frac{V_3}{V_4} = 2$$

$$P.m.e = \frac{W}{V_D} = \frac{W}{V_2 - V_1} = \frac{32.14 \text{ BTU}}{(10 - 5) \text{ lb}} * \frac{778 \text{ lb-ft}}{\text{BTU}} * \frac{1 \text{ ft}^2}{144 \text{ in}^2}$$

$$P.m.e = 34.72 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

## EJERCICIO

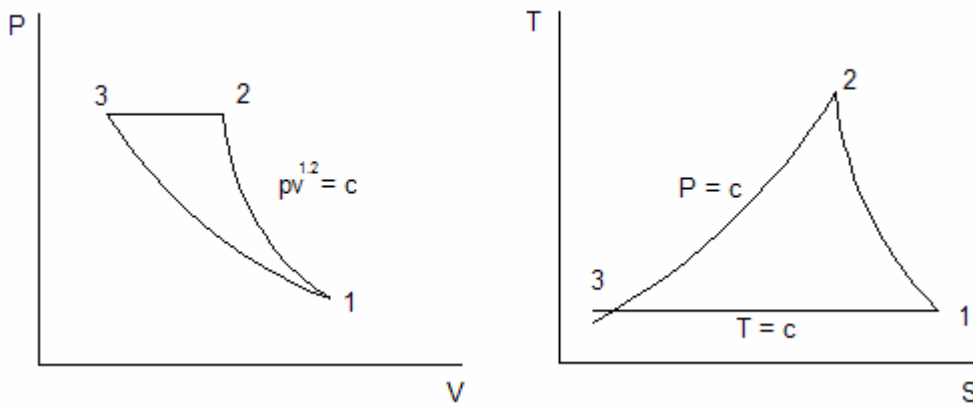
Una libra de argón a 20 Psia y 200° F se comprime politrópicamente con  $PV^{1.2} = C$  Hasta 100 Psia. A continuación se enfría a presión constante hasta la temperatura inicial y luego se expandiona isotérmicamente hasta su estado inicial

a) Trácese los procesos en los planos VP y TS y obténganse ecuaciones para calor añadido, calor rechazado y potencia media.

b) obtener valores numéricos de  $V_1, V_2, Q_R, Q_A, W, PM$  para el Argón

$$R = 38.68 \frac{\text{lb-ft}}{\text{lb}^\circ\text{R}}, C_p = 0.1244 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{R}}, C_v = 0.0747 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{R}}, K = 1.665$$

### DIAGRAMAS PV Y TS



$$P_1 = 20 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \text{ abs}$$

$$T_1 = 200 + 460 = 660$$

Proceso de 1-2: compresión politrópica

$$P_1 V_1^{1.2} = P_2 V_2^{1.2}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{1.2} = \frac{100}{20} = 5$$



$$\frac{V_1}{V_2} = 5^{\frac{1}{1.2}}$$

$$P_1 V_1 = wRT_1$$

$$P_2 V_2 = wRT_2$$

$$\frac{P_2}{P_1} \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{1.2-1}$$

$$\left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{1.2-1} \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 5^{\frac{1.2-1}{1.2}}$$

Estado 2

$$P_2 = 100 \text{ Psia}$$

$$T_2 = 660(5)^{\frac{1.2-1}{1.2}} = 862.8^{\circ} R$$

Estado 3

$$P_3 = P_2 = 100 \text{ Psia}$$

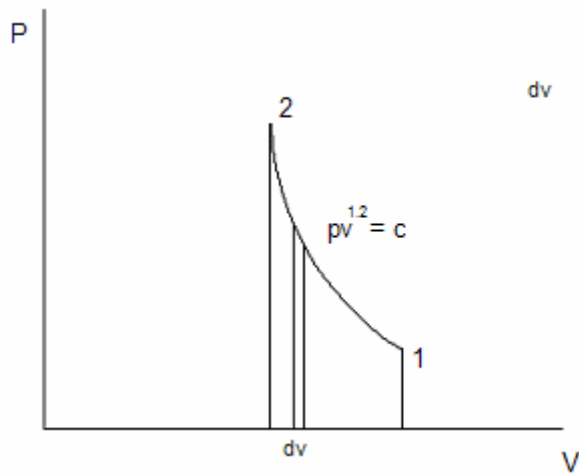
$$T_3 = T_1 = 660^{\circ} R$$

$PV = wRT$  Gas ideal

$$V_1 = \frac{wRT_1}{P_1} = \frac{1 \text{ lb} * 38.68 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{lb}} * 660^{\circ} R}{20 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} * 144 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2}} = 8.86 \text{ ft}^3$$

$$V_2 = \frac{V_1}{5^{\frac{1}{1.2}}} = \frac{8.86}{5^{\frac{1}{1.2}}} = 2.32 \text{ ft}^3$$

$$V_3 = \frac{wRT_3}{P_3} = \frac{11b * 38.68 \frac{lb-ft}{lb} * 660^{\circ} R}{100 \frac{lb}{in^2} * 144 \frac{in^2}{ft^2}} = 1.76 ft^3$$



$$dW = Pdv$$

$$W_{1-2} = \int_1^2 dW = \int_1^2 Pdv = \int_1^2 \frac{c}{v^{1.2}} dv$$

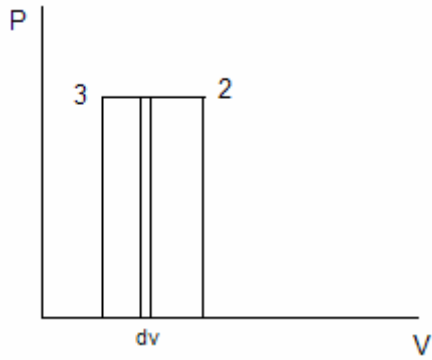
$$W_{1-2} = C \int_1^2 V^{-1.2} dv = c \left. \frac{V^{-1.2+1}}{-1.2+1} \right|_2^1$$

$$W_{1-2} = -\frac{P_1 V_1^{1.2}}{0.2} \left[ \frac{1}{V_2^{0.2}} - \frac{1}{V_1^{0.2}} \right]$$

$$W_{1-2} = -\frac{1}{0.2} [P_2 V_2 - P_1 V_1]$$

$$W_{1-2} = -5[(100 * 144 * 2.32) - (20 * 144 * 8.86)]$$

$$W_{1-2} = -39456 lb-ft$$



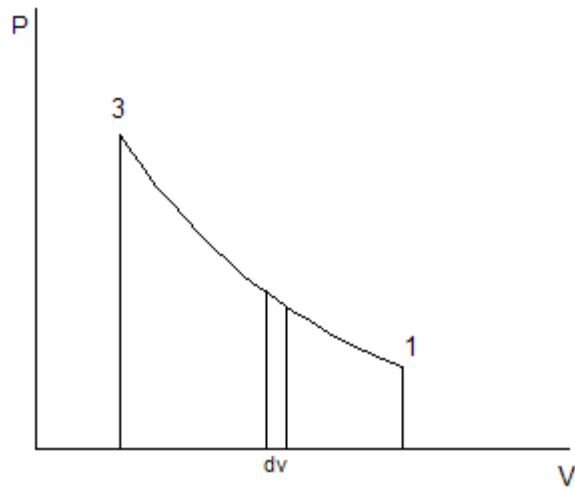
$$dW = Pdv$$

$$W_{2-3} = \int_2^3 dW = \int_2^3 Pdv = P \int_2^3 dv$$

$$W_{2-3} = P(V_3 - V_2)$$

$$W_{2-3} = 100 * 144 * (1.76 - 2.32)$$

$$W_{2-3} = -8064 \text{ lb-ft}$$



$$dW = Pdv$$

$$W_{3-1} = \int_3^1 dW = \int_3^1 Pdv = \int_3^1 \frac{c}{v} dv = c \int_3^1 \frac{dv}{v} = c \ln v \Big|_3^1$$

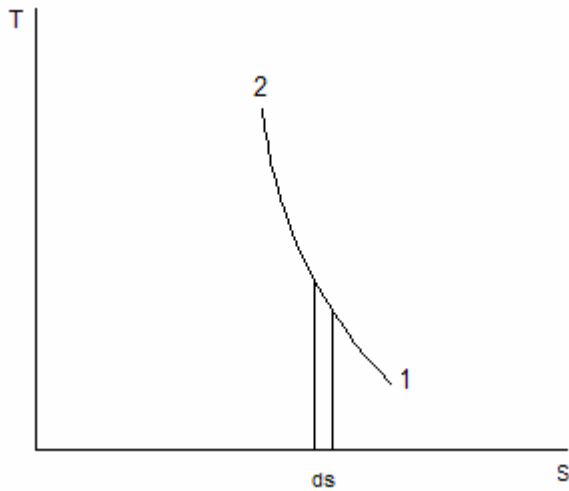
$$W_{3-1} = c \ln \frac{V_1}{V_3} = P_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_3}$$

$$W_{3-1} = 20 * 144 * 8.86 \ln \frac{8.86}{1.76}$$

$$W_n = W_{1-2} = W_{2-3} = W_{3-1}$$

$$W_n = -8.07 \text{ BTU}$$

Proceso 1-2



$$dQ = Tds$$

$$Q_{1-2} = \int_1^2 Tds$$

$$dQ = wC_n dT$$

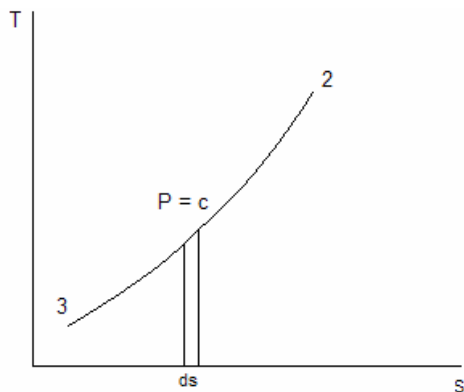
$$Q_{1-2} = \int_1^2 wC_n dT$$

$$C_n = C_v \frac{K - n}{1 - n} = \text{Calor específico para proceso politrópico gas ideal}$$

$$Q_{1-2} = 1lb * 0.0747 \frac{BTU}{lb^\circ R} * \frac{1.665 - 1.2}{1 - 1.2} (862.8 - 660)$$

$$Q_{1-2} = -35.22 BTU$$

proceso 2 a 3



$$dQ = Tds$$

$$Q_{2-3} = \int_2^3 Tds$$

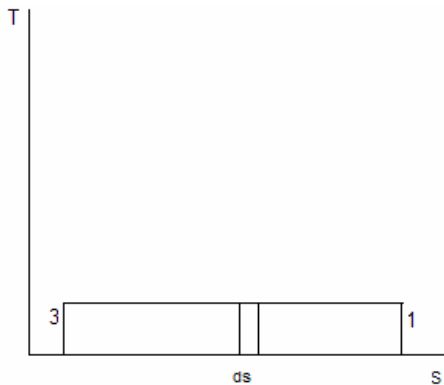
$$dQ = wC_p dT$$

$$Q_{2-3} = \int_1^2 wC_p dT = wC_p (T_3 - T_2)$$

$$Q_{2-3} = 1lb * 0.1244 \frac{BTU}{lb^{\circ}R} * (660 - 862.8)^{\circ}R$$

$$Q_{2-3} = -25.2 BTU$$

Proceso 3-1



$$dQ = Tds$$

$$Q_{3-1} = \int_3^1 Tds$$

$$dQ = wCdT$$

$$Q_{3-1} = \frac{P_3 V_3}{J} \ln \frac{V_1}{V_3} = \frac{100 * 144 * 1.76}{778} \ln \frac{8.86}{1.76} = 52.66 BTU$$

$$Q_A = Q_{3-1} = \frac{P_3 V_3}{J} \ln \frac{V_1}{V_3}$$

$$Q_R = Q_{1-2} + Q_{3-1} = -35.22 - 25.2 = -60.42 BTU$$

$$W = \sum Q = Q_A + Q_R$$

$$W = 52.66 - 60.42 = -7.76 BTU$$

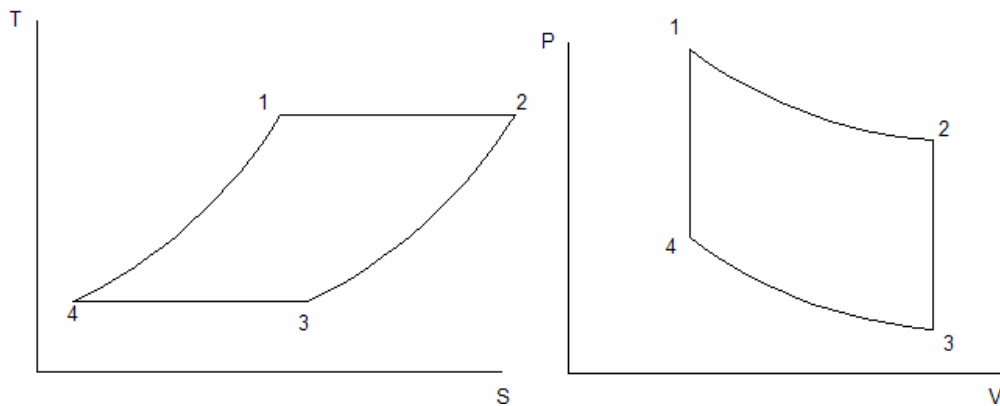
$$P.m.e = \frac{W}{V_D} = \frac{6278 lb - ft}{(8.86 - 1.76) ft^3} * \frac{1 ft^2}{144 in^2} = 6.14 \frac{lb}{in^2}$$

## EJERCICIO

Un ciclo stirling usa aire como sustancia de trabajo. Al comienzo de la expansión isotérmica la presión es de  $21.1 \frac{kg}{cm^2}$  abs, el volumen  $0.14m^3$  y la temperatura de  $282^\circ C$  La relación de expansión isotérmica es de 2. Hallar :

- La temperatura del sumidero y las condiciones en todos los vértices del ciclo
- El cambio de entropía durante el proceso isotérmico
- Trabajo, rendimiento térmico, y la presión media efectiva.

### DIAGRAMAS



Estado 1

$$P_1 = 21.1 \frac{kg}{cm^2}$$

$$V_1 = 0.14m^3$$

$$T_1 = 282 + 273 = 555^0 K$$

$$r_i = 2 = \frac{V_2}{V_1}$$

$$r_k = \frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1} = 2$$

Proceso 1-2

$$T_2 = T_1 = 555^0 K$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = 10.55 \frac{kg}{cm^2}$$

## Estado 2

$$P_2 = 10.55 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$V_2 = 0.28 \text{m}^3$$

$$T_2 = 555^0 \text{K}$$

## De 2-3

$$V_3 = V_2 = 0.28 \text{m}^3$$

$$P_2 V_2 = wRT_2$$

$$P_3 V_3 = wRT_3$$

$$\frac{P_2 V_2}{P_3 V_3} = \frac{T_2}{T_3}$$

## De 3-4

$$T_3 = T_4$$

$$P_3 V_3 = P_4 V_4$$

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{V_4}{V_3} = \frac{1}{r_k} = \frac{1}{2}$$

## De 4-1

$$V_4 = V_1 = 0.14 \text{m}^3$$

$$P_4 V_4 = wRT_4$$

$$P_1 V_1 = wRT_1$$

$$\frac{P_4 V_4}{P_1 V_1} = \frac{T_4}{T_1}$$

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{T_4}{T_1}$$

$$\frac{P_2}{P_3} = \frac{T_2}{T_3} = \frac{T_1}{T_4} = \frac{P_1}{P_4}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} = \frac{1}{2}$$

$$Q_A = Q_{1-2} = \frac{P_1 V_1}{J T_1} \ln \frac{V_1}{V_2} = \frac{21.1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 10000 \frac{\text{cm}}{\text{m}} * 0.14 \text{m}}{427 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kcal}} * 555^\circ \text{K}} \ln 2 = 0.086 \frac{\text{kcal}}{^\circ \text{K}}$$

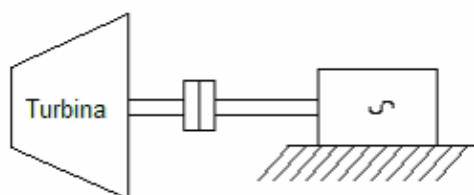
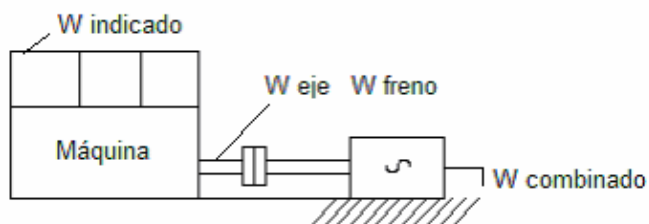
$$W = Q_A + Q_R = \frac{P_1 V_1}{J} \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{P_3 V_3}{J} \ln \frac{V_4}{V_3}$$

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{Q_A + Q_R}{Q_A} = 1 + \frac{Q_R}{Q_A} = 1 - \frac{\frac{P_1 V_1}{J} \ln \frac{V_2}{V_1}}{\frac{P_3 V_3}{J} \ln \frac{V_4}{V_3}}$$

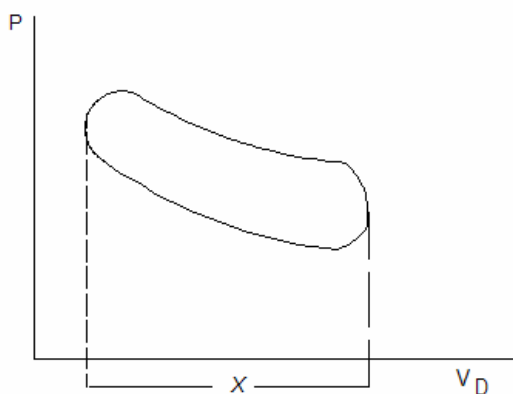
$$e = 1 - \frac{P_1 V_1}{P_3 V_3}$$

$$P.m.e = \frac{W}{V_D} = \frac{W}{V_2 - V_1}$$

## MEDIDA DEL TRABAJO



## DIAGRAMA DEL INDICADOR





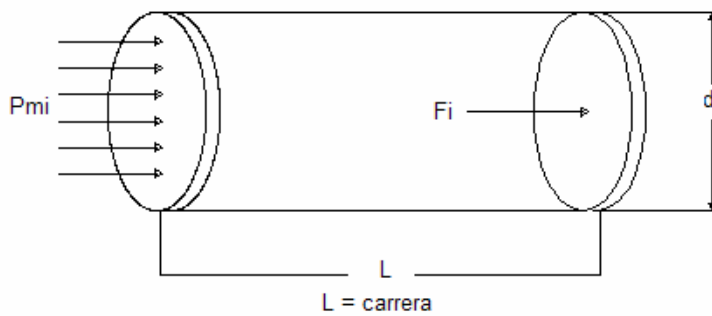
$$P_{mi} = \frac{\text{presión - media - indicada}}{x} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}, \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \right] \quad P_{mi} = \frac{\text{área} * \text{factor}}{x}$$

$$W_K \angle W_B \angle W_I \angle W$$

Movimiento alternativo

$$W_K \angle W_B \angle W :$$

Turbina

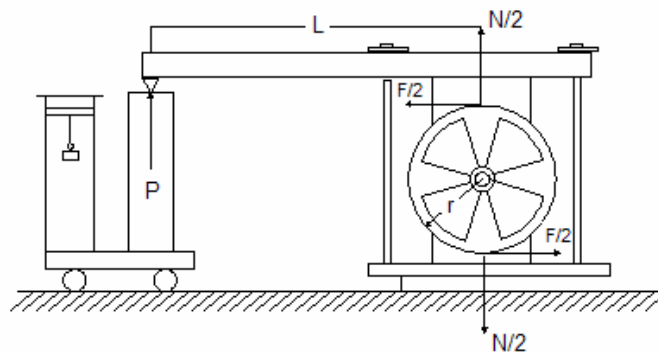


$$F_I = PMI * A = PMI * \frac{\pi d^2}{4} [\text{kg} \text{ ó } \text{lb}] \text{ fuerza indicada}$$

$$W_I = F_I L = PMI * A * L [\text{kgm} \text{ ó } \text{lb} - \text{ft}]$$

$$\dot{W}_I = PMI * A * L * N \left[ \frac{\text{kgm}}{\text{min}} \text{ ó } \frac{\text{lb} - \text{ft}}{\text{min}} \right]$$

## FRENO PRONY



$$D = 2R$$

$T = \text{Par} - \text{del} - \text{freno}$

$$T = \frac{F}{2} D = (L - \text{torque}) [m - \text{kg}, \text{ft} - \text{lb}, N - \text{m}]$$

$W_B = \text{Trabajo} - \text{al} - \text{freno}$

$$W_B = 2\pi T = 2\pi \frac{F}{2} D = \pi F D [kg - m, lb - \text{ft}, N - m = J]$$

Donde

$$n = R.P.M \quad \dot{W} = T\omega$$

$$\dot{W} = 2\pi \frac{T}{n} \left[ \frac{kg - m}{\text{min}}, \frac{lb - \text{ft}}{\text{min}}, \frac{J}{\text{min}} \right]$$

**Poder calorífico del combustible:** cantidad de calor desprendido al quemar una unidad de masa de combustible

$$q_L = \text{Poder calorífico inferior} \left[ \frac{kcal}{kg}, \frac{BTU}{lb_{comb}}, \frac{kJ}{kg} \right]$$

$$q_H = \text{Poder calorífico superior} \left[ \frac{kcal}{kg}, \frac{BTU}{lb_{comb}}, \frac{kJ}{kg} \right]$$

Relación combustible aire

$$r_{c/a} \left[ \frac{kgc}{kga}, \frac{lbc}{lba} \right]$$

$$q_L * r_{c/a} \left[ \frac{kcal}{kga}, \frac{BTU}{lba} \right]$$

$$\omega_f \left[ \frac{kgc}{CV - h}, \frac{kgc}{kW - h}, \frac{lbc}{HP - h}, \frac{lbc}{kW - h} \right]$$

$$\omega_i = \text{Consumo específico de combustible indicado} \left[ \frac{kgc}{CV_i - h}, \frac{lbc}{HP_i - h} \right]$$

$$\omega_B = \text{Consumo específico al freno} \left[ \frac{kgc}{CV_B - h}, \frac{lbc}{HP_B - h} \right]$$

$$\omega_k = \text{Consumo específico combinado} \left[ \frac{kgc}{kW-h}, \frac{lbc}{kW-h} \right]$$

### GASTO O CONSUMO ESPECIFICO DE CALOR

$$GEC_I = q_L \times W_I \left[ \frac{Kcal}{kg-\text{°C}} \times \frac{Kg-\text{°C}}{CV_I-h} = \frac{Kcal}{CV_I-h} \right]$$

$$\left[ \frac{Btu}{Lb-\text{°C}} \times \frac{Lb-\text{°C}}{hp_f-h} = \frac{Btu}{hp_f-h} \right]$$

$$GEC_B = q_L \times W_B \left[ \frac{Kcal}{CV_B-h}; \frac{Btu}{hp_B-h} \right]$$

$$GEC_k = q_L \times W_k \left[ \frac{Kcal}{Kw-h}; \frac{Btu}{Kw-h} \right]$$

$$\text{Rendimiento térmico: } e = \frac{\text{Trabajo}}{E_{\text{cargable-o-consumida}}} = \frac{W}{E_c}$$

$$\text{Ciclo: } e = \frac{W}{Q_A} \quad e_I, e_B, e_K,$$

$$e_I = \frac{W_I}{E_c} \quad ; \quad e_B = \frac{W_B}{E_c} \quad ; \quad e_K = \frac{W_K}{E_c}.$$

$$W_I = \left[ \frac{Kcal}{Kg} \right] \quad E_c = q_o \left[ \frac{Kcal}{Kg} \right]$$

### RENDIMIENTO TÉRMICO EN FUNCIÓN DEL GASTO ESPECIFICO DE CALOR

$$632.5 \frac{Kcal}{cv-h}; \quad 860 \frac{Kcal}{kW-h}; \quad 2544 \frac{Btu}{hp-h}; \quad 3412 \frac{Btu}{kW-h}$$

$$e_I = \frac{632.5}{W_I \times q_L} \frac{\frac{\text{kcal}}{\text{cv} - \text{h}}}{\frac{\text{kcal}}{\text{cv}_I - \text{h}}} \quad \text{o} \quad e_I = \frac{2544}{W_I \times q_L} \frac{\frac{\text{Btu}}{\text{hp} - \text{h}}}{\frac{\text{Btu}}{\text{hp}_I - \text{h}}}$$

$$e_B = \frac{632.5}{W_B \times q_L} \frac{\frac{\text{kcal}}{\text{cv} - \text{h}}}{\frac{\text{kcal}}{\text{cv}_I - \text{h}}} \quad \text{o} \quad e_B = \frac{2544}{W_B \times q_L} \frac{\frac{\text{Btu}}{\text{hp} - \text{h}}}{\frac{\text{Btu}}{\text{hp}_I - \text{h}}}$$

$$e_k = \frac{632.5}{W_k \times q_L} \frac{\frac{\text{kcal}}{\text{kW} - \text{h}}}{\frac{\text{kcal}}{\text{kW} - \text{h}}} \quad \text{o} \quad e_k = \frac{3412}{W_k \times q_L} \frac{\frac{\text{Btu}}{\text{kW} - \text{h}}}{\frac{\text{Btu}}{\text{kW} - \text{h}}}$$

## RENDIMIENTO DE MAQUINA O MOTOR

$$\eta = \frac{W_{\text{real}}}{W_{\text{ideal}}}$$

$$\eta_I = \frac{W_I}{W}; \quad \eta_B = \frac{W_B}{W}; \quad \eta_k = \frac{W_k}{W}$$

$$e > e_I > e_B > e_k \quad \eta_I > \eta_B > \eta_k$$

RENDIMIENTO MECÁNICO =  $\eta_M$  Basado en las perdidas

$$\eta_M = \frac{W_B}{W_I} \quad \eta_B = \frac{W_k}{W_B}$$

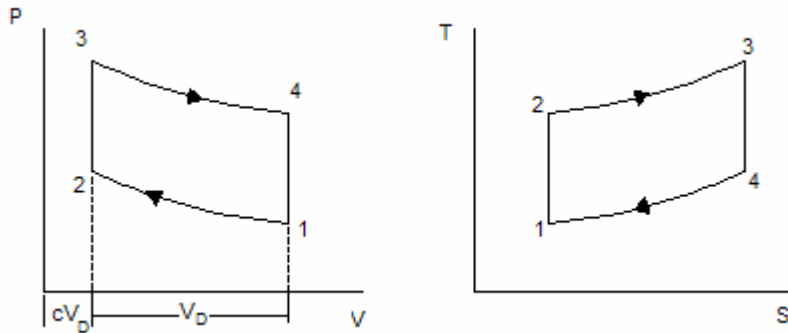
## EJERCICIO

Un motor ideal Otto con un espacio 15% muerto, trabaja con 20 lb por minuto de aire, inicialmente a 14 Psia y 120 °F, utiliza una relación combustible aire de 0.0556 lb<sub>c</sub>/lb<sub>a</sub> con un combustible de poder calorífico inferior de 19000 BTU/lb. Determinar

- Su cilindrada o volumen desplazado.

