Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

TERMODINÁMICA

Térmicas III

Hugo Eliecer Salcedo Vera - morichal51@yahoo.com

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 Ranking
- Ciclo Ranking con recalentamiento intermedio
- Ciclo Ranking 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

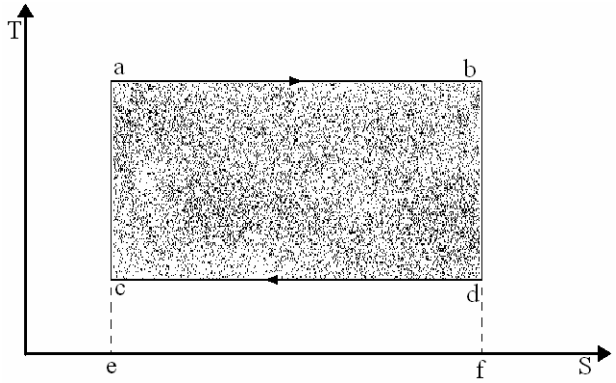
- Bombas
- Compresores
- Calderas
- Propulsión a chorro
- Cohetes

Bibliografía:

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

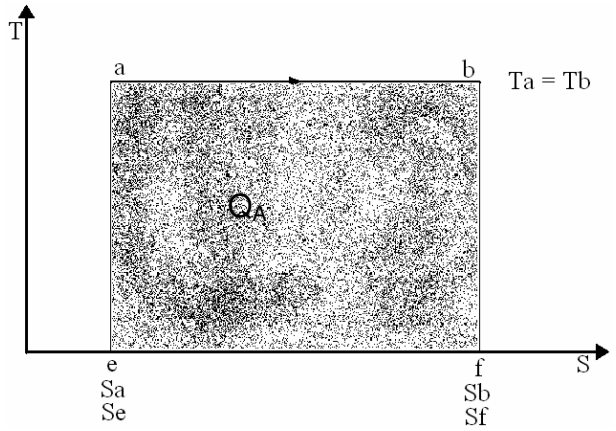
Son procesos isotérmicos donde:

T= Cte. $T_a = T_b$ $T_c = T_d$ $\Delta t = 0$ $dt = 0$

Procesos: b - c
d - a

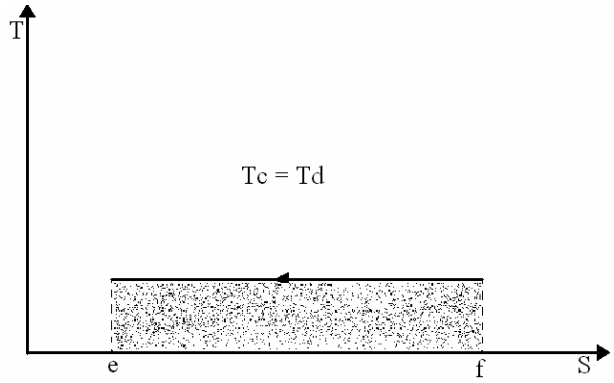
Son procesos isentrópicos donde:

S = Cte. $\Delta s = 0$ $ds = 0$ $s_b = s_c$ $s_d = s_a$



Q_A= Calor añadido = Área bajo la curva del proceso a –b
Q_A = Área e, a, b, f.

$Q_A = (S_b - S_a)T_a$ $\quad [Kcal/Kgr]$ ó $[Btu/lb]$



Q_R = Calor rechazado = Área bajo la curva del proceso c-d
Q_R = Área e, d, c, f

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

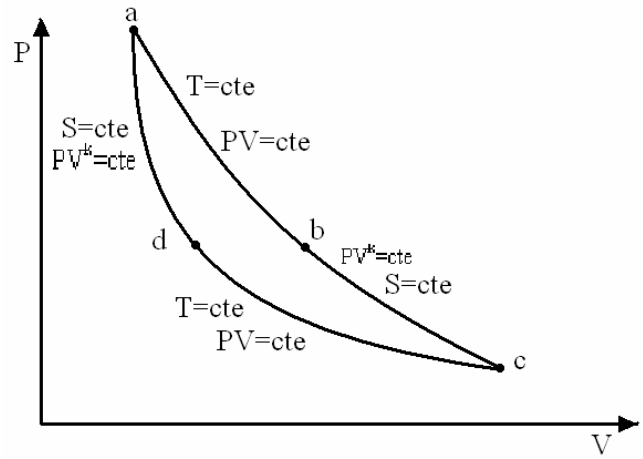
$$W = \Sigma Q = Q_A + Q_R \qquad W = (S_b - S_a)T_a - (S_c - S_d)T_d$$

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

e = Rendimiento térmico
e =Trabajo obtenido / Energía cargable

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

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

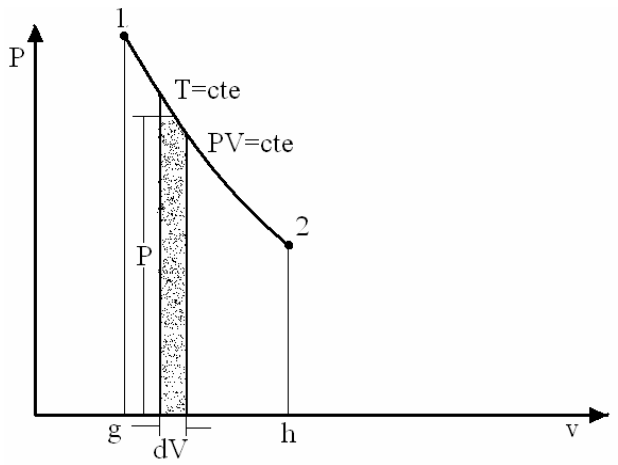


Gas ideal:
Proceso a-b:

T = cte	PV = cte
PV = mRT	Ecuación de estado
PV/m = RT	Pv = RT = cte

Procesos b-c y d-a a S= cte

PV^k= cte Donde: $K=C_P/C_V$



dW=PdV entonces:

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

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

PV=mRT

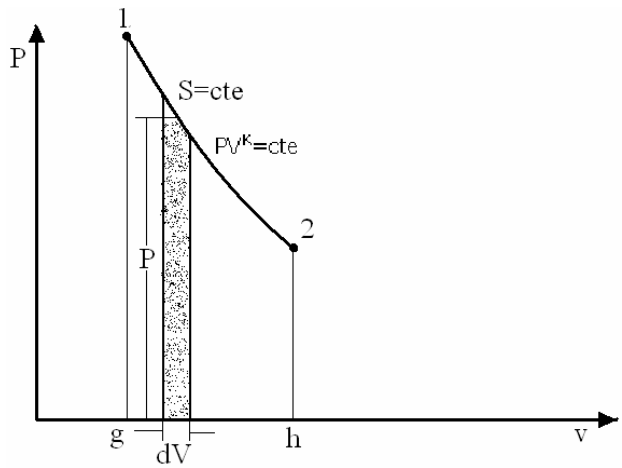
$P_1V_1=mRT_1$	$P_2V_2=mRT_2$	$T_2=T_1$
$P_1V_1=P_2V_2$	Entonces:	$V_2/V_1=P_1/P_2$

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

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

Para el caso:

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



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

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

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

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

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

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

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

Para T= cte y gas ideal, Pv = cte, Pdv + vdP = 0
Entonces: Pdv = -vdP

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

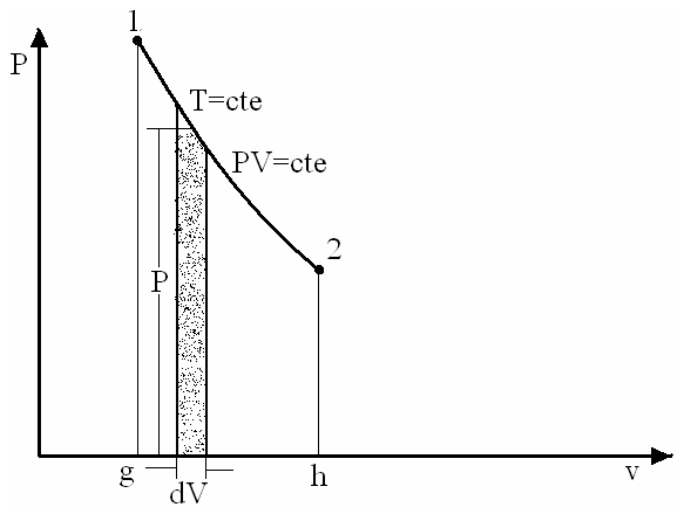
ΔU=0 ΔH=0 ΔT=0

$Q = \Delta U + \frac{1}{j}\int Pdv$ $Q = \frac{1}{j}\int Pdv$

$Q = \Delta H - \frac{1}{j}\int vdP$ $Q = -\frac{1}{j}\int vdP$

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

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



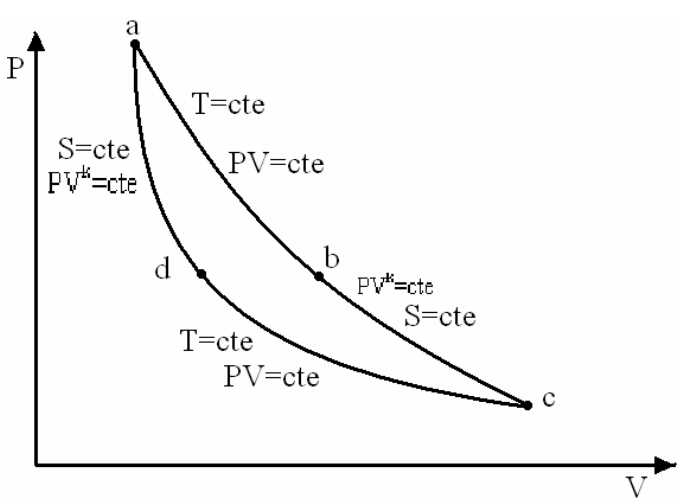
$$Q_A = \frac{1}{j}\int_1^2 Pdv$$

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:

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



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

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

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:

$$\Delta s = \frac{mR}{j} \ln \frac{P_a}{P_b}$$ [Kcal/ºK, Btu/ºR]

$$\frac{\Delta S}{w} = \Delta s = \frac{R}{j} \ln \frac{P_a}{P_b}$$ [Kcal/Kg-ºK, Btu/lb-ºR]

Proceso c-d:

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

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

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

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

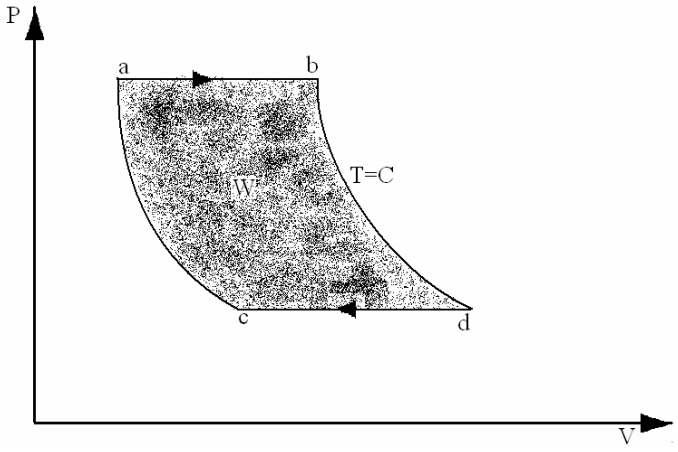
$$W = P_a V_a \ln \frac{P_a}{P_b} + \frac{P_c V_c - P_b V_b}{1 - K} + P_c V_c \ln \frac{P_c}{P_d} + \frac{P_a V_a - P_d V_d}{1 - K}$$

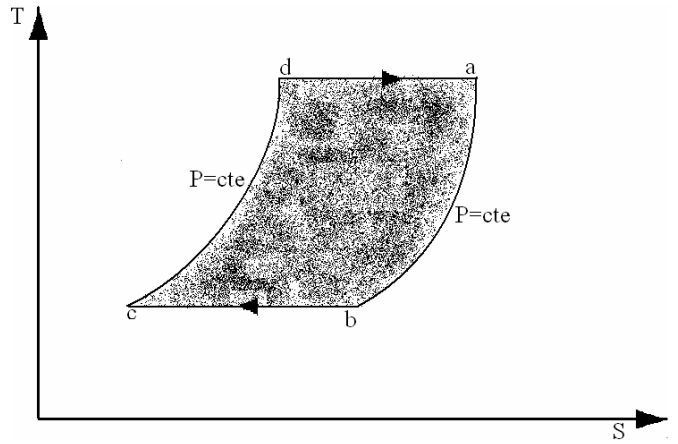
$$W = P_a V_a \ln \frac{P_a}{P_b} + P_c V_c \ln \frac{P_c}{P_d} + \frac{P_c V_c - P_b V_b + P_a V - P_d V_d}{1 - K}$$

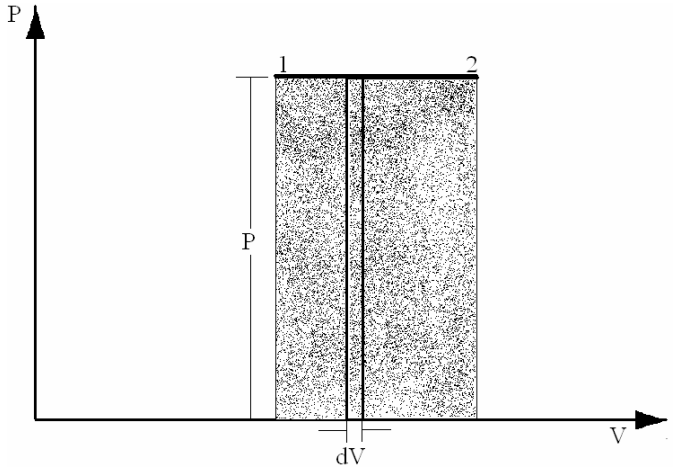
$$e = 1 - \frac{T_d}{T_a}$$

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:

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

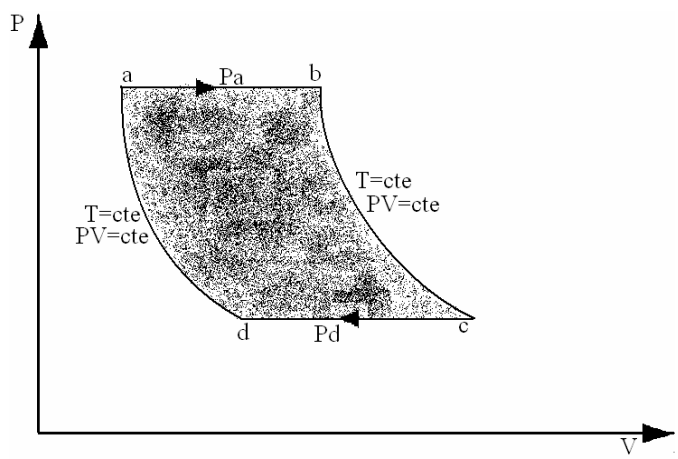
Proceso de c-d:

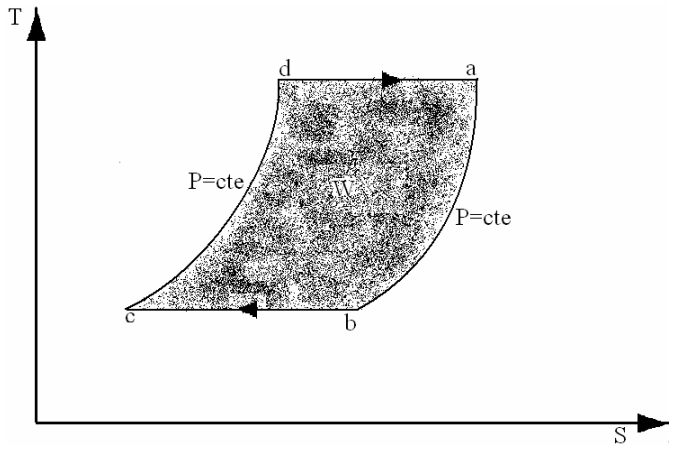
$$W_{c-d} = P_d \left(v_d - v_c \right)$$

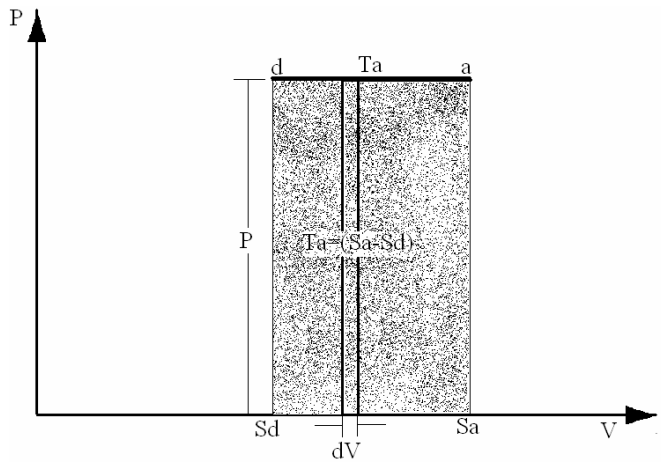
Entonces:

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

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







$Q_A = wRT_a \ln \frac{v_d}{v_a}$ [Kcal ó Btu]

$dQ = dh = C_P dT$ dh: Para cualquier sustancia

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

$Q_{a-b} = C_{Pa-b} \left(T_b - T_a \right)$ Para gas ideal

$Q_{b-c} = T_b \left(S_c - S_b \right)$ Para cualquier sustancia

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

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

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

$$W = T_a\left(S_a - S_d\right) + \int_a^b C_P dT + T_b\left(S_c - S_b\right) + \int_c^d C_P dT$$ Para cualquier sustancia

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

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

$$W = T_a\left(S_a - S_d\right) + T_b\left(S_c - S_b\right)$$ Para gas ideal

$$W = Q_A + Q_R$$

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

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

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

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

$$P_b v_b = P_c v_c$$

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

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

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

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

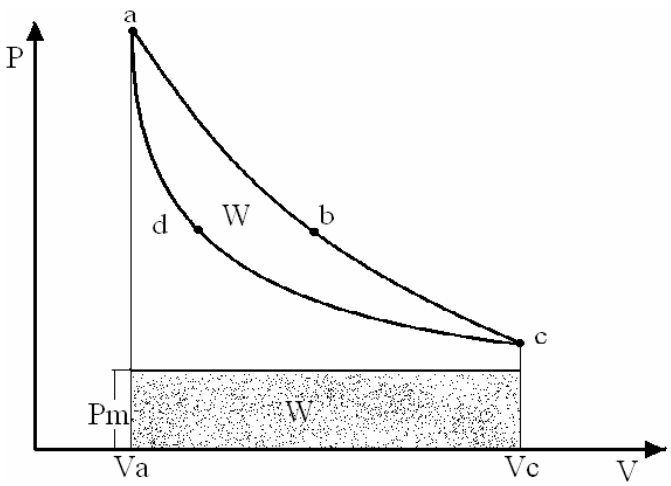
$$W = wR\left(T_a - T_b\right)\ln\frac{v_d}{v_a}$$

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

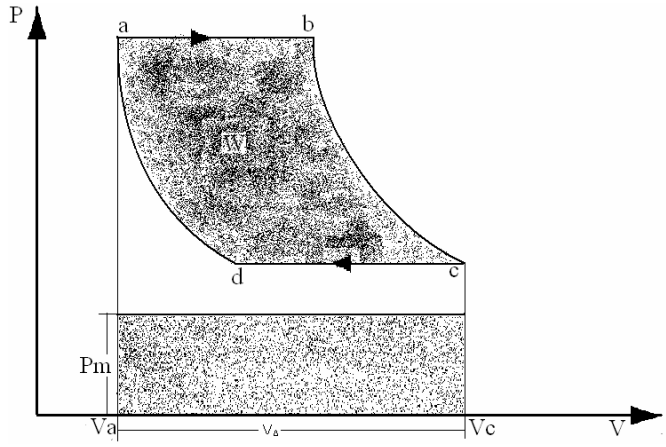
$$e = \frac{T_a - T_b}{T_a} \qquad e = 1 - \frac{T_b}{T_a}$$

PRESIÓN MEDIA

CICLO CARNOT:



CICLO ERICSSON:



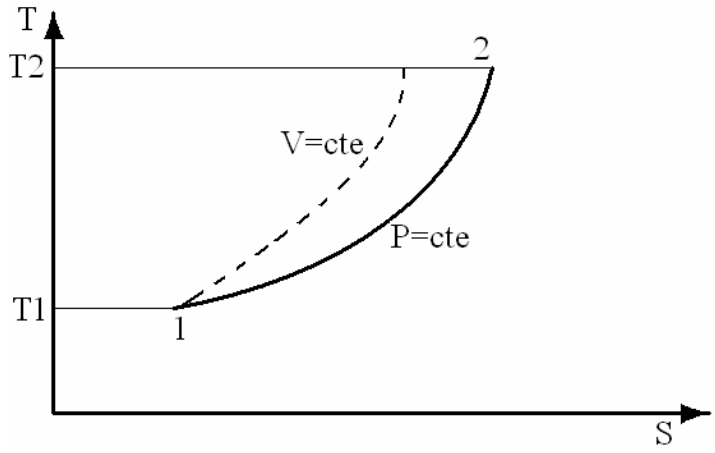
$$V_\Delta = V_c - V_a \qquad [m^3, ft^3]$$

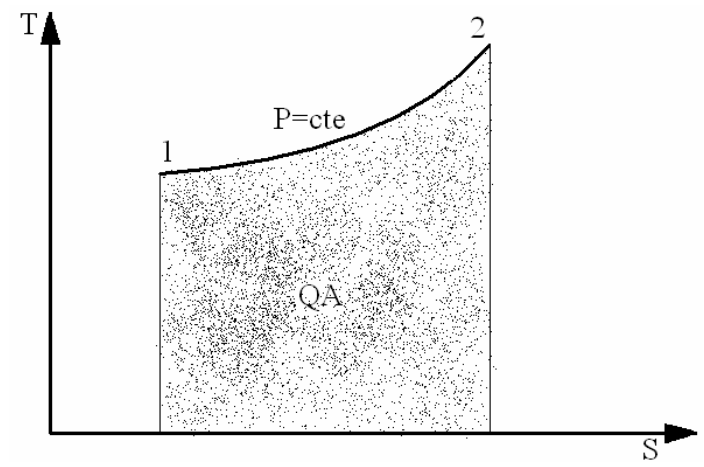
$$W = P_m V_\Delta$$

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

CICLO STIRLING:

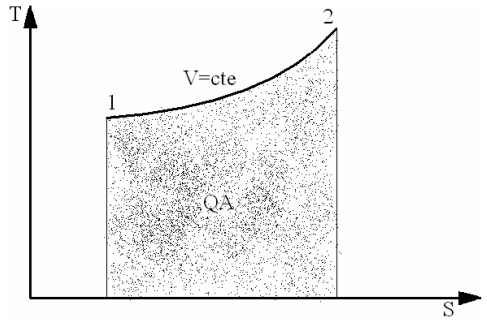
Formados por dos procesos a temperatura constante o isotérmicos y dos procesos a volumen constante o isométricos.





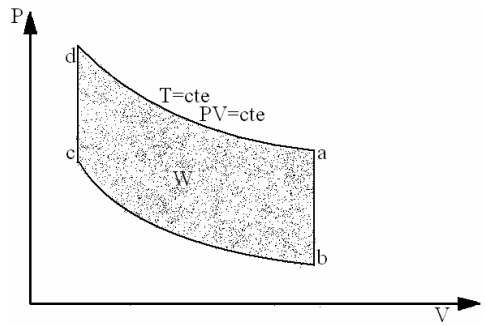
$$Q_A = \int_1^2 C_P dT$$

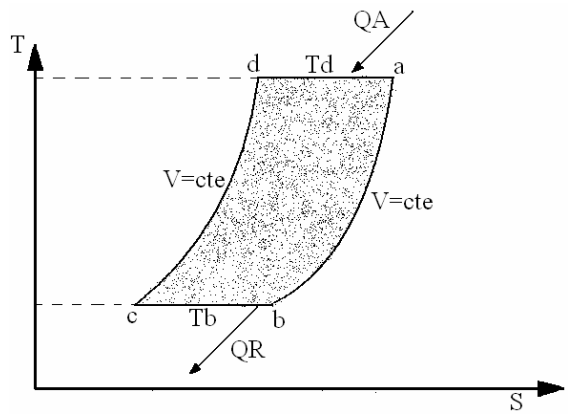
$$Q_A = C_{P1-2}\left(T_2 - T_1\right)$$ Para gas ideal



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

$$Q_A = C_{V1-2}\left(T_2 - T_1\right)$$ Para gas ideal





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

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

$$V_a = V_b = V = cte \qquad dv = 0$$

$$Wbc = PbVb \quad In\frac{Vc}{Vb} = -PbVbIn\frac{Vb}{Vc} = -WRTbIn\frac{Vb}{Vc} = -WRTbIn\frac{Va}{Vd}$$

$$Va = Vb \qquad Vc = Vd$$

$$Wcd = 0$$

$$W = Wda + Wab + Wbc + Wcd$$

$$W = Wda + Wcd$$

$$W = WRTaIn\frac{Va}{Vd} - WRTbIn\frac{Va}{Vd}$$

$$W = WR(Ta - Tb)In\frac{Va}{Vd} \qquad \rightarrow Gas\ Ideal$$

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

$$Qda = Q_A = Ta(Sa-Sd) \qquad \rightarrow C.S.$$

$$Qda = Q_A = WRTaLn\frac{Va}{Vd} \qquad \rightarrow Gas\ Ideal$$

$$Qab = \int_a^b dQ = \int_a^b cv\cdot dt = Cv_{ab}(Td-Tc) = Cv_{ab}(Ta-Tb)$$

$$W = Qda + Qab + Qbc + Qcd$$

$$W = Qda + Qab + Qbc + Qcd$$

$$W = Ta(Sa-Sd) + \int_a^b dQ + Tb(Sc-Sb) + \int_c^d dQ \qquad C.sust.$$

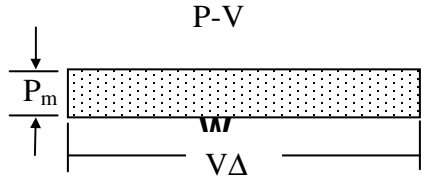
$$W = WRTaIn\frac{Va}{Vd} + Cv_{ab}(Tb-Ta) + WRTbIn\frac{Vc}{Vb} + Cv_{ca}(Ta-Tb)$$

$$W = WRTaIn\frac{Va}{Vd} - WRTbIn\frac{Vb}{Vc} \qquad Cv_{ab} = Cv_{cd}$$

$$W = WR(Ta-Tb)In\frac{Va}{Vd}$$

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{WR(Ta-Tb)In\frac{Va}{Vd}}{WRTaIn\frac{Va}{Vd}}$$