- b. Las temperaturas y presiones de los ángulos del ciclo.
- c. El calor rechazado, potencia producida y rendimiento térmico.
- d. La presión media efectiva y el rendimiento térmico al freno del 24%.

### DIAGRAMAS



Estándar de aire: gas natural

$$r_k = \frac{V_1}{V_2} = \frac{CV_D + V_D}{CV_D} = \frac{V_D(C+1)}{CV_D} = \frac{(C+1)}{C}$$

$$r_k = \frac{(C+1)}{C} \quad r_k = \frac{(0.15+1)}{0.15} = \frac{1.15}{0.15} = 7.67$$

$$C = 15\% = 0.15$$

$$1. \quad P_1 = 14 \frac{\text{Lb}}{\text{in}^2} \text{ abs}$$

$$T_1 = 120 + 460 = 580^\circ\text{R}$$

$$\dot{w} = 20 \frac{\text{Lb}}{\text{min}}$$

$$P_1 \times \dot{V}_1 = \dot{W} \times R \times T_1$$

$$\dot{V}_1 = \frac{\dot{W} \times R \times T_1}{P_1} = \frac{\left(20 \frac{\text{Lb}}{\text{min}}\right) \times \left(53.13 \frac{\text{Lb-ft}}{\text{Lb-}^\circ\text{R}}\right) \times 580^\circ\text{R}}{14 \frac{\text{Lb}}{\text{in}^2} \times 144 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2}}$$

$$\dot{V}_1 = 306.7 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

$$r_k = \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} \quad \dot{V}_2 = \frac{\dot{V}_1}{r_k} = \frac{306.7 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{7.67} \quad \dot{V}_2 = 40 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

$$\dot{V}_\Delta = \dot{V}_1 - \dot{V}_2 \quad \dot{V}_\Delta = (306.7 - 40) \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \quad \dot{V}_\Delta = 266.7 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

$$P_1 \times V_1 = R \times T_1$$

$$V_1 = \frac{R \times T_1}{P_1} = \frac{53.3 \times 580}{14 \times 144} = 15.33 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}$$

$$2. \quad \dot{V}_2 = 40 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

$$r_k = \frac{V_1}{V_2}, \quad V_2 = \frac{V_1}{r_k} = \frac{15.33 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}}{7.67} = 2 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}$$

$$1 \text{ a } 2. \quad s = \text{cte.} \quad P_1 V_1^k = P_2 V_2^k, \quad P_1 \dot{V}_1^k = P_2 \dot{V}_2^k$$

$$P_1 \dot{V}_1 = \omega R T_1$$

$$P_2 \dot{V}_2 = \omega R T_2$$

$$\frac{P_2 \dot{V}_2}{P_1 \dot{V}_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad \frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} \right)^k$$

$$\left( \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} \right)^k * \frac{1}{\left( \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} \right)} = \frac{T_1}{T_2}, \quad \frac{T_2}{T_1} = r_k^k * \frac{1}{r_k} = r_k^{k-1}$$

$$T_2 = 580 (7.67)^{1.4-1} = 1310 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$P_2 = 14 (7.67)^{1.4} = 242.6 \text{ Psia}$$

$$r_{c/a} = 0.0556 \frac{\text{lb}_c}{\text{lb}_a} \quad \omega_f = r_{c/a} \omega_n = 0.0556 \frac{\text{lb}_c}{\text{lb}_a} * \frac{\text{lb}_a}{\text{min}}$$

$$\omega_f = 1.112 \frac{\text{lb}_c}{\text{min}}$$

$$\dot{Q}_A = \omega q_1 = 1.112 \frac{\text{lb}_c}{\text{min}} * 19000 \frac{\text{btu}}{\text{lb}_c} = 21128 \frac{\text{btu}}{\text{min}}$$

$$1 + r_{c/a} = 1 + 0.0556 = 1.055 \text{ gases}$$

$$r_{c/a} \ll 1$$

$$\dot{Q} \text{ 2.} \rightarrow \text{3: } V = \text{Cte.}$$

$$\dot{Q}_A = \dot{U}_p - \dot{U}_1$$

$$\dot{Q}_A = C_v \times \Delta T$$

$$\dot{Q}_A = \omega C_v (T_3 - T_2)$$

$$\omega = 20 + 1.112 = 21.112 \quad C_v = 0.1714 \frac{\text{Btu}}{\text{Lb}^\circ\text{R}}$$

$$T_3 - T_2 = \frac{\dot{Q}_A}{\omega C_v}$$

$$T_3 = T_2 + \frac{\dot{Q}_A}{\omega C_v}$$

$$T_3 = 1310 + \frac{21128 \frac{\text{Btu}}{\text{min}}}{20 \frac{\text{Lb}}{\text{min}} \times 0.17 \frac{\text{Btu}}{\text{Lb}^\circ\text{R}}}$$

$$T_3 = 1310 + 6163$$

Para  $\dot{\omega} = 21.112$

$$T_3 = T_2 + \frac{\dot{Q}_A}{\dot{\omega} C_v} = 1310 + 5838$$

$$T_3 = 7148^\circ\text{R}$$

3.  $T_3 = 7148^\circ\text{R}$

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 = 40 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

$$P_3 \dot{V}_3 = \dot{\omega} R T_3$$

$$P_3 = \frac{21.112 \times 53.5 \times 7148}{40} = 201085 \text{ Psia}$$

4.  $\frac{T_3}{T_4} = r_k^{k-1}$

$$T_4 = \frac{7148}{7.67^{0.4}} = 3164^\circ\text{R}$$

$$\dot{Q}_R = \dot{\omega} C_v (T_4 - T_1)$$

$$\dot{Q}_R = 21.112 \times 0.1714 (3164 - 1310) = 6708 \frac{\text{Btu}}{\text{min}}$$

$$\dot{\omega} = \dot{Q}_A - \dot{Q}_R = 21128 - 6708$$

$$\dot{\omega} = 14419 \frac{\text{Btu}}{\text{min}} \frac{60 \text{ min}}{\text{h}} = 865140 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$\dot{\omega} = 865140 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \frac{1 \text{ hp} \cdot \text{h}}{2544 \text{ Btu}}$$

$$\dot{\omega} = 340 \text{ hp}$$

$$e = \frac{\dot{\omega}}{\dot{Q}_A} = \frac{14419 \frac{\text{Btu}}{\text{min}}}{21128 \frac{\text{Btu}}{\text{min}}} = 0.68$$

$$P_{\text{mec}} = \frac{\dot{\omega}}{\dot{V}_D} = \frac{14419 \frac{\text{Btu}}{\text{min}} * 778 \frac{\text{Lb} \cdot \text{ft}}{\text{Btu}}}{266.7 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}} = 42062.17 \frac{\text{Lb}}{\text{ft}^2}$$



$$\eta_B = \frac{W_B}{W} \quad \eta_B = \frac{\dot{W}_B}{\dot{W}} = \frac{\frac{\dot{W}_B}{\dot{Q}_A}}{\frac{\dot{W}}{\dot{Q}_A}}$$

$$\eta_B = \frac{e_B}{e} = \frac{0.24}{0.68} = 0.35$$

### EJERCICIO

Un indicador con resorte de  $6 \text{ mm} \times \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$  (o atmósfera métrica), se utiliza para hacer diagramas de un compresor de doble efecto de  $305 \times 406 \text{ mm}$ , que marcha a 200 r.p.m. La longitud de todos los diagramas es de 89 mm. El área media de los diagramas del lado del embolo que esta hacia la culata es de  $16.4 \text{ cm}^2$  y la de los diagramas del lado de la manivela es de  $16.1 \text{ cm}^2$ . El diámetro del vástago del embolo es de 51 mm. Determinar la presión media indicada de cada lado del embolo, los CV indicados de cada lado del embolo y la potencia total indicada consumida por el compresor.

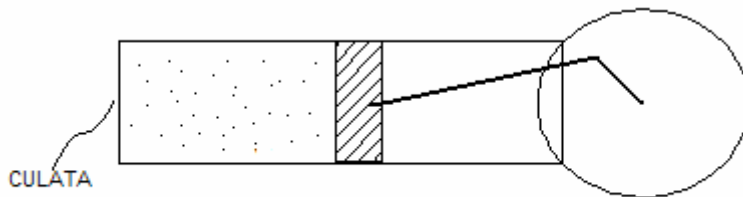


Diagrama del lado de la culata  $A_c = 16.4 \text{ cm}^2$   
 Diagrama del lado de la manivela  $A_m = 16.1 \text{ cm}^2$   
 $L = 89 \text{ mm}$

$$\text{Resorte} = \frac{6\text{mm}}{1 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}} \text{ o } \frac{1 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}}{6\text{mm}}$$

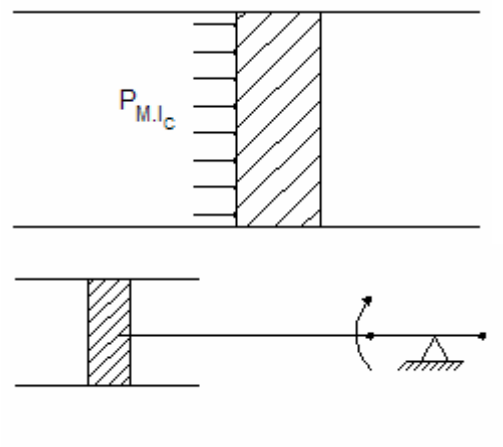
$$P_{MI} = \frac{\text{Area - del - diagrama - indicador} \times \text{Factor}}{\text{Longitud - diagrama - indicador}}$$

$$P_{MIC} = \frac{A_c \times \text{Factor de escala}}{L} = \frac{16.4 \text{ cm}^2 \times \frac{1 \text{ Kg}}{\text{cm}^2}}{89 \text{ mm}}$$

$$P_{MIC} = \frac{16.4 \text{ cm}^2 \times 1 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}}{6 \text{ mm} \times 89 \text{ mm}} = 3.07 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{MIM} = \frac{A_M \times \text{factor de Escala}}{L} = \frac{16.1 \times 1}{89 \times 6 \times \frac{1}{100}} = 3.014 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

Teniendo que 305\*406 mm donde 305 es el diámetro y 406 la carrera



$$F_{IC} = P_{MIC} A_c$$

$$F_{IC} = 3.07 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \times \frac{\pi}{4} (30.5 \text{ cm})^2 = 2243 \text{ Kg}$$

$$W_{IC} = F_{IC} \cdot L = 2243 \text{ Kg} \cdot 0.406 \text{ m} = 910.6 \text{ Kg-m}$$

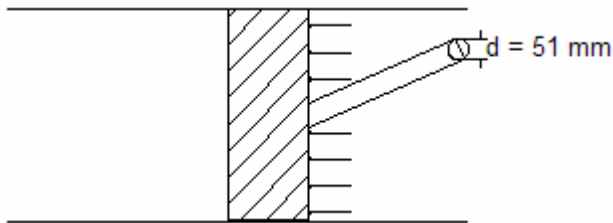
Si N es el numero de ciclos = 200  $\frac{\text{ciclos}}{\text{min}}$

$$W_{IC}^0 = W_{IC} N = 910.6 \text{ Kg-m} \cdot \frac{200}{\text{min}}$$

$$\dot{W}_{IC} = 910.6 \text{Kg} - \text{m} * \frac{200}{\text{min}} * 1 \frac{\text{min}}{\text{seg}} * \frac{1 \text{CV}}{75 \frac{\text{Kg} - \text{m}}{\text{s}}}$$

$$CV_{IC} = 40.47 \text{ CV}$$

Ahora para el otro lado que es un análisis similar



$$F_{IM} = P_{IM} \times A_M$$

$$F_{IM} = 3.014 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \times \frac{\pi}{4} (30.5^2 - 5.1^2) \text{cm}^2$$

$$F_{IM} = 2140.5 \text{ Kg}$$

$$W_{IM} = F_{IM} \times L = 2140.5 \text{ Kg} \times 0.406 \text{ m}$$

$$N = 200 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}}$$

$$\dot{W}_{IM} = 2140.5 \text{Kg} \times 0.406 \text{m} \times 200 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}}$$

$$CV_{IM} = 2140.5 \times 0.406 \times 200 \frac{\text{Kg} - \text{m}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{min}}{60 \text{s}} \times \frac{1 \text{CV}}{75 \frac{\text{Kg} - \text{m}}{\text{s}}}$$

$$CV_{IM} = 38.6 \text{ CV}$$

$$CV_{IT} = 40.47 + 38.6 = 79.07 \text{ CV}$$

## EJERCICIO

Un motor de automóvil de 6 cilindros  $3 \frac{5}{8} * 3.6$  in tiene un consumo de combustible de 0.45 lb por cada hp al freno y 133 hp indicados. El rendimiento del ciclo ideal correspondiente es del 46.4%; y la potencia calorífica inferior del combustible es de 18500 btu/lb. Determinar

- Rendimiento mecánico, rendimiento térmico indicado, rendimiento térmico al freno.
- Rendimiento de maquina indicado y rendimiento de maquina al freno.
- Presión media indicada y presión media al freno.
- Gasto o consumo de calor en btu/hp<sub>f</sub>-h y btu/min.

6 cilindros 3 5/8 x 3.6 in

$$W_{fb} = 0.45 \frac{\text{Lb}}{\text{hp}_f - h}$$

$$n = 3000 \text{ rpm}$$

$$\dot{W}_B = 113 \text{ hp}_f \quad \dot{W}_I = 133 \text{ hp}_I$$

$$e = 46.4\%$$

$$q_L = 18500 \frac{\text{Btu}}{\text{Lb}}$$

$$\eta_M = \frac{W_B}{W_I} \quad \eta_M = \frac{\dot{W}_B}{\dot{W}_I} = \frac{113}{133} = 0.849$$

$$\eta_M = W_{fb} \times q_e = \text{G.E.Calor}$$

$$\text{G.E.C}_b = 0.45 \frac{\text{Lb}}{\text{hp}_b - h} \times 18500 \frac{\text{Btu}}{\text{Lb}}$$

$$\text{G.E.C}_b = 8325 \frac{\text{Btu}}{\text{hp}_b - h}$$

$$\dot{E}_c = (\text{G.E.C}_b)(\dot{W}_B) = \dot{Q}_A$$

$$\dot{E}_c = 8325 \frac{\text{Btu}}{\text{hp}_b - h} \times 113 \text{ hp}_b = 940725 \frac{\text{Btu}}{h} = 15678 \frac{\text{Btu}}{\text{min}} = \dot{Q}_A$$

$$e = \frac{W}{E_c} \quad e = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_c} \quad \dot{W} = e \dot{E}_c = 0.464 \times 940725 \frac{\text{btu}}{h} = 436496 \frac{\text{btu}}{h}$$

$$\dot{W} = 436496 \frac{\text{btu}}{h} \times \frac{1 \text{ hp} - h}{2544 \text{ btu}} = 171.57 \text{ hp}$$

$$\eta_I = \frac{W_I}{W} \quad \eta_I = \frac{W_I^0}{W^0} = \frac{133}{171.57} = 0.775$$

$$\eta_B = \frac{W_B}{W} = \frac{W_B^0}{W^0} = \frac{113}{171.57} = 0.65$$

$$w_{FB} = 0.75 \frac{\text{lb}}{\text{hp}_f - h}$$

$$w_f^0 = 0.45 \frac{\text{lb}}{\text{hp}_b - h} \times 113 \text{hp}_b = 50.85 \frac{\text{lb}}{h}$$

$$w_{FI} = \frac{w_f^0}{w_I^0} = \frac{50.85 \frac{\text{lb}}{h}}{133 \text{hp}_I} = 0.384 \frac{\text{lb}_c}{\text{hp}_I - h}$$

$$e_I = \frac{2544 \text{btu}/\text{hp} - h}{0.382 \frac{\text{lb}}{\text{hp} - h} \times 18500 \frac{\text{btu}}{\text{lb}}} = 0.36$$

$$e_B = \frac{2544 \text{btu}/\text{hp} - h}{0.45 \frac{\text{lb}}{\text{hp} - h} \times 18500 \frac{\text{btu}}{\text{lb}}} = 0.30$$

$$e_I = \frac{W_I}{E_c} \quad e_b = \frac{W_b}{E_c}$$

$$e_I = \frac{W_I^0}{E_c^0} \quad e_b = \frac{W_b^0}{E_c^0}$$

$$e_I = \frac{133 \text{hp}_I}{940725 \frac{\text{btu}}{h} \times \frac{1 \text{hp} - h}{2544 \text{btu}}} = 0.36$$

$$e_I = \frac{113 \text{hp}_B}{940725 \frac{\text{btu}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{hp} - \text{h}}{2544 \text{btu}}} = 0.30$$

$$P_{MI} * A = F_I \quad P_{MB} * A = F_B$$

$$A = 6 * \frac{\pi}{4} \times \left( \frac{29}{8} \text{in} \right)^2 = 61.9 \text{in}^2$$

$$W_I = F_I * L = P_{MI} * A * L$$

$$W_B = F_B * L = P_{MB} * A * L$$

$$N = \frac{n}{2}$$

$$W_I^0 = P_{MI} * A * \frac{L}{12} * \frac{n}{2} * \frac{1}{60}$$

Pues la presión esta en  $\text{lb/in}^2$ , el área en  $\text{in}^2$ , la longitud en  $\text{ft}$ , y  $n$  en  $\text{min}^{-1}$

$$P_{MI} = \frac{24 * 60 * W_I}{A * L * n} = \frac{24 * 60 * 133 * 550}{61.4 * 3.6 * 3000} = 157.5 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$P_{MB} = \frac{24 * 60 * W_B}{A * L * n} = \frac{24 * 60 * 113 * 550}{61.4 * 3.6 * 3000} = 133.8 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

## EJERCICIO

Un ciclo Diesel ideal con aire como fluido de trabajo tiene una relación de compresión de 18 y una relación de corte de admisión de 2. Al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo esta a 15 psia, 100 °F, 120  $\text{in}^3$ . Mediante las suposiciones de aire frío estándar, determine la temperatura y la presión al final de cada proceso, el trabajo neto, el rendimiento térmico y la potencia media indicada (p.m.e). Use para la constante del aire el valor de 0.3704  $\text{psia ft}^3 / \text{lbm } ^\circ\text{R}$ ,  $C_p = 0.24 \text{ Btu} / \text{lbm } ^\circ\text{R}$  y  $C_v = 0.171 \text{ Btu} / \text{lbm } ^\circ\text{R}$ .