$$e = \frac{Ta-Tb}{Ta} = 1-\frac{Tb}{Ta}$$



$$W = PmV_{\Delta}$$

$$Pm = \frac{W}{V_{\Delta}} = \frac{W}{Va - Vd}$$

$$e = 1 - \frac{Tmín}{Tmáx}$$

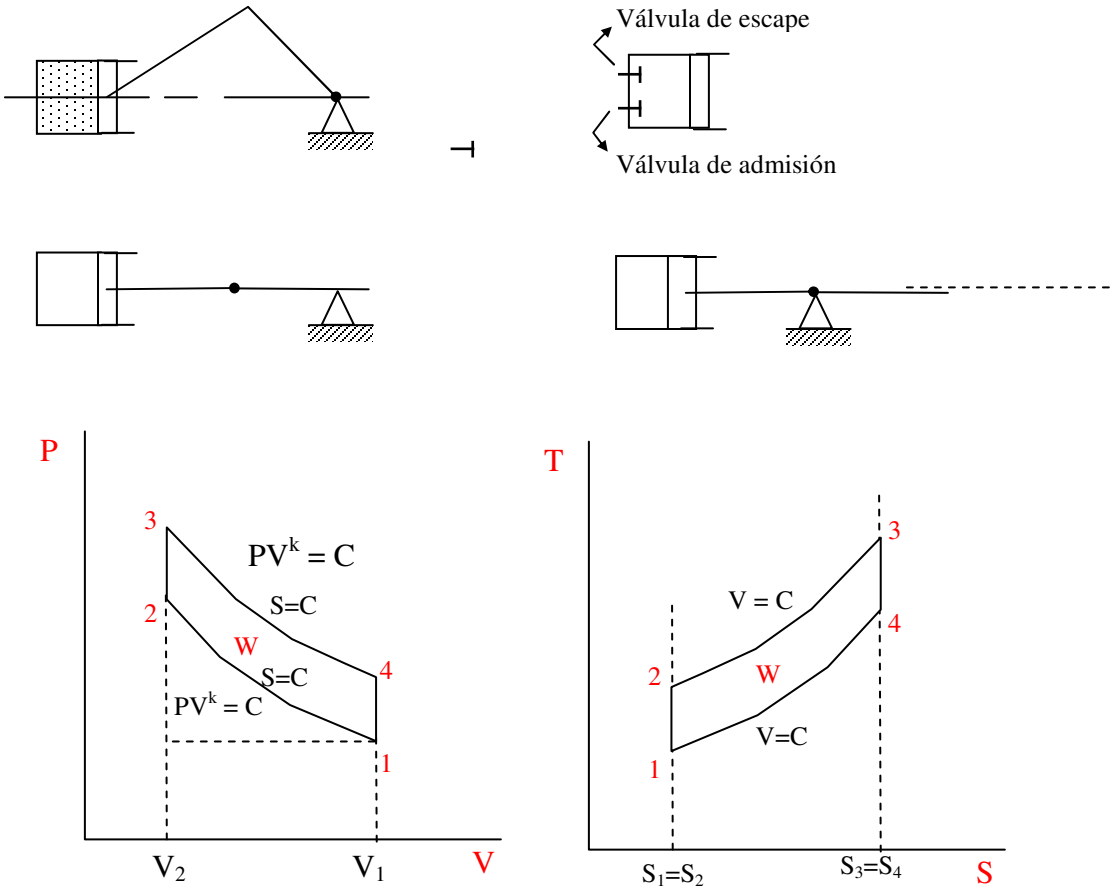
CICLO DE 4 TIEMPOS

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 oto 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.



$$\text{Pr}\,ocesos \quad 1 \rightarrow 2 \quad s = cte \quad \Delta s = 0 \quad dt = 0 \quad ; para\ \ gas\ \ ideal \quad PV^{k} = c$$

$$PV^{k} = c$$

$$\text{Pr}\,ocesos \quad 2 \rightarrow 3 \quad v = cte \quad \Delta v = 0 \quad dv = 0$$

$$v = cte \quad \Delta v = 0 \quad dv = 0$$

$$\text{Pr}\,ocesos \quad 3 \rightarrow 4 \quad s = cte \quad \Delta s = 0 \quad ds = 0$$

$$\text{Pr}\,ocesos \quad 3 \rightarrow 4 \quad v = cte \quad \Delta v = 0 \quad dv = 0$$

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

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

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

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

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

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

$$e = 1 - \frac{U_4 - U_1}{U_3 - U_2} = 1 - \frac{CV_{41}(T_4 - T_1)}{CV_{23}(T_3 - T_2)} \qquad Gas\ ideal$$

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

r_k =relación de compresión

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

$$Estado \quad 1.P_1V_1 = RT_1 \qquad k = \frac{Cp}{Cv}$$

$$1 \rightarrow 2 \qquad P_1V_1k = P_2V_2^{\ k}$$

$$2.P_2V_2 = RT_2$$

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

Del proceso:

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

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

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

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

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

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

2. $P_2V_2 = WRT_2$

$2 \rightarrow 3: \quad V_2 = V_3$

3. $P_3V_3 = WRT_3$

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

$3 \rightarrow 4 \quad P_3V_3{}^K = P_4V_4{}^K$

4. $P_4V_4 = WRT_4$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$W_{34} = \frac{P_4V_4 - P_3V_3}{k-1} \qquad W_{12} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{k-1}$$

$$W = \frac{(P_4V_4 - P_3V_3)}{k-1} + \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{k-1}$$

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

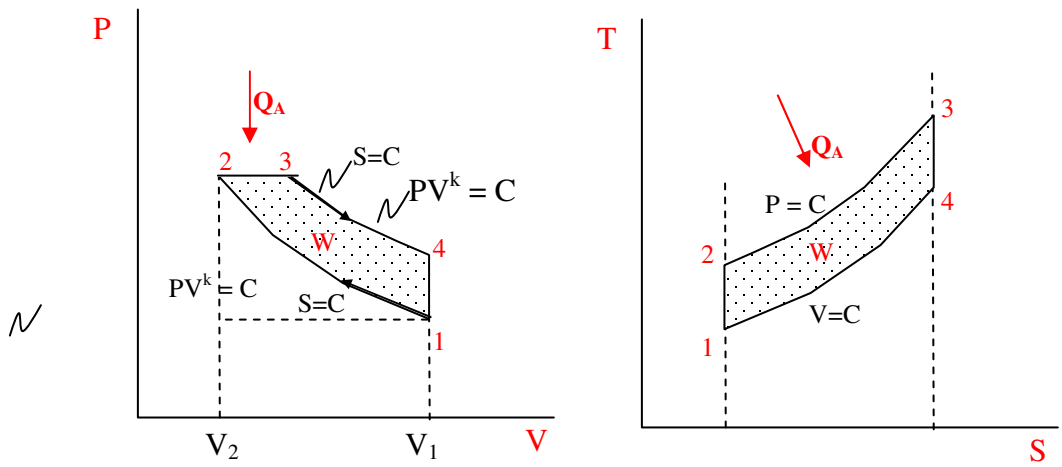
$$\int_2^3 d5 = \int_2^3 \frac{dQ}{T}$$

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

$$S_3 - S_2 = S_4 - S_1$$

CICLO DIESEL

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



1→2 Isentropico

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

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

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

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

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

Cualquier Sustancia

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

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

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

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

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

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

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

$$r_e = \frac{V_3}{V_2} \quad = relación\ de\ \exp ancion = \frac{V_1}{V_3}$$

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

$$r_K = r_e \cdot r_C$$

(1) $P_1V_1 = WRT_1$

$1 \to 2 \quad P_1V_1^{\ K} = P_2V_2^{\ K} \qquad \dfrac{P_1}{P_2} = \left(\dfrac{V_2}{V_1}\right)^K$

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

(2) $P_2V_2 = WRT_2$

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

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

$2 \to 3 \quad P_2 = P_3$

$P_3V_3 = WRT_3$

$P_2V_2 = WRT_2$

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

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

$3 \to 4 \quad V_4 = V_1$

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

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

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

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

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

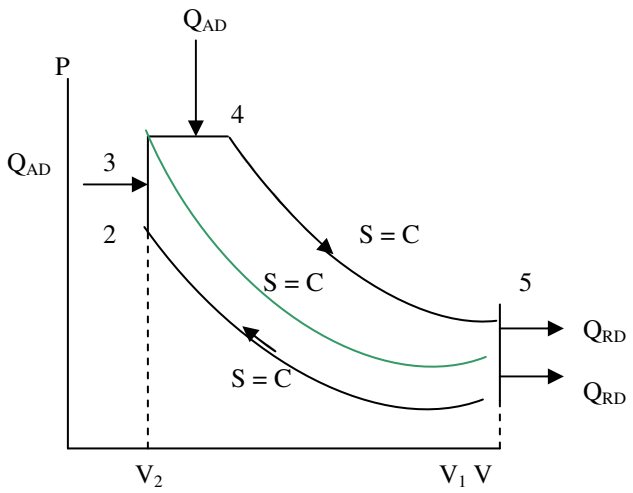
$$\frac{T_3}{T_4} = r_e^{\,K-1} \qquad T_4 = \frac{T_3}{r_e^{\,K-1}} = \frac{T_C r_K^{\,K-1}}{r_e^{\,K-1}} \cdot T_1$$

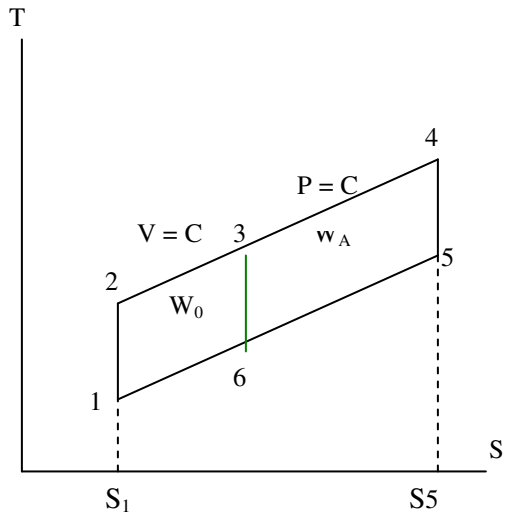
$$e = 1 - \frac{1}{K} \cdot \frac{\dfrac{T_1 r_C r_K^{\,K-1}}{r_C^{\,K-1}} - T_1}{T_1 r_C r_K^{\,K-1} - T r_K^{\,K-1}{}_1}$$

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

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

Ciclo Dual, Mixto o Seiliger





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

$Ciclo \quad otto.1236$

$Ciclo\ diesel 6345$

$Q_{AD} = Area\ a\ 1236b \qquad Q_{ad} = areab6345c$

$Q_{RO} = Areaa16b \quad Q_{RD} = areab65c$

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

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

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

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

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

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

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

$$Q_R = Q_{R0} + Q_{RD} = U_1 - U_6 + U_6 - U_5 = U_1 - U_5$$ Para cualquier sustancia

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

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

$$Q_R = wC_V\left(T_1 - T_5\right)$$

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

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

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{Q_{A0} + Q_{AD} + Q_{R0} + Q_{RD}}{Q_{A0} + Q_{AD}} = \frac{(Q_{A0} + Q_{R0}) + (Q_{AD} + Q_{RD})}{Q_{A0} + Q_{AD}}$$

$$e = \frac{W_O}{Q_{A0} + Q_{AD}} + \frac{W_D}{Q_{A0} + Q_{AD}} = \frac{W_O}{Q_{A0}} \times \frac{Q_{A0}}{Q_{A0} + Q_{AD}} + \frac{W_D}{Q_{AD}} \times \frac{Q_{AD}}{Q_{A0} + Q_{AD}}$$

$$e = e_o \times \frac{Q_{A0}}{Q_{A0} + Q_{AD}} + e_D \times \frac{Q_{AD}}{Q_{A0} + Q_{AD}}$$

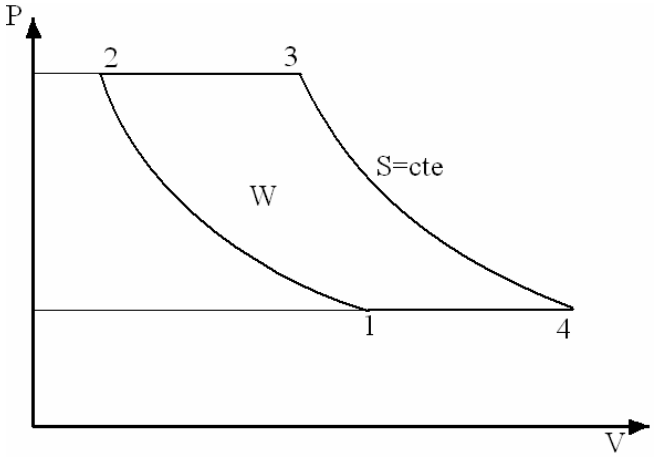
Para gas ideal:

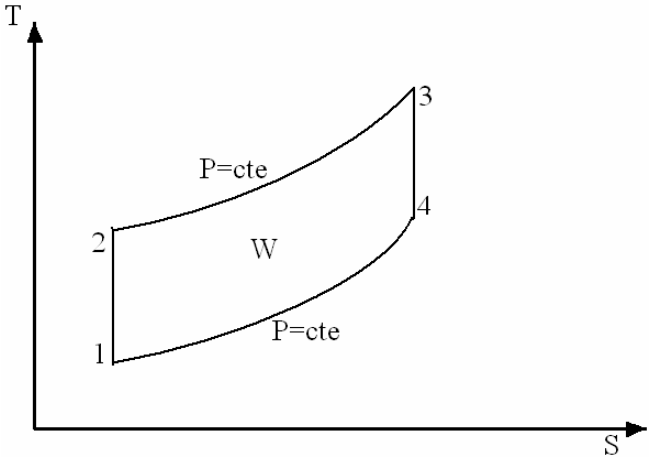
$$e = e_o \times \frac{wC_V\left(T_3 - T_2\right)}{wC_V\left(T_3 - T_2\right) + wC_P\left(T_4 - T_3\right)} + e_D \times \frac{wC_P\left(T_4 - T_3\right)}{wC_V\left(T_3 - T_2\right) + wC_P\left(T_4 - T_3\right)}$$

CICLO JOULE O BRAYTON

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

s=cte	Δs=0	ds=cte
P=cte	ΔP=cte	dP=0





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:

$P_1V_1 = wRT_1$ $P_2V_2 = wRT_2$ $P_1V_1^K = P_2V_2^K$

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

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

$$\frac{T_1}{T_2}=\frac{r_K}{r_K^{\,K}} \qquad \frac{T_1}{T_2}=r_K^{\,1-K} \qquad r_P^{\,1/K}=r_K$$

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

$$\frac{T_2}{T_1}=\frac{1}{r_P^{\,\frac{1-K}{K}}} \qquad \frac{T_2}{T_1}=r_P^{\,\frac{K-1}{K}} \qquad \frac{T_2}{T_1}=\left[r_K^{\,K}\right]^{\frac{K-1}{K}} \qquad \frac{T_2}{T_1}=r_K^{\,K-1}$$

Proceso 2-3:

$$P_2V_2=wRT_2 \qquad P_3V_3=wRT_3 \qquad P_2=P_3$$

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

Proceso 3-4

$$P_3V_3=wRT_3 \qquad P_4V_4=wRT_4 \qquad P_3V_3^{\,K}=P_4V_4^{\,K}$$

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

$$\frac{P_3}{P_4}=\left(\frac{V_4}{V_3}\right)^k \qquad r_p=r_c^{\,k}$$

$$\frac{T_4}{T_3}=\frac{r_c}{r_c^{\,k}}$$

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

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

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

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

Proceso 4-1:

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

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

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

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

$$Q_A = wC_P\left(T_3 - T_2\right)$$

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

$$Q_R = wC_P\left(T_1 - T_4\right) = -wC_P\left(T_4 - T_1\right)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

e Aumenta si r_P aumenta

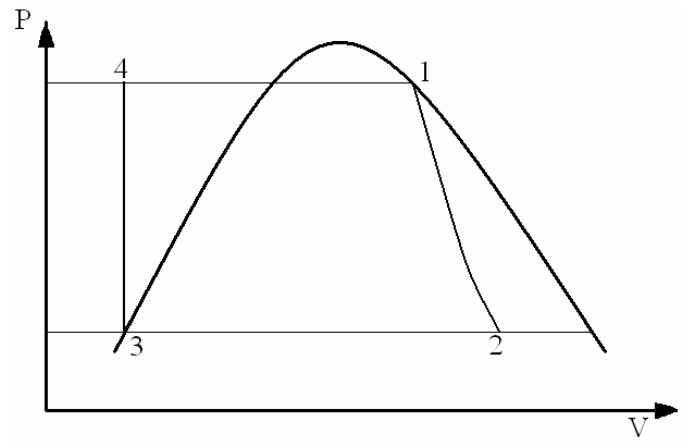
e Aumenta si r_K aumenta

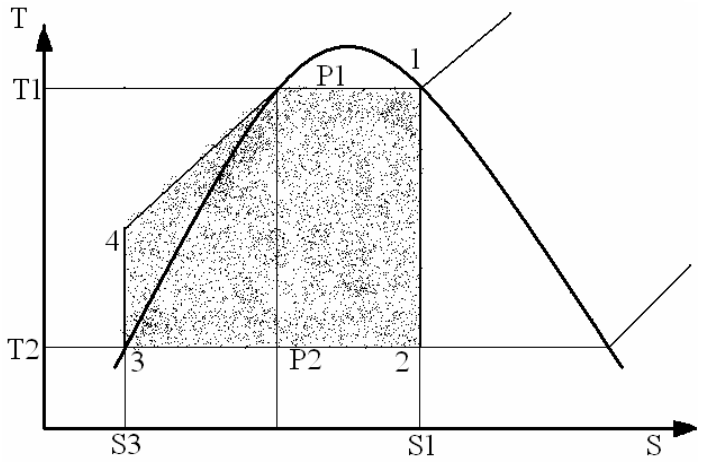
e Aumenta si r_c aumenta

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





Procesos:

1-2:	S=cte	S1=S2
2-3:	P=cte	P2=P3
3-4:	S=cte	S3=S4
4-1:	P=cte	P4=P1

Q_A = Area a34k1b
Q_A = Areaa34kc + area ck1b
$Q_A=Q_1+Q_{evaporación}$
Q_R=Area a32b

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

$Q_A = H_1 - H_4$ [Kcal ó Btu]

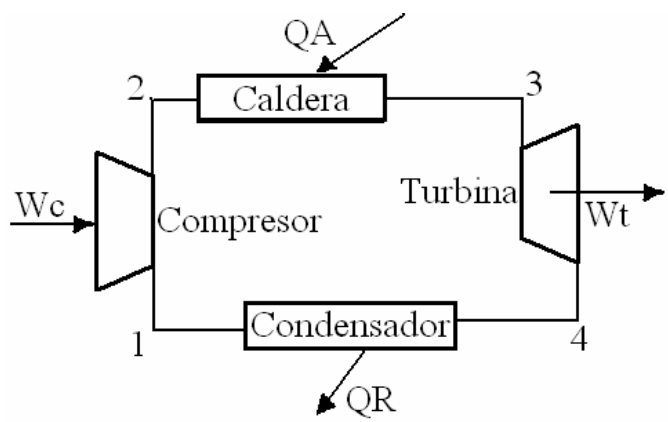
$Q_A = h_1 - h_4$ [Kcal/Kg ó Btu/lb]

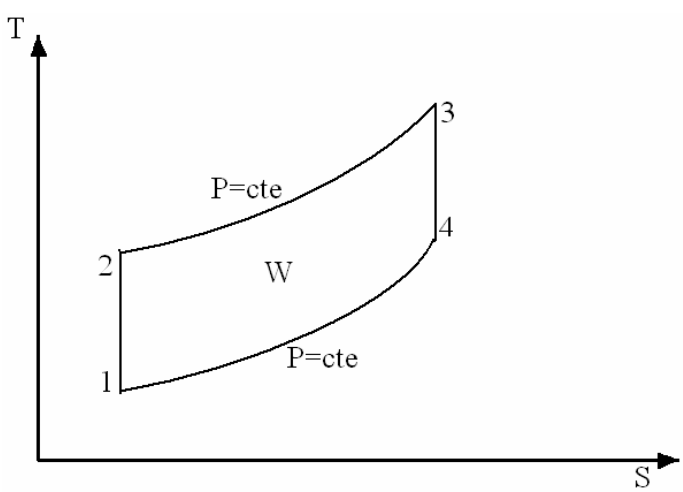
$Q_R = H_2 - H_3$

$Q_R = h_2 - h_3$

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

CICLO JOULE O BRAYTON



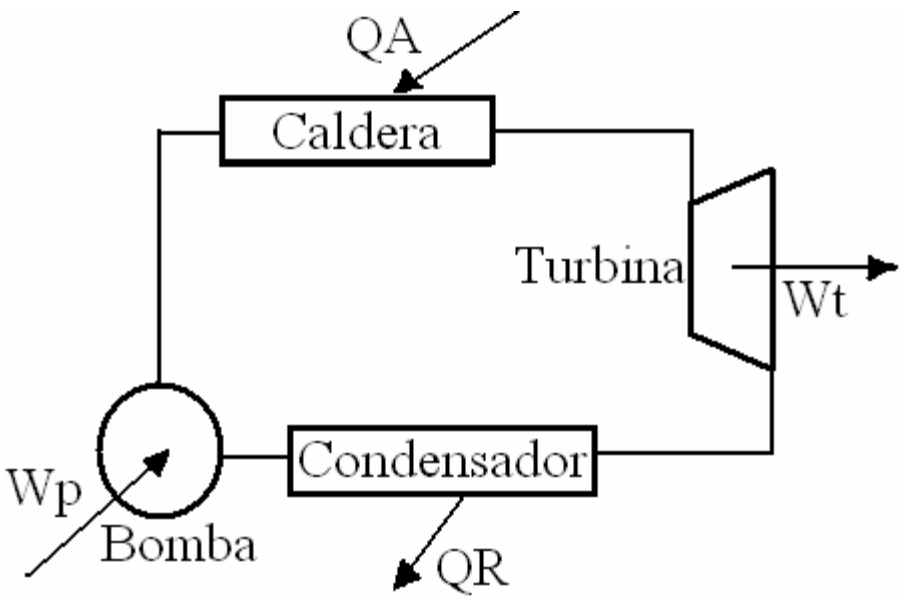


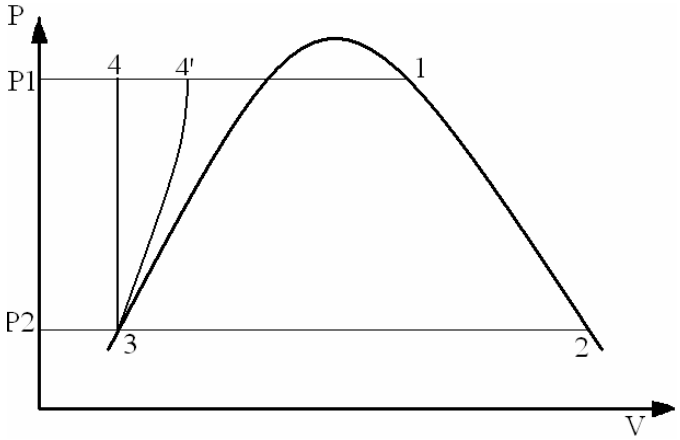
$$W_c + Q_A = W_t + Q_R$$

$$Q_A - Q_R = W_t - W_c$$

$$\Sigma Q = W_n$$

CICLO RANKINE





$$Q_A + W_P = W_t + Q_R$$
$$Q_A - Q_R = W_t - W_P$$
$$\Sigma Q = W_n$$

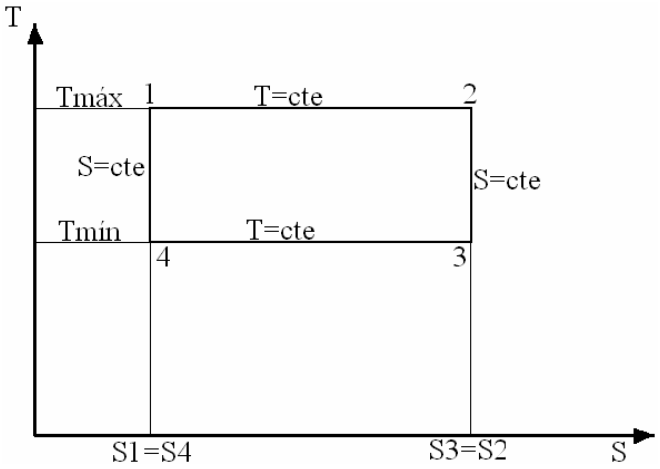
Proceso 3-4: S=cte S4=S3 V=cte

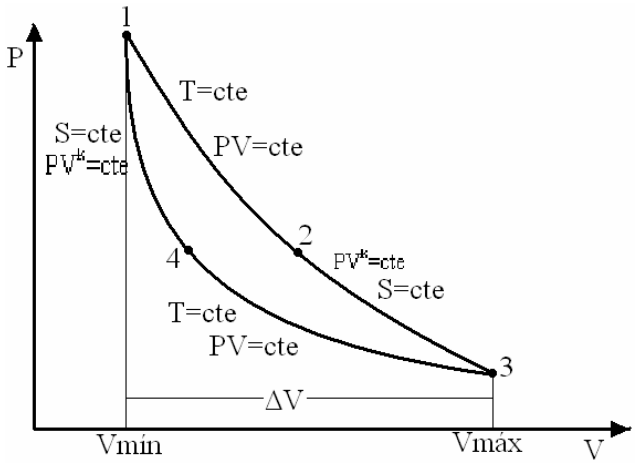
$$W_{3-4} = h_4 - h_3 = -\int_3^4 VdP$$
$$\mathrm{W}_{3\text{-}4} = \mathrm{W}_P \approx V_3(P_4 - P_3) = h_4 - h_3$$

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^2 abs.], el volumen de 5 [ft^3] y la temperatura de 540 [ºF]. La relación de expansión isotérmica r_t es 2 y la relación de compresión isentrópica es $r_k = 5$.
Hallar:

a) La temperatura del sumidero y la presión en cada ángulo o punto del ciclo.
b) El cambio de entropía en los procesos a temperatura constante.
c) El calor suministrado al ciclo.
d) El calor rechazado.
e) Los HP's desarrollados si el volumen mínimo es 0.14 [m^3/min].
f) Rendimiento térmico **e.**
g) Presión media efectiva.