Estado 1

$$P_1 = 15 \text{ psia}$$

$$T_1 = 100 + 460 = 560 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$r_k = \frac{V_1}{V_a} \quad V_2 = \frac{V_1}{r_k} = \frac{120 \text{in}^3}{18} \quad V_2 = 6.67 \text{in}^3$$

$$r = \frac{V_3}{V_2} \quad V_3 = rV_2 = 2V_2 = 2 * 6.67 \quad V_3 = 13.34 \text{in}^3$$

### Proceso 1-2

$$P_1 V_1^K = P_2 V_2^K \quad K = 1.4$$

$$P_2 = P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^K = 1.5(18)^{1.4} = 858 \text{psia} \quad T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{K-1} = 560(18)^{1.4-1} = 1779.5^\circ R$$

### Estado 2

$$V_2 = 6.67 \text{in}^3$$

$$T_2 = 1779.5^\circ R$$

$$P_2 = 858 \text{psia}$$

### Proceso 2-3

$$P_3 = P_2 = 858 \text{psia}$$

$$P_2 V_2 = \omega R T_2 \quad P_3 V_3 = \omega R T_3 \quad \frac{P_3}{P_2} * \frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} = 2$$

$$T_3 = 2T_2 = 2 * 1779.5 = 3559^\circ R$$

### Estado 3

$$V_3 = 13.34 \text{in}^3$$

$$T_3 = 3559^\circ R$$

$$P_3 = 858 \text{psia}$$

### Proceso 3-4

$$P_3 V_3^K = P_4 V_4^K$$

$$P_4 = P_3 \left( \frac{V_3}{V_4} \right)^K$$

$$P_4 = P_3 \left( \frac{V_3}{V_2} * \frac{V_2}{V_1} \right)^K$$

$$P_4 = P_3 \left( \frac{r}{r_K} \right)^K \quad P_4 = 858 \left( \frac{13.34}{120} \right)^{1.4} = 39.6 \text{ psia}$$

$$T_4 = \frac{T_3}{\left( \frac{V_4}{V_3} \right)^{K-1}} = \frac{3559}{\left( \frac{120}{13.34} \right)^{0.4}} = 1478^\circ R$$

Estado 4

$$P_4 = 39.6 \text{ psia}$$

$$T_4 = 1478^\circ R$$

$$V_4 = 120 \text{ in}^3$$

$$PV = \omega RT$$

$$\omega = \frac{PV}{RT} = \frac{15 \text{ psia} \cdot 120 \text{ in}^3 \cdot \frac{1}{12^3} \frac{\text{ft}^3}{\text{in}^3}}{0.3704 \cdot \frac{\text{psia} \cdot \text{ft}^3}{\text{lbm}^\circ R} * 560^\circ R} = 0.005 \text{ lb}$$

$$Q_A = \omega C_p (T_3 - T_2)$$

$$Q_A = \omega C_v (T_4 - T_1) \quad W_n = Q_A - Q_R \quad e = \frac{W_n}{Q_A}$$

$$P_{m.e} \cdot \Delta V = W_n \quad P_{m.e} = \frac{W_n}{V_1 - V_2}$$

## CICLO JOULE O BRAYTON

Para maquinas rotativas. Dos procesos a entropía constante (isentrópico) y otros dos a presión constante (isobárico)

$$Q_A = H_3 - H_2 = \int_2^3 \omega C_p dT = \omega C_p (T_3 - T_2)$$

$$Q_R = H_4 - H_1 = \int_4^1 \omega C_p dT = \omega C_p (T_4 - T_1) \text{ Gas Ideal}$$

$$W = \Sigma Q \quad e = \frac{W}{Q_A}$$



$$Q_A + W_C = Q_R + W_T$$

$$Q_A - Q_R = W_T - W_C = W_n$$

Gas Ideal

Proceso 1-2  $s = cte$  ó  $PV^K = cte$   
 c.s g.i

Proceso 2-3  $P = cte$

Proceso 3-4  $s = cte$  ó  $PV^K = cte$

Proceso 4-1  $P = cte$

$$PV = \omega RT$$

$$PV = \omega RT$$

$$\frac{P_2}{P_1} * \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$P_1 V_1^K = P_2 V_2^K \quad \frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^K$$

$$\left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{1/K} = \frac{V_1}{V_2} \quad \frac{P_2}{P_1} = r_p = \text{Relación de presiones}$$

$$\left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1/K} = \frac{V_2}{V_1} = \left[ \frac{1}{\frac{P_2}{P_1}} \right]^{1/K} = \left( \frac{1}{r_p} \right)^{1/K}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = r_p^{-1/K}$$

$$\frac{P_2}{P_1} * \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad r_p \cdot r_p^{-1/K} = \frac{T_2}{T_1} = r_p^{K-1/K}$$

Proceso 3-4

$$P_3 V_3 = \omega RT_3 \quad P_4 V_4 = \omega RT_4$$

$$\frac{T_3}{T_4} = r_p^{K-1/K}$$

$$P_3 V_3^K = P_4 V_4^K$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = r_p^{K-1/K}$$

$$e = \frac{W_n}{Q_A} = \frac{Q_A - Q_R}{Q_A} = 1 - \frac{Q_R}{Q_A} = 1 - \frac{\omega C_p (T_4 - T_1)}{\omega C_p (T_3 - T_2)}$$

$$e = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = r_p^{K-1/K}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$$

$$\frac{T_4}{T_1} - 1 = \frac{T_3}{T_2} - 1 \quad \frac{T_4 - T_1}{T_1} = \frac{T_3 - T_2}{T_2}$$

$$\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1}} = \frac{1}{r_p^{K-1/K}}$$

$$e = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad e = 1 - \frac{1}{r_p^{K-1/K}}$$

Obsérvese que cuando  $r_p$  aumenta, el rendimiento térmico  $e$  aumenta

Temperatura intermedia para  $W_{\text{Max}}$

$$W_n = W = W_t - W_C$$

Gas ideal  $W = C_p (T_3 - T_4) - C_p (T_2 - T_1)$   
 $W = C_p (T_3 - T_4 - T_2 + T_1)$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \quad T_4 = \frac{T_3 \cdot T_1}{T_2}$$

$$W = C_p \left( T_3 - \frac{T_3 \cdot T_1}{T_2} - T_2 + T_1 \right)$$

$$\frac{dW}{dT_2} = C_p \left( \frac{T_3 \cdot T_1}{T_2^2} - 1 \right) = 0 \quad \text{Para } W_{\text{Max}}$$

$$T_3 \cdot T_1 = T_2^2 \quad T_2 = \sqrt{T_3 \cdot T_1}$$

$$T_4 = \frac{T_3 \cdot T_1}{\sqrt{T_3 \cdot T_1}} \quad T_4 = \sqrt{T_3 \cdot T_1}$$

$$W_{\max} = C_p (T_3 - \sqrt{T_3 \cdot T_1} - \sqrt{T_3 \cdot T_1} + T_1)$$

$$W_{\max} = C_p (T_3 + T_1 - 2\sqrt{T_3 \cdot T_1})$$

### CICLO JOULE O BRAYTON CON FRICCION DE FLUIDO

$$s_2 \neq s_1 \quad s_3 \neq s_4$$

$\eta_c$  = Rendimiento de compresor

$\eta_t$  = Rendimiento de turbina

$$\eta_c = \frac{W_c}{W_c'} = \frac{h_2 - h_1}{h_2' - h_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_2' - T_1}$$

c.s                  g.i

$$\eta_t = \frac{W_t}{W_t'} = \frac{h_3 - h_4'}{h_3 - h_4} = \frac{T_3 - T_4'}{T_3 - T_4}$$

$$T_2' = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_c}$$

$$T_2' = T_1 \left[ 1 + \frac{1}{\eta_c} \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \right] = T_1 \left[ 1 + \frac{1}{\eta_c} (r_p^{K-1/K} - 1) \right]$$

$$T_4' = T_3 + \eta_t (T_3 - T_4) = T_3 \left[ 1 - \eta_t \left( 1 - \frac{T_4}{T_3} \right) \right]$$

$$T_4' = T_3 \left[ 1 - \eta_t \left( 1 - \frac{1}{r_p^{K-1/K}} \right) \right]$$

$$e = \frac{W_n}{Q_A} \quad e = \frac{W_t' - W_c'}{Q_A'}$$

$$e = \frac{C_p(T_3 - T_4') - C_p(T_2' - T_1)}{C_p(T_3 - T_2')}$$

$$e = \frac{(T_3 - T_4') - (T_2' - T_1)}{(T_3 - T_2')} = \frac{(T_3 - T_2') - (T_4' - T_1)}{(T_3 - T_2')}$$

$$e = 1 - \frac{(T_4' - T_1)}{(T_3 - T_2')}$$

$$e = 1 - \frac{T_3 \left[ 1 - \eta_t (1 - r_p^{K-1/K}) \right] - T_1}{T_3 - T_1 \left( 1 + \frac{1}{\eta_c} (r_p^{K-1/K} - 1) \right)}$$

Esta última expresión expresa el rendimiento térmico en función de los rendimientos de compresor y de turbina.

Compresor:  $r_p = \frac{P_2}{P_1} \quad T_2 = T_1 \cdot r_p^{K-1/K}$

Turbina:  $T_4 = \frac{T_3}{r_p^{K-1/K}}$

Para el intercambiador de calor

$$h_1 + K_1 + P_1 + W_c = h_2 + K_2 + P_2$$

$$W_c = (h_2 - h_1) + (K_2 - K_1) + (P_2 - P_1)$$

$$W_c = (h_2 - h_1) + \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g_0} + (gz_2 - gz_1)$$

$$W_c = \Delta h + \Delta K + \Delta P$$

Pero  $\Delta K$  y  $\Delta P$  son despreciables. Entonces:

$$W_c = \Delta h = h_2 - h_1$$

Para la cámara de combustión

Siendo  $r_{c/a}$  la relación combustible-aire  $\left( \frac{kg_c}{kg_a}, \frac{lb_c}{lb_a} \right)$  y:

$h_a$  = Entalpía de aire a la entrada

$h_f$  = Entalpía del combustible a la entrada

$h_p$  = Entalpía de los productos de combustible a la salida

$$1 \cdot h_a + r_{c/a} h_f + E_C = (1 + r_{c/a}) h_p$$

Para la mayoría de las aplicaciones con aire estándar,  $r_{c/a} \ll 1$

$$W_t = (1 + r_{c/a}) [(h_p - h_4) + (K_p - K_4) + (P_p - P_4)]$$

Con  $\Delta K$  y  $\Delta P$  despreciables

$$W_t = (1 + r_{c/a}) (h_p - h_4)$$

$$W_t \approx (h_p - h_4) \approx (h_3 - h_4) = C_p (T_3 - T_4)$$

## EJERCICIO

Un ciclo Brayton trabaja entre los límites de temperatura de 300 K y 1100 K y mantiene una relación de presión en el compresor de 15. Si la presión inicial es de  $1 \text{ kg/cm}^2$  determinar los estados de la sustancia en el ciclo, el trabajo neto y el rendimiento térmico.

$$P_1 V_1 = RT_1 \quad V_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{29.3 \cdot 300}{1 \cdot 10^4} = 0.879 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$T_1 = 300 \text{ K} \quad P_1 = 1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$T_2 = T_1 \cdot r_p^{\frac{K-1}{K}} = 300(15)^{2/7} = 650.3 \text{ K} \quad P_2 = 15 P_1 = 15 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$T_3 = 1100 \text{ K} \quad P_3 = P_2 = 15 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$T_4 = \frac{T_3}{r_p^{\frac{K-1}{K}}} = \frac{1100}{15^{2/7}} = 507.4 \text{ K} \quad P_4 = P_1 = 1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

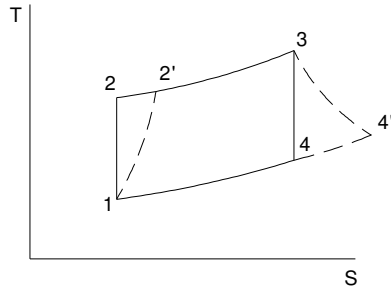
$$W_{CP} = C_p (T_2 - T_1) = 0.24(650.3 - 300) = 84.07 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$Q_A = C_p (T_3 - T_2) = 3.24(1100 - 650.3) = 142.22 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$W_t = C_p (T_3 - T_4) = 0.24(1100 - 507.4) = 142.22 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$W_n = W_t - W_c = 142.22 - 84.07 = 58.15$$

$$\eta = \frac{W_n}{Q_A} = \frac{58.15}{142.22} = 0.41 \Rightarrow 41\%$$



(2')

$$P_2' = P_2 = 15 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\eta_c = \frac{W_c}{W_c'} = \frac{C_p(T_2 - T_1)}{C_p(T_2' - T_1)}$$

$$T_2' = T_1 + \left( \frac{T_2 - T_1}{\eta} \right) = 300 + (650.3 - 300 / 0.73)$$

$$T_2' = 676.6^\circ \text{K}$$

(4')

$$P_4' = P_1 = 1 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\eta_T = \frac{W_T'}{W_T} = \frac{C_p(T_3 - T_4')}{C_p(T_3 - T_4)} = \frac{T_3 - T_4'}{T_3 - T_4}$$

$$T_4' = T_3 - (T_3 - T_4)\eta_T = 596.3^\circ \text{K}$$

$$W_c' = 0.24(676.6 - 300) = 90.38 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

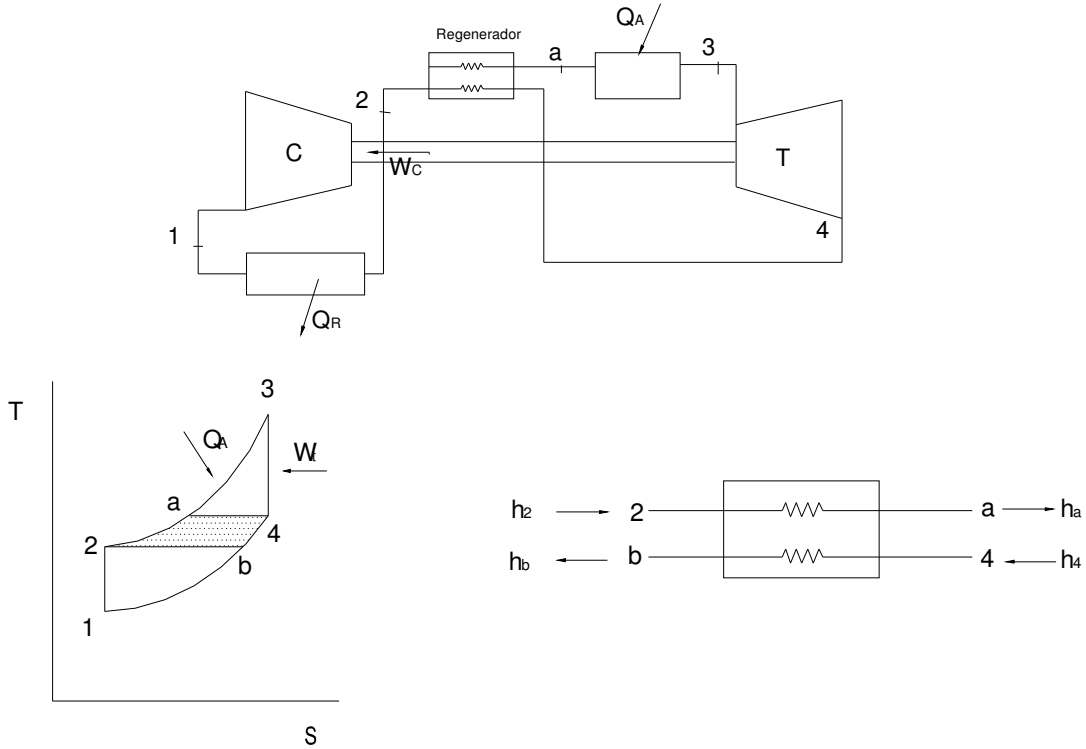
$$W_i' = 0.24(1100 - 596.3) = 120.8$$

$$W_n' = W_i' - W_c' = 120.8 - 90.38 = 30.5$$

$$Q_A = 0.24(1100 - 676.6) = 101.6$$

$$\eta_T = e = \frac{W_n'}{Q_A'} = \frac{30.5}{101.6} = 30\%$$

## CICLO JOULE O BRAYTON CON REGENERACION



$$h_4 - h_b = h_a - h_2$$

$$W_c = h_2 - h_1 = C_p (T_2 - T_1)$$

C.S      Gas ideal

$$Q_A = h_3 - h_a = C_p (T_3 - T_a)$$

$$W_t = h_3 - h_a = C_p (T_3 - T_a)$$

$$W_t = h_3 - h_4 = C_p (T_3 - T_4)$$

$$Q_{12} = h_b - h_1 = C_p (T_b - T_1)$$

$$e = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_a}$$

Cuando el rendimiento del generador es diferente del 100%:

$$\eta_r = \frac{Q_{\text{realsu min istrado}}}{Q_{\text{ideal}}}$$

$$\eta_r = \frac{h_a' - h_2}{h_4 - h_b} = \frac{C_p (T_a' - T_2)}{C_p (T_4 - T_b)}$$

C.S Gas ideal

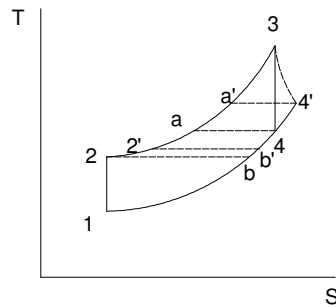
$$W_n = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

$$Q_A = h_3 - h_a$$

$$e = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_a'}$$

$$\eta_c, \eta_t, \eta_r$$

Cada elemento con su respectivo rendimiento se acerca más a la realidad.



a' y b' si  $\eta_r = 100\%$  y  $\eta_c \neq 100\%$

a'' y b'' si  $\eta_r, \eta_c, \eta_t \neq 100\%$

$$\eta_c = \frac{W_c}{W_c'} = \frac{h_2 - h_1}{h_2' - h_1} = \frac{C_p(T_2 - T_1)}{C_p(T_2' - T_1)}$$

Gas Ideal:  $T_2 = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_c} \rightarrow b'$

$$\eta_t = \frac{W_t'}{W_t} = \frac{h_3 - h_4'}{h_3 - h_4} = \frac{C_p(T_3 - T_4')}{C_p(T_3 - T_4)}$$

Gas Ideal:  $T_4' = T_3 - (T_3 - T_4)\eta_t \rightarrow a'$

$$\eta_r = \frac{Q'}{Q} = \frac{h_a'' - h_2}{h_4 - h_b} = \frac{C_p(T_a'' - T_2')}{C_p(T_4' - T_b)} = \frac{T_a'' - T_2'}{T_4' - T_2'}$$

Gas Ideal:  $T_a'' = T_2' + \eta_r(T_4' - T_2')$

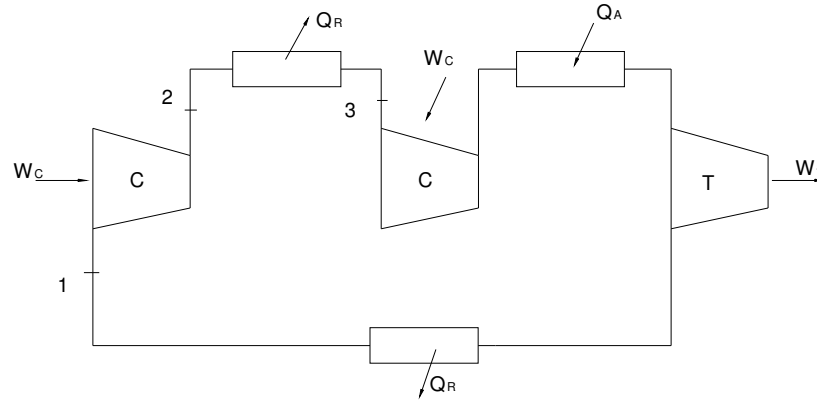
$$W_t = h_3 - h_4' = C_p(T_3 - T_4')$$

$$W_c = h_2' - h_1 = C_p(T_2' - T_1)$$

$$Q_A'' = h_3 - h_a'' = C_p(T_3 - T_a'')$$



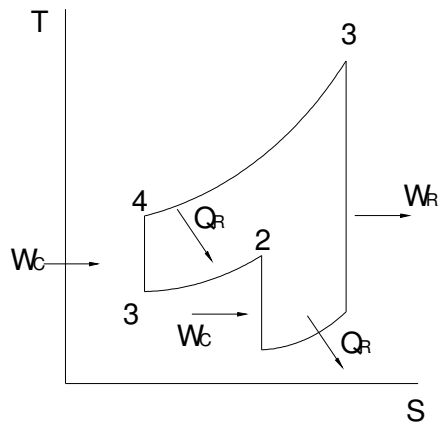
## CICLO JOULE O BRAYTON CON REFRIGERACION INTERMEDIA



$$W_{C1} + W_{C2} + Q_A = Q_{R1} + Q_{R2} + W_t$$

$$W_n = \sum Q$$

$$W_t - (W_{C1} + W_{C2}) = Q_A - (Q_{R1} + Q_{R2})$$



$$W_{C1} = h_2 - h_1$$

$$W_{C2} = h_4 - h_3$$

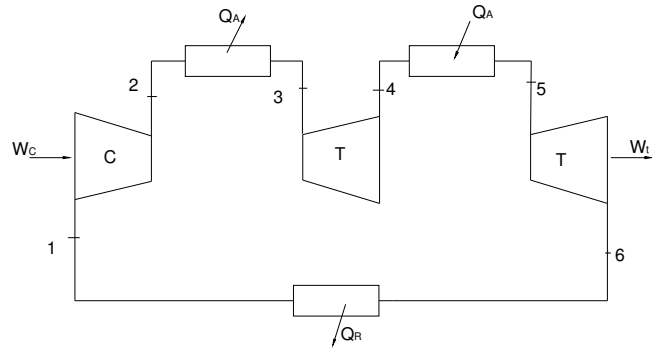
$$Q_{R1} = h_2 - h_3$$

$$Q_{R2} = h_4 - h_1$$

$$Q_R = h_3 - h_4$$

$$e = \frac{W_n}{Q_A}$$

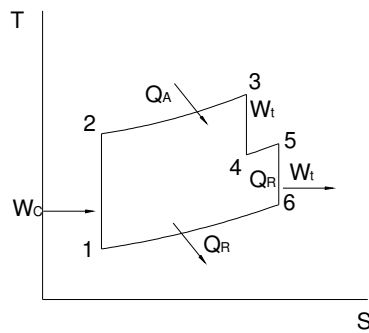
## CICLO JOULE O BRAYTON CON RECALENTAMIENTO INTERMEDIO



$$W_C + Q_{A1} + Q_{A2} = Q_{12} + W_{t1} + W_{t2}$$

$$W_n = \sum Q$$

$$(W_{t1} + W_{t2}) - W_C = (Q_{A1} + Q_{A2}) - Q_R$$



$$W_C = h_2 - h_1$$

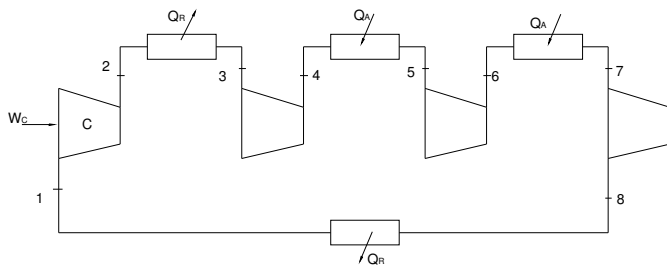
$$Q_{A1} = h_3 - h_2$$

$$Q_{A2} = h_5 - h_4$$

$$Q_2 = h_6 - h_1$$

$$W_{t1} = h_3 - h_4$$

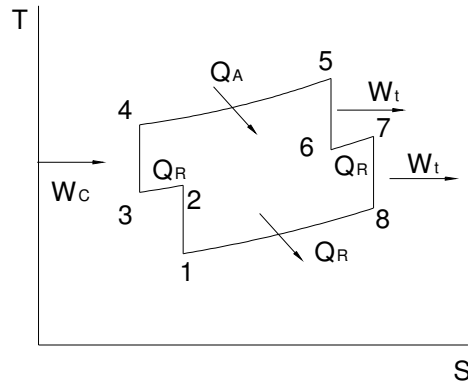
$$W_{t2} = h_5 - h_6$$



$$W_{C1} + W_{C2} + Q_{A1} + Q_{A2} = W_{t1} + W_{t2} + Q_{R1} + Q_{R2}$$

$$(W_{t1} + W_{t2}) - (W_{C1} + W_{C2}) = (Q_{A1} + Q_{A2}) - (Q_{R1} + Q_{R2})$$

$$W_n = \Sigma Q$$



$$W_{C1} = h_2 - h_1$$

$$Q_{R1} = h_2 - h_3$$

$$W_{C2} = h_4 - h_3$$

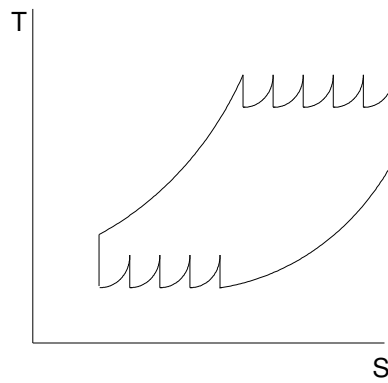
$$Q_{A1} = h_5 - h_4$$

$$W_{t1} = h_5 - h_6$$

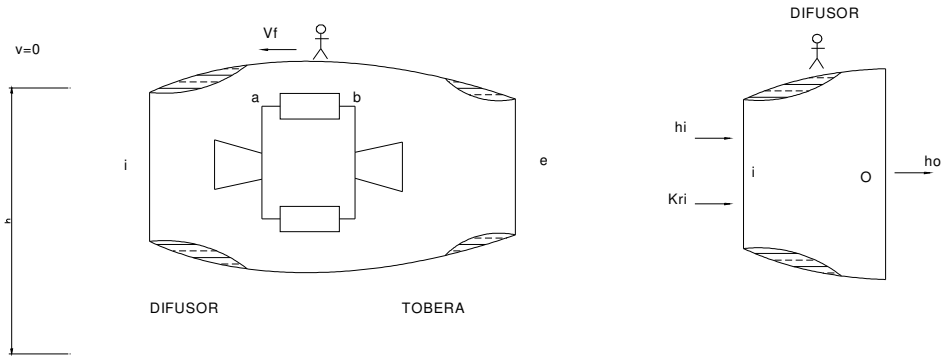
$$Q_{A2} = h_7 - h_6$$

$$W_{t2} = h_7 - h_8$$

$$Q_{R1} = h_8 - h_1$$



## PROPULSION A CHORRO, COHETE



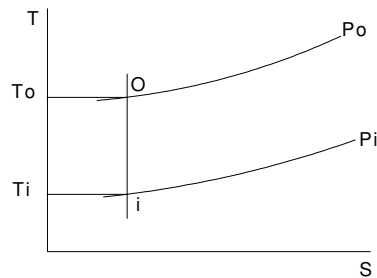
$$h_i + k_{ri} = h_o \Rightarrow k_{ri} = \frac{V_P^2}{2g_o J}$$

$$h_i + \frac{V_P^2}{2g_o J} = h_o \rightarrow \frac{V_P^2}{2g_o J} = h_o - h_i$$

$$\frac{V_P^2}{2g_o J} = C_p (T_o - T_i)$$

Gas Ideal:

$$T_o - T_i = \frac{V_P^2}{2g_o J C_p} \Rightarrow T_o = T_i + \frac{V_P^2}{2g_o J C_p}$$