Estado 1:

$P_1 = 300\,psia$

$V_1 = 5\,ft^3$

$T_1 = 540 + 460 = 1000º\,R = T_{máx}$

Estado 2:

$r_t = 2 = \frac{V_2}{V_1}$ $\qquad V_2 = r_t \times V_1 = 10\,ft^3$

$T_1 = T_2 = 1000º\,R$

$P_1V_1 = wRT_1$ $\qquad P_2V_2 = wRT_2$ $\qquad P_1V_1 = P_2V_2$

$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} = 2$ $\qquad P_2 = \frac{P_1}{2} = \frac{300}{2} = 150\,psia$

Estado 3:

$S_3 = S_2$:

$P_2V_2^{\,K} = P_3V_3^{\,K}$ $\qquad \frac{P_2}{P_3} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^K$

$P_2V_2 = wRT_2$ $\qquad P_3V_3 = wRT_3$

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

Estado 4:

$P_4V_4 = wRT_4$ $\qquad P_4V_4 = P_3V_3$

$\frac{P_4}{P_3} = \frac{V_3}{V_4}$ $\qquad P_4V_4^{\,k} = P_1V_1^{\,k}$

$P_1V_1 = wRT_1$ $\qquad P_4V_4 = wRT_4$

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

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

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

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

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

$T_{máx} = 1000º\,R$ $\qquad T_{mín} = 525.2º\,R$

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

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

$$\frac{V_3}{V_2} = \left(\frac{T_1}{T_4}\right)^{\frac{1}{K-1}} = 5 \qquad K = \frac{C_C}{C_V} = 1.4$$

$$T_3 = T_4$$

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

$$P_1 = 300\,psia \qquad P_2 = 150\,psia$$

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

$$P_3 = 15.75\,psia$$

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

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

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

$$Q_A = 192.44\,Btu$$

$$Q_A = (S_2 - S_1)T_1 = 192.44\,Btu$$

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

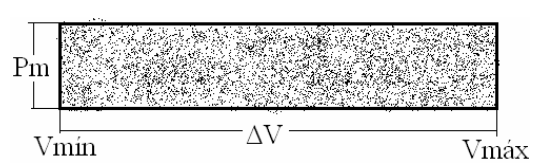
$$Q_R = (S_4 - S_3)T_4 = -(S_2 - S_1)T_4$$

$$Q_R = -0.19244\,Btu/^\circ R \times 525^\circ R$$

$$Q_R = -101.1\,Btu$$

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

$$W = 71085.9\,lb-ft$$



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

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

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

$$014 \frac{m^3}{\min} \times \left(\frac{3.28 ft}{1m} \right)^3 = 5 ft^3 / \min$$

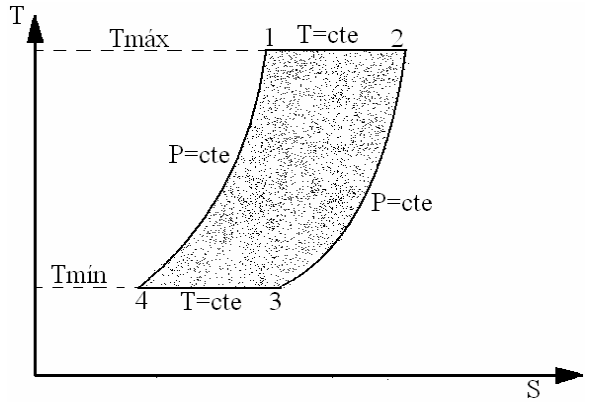
$$W' = 91.34 Btu / \min \frac{60 \min}{1h} \times \frac{1 HP - h}{2.54 Btu}$$

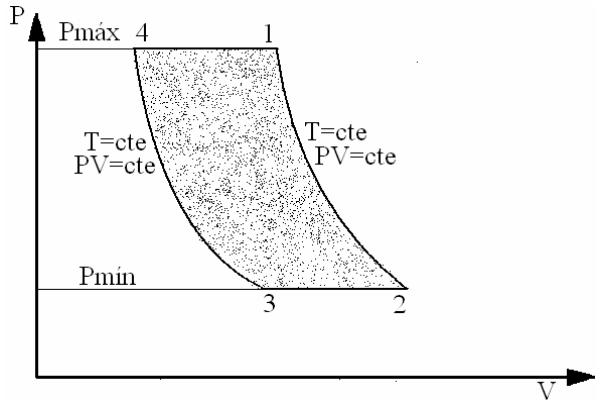
$$W' = 2.15 HP$$

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 [ft^3], T=540 [ºF]. Para una r_t de 2 y una temperatura mínima de ciclo de 40 [ºF], hallar:

a) Cambio de entropía durante el proceso isotérmico.
b) Calor añadido.
c) Calor rechazado.
d) Trabajo.
e) Rendimiento térmico.
f) Volumen al final de la expansión isotérmica y la relación de expansión general.
g) Presión media efectiva.





Estado 1:

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

Proceso 1-2:

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

$$r_t = \frac{V_2}{V_1} = 2 \qquad V_2 = 2 \times 5 = 10\,ft^3$$

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

Estado 2:

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

Proceso de 2-3: $P_2 = P_3 = 50Psia$

$$P_2V_2 = wRT_2 \qquad \frac{V_2}{V_3} = \frac{T_2}{T_3}$$

$$P_3V_3 = wRT_3$$

$$T_{MIN} = 40 + 460 = 500^0\,R = T_3 = T_4$$

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

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

Estado 3

$$T_3 = 500^0\,R$$

$$V_3 = 5\,ft^2$$

$$P_3 = 50Psia$$

Proceso de 3-4:

$$T_3 = T_4 = 500^0\,R$$

$$P_3V_3 = P_4V_4$$

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

$$V_4 = 2.5\,ft^2$$

Estado 4

$$T_4 = 500^0\,R$$

$$V_4 = 2.5\,ft^2$$

$$P_4 = 100\,Psia$$

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

$$Q_{1-2} = (S_2 - S_1)T_1 \Rightarrow S_2 - S_1 = \frac{64.14\,BTU}{1000^0\,R} = 0.06414\frac{BTU}{^0 R}$$

$$Q_{3-4} = \frac{P_{31} V_3}{J}\ln\frac{V_4}{V_3} = \frac{50*144*5}{778}\ln\frac{1}{2} = -32.07\,BTU = Q_R$$

$$Q_{2-3} = \int_2^3 wCpdT = wCp_{2-3}(T_3 - T_2)$$

$$Q_{4-1} = \int_4^1 wCpdT = wCp_{4-1}(T_1 - T_4)$$

$$Cp_{2-3} = Cp_{4-1}$$

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

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

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

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

$$W = 32..07\,BTU$$

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

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

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

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

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

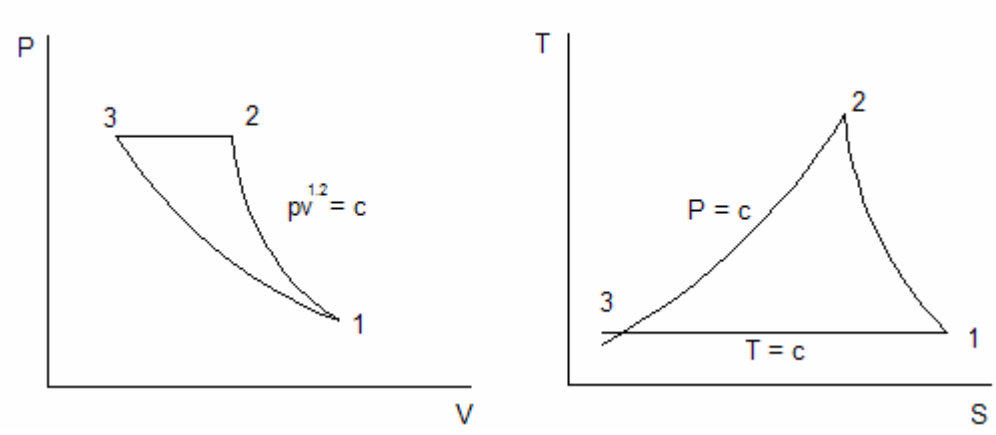
EJERCICIO

Una libra de argón a 20 Psia y 200^oF 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 expansiona isotérmicamente hasta su estado inicial

a) Trácense 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 $R = 38.68 \frac{lb - ft}{lb^o R}, Cp = 0.1244 \frac{BTU}{lb^o R}, Cv = 0.0747 \frac{BTU}{lb^o R}, \quad K = 1.665$

DIAGRAMAS PV Y TS



$$P_1 = 20 \frac{lb}{in^2} abs$$
$$T_1 = 200 + 460 = 660$$

Proceso de 1-2: compresión politrópica

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

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

$$\frac{V_1}{V_2} = 5^{\frac{1}{1.2}}$$
$$P_1V_1 = wRT_1$$
$$P_2V_2 = wRT_2$$

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

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

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

Estado 2

$$P_2 = 100 Psia$$
$$T_2 = 660(5)^{\frac{1.2-1}{1}} = 862.8^0 R$$

Estado 3

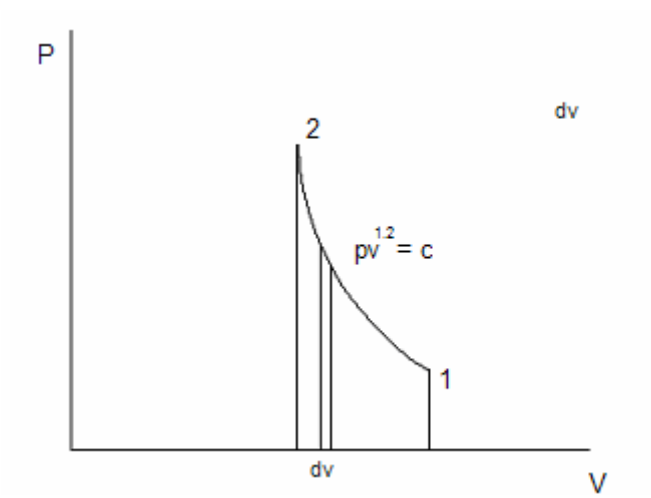
$$P_3 = P_2 = 100 Psia$$
$$T_3 = T_1 = 660^0 R$$

$PV = wRT$ Gas ideal

$$V_1 = \frac{wRT_1}{P_1} = \frac{1lb * 38.68\frac{lb-ft}{lb} * 660^0 R}{20\frac{lb}{in^2} * 144\frac{in^2}{ft^2}} = 8.86 ft^3$$

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

$$V_3 = \frac{wRT_3}{P_3} = \frac{1lb * 38.68\frac{lb-ft}{lb} * 660^0 R}{100\frac{lb}{in^2} * 144\frac{in^2}{ft^2}} = 1.76\,ft^3$$



$$dW = Pdv$$

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

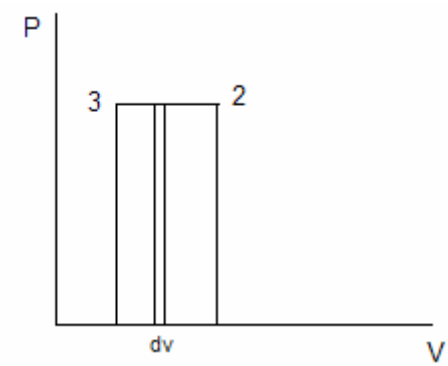
$$W_{1-2} = C\int_1^2 V^{-1.2}dv = c\left.\frac{V^{-1.2+1}}{-1.2+1}\right|_2^1$$

$$W_{1-2} = -\frac{P_1V_1^{1.2}}{0.2}\left[\frac{1}{V_2^{0.2}} - \frac{1}{V_1^{0.2}}\right]$$

$$W_{1-2} = -\frac{1}{0.2}\left[P_2V_2 - P_1V_1\right]$$

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

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



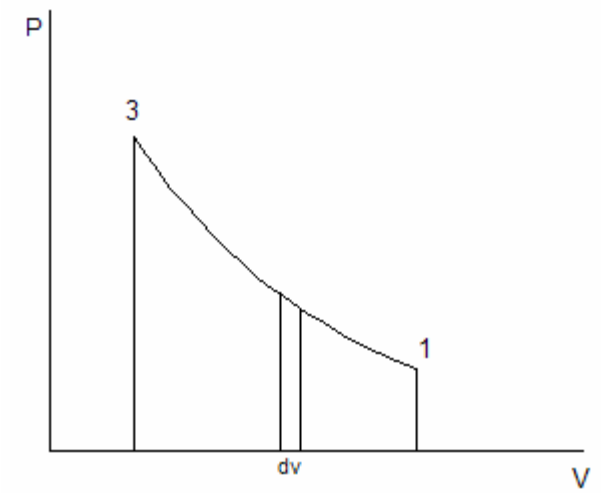
$$dW = Pdv$$

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

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

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

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



$$dW = Pdv$$

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

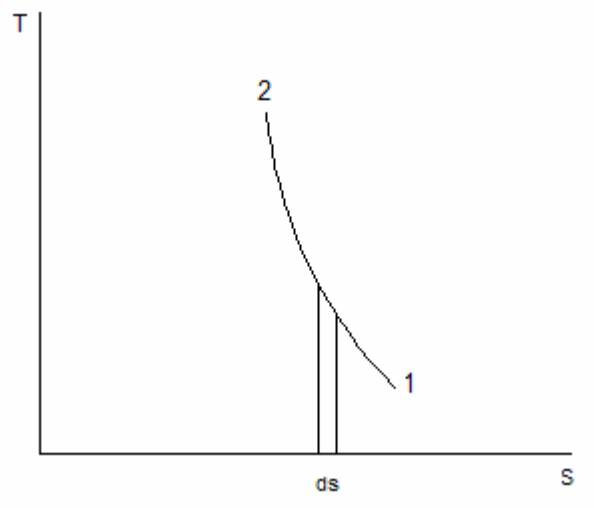
$$W_{3-1} = c \ln \frac{V_1}{V_3} = P_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_3}$$