$i \rightarrow o$ : Proceso Isentrópico

$S_i = S_o \Rightarrow \Delta S = 0$  para cualquier sustancia

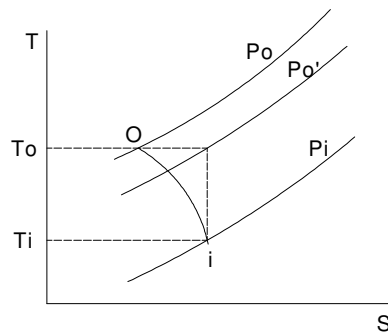
Gas Ideal:  $PV^K = cte$   
 $PV^K = C$

$$T_o = T_i \left( \frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{K-1}{K}}$$

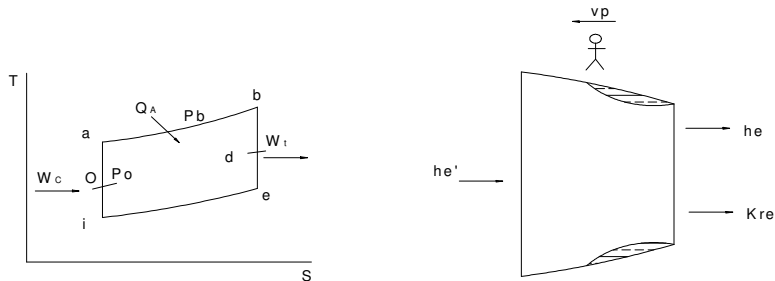
$$\frac{T_o}{T_i} = \left( \frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{K-1}{K}}$$

$$\frac{T_o}{T_i} = 1 + \frac{V_p^2}{2g_o J C_p T_i} = \left( \frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{K-1}{K}}$$

### RENDIMIENTO DE ARIETE O DINAMICO



$$\eta_r = \frac{P_o' - P_i}{P_o - P_i} \Rightarrow P_o' = P_i + (P_o - P_i)\eta_r$$



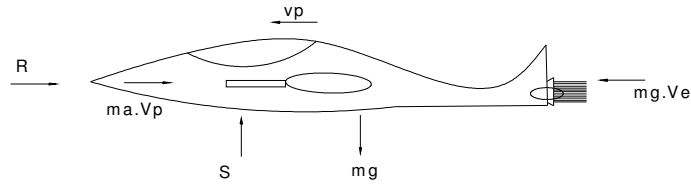
$$h_d = h_e + K_{re}$$

$$K_{re} = h_d - h_e = \frac{V_e^2}{2g_o J}$$

$$V_e^2 = 2g_o J (h_c' - h_e)$$

$$V_e = \sqrt{2g_o (h_d - h_e)}$$

$$V_e \propto \sqrt{\Delta h}$$



$$\leftarrow : \dot{m}_g V_e - \dot{m}_a V_p - R = ma$$

$$V_p = ek, a = 0 \rightarrow \dot{m}_g - \dot{m}_a V_p - R = 0$$

$$F = \dot{m}_g V_e - \dot{m}_a V_p$$

$$r_{c/a} = \text{Relación de combustible aire: } \frac{Kg_c}{Kg_a}, \frac{lb_c}{lb_a} \text{ Para 1Kg lb. de aire}$$

$$r_{c/a} \left( \frac{Kg_c}{Kg_a}, \frac{lb_c}{lb_a} \right) \rightarrow (1 + r_{c/a})$$

$$\dot{m}_a \left( \frac{Kg_{aire}}{s}, \frac{lb_{aire}}{s} \right)$$

$$r_{c/a} \cdot \dot{m}_a \left( \frac{Kg_c}{Kg_a} \times \frac{Kg_a}{s} = \frac{Kg}{s}, \frac{lb_c}{s} \right)$$

$$\dot{m}_g = (1 + r_{c/a}) \dot{m} \left[ \frac{Kg_{gasolina}}{s}, \frac{lb}{s} \right]$$

$$F = (1 + r_{c/a}) \dot{m}_a V_e - \dot{m}_a V_p$$

$$F = \dot{m}_a [(1 + r_{c/a}) V_e - V_p]$$

$$F = \dot{m}_a V_e \left[ 1 + r_{c/a} - \frac{V_p}{V_e} \right]$$

$$\dot{m}_a \rightarrow \frac{Kg}{s}$$

$$V_e \rightarrow \frac{m}{s}$$

$$\frac{Kg}{s} \cdot \frac{m}{s} = \frac{Kg \cdot m}{s^2} = N$$

$$\dot{m}_a \rightarrow \frac{U.T.M}{s}$$

$$V_e \rightarrow \frac{m}{s}$$

$$\frac{Kg-s}{m} \cdot \frac{m}{J} = Kg$$

$$\dot{m}_a \rightarrow \frac{Slug}{s}$$

$$V_e \rightarrow \frac{ft}{s}$$

$$\frac{lb-ft}{ft} \cdot \frac{ft}{s} = lb$$

$$F = \dot{m}_a V_e \left[ \left( 1 + r_{c/a} - \frac{V_p}{V_e} \right) \right]$$

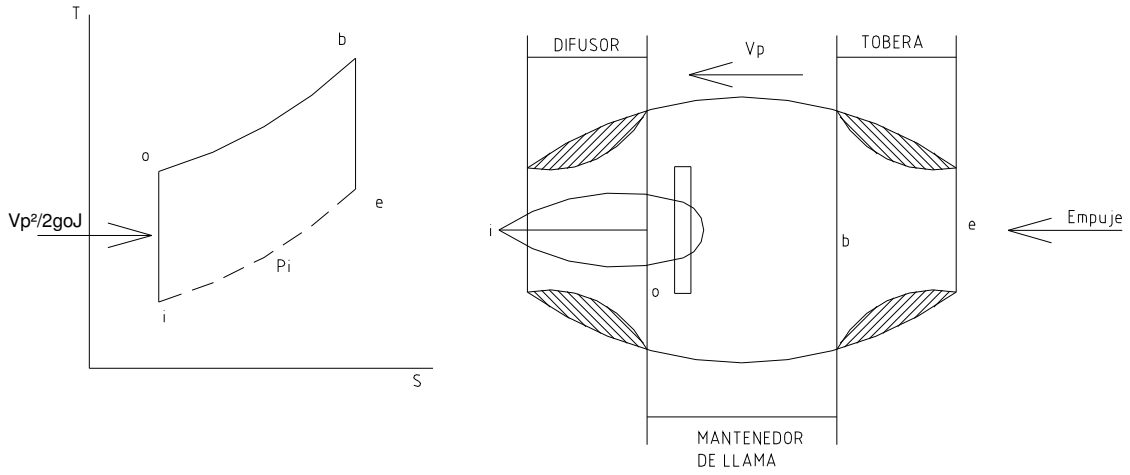
Si  $r_{c/a} \ll 1$

$$F = \dot{m}_a V_e \left( 1 - \frac{V_p}{V_e} \right)$$

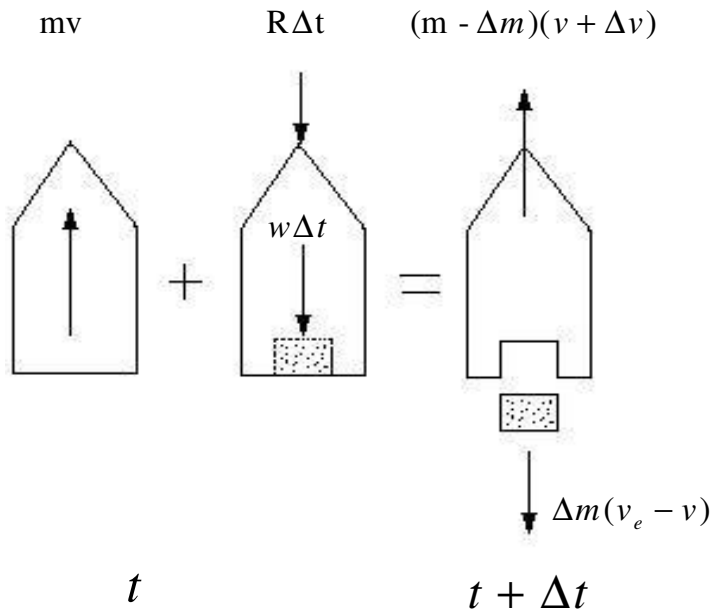
$$\dot{W} = F V_p$$

$$\dot{W} = \dot{m}_a V_e V_p \left[ \left( 1 + r_{c/a} \right) - \frac{V_p}{V_c} \right] \left\{ \begin{array}{l} \frac{N.m}{s} = \frac{J}{s} = Watt \\ \frac{Kg.m}{s} \rightarrow CV \\ \frac{lb-ft}{s} \rightarrow Hp \\ 75 \frac{Kg-m/s}{CV} \\ 550 \frac{lb-ft/s}{Hp} \end{array} \right.$$

# ESTATORREACTORES (Permite vuelos más altos)



## COHETE





$$+ \uparrow: mv - R\Delta t - W\Delta t = (m - \Delta m)(v + \Delta v) - \Delta(v_e - v)$$

$$mv - R\Delta t - W\Delta t = mv + m\Delta v - \Delta mv - \Delta m\Delta v - \Delta mv_e + \Delta mv$$

$$- R\Delta t - W\Delta t = m\Delta v - \Delta mv_e$$

$$- R - W = m \frac{\Delta v}{\Delta t} - \frac{\Delta m}{\Delta t} v_e$$

$$- R - W = m \frac{dv}{dt} - \frac{dm}{dt} v_e$$

$$m \frac{dv}{dt} = -(R + W) + \frac{dm}{dt} v_e$$

$$\frac{dv}{dt} = a \quad ma = \sum F + E$$

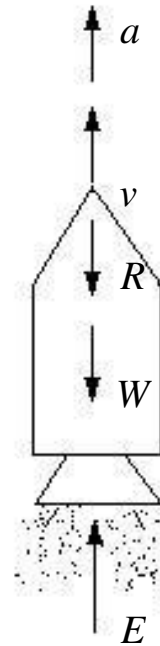
$$E = \frac{dm}{dt} v_e$$

$$+ \uparrow \sum F = ma$$

$$E - R - W = ma$$

$$F = \frac{dm}{dt} v_e = \dot{m} v_e$$

$$\dot{w} = F v_e v_p$$



b → e proceso isentrópico

$$Pv^k = \text{constante} \quad PV^k = \text{constante}$$

$$\frac{T_b}{T_e} = \left( \frac{P_b}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Gas ideal:  $v_e \propto \Delta h$

$$v_e = \sqrt{2g_o J (h_b - h_e)}$$

$$v_e = \sqrt{2g_o J C_p (T_b - T_e)}$$

$$v_e' = \sqrt{2g_o J C_p (T_b - T_e')}$$

Rendimiento de tobera:

$$\eta = \frac{h_b - h_e'}{h_b - h_e} = \frac{T_b - T_e'}{T_b - T_e}$$

cualquier sustancia gas ideal

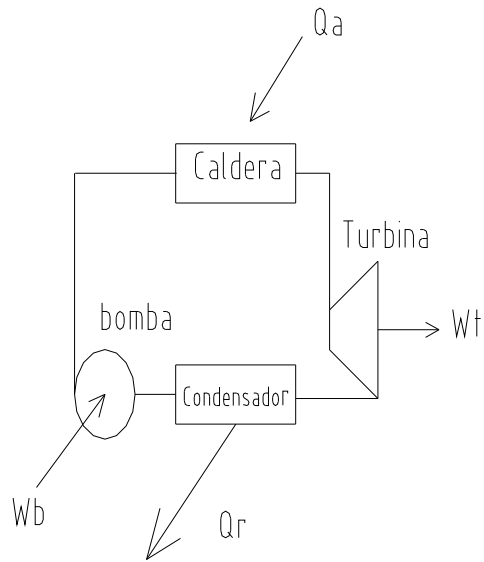
$$v_e' = \sqrt{2g_o J (h_b - h_e')} = \sqrt{2g_o J (h_b - h_e) \eta}$$

$$v_e' = \sqrt{2g_o J (h_b - h_e)} \sqrt{\eta}$$

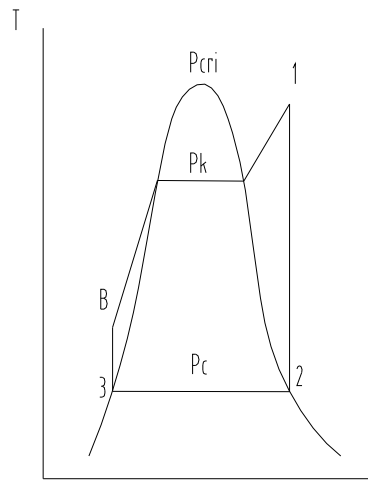
$$v_e' = v_e \sqrt{\eta}$$

$$\eta = \frac{\Delta h'}{\Delta h} \quad \Delta h' = \Delta h \eta$$

**CICLO RANKINE**  
 Dos procesos isentrópicos  
 Dos procesos isobáricos



- 1 → 2    Proceso isentrópico  
 $S_1 = S_2 \quad \Delta S = 0$
- 2 → 3    Proceso isobárico  
 $P_2 = P_3 \quad \Delta P = 0$
- 3 → B    Proceso isentrópico  
 $S_3 = S_B \quad \Delta S = 0$
- B → 1    Proceso isobárico  
 $P_B = P_1 \quad \Delta P = 0$



**B**: Subenfriado

**K**: Líquido saturado

**K'**: Vapor saturado

**1**: Vapor recalentado

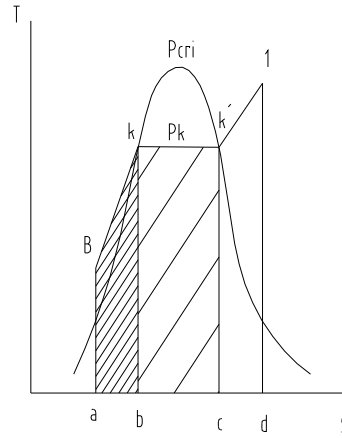
Area  $aBkb = Q_{\text{economizador}}$

Area  $bKK'c = Q_{\text{evaporador}}$

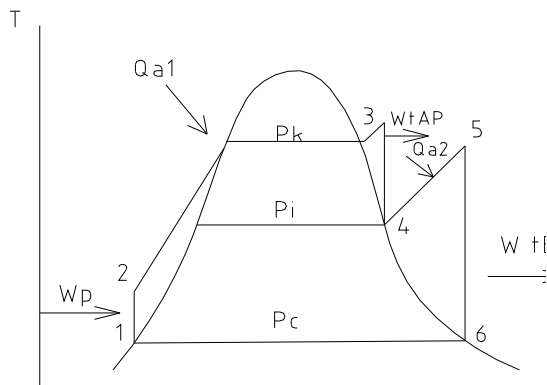
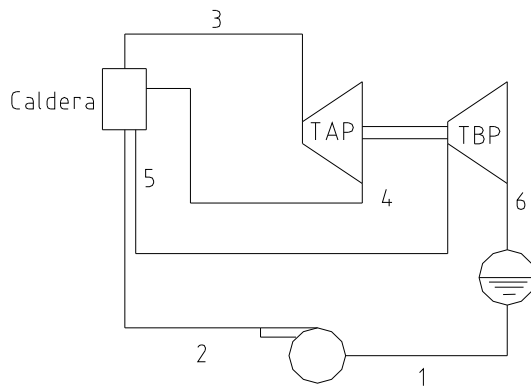
Area  $cK'1d = Q_{\text{sobrecalentador}}$

Caldera  $Q_a = \text{Area } aBKK'1d$

$Q_A = Q_{\text{economizador}} + Q_{\text{evaporador}} + Q_{\text{sobrecalentador}}$



### CICLO RANKINE CON RECALENTAMIENTO INTERMEDIO



$$h_3 + h_5 = h_4 + h_6 + w_t$$

$$w_t = \underbrace{(h_3 - h_4)}_{w_{tAP}} + \underbrace{(h_5 - h_6)}_{w_{tBP}}$$

$$w_t = w_{tAP} + w_{tBP}$$

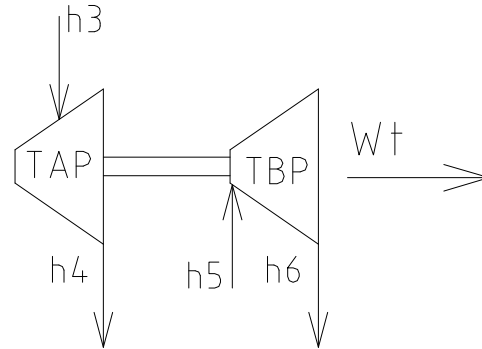
$$w_p = h_2 - h_1 \approx v_2 (P_k - P_c)$$

$$w_N = w_t - w_p$$

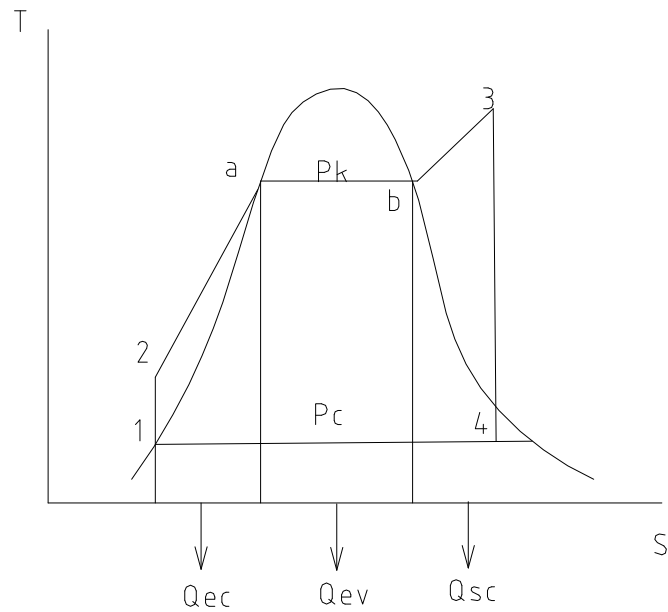
$$e = \frac{w_N}{Q_a} = \frac{w_t - w_p}{Q_{a1} + Q_{a2}}$$

$$Q_A = Q_{A1} + Q_{A2}$$

$$Q_{A2} = \text{calor del recalentador}$$



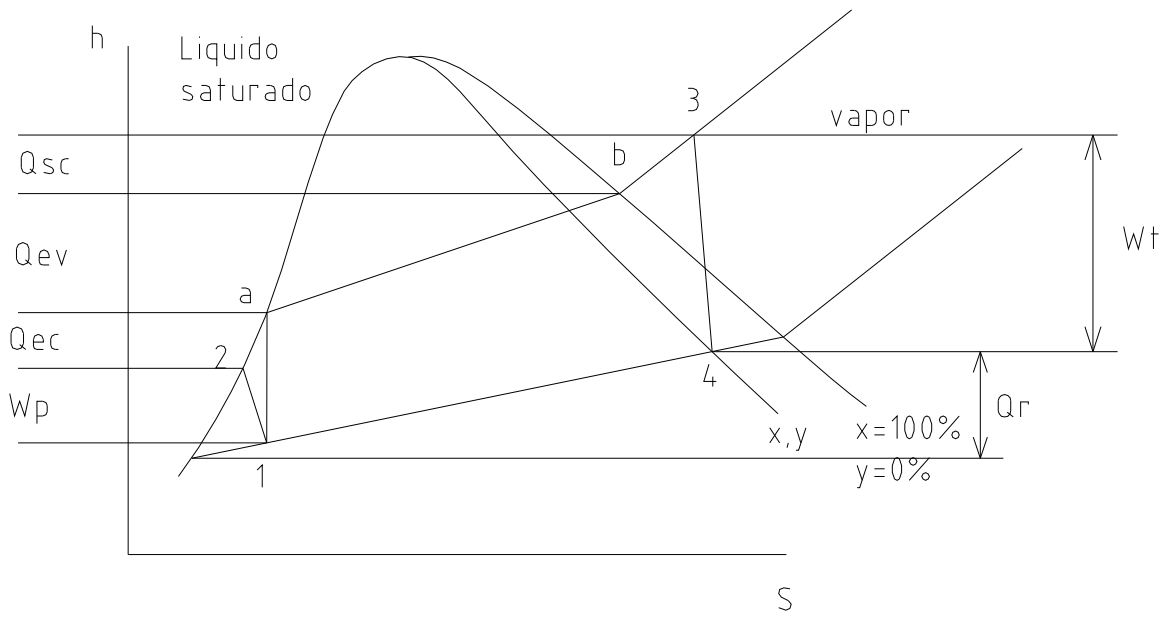
### DIAGRAMA DE MOLLIER



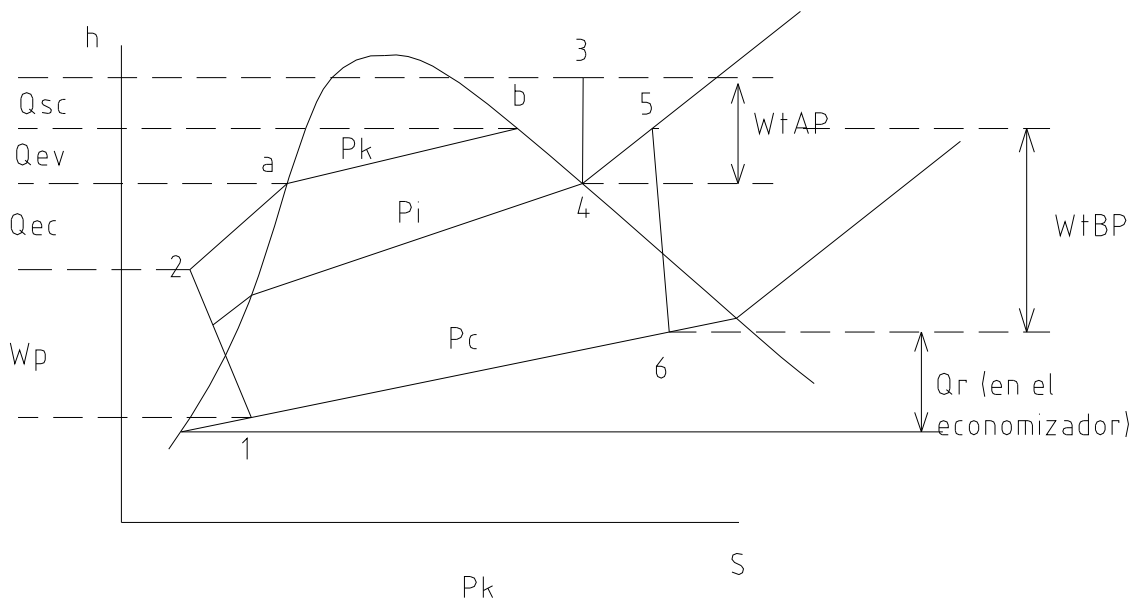
$Q_{ec} = \text{calor en el economizador}$

$Q_{ev} = \text{calor en el evaorador}$

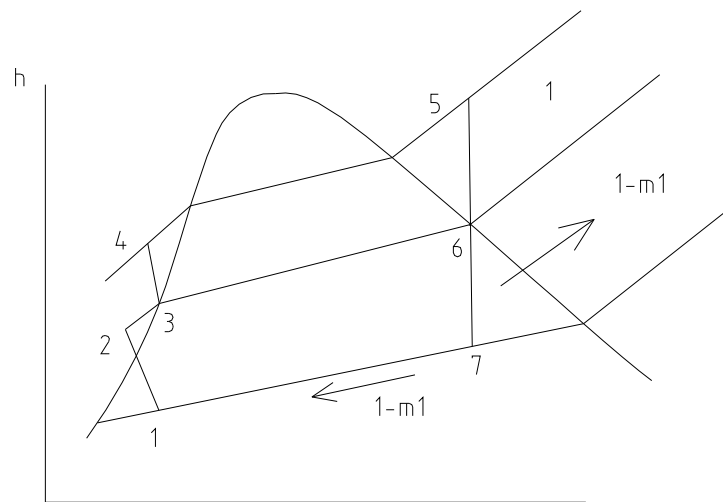
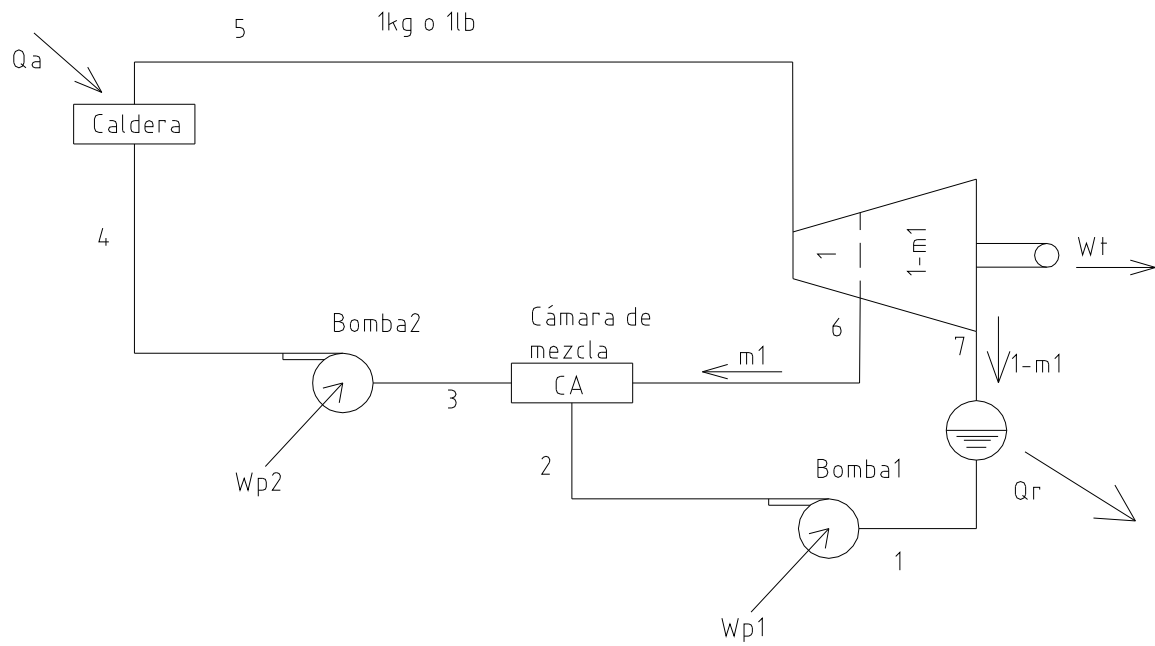
$Q_{sc} = \text{calor en el sobrecalentador}$



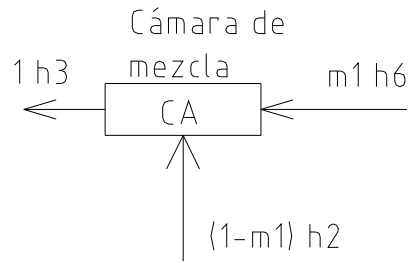
**CICLO RANKINE CON RECALENTAMIENTO INTERMEDIO (MOLIER)**



# CICLO CON REGENERACIÓN



$$m_1 = \frac{\text{kg vapor sangrado}}{\text{kg vapor}} \quad \text{o} \quad \frac{\text{lb vapor sangrado}}{\text{lb vapor}}$$



$$m_1 h_6 + (1 - m_1) h_2 = 1 h_3$$

$$m_1 (h_6 - h_2) + h_2 = h_3$$

$$m_1 = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} = \text{cantidad de vapor que hay que sacar para regenerar el ciclo}$$

$$Q_A + w_{p1} + w_{p2} = w_t + Q_R$$

$$Q_A - Q_R = w_t - \sum w_p$$

$$\sum Q = w_N$$

$$\text{Aproximando} \quad m_1 \approx \frac{h_3 - h_1}{h_6 - h_1} \quad e = \frac{w_N}{Q_A}$$

$$w_t = 1(h_5 - h_6) + (1 - m_1)(h_6 - h_7) \quad \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} \right]$$

$$w_{p1} = (h_2 - h_1)(1 - m_1) \approx (1 - m_1) v_1 (P_i - P_c)$$

$$w_{p2} = (h_4 - h_3) \approx v_3 (P_k - P_i)$$

$$Q_R = (h_7 - h_1)(1 - m_1)$$

$$Q_A = (h_5 - h_4) \quad \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} \right]$$

# CICLO CON GENERACIÓN

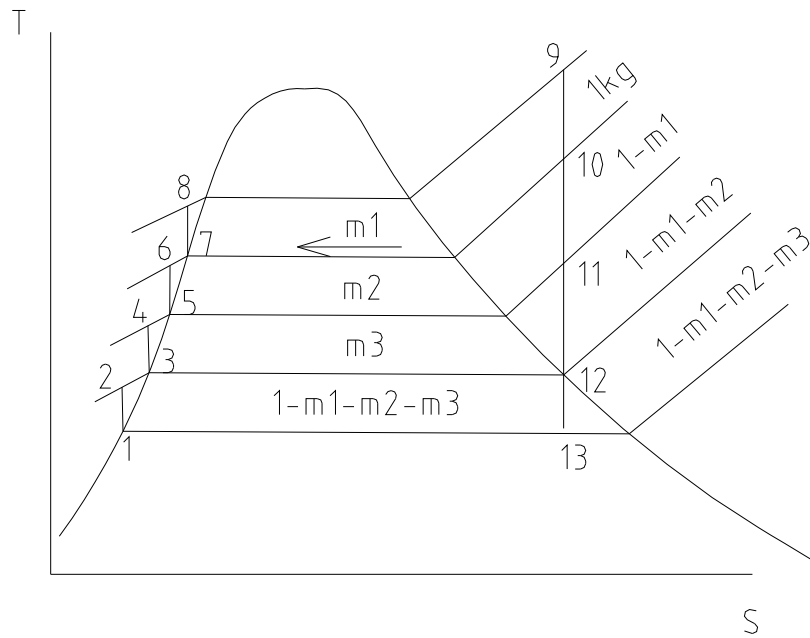
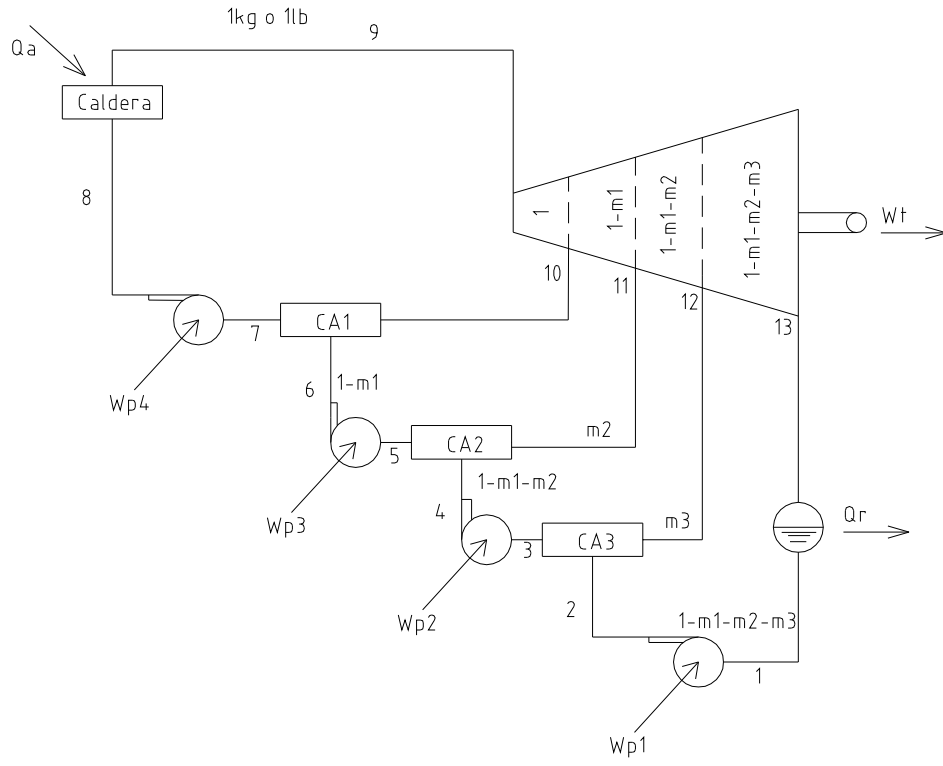


DIAGRAMA T S



$$Q_A + \sum_{i=1}^4 WP_i = W_t + Q_R$$

$$Q_A - Q_R = W_t - \sum_{i=1}^4 WP_i$$

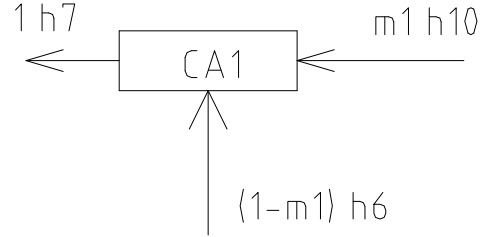
$$\Sigma Q = W_N$$

$$1(h_7) = m_1(h_{10} + h_6(1 - m_1))$$

$$1h_7 = m_1h_{10} + h_6 - h_6m_1$$

$$m_1 = \frac{h_7 - h_6}{h_{10} - h_6}$$

$$m_1 \approx \frac{h_7 - h_5}{h_{10} - h_5} \left[ \frac{\text{kg de vapor saturado}}{\text{kg de vapor}} \right]$$



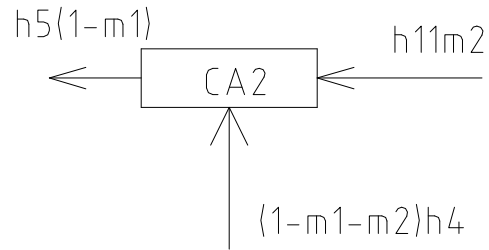
$$h_5(1 - m_1) = h_{11}m_2 + (1 - m_1 - m_2)h_4$$

$$h_5(1 - m_1) = h_{11}m_2 + h_4(1 - m_1) - h_4m_2$$

$$(1 - m_1)(h_5 - h_4) = m_2(h_{11} - h_4)$$

$$m_2 = \frac{(1 - m_1)(h_5 - h_4)}{h_{11} - h_4}$$

$$m_2 \approx \frac{(1 - m_1)(h_5 - h_3)}{h_{11} - h_3}$$



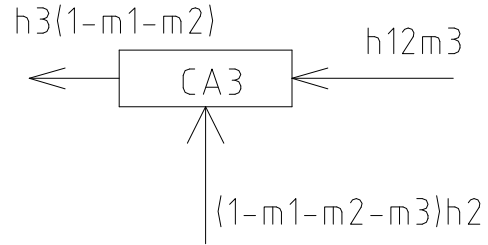
$$h_3(1 - m_1 - m_2) = h_{12}m_3 + h_2(1 - m_1 - m_2 - m_3)$$

$$h_3(1 - m_1 - m_2) = h_{12}m_3 + h_2(1 - m_1 - m_2) - h_2m_3$$

$$(1 - m_1 - m_2)(h_3 - h_2) = m_3(h_{12} - h_2)$$

$$m_3 = \frac{(1 - m_1 - m_2)(h_3 - h_2)}{h_{12} - h_2}$$

$$m_3 \approx \frac{(1 - m_1 - m_2)(h_3 - h_1)}{h_{12} - h_1}$$



$$W_t = 1(h_9 - h_{10}) + (1 - m_1)(h_{10} - h_{11}) + (1 - m_1 - m_2)(h_{11} - h_{12}) + (1 - m_1 - m_2 - m_3)(h_{12} - h_{13})$$

$$W_t = \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}; \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}; \frac{\text{Kj}}{\text{kg}} \right]$$

$$w_{p4} = 1(h_8 - h_7) \approx v_7(P_k - P_i)$$

$$w_{p3} = (1 - m_1)(h_6 - h_5) \approx (1 - m_1)v_5(P_{i1} - P_{i2})$$

$$w_{p2} = (1 - m_1 - m_2)(h_4 - h_3) \approx (1 - m_1 - m_2)v_3(P_{i2} - P_{i3})$$

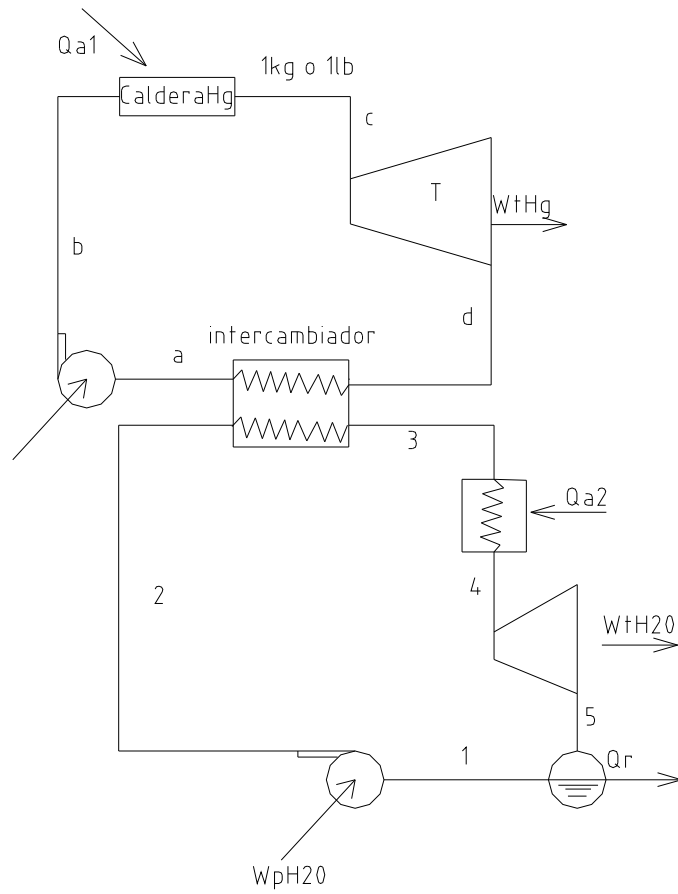
$$w_{p1} = (1 - m_1 - m_2 - m_3)(h_2 - h_1) \approx (1 - m_1 - m_2 - m_3)v_1(P_{i3} - P_c)$$

$$Q_A = h_9 - h_8 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}; \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}; \frac{\text{Kj}}{\text{kg}} \right]$$

$$Q_R = (1 - m_1 - m_2 - m_3)(h_{13} - h_1) \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}; \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}; \frac{\text{Kj}}{\text{kg}} \right]$$

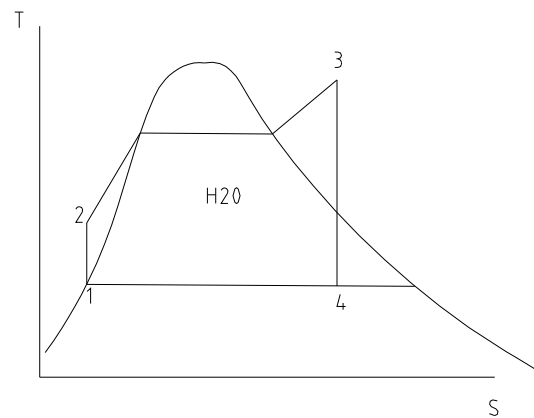
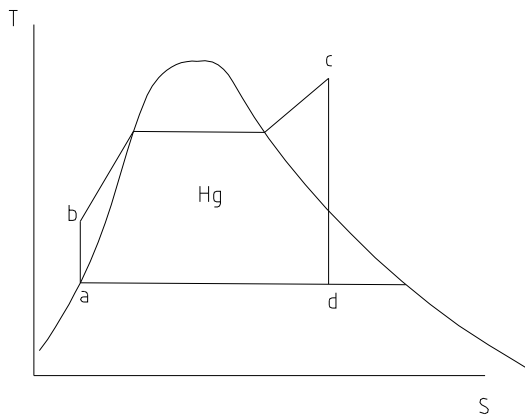
# CICLO BINARIO

Dos ciclos Rankine, uno con un fluido superior y otro con un fluido inferior.



El balance energético será:

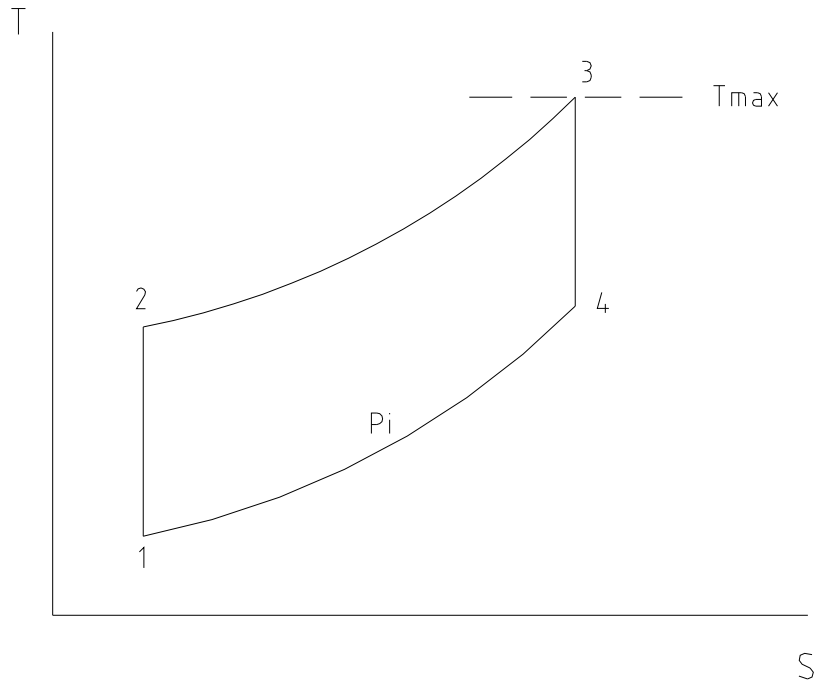
$$Q_{A1} + Q_{A2} + W_{pHg} + W_{pH_2O} = W_{THg} + W_{TH_2O} + Q_R$$



Se desea obtener trabajo máximo en una turbina de gas que funciona según el ciclo estándar de Brayton entre los límites de temperatura de 100°F y 1300°F y con presión inicial de 15 psia. Usando el estándar de aire con  $K=1.4$  y  $C_p = 0.24$  BTU/lb. Calcular la temperatura al final de la compresión, la relación de presiones y el rendimiento térmico.

Si se hacen pasar 10 lb de aire por segundo determinar la potencia máxima producida.

$$T_{\text{máx}} = 1300^\circ\text{F} + 460 = 1760^\circ\text{R}$$



Estado 1

$$P_1 = 15 \text{ psia}$$

$$T_1 = 100 + 460 = 560^\circ\text{R}$$

$$W_{\text{max}} \rightarrow T_2 = \sqrt{T_1 T_3} = \sqrt{560 * 1760} \quad T_2 = 992.7^\circ\text{R}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \quad T_4 = \frac{T_3 T_1}{T_2} = \frac{T_3 T_1}{\sqrt{T_1 T_3}} = \sqrt{T_1 T_2} = 992.7^\circ\text{R}$$

Estado 2

$$T_2 = 992.7^\circ\text{R}$$

$$T_2 = T_1 r_p^{\frac{K-1}{K}} \quad \frac{T_2}{T_1} = r_p^{\frac{K-1}{K}} \quad r_p = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{K}{K-1}} = \left( \frac{992.7}{560} \right)^{\frac{1.4}{1.4-1}}$$

$$r_p = 7.41 = \frac{P_2}{P_1} \quad P_2 = 7.41 * 15 \quad P_2 = 111.2 \text{psia}$$

Estado 3

$$T_3 = 1160^\circ\text{R}$$

$$P_3 = 11.2 \text{psia}$$

Estado 4

$$P_4 = P_1 = 15 \text{psia}$$

$$T_4 = \frac{T_3}{r_p^{\frac{K-1}{K}}} \rightarrow T_4 = 992.7^\circ\text{R}$$

$$e = \frac{W_N}{Q_A} \rightarrow e = \frac{C_p(T_3 - T_4) - C_p(T_2 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = \frac{(1760 - 992.7) - (992.7 - 560)}{1760 - 992.7}$$

$$e = 43\%$$

$$WT = 0.24(1760 - 992.7) = 184.2 \frac{\text{BTU}}{\text{LB}}$$

$$WC = 0.24(992.7 - 560) = 103.8 \frac{\text{BTU}}{\text{LB}}$$

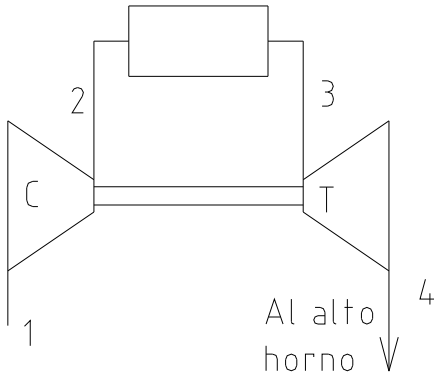
$$WN = 184.2 - 103.8 = 80.35 \frac{\text{BTU}}{\text{LB}}$$

$$\dot{\omega} = 10 \frac{\text{lb}}{\text{s}}$$

$$\dot{W} = \dot{\omega} * W = 10 \frac{\text{lb}}{\text{s}} * 80.35 \frac{\text{BTU}}{\text{LB}} * 778 \frac{\text{lb}\cdot\text{ft}}{\text{BTU}} * \frac{1 \text{hp}}{550 \frac{\text{lb}\cdot\text{ft}}{\text{ss}}}$$

$$\dot{W} = 1136.587 \text{hp}$$

Un alto horno necesita para su funcionamiento un abastecimiento de gas caliente, compresión de 30psia. El gas lo proporciona el escape de una turbina de gas que no produce otra energía que la necesaria para suministrar dicho gas. Para el ciclo de la turbina en el estado 1 la presión es de 15psia y 60°F; la temperatura en la entrada de la turbina es de 1500°F. El  $n_c$  y el  $n_t$  son del 100%. Hállense la  $r_p$  del compresor. Determine la relación de presión del compresor cuando  $n_c$  sea del 85% y  $n_t$  del 90%.