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

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

$$W_n = -8.07 BTU$$

Proceso 1-2



$$dQ = Tds$$

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

$$dQ = wC_n dT$$

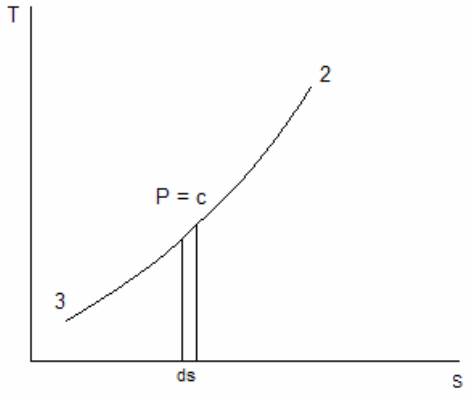
$$Q_{1-2} = \int_1^2 wC_n dT$$

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

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

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

proceso 2 a 3



$$dQ = Tds$$

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

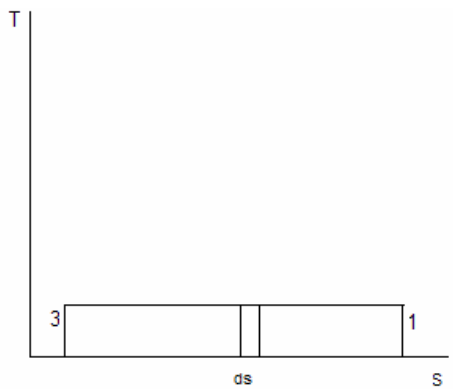
$$dQ = wC_p dT$$

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

$$Q_{2-3} = 1lb * 0.1244 \frac{BTU}{lb^o R} * (660 - 862.8)^0 R$$

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

Proceso 3-1



$$dQ = Tds$$

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

$$dQ = wCdT$$

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

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

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

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

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

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

EJERCICIO

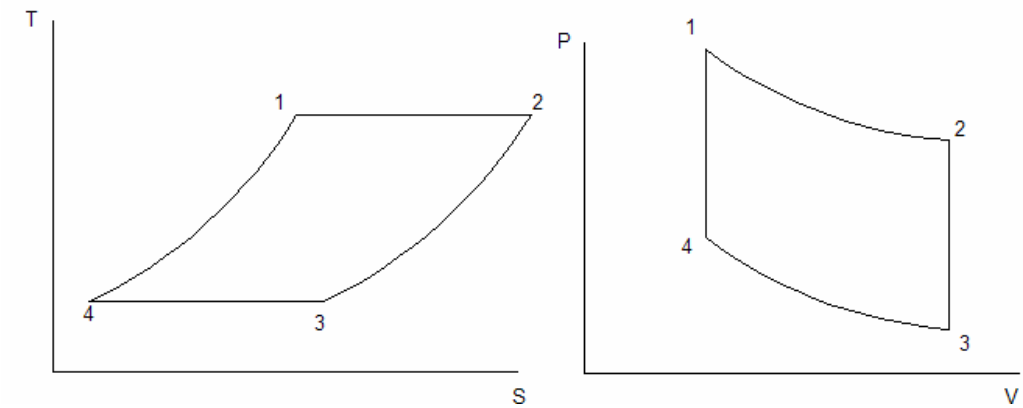
Un ciclo stirling usa aire como sustancia de trabajo. Al comienzo de la expansión isotérmica la presión es de $21.1\frac{kg}{cm^2}$ abs, el volumen $0.14m^3$ y la temperatura de $282^o C$ La relación de expansión isotérmica es de 2. Hallar :

a) La temperatura del sumidero y las condiciones en todos los vértices del ciclo

b) El cambio de entropía durante el proceso isotérmico

c) Trabajo, rendimiento térmico, y la presión media efectiva.

DIAGRAMAS



Estado 1

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

$$V_1 = 0.14m^3$$

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

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

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

Proceso1-2

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

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

$$P_2 = \frac{P_1V_1}{V_2} = 10.55\frac{kg}{cm^2}$$

Estado 2

$$P_2 = 10.55 \frac{kg}{cm^2}$$
$$V_2 = 0.28 m^3$$
$$T_2 = 555^0 K$$

De 2-3

$$V_3 = V_2 = 0.28 m^3$$
$$P_2 V_2 = wRT_2$$
$$P_3 V_3 = wRT_3$$
$$\frac{P_2}{P_3} \frac{V_2}{V_3} = \frac{T_2}{T_3}$$

De 3-4

$$T_3 = T_4$$
$$P_3 V_3 = P_3 V_3$$
$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{V_4}{V_3} = \frac{1}{r_k} = \frac{1}{2}$$

De 4-1

$$V_4 = V_1 = 0.14 m^3$$
$$P_4 V_4 = wRT_4$$
$$P_1 V_1 = wRT_1$$
$$\frac{P_4}{P_1} \frac{V_4}{V_1} = \frac{T_4}{T_1}$$
$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{T_4}{T_1}$$
$$\frac{P_2}{P_3} = \frac{T_2}{T_3} = \frac{T_1}{T_4} = \frac{P_1}{P_4}$$
$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} = \frac{1}{2}$$

$$Q_A = Q_{1-2} = \frac{P_1V_1}{JT_1}\ln\frac{V_1}{V_2} = \frac{21.1\frac{kg}{cm^2} * 10000\frac{cm}{m} * 0.14m}{427\frac{kg.m}{kcal} * 555^0 K}\ln 2 = 0.086\frac{kcal}{^oK}$$

$$W = Q_A + Q_R = \frac{P_1V_1}{J}\ln\frac{V_2}{V_1} + \frac{P_3V_3}{J}\ln\frac{V_4}{V_3}$$

$$e = \frac{W}{Q_A} = \frac{Q_A + Q_R}{Q_A} = 1 + \frac{Q_R}{Q_A} = 1 - \frac{\frac{P_1V_1}{J}\ln\frac{V_2}{V_1}}{\frac{P_3V_3}{J}\ln\frac{V_4}{V_3}}$$

$$e = 1 - \frac{P_1V_1}{P_3V_3}$$

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

MEDIDA DEL TRABAJO

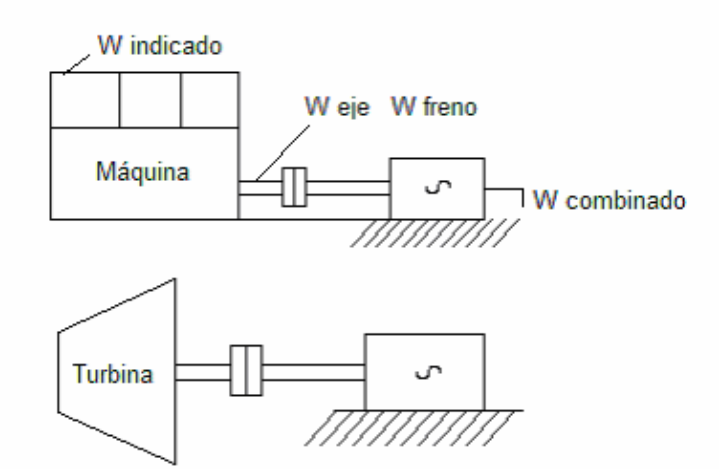
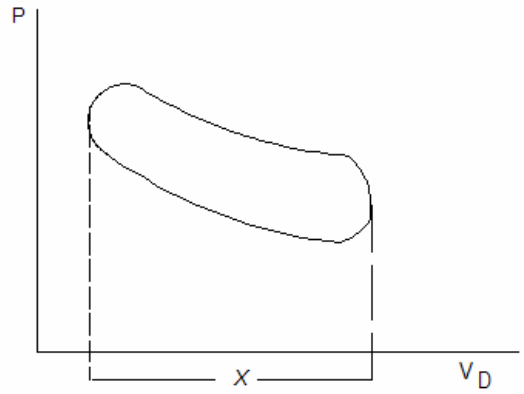


DIAGRAMA DEL INDICADOR



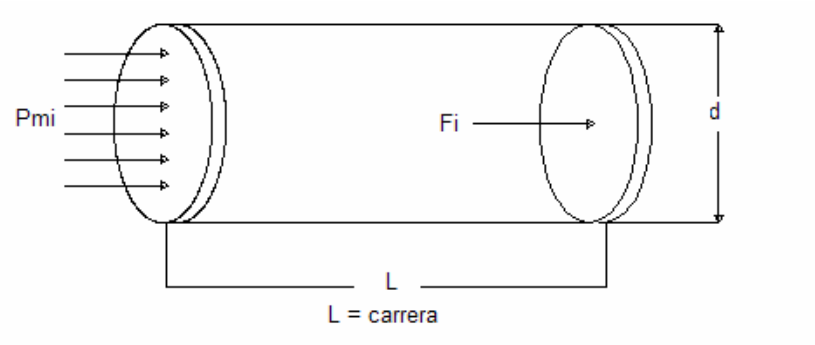
$$Pmi = \frac{presión - media - indicada}{x}\left[\frac{kg}{cm^2}, \frac{lb}{in^2}\right] \qquad Pmi = \frac{área * factor}{x}$$

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

Movimiento alternativo

$W_K \angle W_B \angle W$:

Turbina

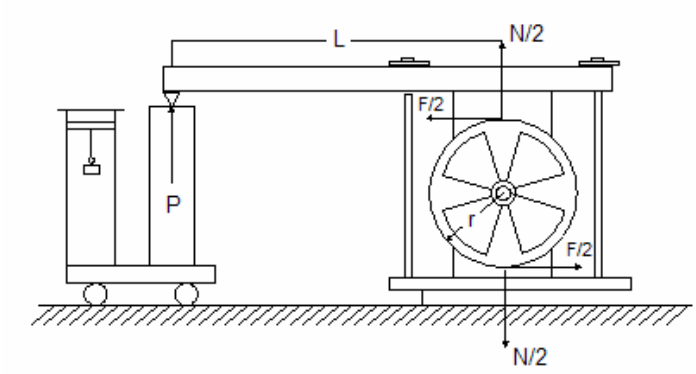


$F_I = PMI * A = PMI * \frac{\pi d^2}{4}[kg\_ó\_lb]$ fuerza indicada

$W_I = F_I L = PMI * A * L[kgm\_ó\_lb - ft]$

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

FRENO PRONY



$$D = 2R$$
$$T = Par - del - freno$$
$$T = \frac{F}{2} D = (L - torque)[m - kg, ft - lb, N - m]$$
$$W_B = Trabajo\_al\_freno$$

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

Donde

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

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

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

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

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

Relación combustible aire

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

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

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

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

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

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

GASTO O CONSUMO ESPECIFICO DE CALOR

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

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

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

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

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

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

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

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

RENDIMIENTO TÉRMICO EN FUNCIÓN DEL GASTO ESPECIFICO DE CALOR

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

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

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

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

RENDIMIENTO DE MAQUINA O MOTOR

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

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

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

RENDIMIENTO MECÁNICO = η_M Basado en las perdidas

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

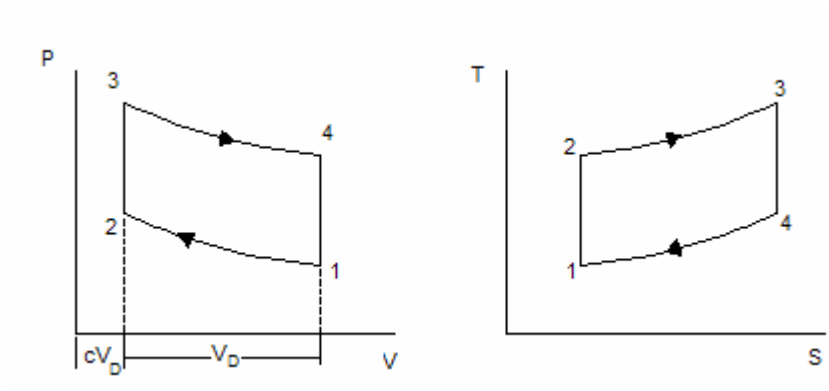
EJERCICIO

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_c/lb_a con un combustible de poder calorífico inferior de 19000 BTU/lb. Determinar

a. 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

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

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

C = 15% = 0.15

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

$$T_1 = 120 + 460 = 580°R$$

$$\overset{o}{w} = 20\frac{Lb}{min}$$

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

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

$$\overset{o}{V}_1 = 306.7\frac{ft^3}{min}$$

$$r_k = \frac{\overset{o}{V}_1}{\overset{o}{V}_2} \qquad \overset{o}{V}_2 = \frac{\overset{o}{V}_1}{r_k} = \frac{306.7}{7.67}\frac{ft^3}{min} \qquad \overset{o}{V}_2 = 40\frac{ft^3}{min}$$

$$\overset{o}{V}_\Delta = \overset{o}{V}_1 - \overset{o}{V}_2 \qquad \overset{o}{V}_\Delta = (306.7 - 40)\frac{ft^3}{min} \qquad \overset{o}{V}_\Delta = 266.7\frac{ft^3}{min}$$

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

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

2. $\overset{0}{V}_2 = 40\frac{ft^3}{min}$

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

1 a 2. s = cte. $P_1V_1^k = P_2V_2^k$, $P_1\overset{0}{V}_1^k = P_2\overset{0}{V}_2^k$

$$P_1\overset{0}{V}_1 = \overset{0}{\omega}RT_1$$

$$P_2\overset{0}{V}_2 = \overset{0}{\omega}RT_2$$

$$\frac{P_2\overset{0}{V}_2}{P_1\overset{0}{V}_1} = \frac{T_2}{T_1}, \qquad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\overset{0}{V}_1}{\overset{0}{V}_2}\right)^K$$

$$\left(\frac{\overset{0}{V}_1}{\overset{0}{V}_2}\right)^K * \frac{1}{\left(\frac{\overset{0}{V}_1}{\overset{0}{V}_2}\right)} = \frac{T_1}{T_2}, \qquad \frac{T_2}{T_1} = r_k^{\ k} * \frac{1}{r_k} = r_k^{\ k-1}$$

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

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

$r_{c/a} = 0.0556\ \frac{lb_c}{lb_a}$ $\quad \overset{0}{\omega}_f = r_{c/a}\,\overset{0}{\omega}_n = 0.0556\frac{lb_c}{lb_a} * \frac{lb_a}{min}$

$$\overset{0}{\omega}_f = 1.112\frac{lb_c}{min}$$

$$\overset{0}{Q}_A = \overset{0}{\omega} q_1 = 1.112\frac{lb_c}{min} * 19000\frac{btu}{lb_c} = 21128\frac{btu}{min}$$

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

$$r_{c/a} << 1$$

$\overset{0}{Q}$ 2. $\rightarrow$ 3: V = Cte.