Estado (1)

$$P_1 = 15 \frac{lb}{in^2} abs$$

$$T_1 = 60 + 460 = 520^\circ R$$

Estado (2)

$$P_2 = r_p P_1 = 15 r_p$$

$$T_2 = T_1 r_p^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 520 r_p^{\frac{2}{7}}$$

Estado (3)

$$P_3 = P_2 = 15 r_p$$

$$T_3 = 1500 + 460 = 1960^\circ R$$

Estado (4)

$$P_4 = 30 \frac{lb}{in^2} abs$$

$$T_4 = \frac{T_3}{r_{P1}^{\frac{K-1}{K}}} = \frac{1960}{r_{P1}^{2/7}}$$

$$W_C = C_p (T_2 - T_1) = C_p [520 r_p^{2/7} - 520] = 0.24 \times 520 (r_p^{2/7} - 1)$$

$$W_t = C_p (T_3 - T_4) = C_p \left[ 1960 - \frac{1960}{r_p^{2/7}} \right] = 0.24 \times 1960 \left( 1 - \frac{1}{r_{P1}^{2/7}} \right)$$

$$\eta_C = \eta_t = 100\% \rightarrow W_t = W_C$$

$$0.24 \times 520 (r_{Pc}^{2/7} - 1) = 0.24 \times 1960 \left( 1 - \frac{1}{r_{Pt}^{2/7}} \right)$$

$$r_{Pc}^{2/7} - 1 = \frac{1960}{520} \left( 1 - \frac{1}{r_{Pt}^{2/7}} \right)$$

$$r_{pc} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{15}$$

$$r_{pt} = \frac{P_3}{P_4} = \frac{P_2}{30}$$

$$\left(\frac{P_2}{15}\right)^{2/7} - 1 = 3.76 \left[ 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{30}\right)^{2/7}} \right]$$

$$\frac{P_2^{2/7}}{15^{2/7}} - 1 = 3.76 - \frac{3.76 \times 30^{2/7}}{P_2^{2/7}}$$

$$\frac{P_2^{2/7} - 15^{2/7}}{15^{2/7}} = \frac{3.76P_2^{2/7} - 3.76 \times 30^{2/7}}{P_2^{2/7}}$$

$$\left(P_2^{2/7}\right)^2 - 15^{2/7} \cdot P_2^{2/7} = 3.76 \times 15^{2/7} \times P_2^{2/7} - 3.76 \times 30^{2/7} \times 15^{2/7}$$

$$\left(P_2^{2/7}\right)^2 - 2.16P_2^{2/7} = 8.15P_2^{2/7} - 21.5$$

$$\left(P_2^{2/7}\right)^2 - 10.31r_p^{2/7} + 21.5 = 0$$

$$P_2^{2/7} = \frac{10.31 \pm \sqrt{10.31^2 - 4 \times 21.5}}{2} \Rightarrow P_2^{2/7} = 7.4 \rightarrow P_2^{2/7} = 2.9$$

$$P_2 = 7.4^{7/2} = 1102.3 \frac{lb}{in^2} abs$$

$$P_2 = 2.9^{7/2} = 41.5 \frac{lb}{in^2} abs$$

$$r_p = \frac{41.5}{15} = 2.7$$

b)

$$\eta_c = 85\%, \eta_t = 90\%$$

$$\eta_c = \frac{W_c}{W_c'} \rightarrow W_c' = \frac{W_c}{\eta_c}$$

$$\eta_t = \frac{W_t'}{W_t} \rightarrow W_t' = \eta_t W_t$$

$$W_t' = W_c'$$

$$\frac{W_c}{\eta_c} = \eta_t W_t$$

$$W_c = \eta_c \cdot \eta_t \cdot W_t$$

$$0.24 \times 520 \left[ \left( \frac{P_2}{15} \right)^{2/7} - 1 \right] = 0.85 \times 0.90 \times 0.24 \times 1960 \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{P_2}{30} \right)^{2/7}} \right]$$

$$\frac{P_2 - 15^{2/7}}{15^{2/7}} = 0.85 \times 0.90 \times \frac{1960}{520} \left[ \frac{P_2^{2/7} - 30^{2/7}}{P_2^{2/7}} \right]$$

$$(P_2^{2/7})^2 - 2.16 P_2^{2/7} = 6.22 P_2^{2/7} - 16.4$$

$$(P_2^{2/7})^2 - 8.38 P_2^{2/7} + 16.4 = 0$$

$$P_2^{2/7} = \frac{8.38 \pm \sqrt{8.38^2 - 4 \times 16.4}}{2}$$

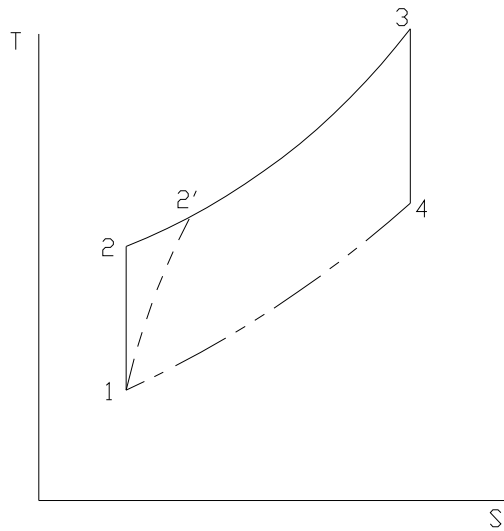
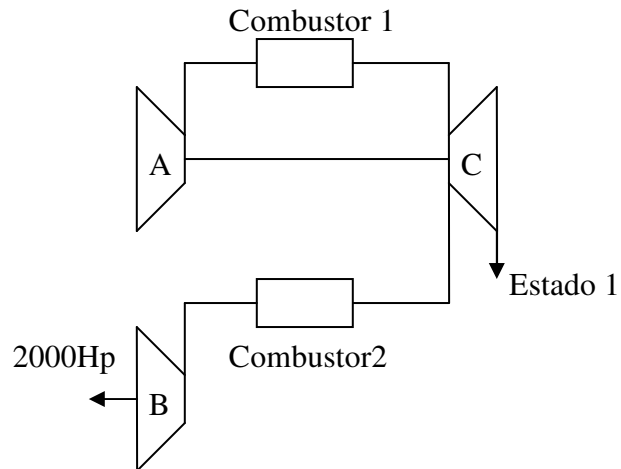
$$P_2^{2/7} = 5.26 \rightarrow P_2 = 5.26^{7/2} = 333.7$$

$$P_2^{2/7} = 3.11 \rightarrow P_2 = 53.047$$

$$r_p' = \frac{P_2}{P_1} = \frac{53.1}{15} = 3.53$$

Un grupo de turbinas de gas consta de dos turbinas A y B, dos combustores, y un solo compresor C, que suministra todo el aire necesario mientras que la turbina B suministra 2000 Hp, producción neta del grupo. Los rendimientos de la turbina y el compresor son del 83% c/u. en el estado 1 la presión es de 15 Psia y 100 °F, i el compresor funciona con una  $r_p$  de 5, la condición a la entrada de la turbina es a 1300 °F, y sin pérdida de presión con respecto a la salida del compresor. El escape de ambas turbinas a 15 Psia, determinar los calores Q1, Q2 en los combustores y el rendimiento térmico del grupo.





Estado 1

$$P_1 = 15 \frac{lb}{in^2} abs$$

$$T_1 = 100 + 460 = 560^\circ R$$

Estado 2

$$P_2 = r_p \times P_1 = 5 \times 15 = 75 \frac{lb}{in^2} abs$$

$$T_2 = T_1 \times r_p^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 560(5)^{\frac{2}{7}} = 886^\circ R$$

Estado 3

$$P_3 = P_2 = 75 \frac{lb}{in^2} abs$$

$$T_3 = 1300 + 460 = 1760^\circ R$$

Estado 4

$$P_4 = P_1 = 15 \frac{lb}{in^2} abs$$

$$T_4 = \frac{T_3}{r_p^{\frac{K-1}{K}}} = \frac{1760}{5^{\frac{2}{7}}} = 1111.2^\circ R$$

Estado 4'

$$\eta_t = \frac{W'_t}{W_t} = \frac{c_p(T_3 - T'_4)}{c_p(T_3 - T_4)}$$

$$T'_4 = T_3 - (T_3 - T_4) \times \eta_t$$

$$T'_4 = 1760 - (1760 - 1111.2) \times 0.83$$

Estado 2'

$$\eta_c = \frac{W_c}{W'_c} = \frac{c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T'_2 - T_1)}$$

$$T'_2 = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_c} = 560 + \frac{886 - 560}{0.83} = 952.5^\circ R$$

$$W'_{tA} = X \frac{lb}{lb} = c_p(T_3 - T'_4) \quad \frac{BTU}{lb}$$

$$W'_c = c_p(T'_2 - T_1) \quad \frac{BTU}{lb}$$

$$W'_{iB} = (1 - X)c_p(T_3 - T'_4) \quad \frac{BTU}{lb}$$

$$W'_{iA} = W'_{iC}$$

$$Xc_p(T_3 - T'_4) = c_p(T'_2 - T_1)$$

$$X = \frac{T'_2 - T_1}{T_3 - T'_4} = \frac{952.5 - 560}{1760 - 1221}$$

$$X = 0.72 \frac{lbA}{lbB}$$

$$(1 - X) = 1.0 - 0.72 = 0.28 \frac{lbB}{lbC}$$

$$W'_{iB} = 0.28 \times 0.24 \times (1760 - 1221.4) = 36.19 \frac{BTU}{lb}$$

$$^* W_{iB} = 2000 Hp$$

$$^* \omega_B = \frac{W_{iB}}{W'_{iB}} = \frac{2000 Hp}{36.1 \frac{BTU}{lb}} \times \frac{550 \frac{lb-ft}{s}}{Hp} \times \frac{1 BTU}{778 lb-ft}$$

$$^* \omega_B = 39.1 \frac{lb}{s}$$

$$^* \omega_C = 39.1 \frac{lbB}{s} \times \frac{1 lbC}{0.28 lbB} = 139.6$$

$$^* \omega_A = 0.72 \frac{lbB}{lbC} \times 139.6 \frac{lbC}{s} = 100.5 \frac{lb}{s}$$

$$Q_A = c_p(T_3 - T'_2)$$

$$Q_A = 0.24(1760 - 952.5) = 193.7 \frac{BTU}{lb}$$

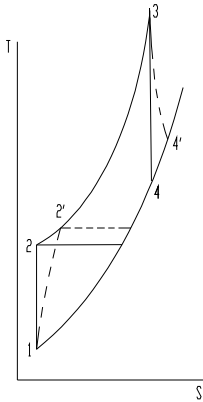
$$^* Q_1 = 193.7 \frac{BTU}{lb} \times 100.5 \frac{lb}{s} = 19466.85 \frac{BTU}{s}$$

$$Q_2^* = 193.7 \frac{BTU}{lb} \times 39.1 \frac{lb}{s} = 7573.67 \frac{BTU}{s}$$

$$e = \frac{W_n}{Q_1 + Q_2} = 5.2\%$$

El aire entra en un motor a gas fijo a  $500^\circ \text{R}$  y  $14.7 \text{ Psia}$ , la  $r_p = 7.95$  y la temperatura real en un punto de descarga del compresor es de  $1000^\circ \text{R}$ , los productos de la combustión entran a la turbina a  $2000^\circ \text{R}$  y se expande hasta la presión de  $14 \text{ Psia}$ , se utiliza regeneración con  $60\%$  de efectividad y no se consideran caídas de presión y la temperatura real de escape es  $1320^\circ \text{R}$ . Muestre todos los estados en un diagrama T-S.

- 1) Para el ciclo ideal Brayton determine  $W_{\text{neto}}$  y  $e$
- 2) Hallar  $\eta_c$  y  $\eta_t$
- 3)  $W_{\text{neto}}$  y  $Q'_{\text{A}}$ ,  $e'$
- 4) Cuál sería el  $e$  sin regeneración
- 5) Si la potencia es  $5 \text{ KHp}$  que volumen de aire en  $\text{ft}^3$  entra al compresor.



### PARA EL CICLO IDEAL

Estado 1.

$$P_1 = 14.7 \text{ lb} / \text{in}^2 \text{ abs}$$

$$T_1 = 500^\circ \text{R}$$

Estado 2.

$$r_p * P_1 = 7.95 * 14.7 = 116.8 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \text{ abs}$$

$$T_2 = T_1 * r_p^{K-1/K}$$

$$T_2 = 500 * (7.95)^{1.4-1/1.4} = 904^\circ \text{R}$$

Estado 3.

$$P_3 = P_2 = 116.8 \text{ lb} / \text{in}^2 \text{ abs}$$

$$T_3 = 2000^\circ \text{R}$$

Estado 4.

$$P_4 = 14.7 \text{ lb} / \text{in}^2 \text{ abs}$$

$$T_4 = T_3 * r_p^{K-1/K}$$

$$T_4 = 2000^\circ \text{ R} / 7.95^{2/7} = 1106^\circ \text{ R}$$

$$W_t = C_p ( T_3 - T_4 )$$

$$W_t = 0.24 \text{ Btu} / \text{lb} ( 2000-1106 )$$

$$W_t = 214.56 \text{ Btu} / \text{lb}$$

$$W_c = C_p ( T_2 - T_1 )$$

$$W_c = 0.24 ( 904-500 ) = 96.9 \text{ Btu} / \text{lb}$$

$$Q_A = C_p ( T_3 - T_2 ) = 0.24 ( 2000-904 )$$

$$Q_A = 263.04 \text{ Btu} / \text{lb}$$

$$a) W_n = W_t - W_c = 214.56 - 96.9 = 117.67$$

$$e = \frac{W_n}{Q_A} = \frac{117.67}{263.04} = 0.44$$

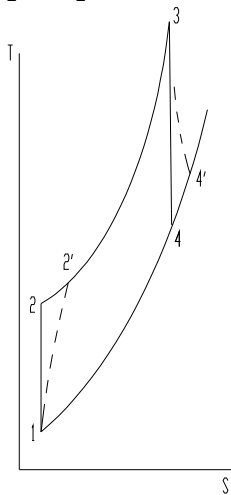
b) TENIENDO EN CUENTA  $\eta_c, \eta_t$

$$T_2' = 1000^\circ \text{ R}$$

$$T_4' = 1320^\circ \text{ R}$$

Estado 2'

$$P_2' = P_2 = 116.8 \text{ lb} / \text{in}^2 \text{ abs}$$



Estado 4'

$$P_4' = P_4 = 14.7 \text{ lb} / \text{in}^2 \text{ abs}$$

$$T_4 = 1320.^\circ \text{ R}$$

$$\eta_c = \frac{W_c}{W'_c}$$

$$\eta_t = \frac{W'_t}{W_t}$$

$$\eta_c = \frac{Cp(T_2 - T_1)}{Cp(T'_2 - T_1)} = \frac{(T_2 - T_1)}{(T'_2 - T_1)}$$

$$\eta_c = \frac{904 - 500}{1000 - 500} = 0.8$$

$$\eta_t = \frac{Cp(T_3 - T'_4)}{Cp(T_3 - T_4)} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_4}$$

#### **RENDIMIENTO REAL SIN GENERACION**

$$Q_A' = Cp ( T_3 - T_2' ) = 0.24 ( 2000-1000 ) = 240$$

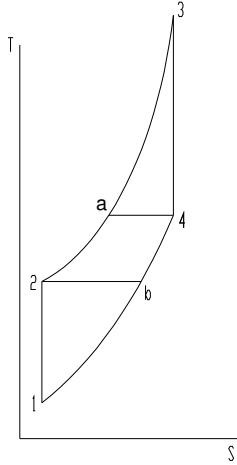
$$Wt' = Cp ( T_3 - T_4' ) = 0.24 ( 2000-1320 ) = 163.2$$

$$Wc' = Cp ( T_2' - T_1 ) = 0.24 ( 1000 - 500 ) = 120$$

$$Wn' = Wt' - Wc' = 163.2 - 120 = 43.2$$

$$e = \frac{Wn'}{Q_A'} = \frac{43.2}{240} = 0.18$$

#### **RENDIMIENTO CON GENERACION DE 100 % PARA CICLO IDEAL**



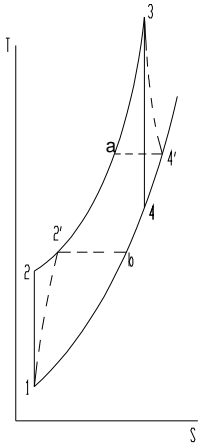
$$T_a = T_4 = 1106 \text{ } ^\circ \text{R}$$

$$T_b = T_2 = 904 \text{ } ^\circ \text{R}$$

$$Q_A = C_p (T_3 - T_a) = 0.24 (2000 - 1106) = 214.56$$

$$e = \frac{W_n}{Q_A} = \frac{117.67}{214.56} = 0.548$$

**RENDIMIENTO CON GENERACION DEL 100 %, PERO CON  $\eta_c, \eta_t$**



$$Q_A' = C_p (T_3 - T_a)$$

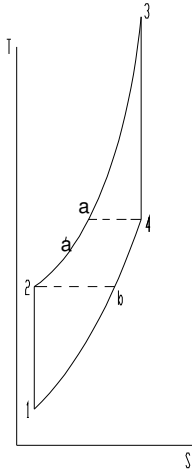
$$T_a = T_4' = 1320 \text{ } ^\circ \text{R}$$

$$Q_A' = 0.24 (2000 - 1320) = 43.2$$



$$e' = \frac{W'n}{Q'_A} = \frac{43.2}{163.2} = 0.2614$$

**RENDIMIENTO CON GENERACION DEL 60 %, PERO CON  $\eta_c, \eta_t = 100\%$**



$$\eta_r = \frac{Cp(Ta' - T_2)}{Cp(T_4 - T_b)}$$

$$T_b = T_2$$

$$\eta_r = \frac{Ta' - T_2}{T_4 - T_2}$$

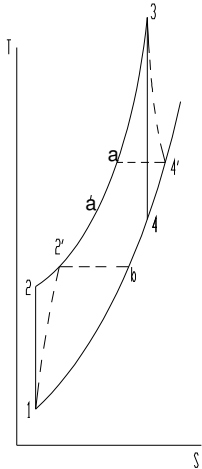
$$Ta' = T_2 + \eta_r (T_4 - T_2)$$

$$Ta' = 904 + 0.6 (1106 - 904) = 1025.2$$

$$Q_A' = Cp (T_3 - Ta') = 0.24 (2000 - 1025.2) = 233.95$$

$$e' = \frac{Wn}{Q'_A} = \frac{117.66}{233.95} = 0.50$$

Para nuestro caso  $\eta_r = 60\%; \eta_c = 80\%; \eta_t = 76\%$



$$\eta_r = \frac{Cp(Ta' - T_2')}{Cp(T_4' - Tb)}$$

$$Tb = T_2'$$

$$\eta_r = \frac{(Ta' - T_2')}{(T_4' - Tb)}$$

$$Ta' = T_2 + \eta_r (T_4 - T_2')$$

$$Ta' = 1000 + 0.6 (1320 - 1000) = 1192^\circ \text{ R}$$

$$Q_A' = Cp (T_3 - Ta') = 0.24 (2000 - 1192) = 193.92$$

$$Wn' = Wt - Wc' = 43.2$$

$$e' = \frac{W_n'}{Q_A'} = \frac{43.2}{193.92} = 0.222$$

$$\dot{W}_n' = 5000 \text{ Hp}$$

$$\dot{\omega} = \frac{\dot{W}_n'}{W_n} = \frac{5000 \text{ Hp}}{43.2 \text{ btu/lb}} * \frac{1 \text{ btu}}{778 \text{ lb.ft}} * \frac{550 \text{ lb.ft/s}}{\text{Hp}}$$

$$\dot{\omega} = 81.83 \frac{\text{lb}}{\text{s}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 4909 \frac{\text{lb}}{\text{min}}$$

$$P_1 V_1 = \omega R T_1$$

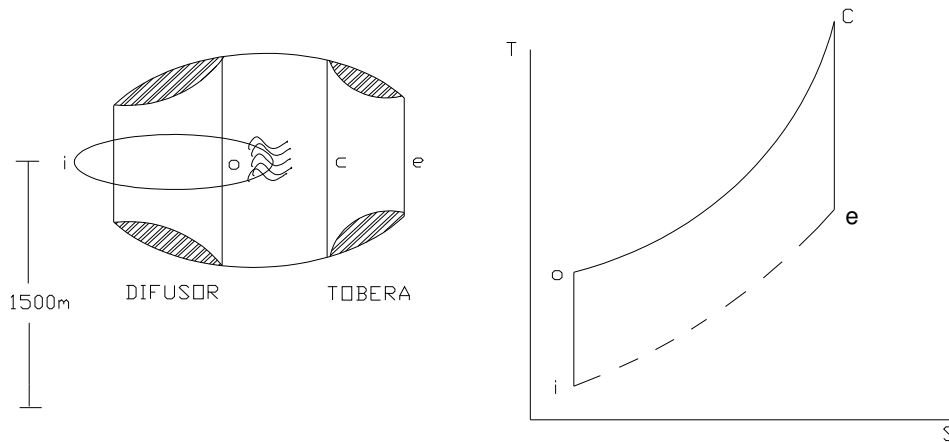
$$\dot{V}_1 = \frac{4909 \text{ lb/min} * 53.3 \text{ lb-ft/lb}^\circ\text{R} * 500^\circ\text{R}}{14.7 \text{ lb/in}^2 * 144 \text{ in}^2/\text{ft}^2} = 61803 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

Un avión estatorreactor vuela a 780 m/s a una altitud de 15000 m, donde las condiciones ambientales tienen una presión de 0.105 Kg / cm<sup>2</sup> abs y 220 ° K. El rendimiento de ariete o dinámico es del 94 %. El aire calentado pasa a través de una tobera que lo expande hasta la presión ambiente con un rendimiento de tobera del 90 %.

Determinar.