$$\overset{0}{Q}_A = \overset{0}{U}_p - \overset{0}{U}_I$$

$$\overset{0}{Q}_A = Cv \times \Delta T$$

$$\overset{0}{Q}_A = \overset{0}{\omega} Cv(T_3 - T_2)$$

$$\overset{0}{\omega} = 20 + 1.112 = 21.112 \qquad Cv = 0.1714\frac{Btu}{Lb°R}$$

$$T_3 - T_2 = \frac{\overset{0}{Q}_A}{\overset{0}{\omega} Cv}$$

$$T_3 = T_2 + \frac{\overset{0}{Q}_A}{\overset{0}{\omega} Cv}$$

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

$$T_3 = 1310 + 6163$$

Para $\overset{0}{\omega} = 21.112$

$$T_3 = T_2 + \frac{\overset{0}{Q}_A}{\overset{0}{\omega} Cv} = 1310 + 5838$$

$$T_3 = 7148°R$$

3. $T_3 = 7148°R$

$$\overset{o}{V}_3 = \overset{o}{V}_2 = 40 \frac{ft^3}{min}$$

$$P_3 \overset{0}{V}_3 = \overset{0}{\omega}_g R T_3$$

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

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

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

$$\overset{0}{Q}_R = \overset{0}{\omega} Cv(T_4 - T_1)$$

$$\overset{0}{Q}_R = 21.112 \times 0.1714(3164 - 1310) = 6708 \frac{Btu}{min}$$

$$\overset{0}{\omega} = \overset{0}{Q}_A - \overset{0}{Q}_R = 21128 - 6708$$

$$\overset{0}{\omega} = 14419 \frac{Btu}{min} \frac{60 min}{h} = 865140 \frac{Btu}{h}$$

$$\overset{0}{\omega} = 865140 \frac{Btu}{h} \frac{1hp - h}{2544 Btu}$$

$$\overset{0}{\omega} = 340 hp$$

$$e = \frac{\overset{o}{\omega}}{Q_A} = \frac{14419 \frac{Btu}{min}}{21128 \frac{Btu}{min}} = 0.68$$

$$P_{mec} = \frac{\overset{o}{\omega}}{\overset{o}{V}_D} = \frac{14419 \frac{Btu}{min} * 778 \frac{Lb - ft}{Btu}}{266.7 \frac{ft^3}{min}} = 42062.17 \frac{Lb}{ft^2}$$

$$\eta_B = \frac{W_B}{W} \quad \eta_B = \frac{\overset{o}{W}_B}{\overset{o}{W}} = \frac{\dfrac{\overset{o}{W}_B}{\overset{o}{Q}_A}}{\dfrac{\overset{o}{W}}{\overset{o}{Q}_A}}$$

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

EJERCICIO

Un indicador con resorte de 6 mm$\times\frac{Kg}{cm^2}$(o atmósfera métrica), se utiliza para hacer diagramas de un compresor de doble efecto de 305 x 406 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 cm^2 y la de los diagramas del lado de la manivela es de 16.1 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.

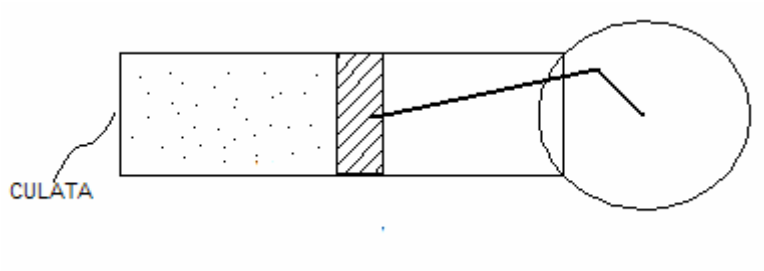


Diagrama del lado de la culata A_c = 16.4 cm^2
Diagrama del lado de la manivela A_m = 16.1 cm^2
L = 89 mm

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

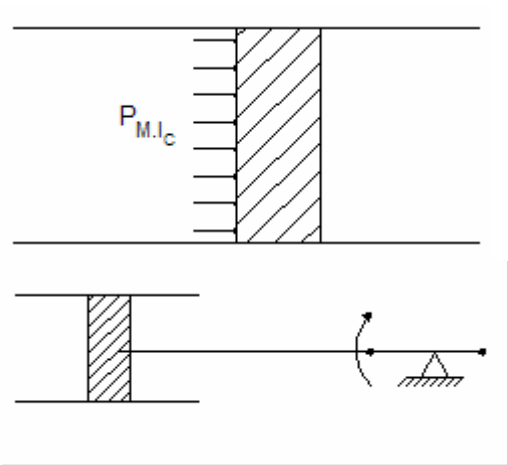
$$P_{MI} = \frac{\text{Area} - \text{del} - \text{diagrama} - \text{indicador} \times \text{Factor}}{\text{Longitud} - \text{diagrama} - \text{indicador}}$$

$$P_{MIC} = \frac{Ac \times Factor - de - escala}{L} = \frac{16.4cm^2 \times \frac{1\frac{Kg}{cm^2}}{6mm}}{89mm}$$

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

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

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



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

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

$W_{IC} = F_{IC} * L$ = 2243 Kg * 0.406 m = 910.6 Kg-m

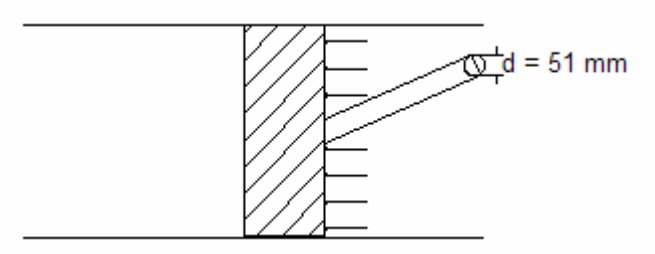
Si N es el numero de ciclos = 200 $ciclos/min$

$$\overset{0}{W}_{IC} = W_{IC}N = 910.6Kg - m * \frac{200}{min}$$

$$\overset{0}{W}_{IC} = 910.6Kg - m * \frac{200}{min} * 1\frac{min}{seg} * \frac{1CV}{75\frac{Kg - m}{s}}$$

CV $_{Ic}$ = 40.47 CV

Ahora para el otro lado que es un análisis similar



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

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

F_{IM} =2140.5 Kg

$W_{IM} = F_{IM} \times L$ = 2140.5 Kg x 0.406 m N = 200 $\frac{ciclos}{min}$

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

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

$$CV_{IM} = 38.6CV$$

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

EJERCICIO

Un motor de automóvil de 6 cilindros 3 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

a. Rendimiento mecánico, rendimiento térmico indicado, rendimiento térmico al freno.
b. Rendimiento de maquina indicado y rendimiento de maquina al freno.
c. Presión media indicada y presión media al freno.
d. Gasto o consumo de calor en btu/hp_f-h y btu/min.

6 cilindros 3 5/8 x 3.6 in

$$W_{fb} = 0.45 \frac{Lb}{hp_f - h}$$

n = 3000 rpm

$$\overset{o}{W}_B = 113 hp_f \qquad \overset{o}{W}_I = 133 hp_I$$

e = 46.4%

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

$$\eta_M = \frac{W_B}{W_I} \qquad \eta_M = \frac{\overset{o}{W}_B}{\overset{o}{W}_I} = \frac{113}{133} = 0.849$$

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

$$G.E.C_b = 0.45 \frac{Lb}{hp_b - h} \times 18500 \frac{Btu}{Lb}$$

$$G.E.C_b = 8325 \frac{Btu}{hp_b - h}$$

$$\overset{o}{E}c = (G.E.Cb)(\overset{o}{W}_B) = \overset{o}{Q}_A$$

$$\overset{o}{E}c = 8325 \frac{Btu}{hp_b - h} \times 113 hp_b = 940725 \frac{Btu}{h} = 15678 \frac{Btu}{min} = \overset{o}{Q}_A$$

$$e = \frac{W}{E_c} \qquad e = \frac{\overset{0}{W}}{\overset{0}{E}_C} \qquad \overset{0}{W} = e\overset{0}{E}_c = 0.464 \times 940725 \frac{btu}{h} = 436496 \frac{btu}{h}$$

$$\overset{0}{W} = 436496 \frac{btu}{h} \times \frac{1hp - h}{2544 btu} = 171.57 hp$$

$$\eta_I = \frac{W_I}{W} \qquad \eta_I = \frac{\overset{0}{W}_I}{\overset{0}{W}} = \frac{133}{171.57} = 0.775$$

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

$$w_{FB} = 0.75 \frac{lb}{hp_f - h}$$

$$\overset{0}{w}_f = 0.45 \frac{lb}{hp_b - h} \times 113 hp_b = 50.85 \frac{lb}{h}$$

$$w_{FI} = \frac{\overset{0}{w}_f}{\overset{0}{w}_I} = \frac{50.85 \frac{lb}{h}}{133 hp_I} = 0.384 \frac{lb_c}{hp_I - h}$$

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

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

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

$$e_I = \frac{\overset{0}{W}_I}{\overset{0}{E}_c} \qquad e_b = \frac{\overset{0}{W}_b}{\overset{0}{E}_c}$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\overset{0}{W}_I = P_{MI} * A * \frac{L}{12} * \frac{n}{2} * \frac{1}{60}$$

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

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

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

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 ºF, 120 in$^{3.}$ Mediante las suposiciones de aire frió 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 psia ft^3 /lbm ºR, C_P = 0.24 Btu/ lbm ºR y C_V = 0.171 Btu/ lbm ºR.

Estado 1

P_1 = 15 psia
T_1 = 100 + 460 = 560 ºR

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

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

Proceso 1-2

$$P_1V_1^{\ K} = P_2V_2^{\ K} \qquad K = 1.4$$

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

Estado 2

$$V_2 = 6.67in^3$$
$$T_2 = 1779.5^{\circ}R$$
$$P_2 = 858\,psia$$

Proceso 2-3

$$P_3 = P_2 = 858\,psia$$

$$P_2V_2 = \omega RT_2 \qquad P_3V_3 = \omega RT_3 \qquad \frac{P_3}{P_2}*\frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} = 2$$

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

Estado 3

$$V_3 = 13.34in^3$$
$$T_3 = 3559^{\circ}R$$
$$P_3 = 858\,psia$$

Proceso 3-4

$$P_3V_3^{\ K} = P_4V_4^{\ K}$$

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

$$P_4 = P_3\left(\frac{V_5}{V_2} * \frac{V_2}{V_1}\right)^K$$

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

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

Estado 4

$$P_4 = 39.6\,psia$$
$$T_4 = 1478^{\circ}R$$
$$V_4 = 120in^3$$

$$PV = \omega RT$$

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

$$Q_A = \omega \cdot C_P\left(T_3 - T_2\right)$$

$$Q_A = \omega \cdot C_V\left(T_4 - T_1\right) \qquad W_n = Q_A - Q_R \qquad e = \frac{W_n}{Q_A}$$

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

CICLO JOULE O BRAYTON

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

$$Q_A = H_3 - H_2 = \int_2^3 \omega C_P dT = \omega C_P\left(T_3 - T_2\right)$$
$$Q_R = H_4 - H_1 = \int_4^1 \omega C_P dT = \omega C_P\left(T_4 - T_1\right)$$ Gas Ideal

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

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

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 $P = cte$

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

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

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

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

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

Proceso 3-4

$$P_3 V_3 = \omega RT_3 \qquad P_4 V_4 = \omega RT_4$$
$$\frac{T_3}{T_4} = r_P^{\ K-1/K}$$

$$P_3 V_3^{\ K} = P_4 V_4^{\ K}$$

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

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

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

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

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

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

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

$$e = 1 - \frac{T_1}{T_2} \qquad e = 1 - \frac{1}{r_P^{\ K-1/K}}$$

Obsérvese que cuando r_P aumenta, el rendimiento térmico ***e*** aumenta

Temperatura intermedia para W_{Max}

$$W_n = W = W_t - W_C$$

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

$$W = C_P (T_3 - T_4 - T_2 + T_1)$$

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

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

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

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

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

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

CICLO JOULE O BRAYTON CON FRICCION DE FLUIDO

$s_2 \neq s_1 \qquad\qquad s_3 \neq s_4$

$\eta_c =$ 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Para el intercambiador de calor

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

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

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

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

Pero ΔK y ΔP 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, $r_{c/a}$ << 1

$$W_t = (1 + r_{c/a})[(h_P - h_4) + (K_P - K_4) + (P_P - P_4)]$$

Con ΔK y ΔP 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 de15. Si la presión inicial es de 1kg/cm^2 determinar los estados de la sustancia en el ciclo, el trabajo neto y el rendimiento térmico.

$$P_1 V_1 = R T_1 \qquad V_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{29.3 * 300}{1 * 10^4} = 0.879 \frac{m^3}{kg}$$