1. La T y P del aire ideales y reales a la salida del difusor
2. velocidad ideal y real a la salida de la tobera.
3. El impulso desarrollado para un consumo de combustible de poder calorífico 10280 Kcal / Kg

$$r_{c/a} = 0.017 \text{ Kg}_c/\text{Kg}_a$$



### Estado i

$$P_i = 0.105 \text{ Kg / cm}^2 \text{ abs}$$

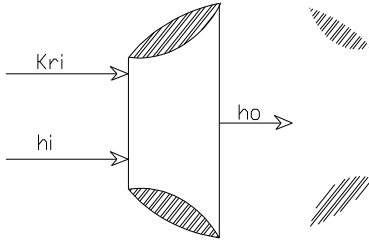
$$T_i = 220^\circ \text{ k}$$

### Proceso i a 0

$$S = \text{cte}$$

$$T_b = T_i r_p^{k-1/k}$$

## Difusor



$$Kri + hi = hc$$

$$hc - hi = Kri$$

$$C_p (T_o - T_i) = \frac{Vp^2}{2goJ}$$

$$T_o - T_i = \frac{Vp^2}{2goJCp}$$

$$T_o = T_i + \frac{Vp^2}{2goJCp}$$

$$T_i = 220 \text{ } ^\circ \text{ k}$$

$$T_o = 220 + \frac{780^2 \text{ m}^2 / \text{s}^2}{2 * 9.8 \text{ m} / \text{s}^2 * 427 \text{ kgm} / \text{Kcal} * 0.24 \text{ kcal} / \text{Kg} ^\circ \text{K}}$$

$$T_o = 522.8 \text{ } ^\circ \text{ K}$$

$$r_p = \left( \frac{T_o}{T_i} \right)^{k/k-1} = \left( \frac{522.8}{220} \right)^{7/2} = 20.6$$

$$P_o = 20.6 * 0.105 = 216 \text{ Kg/cm}^2 \text{ abs}$$

## Estado O

$$P_o = 2.16 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \text{ abs}$$

$$T_o = 522.8 \text{ } ^\circ \text{ K}$$

## Estado C

$$P_c = P_o = 2.16 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \text{ abs}$$

$$P_{c/a} = 0.017 \text{ Kg c} / \text{kg}$$

$$Q_A = 0.017 \text{ Kg c} / \text{kg} * 10280 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$Q_A = 174.8 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$Q_A = C_p (T_c - T_o)$$

$$T_c = T_o + \frac{Q_A}{C_p}$$

$$T_c = 522.8 + \frac{174.8}{0.24} = 1251^\circ\text{K}$$

### Proceso C a e

S = cte

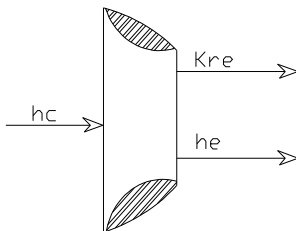
$$T_e = \frac{T_c}{r p^{k-1/k}} = \frac{1251}{20.6^{2/7}} = 527.4^\circ\text{K}$$

### Estado e

$$P_e = 0.105 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \text{ abs}$$

$$T_e = 527.4^\circ\text{K}$$

### TOBERA



$$hc = he + Kre$$

$$Kre = hc - he = \frac{V_e^2}{2g_oJ}$$

$V_e$  = velocidad de escape relativa al motor

$$V_e = \sqrt{2g_oJ(hc - he)} = \sqrt{2g_oJ C_p (T_c - T_e)}$$

$$V_e = \sqrt{2 * 9.8 \text{ m/s} * 427 \text{ Kg} / \text{Kcal} * 0.24 \text{ Kcal} / \text{Kg}^\circ\text{K} (1251 - 527.4^\circ\text{K})}$$

$$V_e = 1205.5 \text{ m/seg}$$

$$F = \frac{\omega}{g_0} [(1 + 0.017)1205.5 - 780] m / seg$$

$$F = 45.5 \text{ kg}$$

$$\eta_r = \frac{P_{o'} - P_i}{P_o - P_i}$$

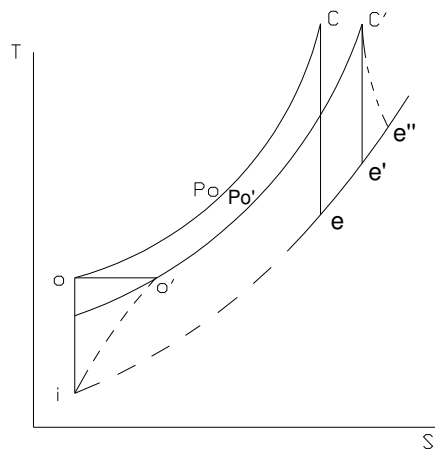
$$P_{o'} = P_i + \eta_r (P_o - P_i)$$

$$P_{o'} = 0.105 + 0.94 (2016 - 0.105) = 2.03 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \text{ abs}$$

### Estado O'

$$P_{o'} = 2.03 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \text{ abs}$$

$$T_{o'} = T_o = 522.8^\circ \text{ c}$$



$$Q_A = 174.8 \text{ Kcal} / \text{Kg}$$

$$Q_A = C_p (T_{c'} - T_{o'})$$

$$T_{c'} = T_{o'} + \frac{Q_A}{C_p}$$

$$T_{c'} = 522.8 + \frac{174.8}{0.24}$$

$$T_{c'} = 1251.1^\circ \text{ R}$$

### Estado c'

$$T_{c'} = 1251.1^\circ \text{ R}$$

$$Pc' = Po' = 2.03 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \text{ abs}$$

### Proceso c' a e'

$$S = c \text{ te}$$

$$Te' = \frac{1251.1}{\left(\frac{2.03}{0.15}\right)^{2/7}} = 594.3^\circ\text{K}$$

$$\eta_i = \frac{hc' - he''}{hc' - he'} = \frac{Cp(Tc' - Tc'')}{Cp(Tc' - Te')}$$

$$Te'' = Tc' + \eta_i(Tc' - Te')$$

$$Te'' = 1251.1 - 0.90(1251.1 - 594.3)$$

$$Te'' = \mathbf{659.9^\circ K}$$

$$Ve'' = \sqrt{2 * 9.8 * 127 * 0.24(1251.1 - 659.9)}$$

$$Ve'' = \mathbf{1089 \text{ m/s}}$$

$$F' = \frac{1}{9.8} [(1 + 0.017)1089 - 780] = 33.41 \text{ kg}$$

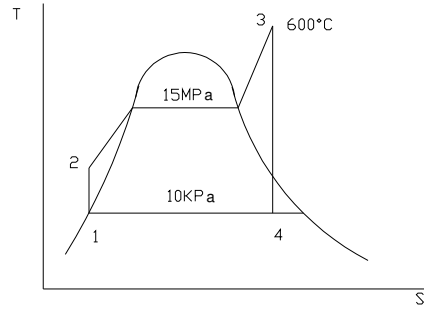
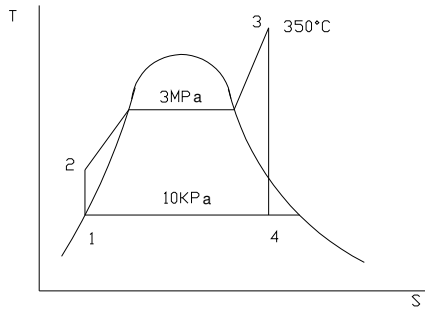
$$\dot{W} = F' * V$$

$$\dot{W} = 33.41 \text{ Kg} * 780 \text{ m/s} * \frac{1 \text{ Cv}}{75 \text{ Kg.m/s}} = 347.4 \text{ Cv}$$

Considere una central eléctrica de vapor que opera con el ciclo rankine ideal. El vapor entra a la turbina a 3 MPa y 350 ° c y se expande hasta la presión de 10 KPa del condensador.

Determine:

El rendimiento térmico de esta central y compare este rendimiento con el se tendría si se elevara la presión de la caldera hasta 15 MPa y se recalienta el vapor hasta 600 °C, manteniendo la presión del condensador.



a) Estado 1

$$P_1 = 10 \text{ Kpa}$$

$$h_1 = 191.87 \text{ KJ/Kg} \quad \text{por tabla}$$

$$V_1 = 0.00101 \frac{m^3}{Kg}$$

$$P_1 = 10 \text{ Kpa}$$

$$S_f = 0.6493 \text{ KJ / Kg}^\circ\text{K}$$

$$h_f = 191.89 \text{ KJ / Kg}$$

$$h_{fg} = 2392.8$$

$$s_{fg} = 7.5009$$

Estado 2

$$P_2 = 3 \text{ Mpa}$$

$$S = S_1 = 0.6493, \quad V_2 = V_1$$

$$W_p = V_1 (P_2 - P_1) = 0.00101 \frac{m^3}{Kg} [3000 - 10] \text{ KN / m}^2$$

$$W_p = 3.019 \text{ KJ / Kg}$$

$$W_p = h_2 - h_1 = V_1 (P_2 - P_1)$$

$$h_2 = h_1 + W_p = 191.83 + 3.019$$

$$h_2 = 194.85$$



Estado 3

$$\begin{aligned} P_3 &= 3 \text{ Mpa} & h_3 &= 3115 \text{ KJ / Kg} \\ T_3 &= 350^\circ \text{ c} & s_3 &= 6.7428 \text{ KJ / Kg}^\circ\text{K} \end{aligned}$$

Estado 4

$$\begin{aligned} P_4 &= 10 \text{ KPa} \\ S_4 &= S_f + X_4 S_{fg} \end{aligned}$$

$$X_4 = \frac{S_4 - S_f}{S_{fg}} = \frac{6.7428 - 0.6493}{7.5009} = 0.81$$

$$\begin{aligned} h_4 &= h_f + X_4 S_{fg} \\ h_4 &= 191.83 + 0.81 \cdot 2392.8 \\ h_4 &= 2129.9 \text{ KJ / Kg} \end{aligned}$$

$$W_t = h_3 - h_4 = 3115.3 - 194.85 = 2920.45$$

$$e = \frac{W_n}{Q_A} = \frac{982.38}{2920.45} = 0.33$$

b) Estado 2

$$\begin{aligned} P_2 &= 15 \text{ MPa} \\ S_2 &= S_1, V_2 = V_1 \end{aligned}$$

$$W_p = V_1 (P_2 - P_1) = 0.00101 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} (15000 - 10) \text{ KN/ m}^2$$

$$h_2 = h_1 + W_p = 191.83 + 15.13 = 206.96$$

Estado 3

$$P_3 = 15 \text{ MPa}$$

Ahora se recalienta hasta  $600^\circ \text{ c}$

$$\begin{aligned} T_3 &= 600^\circ \text{ C} \\ h_3 &= 3682.3 \text{ KJ / Kg} \\ S_3 &= 6.6776 \text{ KJ / Kg}^\circ\text{K} \end{aligned}$$

Estado 4

$$P_4 = 10 \text{ KPa}$$

$$S_4 = S_3 = S_f + X_4 S_{fg}$$

$$X_4 = \frac{6.6776 - 0.6493}{7.5009} = 0.80$$

$$h_4 = 191.83 + 0.80 \cdot 2392.8$$

$$h_4 = 2106.07$$

$$W_t = h_3 - h_4 = 3682.3 - 2106.07 = 1576.23$$

## 5. TURBINAS

La forma en que se produce el trabajo en la turbina es: partiendo de un fluido a alta presión con alta energía potencial que luego de expansionarse en una tobera aumenta la energía cinética y la velocidad que produce una fuerza de empuje en los alabes móviles que están diseñados para cambiar la cantidad de movimiento en la corriente.

### 5.1. PRINCIPIOS

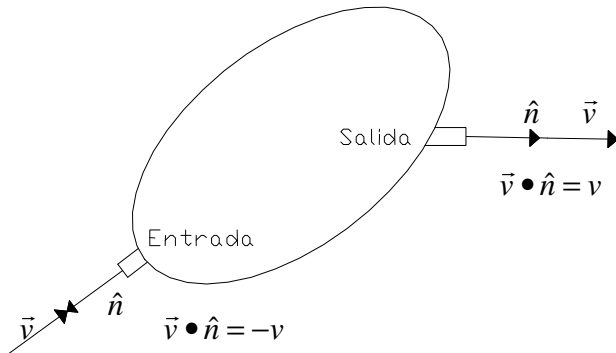
5.1.1. Ecuación de cantidad de movimiento para volumen de control:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{V_{vc}} \vec{v} \rho dv + \int_{S_{vc}} \vec{v} (\rho * \vec{v} \cdot \hat{n}) dA \quad \text{Para estado estacionario tenemos que:}$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_{vc}} \vec{v} \rho dv = 0 \quad \text{Entonces } \sum \vec{F} \text{ se simplifica en la siguiente ecuación:}$$

$$\sum \vec{F} = \int_{S_{vc}} \vec{v} (\rho * \vec{v} \cdot \hat{n}) dA = \int_{S_{vc}} \vec{v} dm \quad \text{Para una entrada y una salida tenemos que:}$$

$$\sum \vec{F} = \int_{ent} \vec{v} dm + \int_{sal} \vec{v} dm \quad \text{Teniendo en cuenta que: } dm = \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dA$$



$$\sum \vec{F} = \int_{ent} \vec{v} dm + \int_{sal} \vec{v} dm \quad (1) \text{ a}$$

la entrada tengo:

$$dm = \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dA = -\rho v dA \quad (2) \text{ y}$$

a la salida tengo:

$$dm = \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dA = \rho v dA \quad (3)$$

reemplazando 2 y 3 en 1:

$$\sum \vec{F} = \int_{ent} \vec{v} (\rho * -v dA) + \int_{sal} \vec{v} \rho * v dA \quad \text{Si } \vec{v} \text{ es uniforme para las secciones de}$$

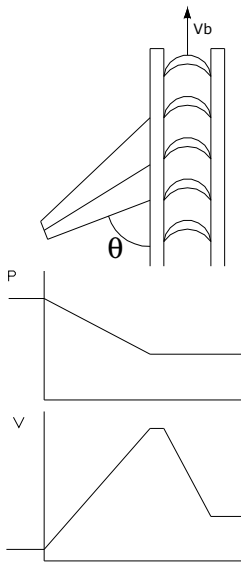
entrada y salida tenemos:

$$\sum \vec{F} = \vec{v} \int_{ent} (\rho * -v dA) + \vec{v} \int_{sal} \rho * v dA = \sum \vec{F} = v_{ent} (-\dot{m}) + v_{sal} (\dot{m}) = (v_{sal} - v_{ent}) \dot{m} \quad (4)$$

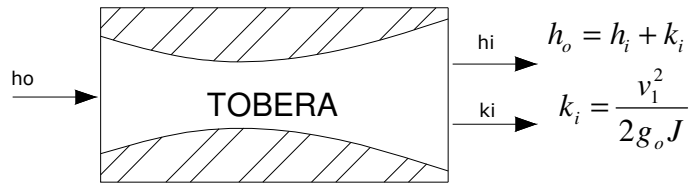
De donde tenemos que la ecuación 4 es la ecuación de continuidad donde:

$$\dot{m} = \dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal}$$

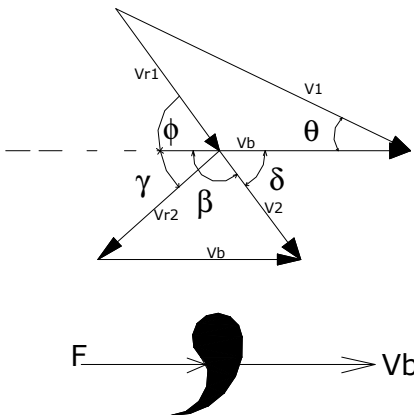
### 5.1.2. Diagrama de velocidad de una turbina de acción de una etapa



#### Análisis de energía en la tobera Condiciones de Estancamiento



$\frac{v_1^2}{2g_o J} = h_o - h_i$  elevando al cuadrado ambas partes se tiene  $v_1 = \sqrt{2g_o J(h_o - h_i)}$  podemos observar que  $v_1$  es proporcional a  $\sqrt{h_o - h_i}$  entonces a mayor salto de entalpia mayor velocidad



$V_1$  = Velocidad absoluta del vapor a la entrada  
 $V_{r1}$  = Velocidad relativa del vapor a la entrada  
 $V_2$  = Velocidad absoluta del vapor a la salida  
 $V_{r2}$  = Velocidad relativa del vapor a la salida  
 $V_b$  = Velocidad de la paleta  
 $\theta$  = Angulo formado por  $V_b$  y  $V_1$   
 $\phi$  = Angulo formado por  $V_b$  y  $V_{r1}$   
 $\gamma$  = Angulo formado por  $V_b$  y  $V_{r2}$   
 $\delta$  = Angulo formado por  $V_b$  y  $V_2$   
 $F = \dot{m}(v_1 \cos \theta - v_2 \cos \delta) [N]$   
 $\dot{W}_b = F V_b = [\dot{m}(v_1 \cos \theta - v_2 \cos \delta) v_b]$

Cuando es el caso real y existe fricción de fluido, la velocidad relativa  $v_{r1} > v_{r2}$  y se estima  $v_{r2}$  utilizando un coeficiente de velocidad por rozamiento, ósea un rendimiento  $\eta_f = \frac{v_{r2}}{v_{r1}}$ . Este valor es del orden del 90%. Este diagrama de velocidad es el mismo para cualquier tipo de paleta.

### 5.1.3. Velocidad De Trabajo Máximo

Esto se da cuando  $\delta = 90$  y  $v_2$  es perpendicular a  $v_b$  donde la potencia  $\dot{W} = Fv_b$ , y la velocidad de paleta es  $v_b = \dot{m}(v_1 \cos \theta - v_2 \cos \delta)$  pero  $v_2 \cos \delta$  es cero.

### 5.1.4. Rendimiento

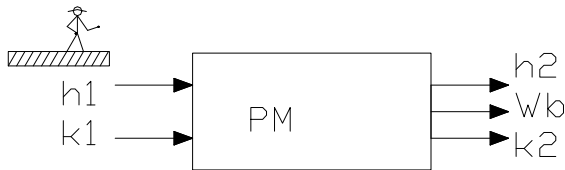
$$\eta_b = \frac{W_b}{K_1} = \frac{W_b}{\frac{v_1^2}{2g_0 J}}$$

Rendimiento de paleta

$$\eta_s = \frac{W_s}{-\Delta h_s}$$

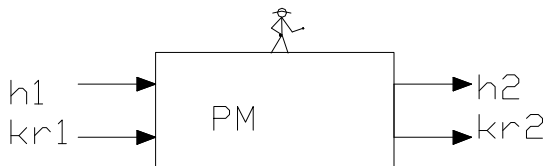
Rendimiento de etapa

### 5.1.5. Ecuación de Energía Para Paletas



$$k_1 + h_1 = k_2 + h_2 + W_b$$

$$W_b = (k_1 - k_2) + (h_1 - h_2)$$



$$k_{r1} + h_1 = k_{r2} + h_2$$

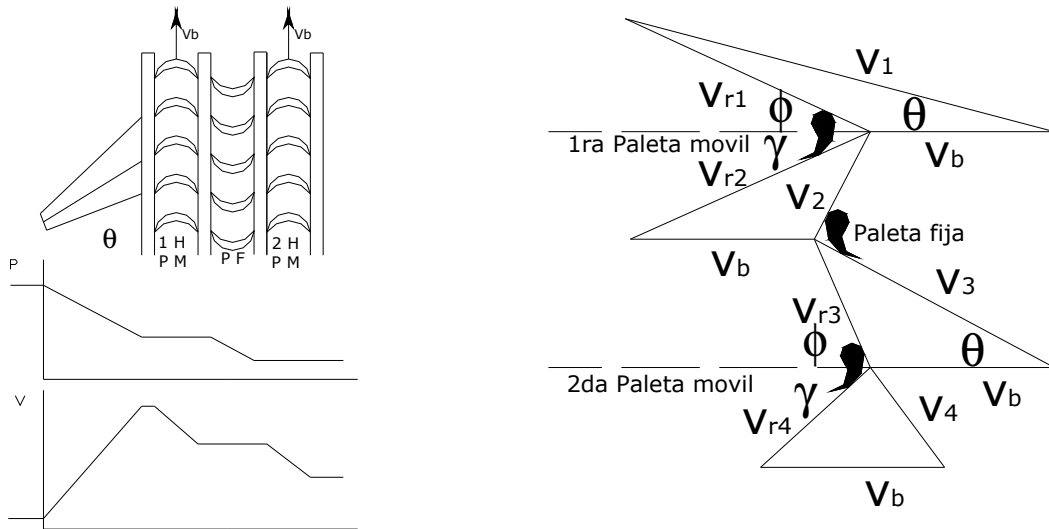
$$(h_1 - h_2) = (k_{r2} - k_{r1})$$

Entonces tenemos que  $W_b = (k_1 - k_2) + (k_{r2} - k_{r1})$  que es igual a:

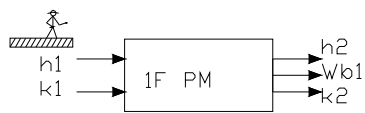
$$W_b = \frac{(v_1^2 - v_2^2) + (v_{r2}^2 - v_{r1}^2)}{2g_0}$$

## 5.2. ETAPA CURTIS O ETAPA DE VELOCIDAD COMPUESTA

Los cálculos de la etapa Curtis están basados en el diagrama de velocidades.

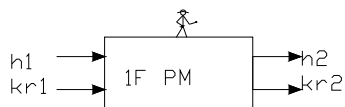


Las potencias y el trabajo pueden ser hallados con base en los diagramas de energía.



$$k_1 + h_1 = k_2 + h_2 + W_{b1}$$

$$W_{b1} = (k_1 - k_2) + (h_1 - h_2)$$



$$k_{r1} + h_1 = k_{r2} + h_2$$

$$(h_1 - h_2) = (k_{r2} - k_{r1})$$



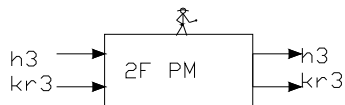
$$k_2 + h_2 = k_3 + h_3$$

$$h_2 - h_3 = k_3 - k_2$$



$$k_3 + h_3 = k_4 + h_4 + W_{b2}$$

$$W_{b2} = (k_3 - k_4) + (h_3 - h_4)$$

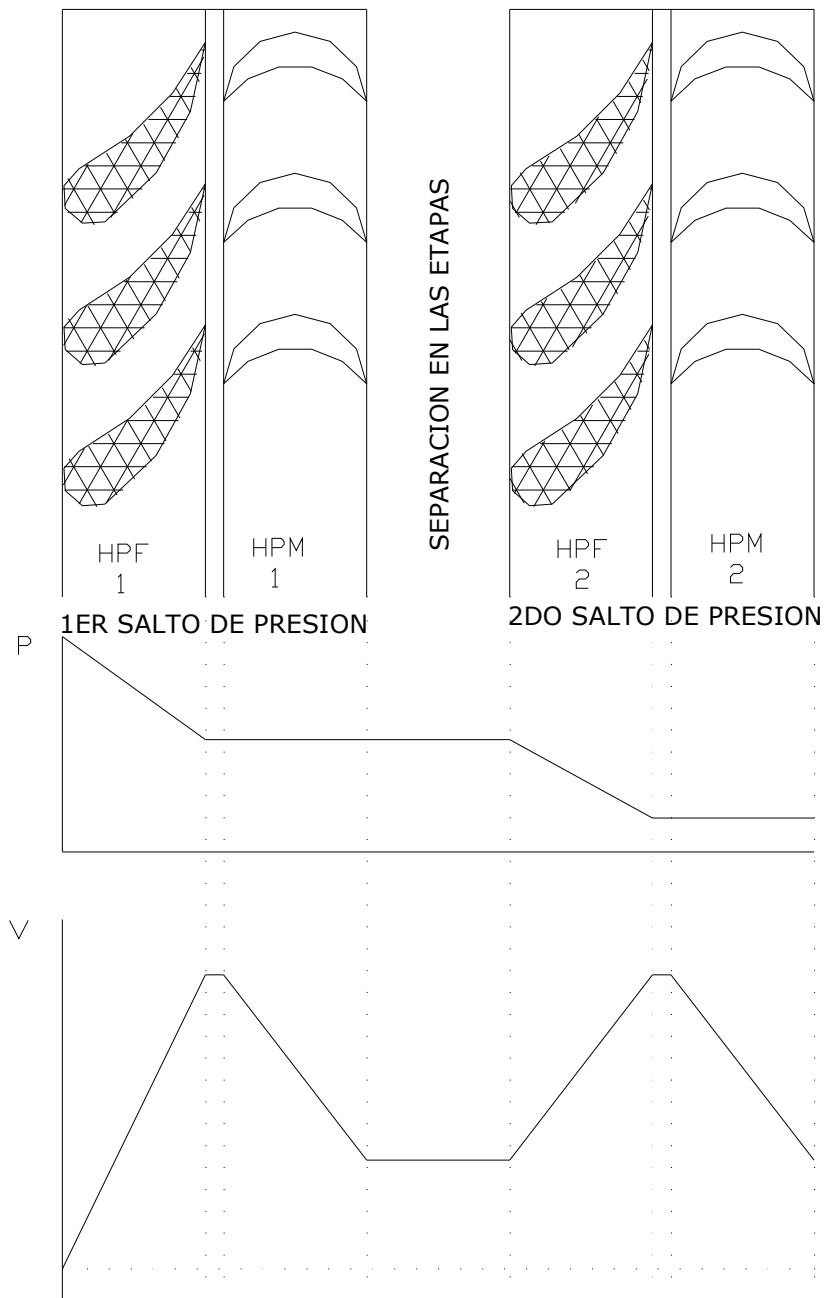


$$k_{r3} + h_3 = k_{r4} + h_4$$

$$(h_3 - h_4) = (k_{r4} - k_{r3})$$

### 5.3. TURBINA RATEAU

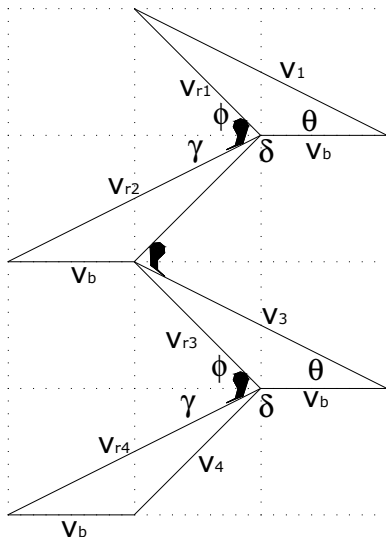
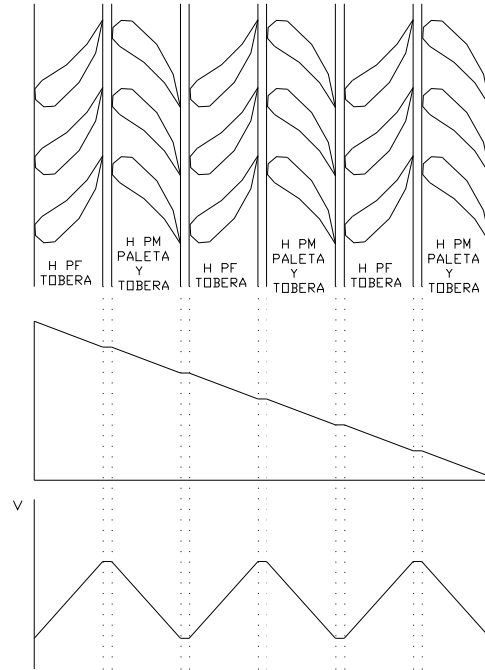
Esta turbina obtiene un  $\Delta h$  grande por medio de una serie de pequeñas expansiones. Hay un grupo de toberas para cada expansión y una hilera de paletas o rodets para cada grupo.



## 5.4. TURBINAS DE REACCIÓN

Una etapa de reacción es aquella en que hay una caída importante de presión al pasar el fluido entre las paletas, que actúan por tanto como toberas y paletas sobre las que se realiza un trabajo.

Una etapa o salto esta conformado por una hilera fija y una móvil.

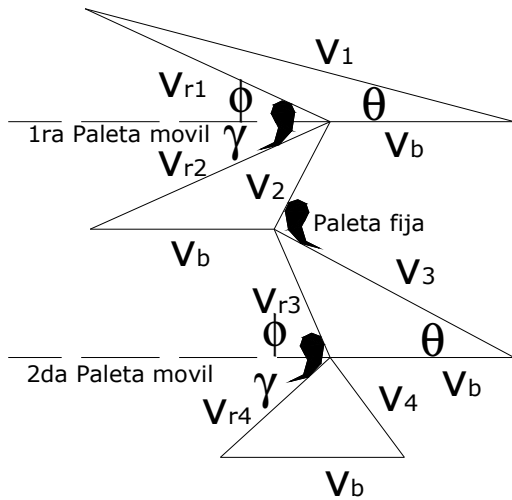


Si la proporción de  $\Delta h$  por etapa es igual en las paletas móviles y fijas se dice que existe un grado de reacción del 50% entonces  $\gamma = \theta$  y  $\phi = \beta = 180 - \delta$  con la misma caída de entalpía en cada hilera y se tiene que:

$$v_{r2} = v_1 \text{ y } v_{r1} = v_2$$



EJERCICIO: una etapa curtis recibe vapor con 1000 btu/lb. de entalpía y 2400 ft/s de velocidad absoluta. Para la velocidad de las paletas se tiene que  $v_b = 600$  ft/s,  $\theta_1 = \theta_2$ , el coeficiente de velocidad por fricción es de 90 y 93% para las paletas móviles y para las paletas fijas respectivamente. Las paletas son simétricas. Hallar para un flujo masico de 10 lb/s la  $\dot{W}$  producida, la entalpía a la salida de la etapa curtis y los rendimientos de paleta.



$$h_1 = 1000 \frac{btu}{lb}$$

$$v_1 = 2400 \frac{ft}{s}$$

$$v_b = 600 \frac{ft}{s}$$

$$\theta_1 = \theta_2 = 20^\circ$$

$$\eta_{fm} = 0.9$$

$$\eta_{ff} = 0.93$$

$$\sigma = 10 \frac{lb}{s}$$

Del primer triangulo obtengo  $v_{r1} \sin \phi_1 = 2400 \sin 20$  y  $v_{r1} \cos \phi_1 = 2400 \cos 20 - 600$

$$tg \phi_1 = \frac{2400 \sin 20}{2400 \cos 20 - 600} \Rightarrow \phi_1 = tg^{-1} \frac{2400 \sin 20}{2400 \cos 20 - 600} \Rightarrow \phi_1 = 26.4^\circ$$

$$v_{r1} = \frac{2400 \sin 20}{\sin \phi} \Rightarrow v_{r1} = 1846.2 \frac{ft}{s}$$

$$\eta_{fm} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}} \Rightarrow v_{r2} = \eta_{fm} v_{r1} = 0.9 * 1846.2 \frac{ft}{s} \Rightarrow v_{r2} = 1716 \frac{ft}{s} \text{ También se tiene que } \phi = \gamma$$

$$v_2 \sin \beta = 763.4 \frac{ft}{s}$$

$$v_2 \cos \beta = (1537.8 - 600) \frac{ft}{s}$$

$$tg \beta = \frac{763.4 \frac{ft}{s}}{1537.8 - 600 \frac{ft}{s}} \Rightarrow \beta = tg^{-1} = \frac{763.4 \frac{ft}{s}}{1537.8 - 600 \frac{ft}{s}} \Rightarrow \beta = 39.14^\circ$$

$$v_2 = \frac{(1537.8 - 600) \frac{ft}{s}}{\cos 39.14^\circ} \Rightarrow v_2 = 1209.4 \frac{ft}{s}$$

$$\eta_{ff} = \frac{v_3}{v_2} \Rightarrow v_2 = \eta_{ff} v_3 = 0.93 * 1209.4 \frac{ft}{s} \Rightarrow v_3 = 1088.6 \frac{ft}{s}$$

Del tercer triangulo obtengo  $v_{r3} \text{sen} \phi_2 = 1088.43 \text{sen} 20$  y  $v_{r3} \text{cos} \phi_2 = 1088.46 \text{cos} 20 - 600$

$$\text{tg} \phi_2 = \frac{1088.46 \text{sen} 20}{1088.46 \text{cos} 20 - 600} \Rightarrow \phi_2 = \text{tg}^{-1} \frac{1088.16 \text{sen} 20}{1088.46 \text{cos} 20 - 600} \Rightarrow \phi_2 = 41.36^\circ \Rightarrow \gamma_2 = \phi_2 = 41.36^\circ$$

$$v_{r3} = \frac{1088.46 \text{sen} 20}{\text{sen} 41.36} \Rightarrow v_{r3} = 563.3 \frac{ft}{s}$$

$$v_4 \text{sen} \delta_2 = 346.16$$

$$v_4 \text{cos} \delta_2 = 600 - 393.19$$

$$\text{tg} \delta_2 = \frac{346.16}{600 - 393.19} \Rightarrow \delta_2 = 59.14^\circ$$

$$v_4 = \frac{346.16}{\text{sen} 59.14^\circ} = 403.25 \frac{ft}{s}; v_{r4} = \eta_{fm} * v_{r3} = 0.9 * 563.3 \Rightarrow v_{r4} = 523.86 \frac{ft}{s}$$

La fuerza ejercida sobre la primera hilera de paletas es  $F_{b1} = \frac{\dot{w}}{g_o} (v_1 \text{cos} \theta - v_2 \text{cos} \delta_1)$

$$F_{b1} = \frac{10 \frac{lb}{s}}{32.2 \frac{ft}{s^2}} (2400 \text{cos} 20 - v_1 209.4 \text{cos} 140.86) \frac{ft}{s} \Rightarrow F_{b1} = 991.7 lb$$

PRIMERA HILERA DE PALETAS MÓVILES:

La potencia en la paleta es:  $\dot{W}_{b1} = F_{b1} * v_{b1} \Rightarrow \dot{W}_{b1} = 991.7 lb * 600 \frac{ft}{s} * \frac{1 hp}{550 \frac{lb \cdot ft}{s}} = 1081.8 hp$

Ecuaciones De Energía:

El trabajo en la paleta es:  $W_b = (k_1 - k_2) + (h_1 - h_2) = (k_{r2} - k_{r1}) + (k_1 - k_2)$  lo que se traduce en:

$$W_{b1} = \frac{(v_1^2 - v_2^2) + (v_{r2}^2 - v_{r1}^2)}{2g_o} = \frac{(2400^2 - 1209.4^2) + (1716.9^2 - 1846^2)}{2 * 32.2 \frac{ft}{s^2}} * 10 \frac{lb}{s} = 595752 \frac{lb \cdot ft}{s}$$

$\dot{W}_{b1} = 595752 \frac{lb \cdot ft}{s} * \frac{1 hp}{550 \frac{lb \cdot ft}{s}} = 1083 hp$  se puede hallar la entalpía  $h_2$  de la siguiente manera:

$$(h_1 - h_2) = (k_{r2} - k_{r1}) = \frac{(v_{r2}^2 - v_{r1}^2)}{2g_o J} \Rightarrow h_2 = h_1 - \frac{(v_{r2}^2 - v_{r1}^2)}{2g_o J}$$

tenemos que:

$$h_2 = 1000 \frac{btu}{lb} - \frac{(1716.9^2 - 1846.2^2) \frac{ft^2}{s^2}}{2 * 32.2 \frac{ft}{s^2} * 778 \frac{lb \cdot ft}{btu}} \Rightarrow h_2 = 1009.18 \frac{btu}{lb} <$$

El rendimiento de paleta es:  $\eta_{b1} = \frac{W_{b1}}{v1^2} \Rightarrow \eta_{b1} = \frac{59575.2 \frac{ft}{s}}{2400^2 \frac{ft^2}{s^2}} = 0.66 \Rightarrow \eta_{b1} = 66\%$

$$\frac{2 * 32.2 \frac{ft}{s}}$$

### HILERA DE PALETAS FIJAS

$$k_2 + h_2 = k_3 + h_3 \Rightarrow h_3 = h_2 + k_2 - k_3 = h_2 + \frac{(v_2^2 - v_3^2)}{2g_0J}$$

$$h_3 = 1009.18 \frac{btu}{lb} + \frac{(1209.4^2 - 1088.46^2) \frac{ft^2}{s^2}}{2 * 32.2 \frac{ft}{s^2} * 778 \frac{lb \cdot ft}{btu}} \Rightarrow h_3 = 1014.72 \frac{btu}{lb} <$$

### SEGUNDA HILERA DE PALETAS MÓVILES

$F_{b2} = \frac{\dot{w}}{g_o} (v_3 \cos \theta - v_4 \cos \delta_2)$  reemplazando valores en esta ecuación obtenemos:

$$F_{b2} = \frac{10 \frac{lb}{s}}{32.3 \frac{ft}{s^2}} (1088.46 \cos 20 - 403.25 \cos 59.14) \frac{ft}{s} \Rightarrow F_{b2} = 253.4 lb$$

$$\dot{W}_{b2} = F_{b2} * v_b \Rightarrow \dot{W}_{b2} = 253.4 lb * 600 \frac{ft}{s} * \frac{1 hp}{550 \frac{lb \cdot ft}{s}} = 276.46 hp$$

### Ecuaciones De Energía:

El trabajo producido es:  $W_{b2} = (k_3 - k_4) + (h_3 - h_4) = (k_{r4} - k_{r3}) + (k_3 - k_4)$  lo que se traduce en:

$$W_{b2} = \frac{(v_3^2 - v_4^2) + (v_{r4}^2 - v_{r3}^2)}{2g_0} = \frac{(1088.46^2 - 403.46^2) + (523.86^2 - 563.3^2) \frac{ft^2}{s^2}}{2 * 32.2 \frac{ft}{s^2}} * 10 \frac{lb}{s} = 15115.85 \frac{lb \cdot ft}{s}$$

$$\dot{W}_{b2} = 151158.5 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{s}} * \frac{1 \text{hp}}{550 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{s}}} = 274.86 \text{hp} \quad \text{Se puede hallar la entalpía } h_4 \text{ de la siguiente}$$

$$\text{manera: } (h_3 - h_4) = (k_{r4} - k_{r3}) = \frac{(v_{r4}^2 - v_{r3}^2)}{2g_0 J} \Rightarrow h_{r4} = h_{r3} - \frac{(v_{r4}^2 - v_{r3}^2)}{2g_0 J} \quad \text{reemplazando en}$$

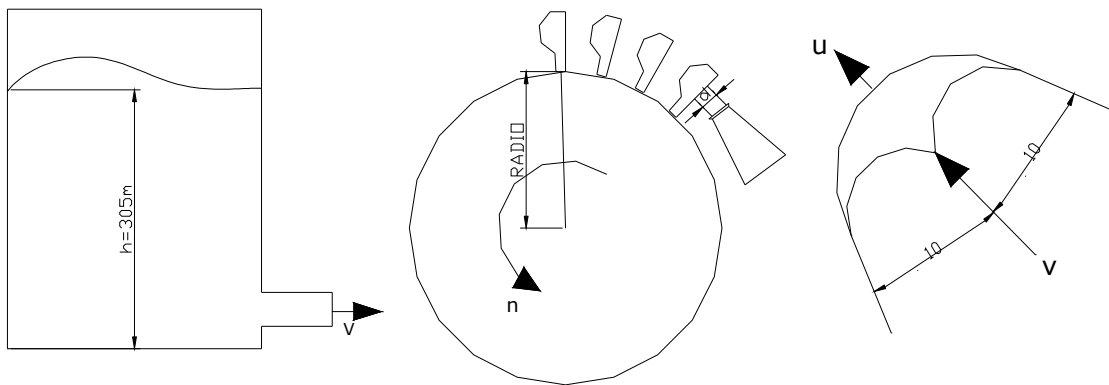
$$h_4 = 1014.72 \frac{\text{btu}}{\text{lb}} - \frac{(563.3^2 - 523.86^2) \frac{\text{ft}^2}{\text{s}^2}}{2 * 32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} * 778 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{btu}}} \Rightarrow h_4 = 1015.57 \frac{\text{btu}}{\text{lb}} <$$

$$\text{El rendimiento de paleta es: } \eta_{b2} = \frac{W_{b2}}{\frac{v_3^2}{2g_0}} \Rightarrow \eta_{b1} = \frac{15115.8 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}{\frac{1088.46^2 \frac{\text{ft}^2}{\text{s}^2}}{2 * 32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}} = 0.82 \Rightarrow \eta_{b2} = 82\%$$

El trabajo total de paleta es:

$$\dot{W}_b = \dot{W}_{b1} + \dot{W}_{b2} \Rightarrow \dot{W}_b = 1083.18 \text{hp} + 276.46 \text{hp} \Rightarrow \dot{W}_b = 1369.54 \text{hp}$$

EJERCICIO: En la figura puede verse una turbina de una central hidroeléctrica que funciona con una columna estática de agua de altura igual a 305m. En cada una de sus 6 toberas y gira a 270 rpm. Cada conjunto de rueda y generador debe desarrollar una potencia útil de 22000 Kw. El rendimiento del generador se asume igual a 90% y puede esperarse un rendimiento de conversión de la energía cinética de los chorros de agua en energía suministrada por la turbina de 85%. La velocidad periférica media para rendimiento máximo es aproximadamente el 47% de la velocidad del chorro. Si cada uno de los alabes tiene la forma indicada, determinar el diámetro  $d$  del chorro y el diámetro  $D$  de la rueda, necesarios para las anteriores condiciones. Supóngase que el agua actúa sobre el alabe que esta tangente a cada uno de los chorros.

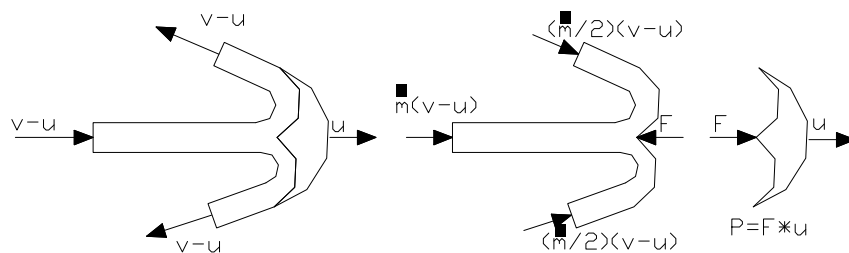


$$u = \frac{\omega D}{2} = \frac{\pi n D}{60}$$

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 * 9.81 * 305} \frac{m}{s} = 77.3 \frac{m}{s} = \text{velocidad del chorro}$$

$$u = 0.47v ; u = 0.47 * 77.3 = 36.3 = \text{velocidad de paleta}$$

$$D = \frac{60u}{\pi n} = \frac{60 * 36.3}{\pi * 270} = 2.56m$$



$A = \frac{\pi d^2}{4}$  Pero también tenemos que  $Q = Av$  y  $\dot{m} = \rho Q = \rho AV$  de esto tenemos:

$$F = \dot{m}(v-u) + \frac{\dot{m}}{2}(v-u)\cos 10 + \frac{\dot{m}}{2}(v-u)\cos 10 = \dot{m}(v-u) + \dot{m}(v-u)\cos 10 = \dot{m}(v-u)(1 + \cos 10)$$

$P = F * u = \dot{m}(v-u)(1 + \cos 10)u \Rightarrow P_{util} = 22000 Kw$  Y si P es el 85 y el 90% tenemos que

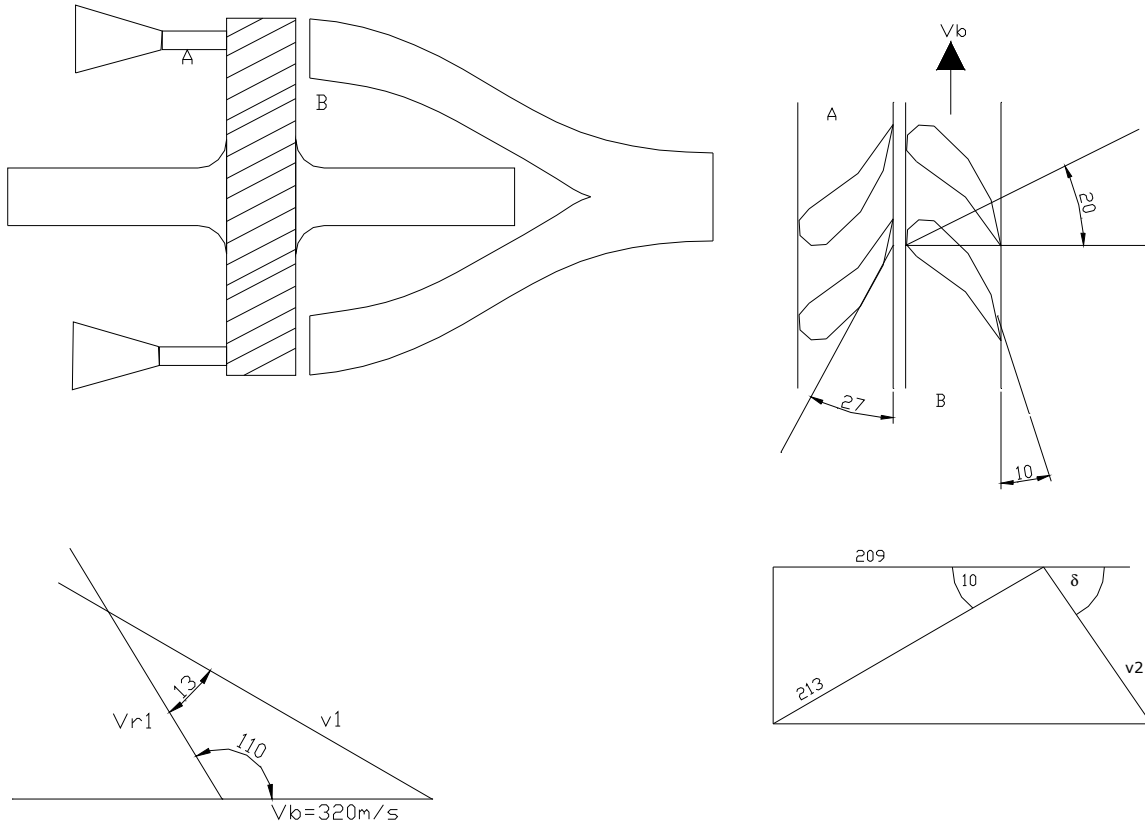
$$P = \frac{P_{util}}{0.85 * 0.9} = \frac{22000 Kw}{0.85 * 0.9} = 28758 Kw = \dot{m}u(v-u)(1 + \cos 10) \quad \text{Si } v=77.3, \quad u=36.3 \quad \text{y}$$

$\dot{m} = \rho Q = \rho AV$  tenemos que  $P = \rho AVu(v-u)(1 + \cos 10)$  despejamos el área y reemplazamos valores:

$$A = \frac{P}{\rho V u (v-u)(1 + \cos 10)} = \frac{28758 \times 10^3 \frac{Nm}{s}}{1000 \frac{kg}{m^3} * 77.3 \frac{m}{s} * 36.3 \frac{m}{s} (77.3 + 36.3) \frac{m}{s}} \Rightarrow A = 0.126 m^2$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{Despejamos } d \text{ de esta ecuación para obtener: } d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \Rightarrow d = 0.4 \text{ m}$$

EJERCICIO: En la figura puede verse en detalle el diagrama de la tobera estacionaria A y las paletas giratorias B de una turbina de gas. Los productos de combustión pasan a través de las paletas fijas del diagrama montadas a  $27^\circ$  e inciden sobre las paletas móviles del rotor. Los ángulos que se indican se han tomado para que la velocidad del gas relativa a las paletas móviles forme a la entrada un ángulo de  $20$  grados para turbulencia mínima correspondiente a una velocidad media de las paletas de  $320 \text{ m/s}$  a un radio de  $38 \text{ cm}$ . Si el flujo de gas rebosa las paletas es de  $13.6 \text{ kg/s}$ . Determine la potencia útil teórica de la turbina.



$$\frac{v_b}{\text{sen}13} = \frac{v_1}{\text{sen}110} = \frac{v_{r1}}{\text{sen}27}$$

$$v_1 = 320 \frac{\text{sen}110}{\text{sen}43} = 440 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{r1} = 320 \frac{\text{sen}27}{\text{sen}43} = 213 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_2 \cos \delta = 320 - 209.7 = 36.9$$

$$\text{tg} \delta = \frac{36.9}{320 - 209.7} = 18.5$$

$$v_2 = \frac{36.9}{\text{sen}18.5} = 113.9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$F = \dot{m}(v_1 \cos \theta - v_2 \cos \delta_1) = 13.6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (440 \cos 27 - 113.9 \cos 18.5) \frac{\text{m}}{\text{s}} \Rightarrow F = 3872 \text{ N}$$

$$P = F * v_b = 3872 \text{ N} * 320 \frac{\text{m}}{\text{s}} \Rightarrow P = 1236 \text{ Kw} \triangleleft$$

APUNTES DE CLASE DE LA ASIGNATURA TERMICAS III

HUGO ELIECER SALCEDO VERA  
JORGE ALBERTO URIBE DAZA  
EDGAR FERNEY COMBARIZA SUAREZ  
EDWARD HERNAN PEREZ ALFONSO  
ALEX FRANCISCO GUERRA NEIRA  
JUAN CARLOS ZAMBRANO TRIANA  
LUIS MAURICIO CASTIBLANCO  
ISRAEL CRISTANCHO  
FERNANDO CHAPARRO  
GIOVANNY ARIZA

PRESENTADO EN LA ASIGNATURA DE TERMICAS III

PRESENTADO A:  
INGENIERO OSWALDO ECHEVERRIA SALAMANCA

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA  
2005