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

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

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

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

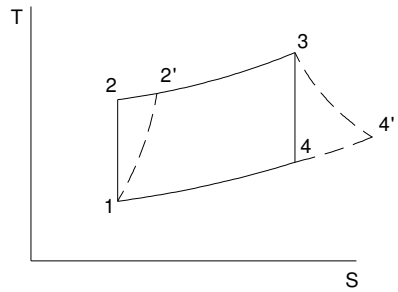
$$W_{CP} = C_P (T_2 - T_1) = 0.24(650.3 - 300) = 54.07 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$Q_A = C_P (T_3 - T_2) = 3.24(1100 - 650.3) = 107.9 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$W_t = Cp(T_3 - T_4) = 0.24(507.4 - 300) = 49.75 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$W_n = W_t - W_c = 142.22 - 84.07 = 58.5$$

$$\eta = \frac{W_n}{Q_A} = \frac{58.15}{107.90} = 0.53 \Rightarrow 53\%$$



$(2')$

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

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

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

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

$(4)'$

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

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

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

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

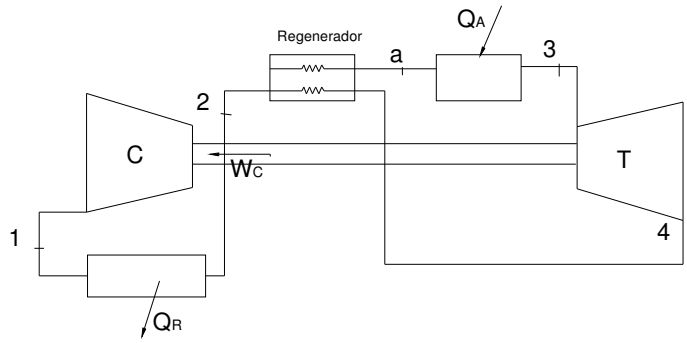
$$W_t' = 0.24(1100 - 596.3) = 120.8$$

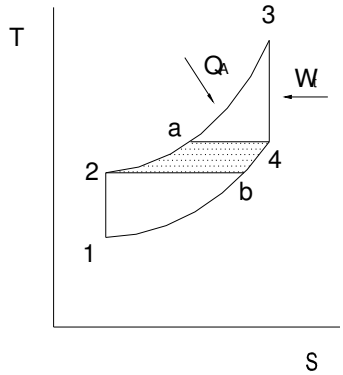
$$W_n' = W_t' - W_c' = 120.8 - 90.38 = 30.5$$

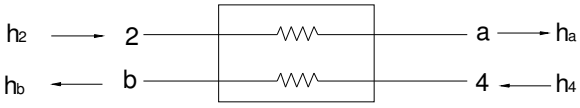
$$Q_A = 0.24(1100 - 676.6) = 101.6$$

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

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

$$Q_A = h_3 - h_a = C_P(T_3 - T_a)$$
$$W_t = h_3 - h_a = C_P(T_3 - T_a)$$
$$W_t = h_3 - h_4 = C_P(T_3 - T_4)$$
$$Q_{12} = h_b - h_1 = C_P(T_b - T_1)$$
$$e = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_a}$$

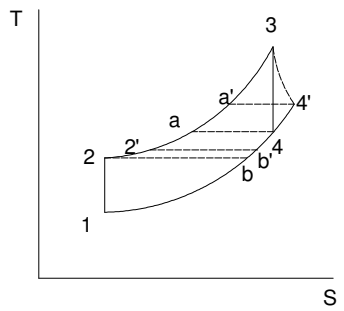
Cuando el rendimiento del generador es diferente del 100%:

$$\eta_r = \frac{Q_{realsu\min istrado}}{Q_{ideal}}$$
$$\eta_r = \frac{h_a' - h_2}{h_4 - h_b} = \frac{C_P(T_a' - T_2)}{C_P(T_4 - T_b)}$$

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: $T_2 = T_1 + \dfrac{T_2 - T_1}{\eta_c} \rightarrow b'$

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

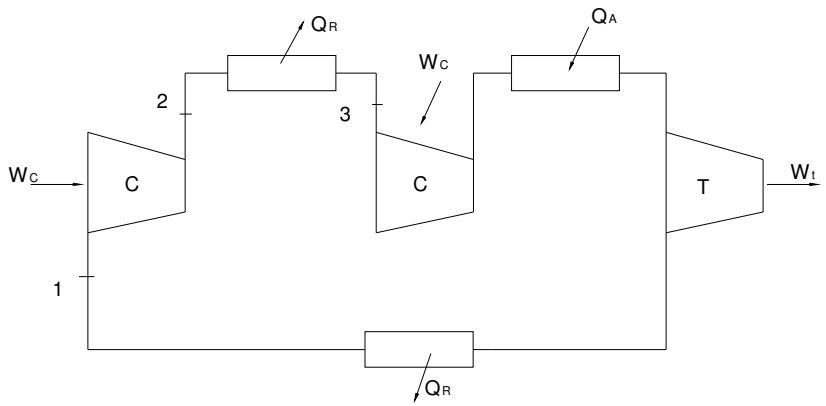
Gas Ideal: $T_4' = T_3 - (T_3 - T_4)\eta_t \rightarrow a'$

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

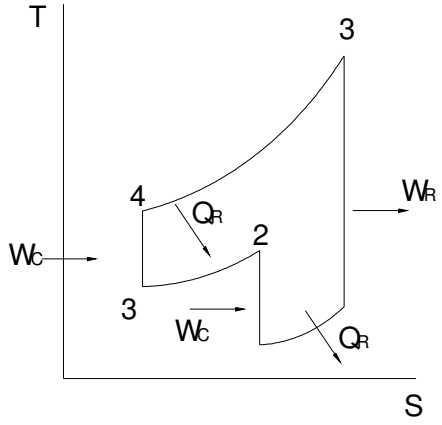
Gas Ideal: $T_a'' = T_2' + \eta_r(T_4' - T_2')$

$$W_t = h_3 - h_4' = C_P(T_3 - T_4')$$
$$W_c = h_2' - h_1 = C_P(T_2' - T_1)$$
$$Q_A'' = h_3 - h_a'' = C_P(T_3 - T_a'')$$

CICLO JOULE O BRAYTON CON REFRIGERACION INTERMEDIA

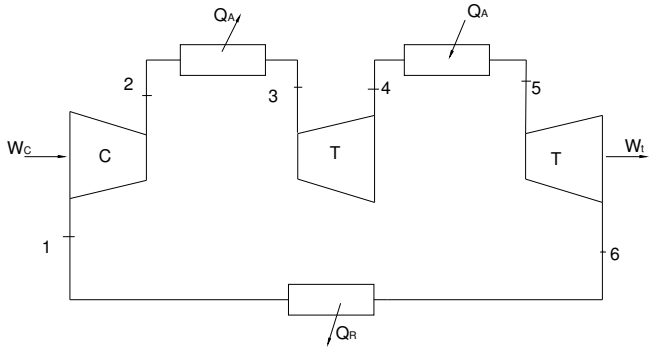


$$W_{C1} + W_{C2} + Q_A = Q_{R1} + Q_{R2} + W_t$$
$$W_n = \sum Q$$
$$W_t - (W_{C1} + W_{C2}) = Q_A - (Q_{R1} + Q_{R2})$$

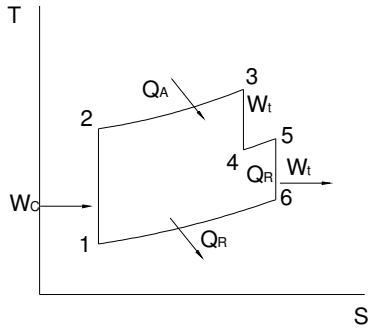


$$W_{C1} = h_2 - h_1$$
$$W_{C2} = h_4 - h_3$$
$$Q_{R1} = h_2 - h_3$$
$$Q_{R2} = h_4 - h_1$$
$$Q_R = h_3 - h_4$$
$$e = \frac{W_n}{Q_A}$$

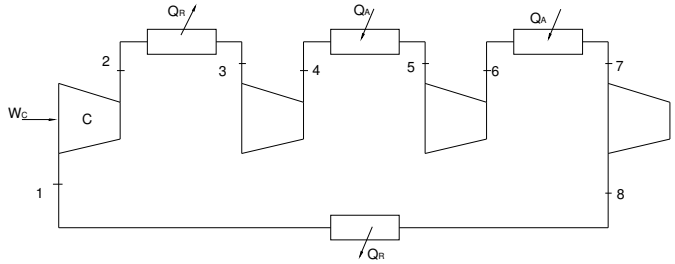
CICLO JOULE O BRAYTON CON RECALENTAMIENTO INTERMEDIO



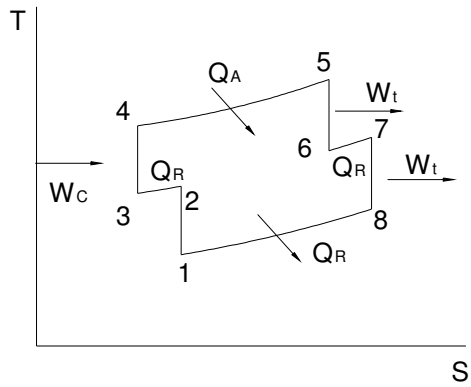
$$W_C + Q_{A1} + Q_{A2} = Q_{12} + W_{t1} + W_{t2}$$
$$W_n = \sum Q$$
$$(W_{t1} + W_{t2}) - W_C = (Q_{A1} + Q_{A2}) - Q_R$$



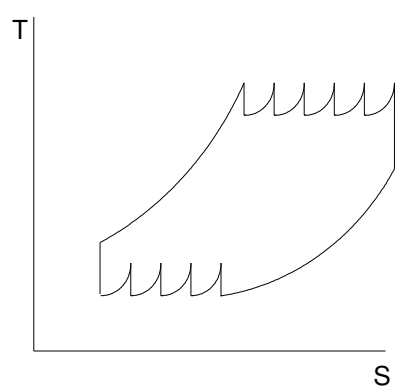
$$W_C = h_2 - h_1$$
$$Q_{A1} = h_3 - h_2$$
$$Q_{A2} = h_3 - h_4$$
$$Q_2 = h_6 - h_1$$
$$W_{t1} = h_3 - h_4$$
$$W_{t2} = h_5 - h_6$$



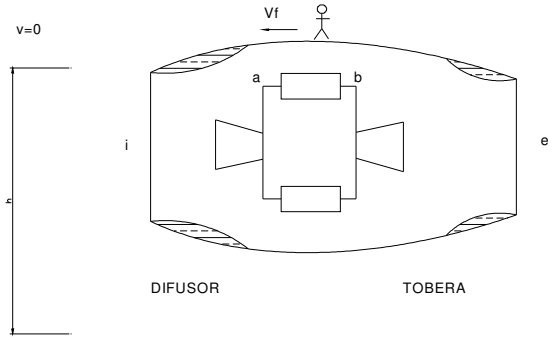
$$W_{C1} + W_{C2} + Q_{A1} + Q_{A2} = W_{t1} + W_{t2} + Q_{R1} + Q_{R2}$$
$$(W_{t1} + W_{t2}) - (W_{C1} + W_{C2}) = (Q_{A1} + Q_{A2}) - (Q_{R1} + Q_{R2})$$
$$W_n = \sum Q$$

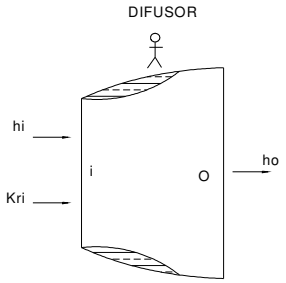


$$W_{C1} = h_2 - h_1$$
$$Q_{R1} = h_2 - h_3$$
$$W_{C2} = h_4 - h_3$$
$$Q_{A1} = h_5 - h_4$$
$$W_{t1} = h_5 - h_6$$
$$Q_{A2} = h_7 - h_6$$
$$W_{t2} = h_7 - h_8$$
$$Q_{R1} = h_8 - h_1$$



PROPULSION A CHORRO, COHETE





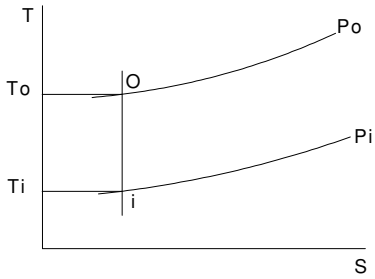
$$h_i + k_{ri} = h_o \Rightarrow k_{ri} = \frac{V_P^2}{2g_o J}$$

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

Gas Ideal:

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

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



$i \rightarrow$o: Proceso Isentrópico
Si = So ò ΔS = 0 para cualquier sustancia

Gas Ideal:

$$PV^K = cte$$

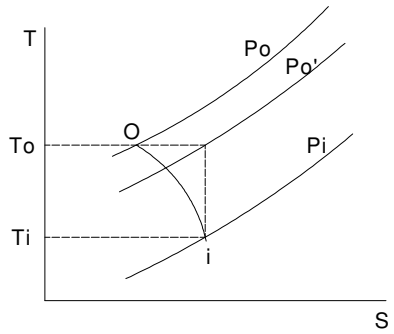
$$PV^K = C$$

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

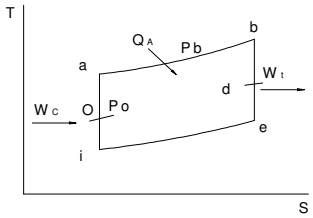
$$\frac{T_o}{T_i} = \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{K-1}{K}}$$

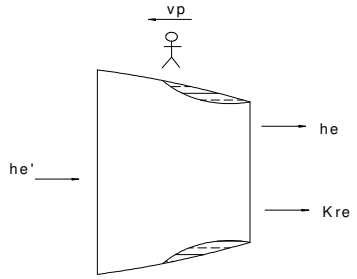
$$\frac{T_o}{T_i} = 1 + \frac{V_P^2}{2 g_o J C_P T_i} = \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{K-1}{K}}$$

RENDIMIENTO DE ARIETE O DINAMICO



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





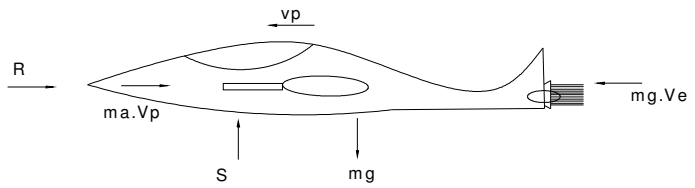
$$h_d = h_e + K_{re}$$

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

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

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

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



$$\overset{+}{\leftarrow}: \dot{m}_g V_e - \dot{m}_a V_P - R = ma$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

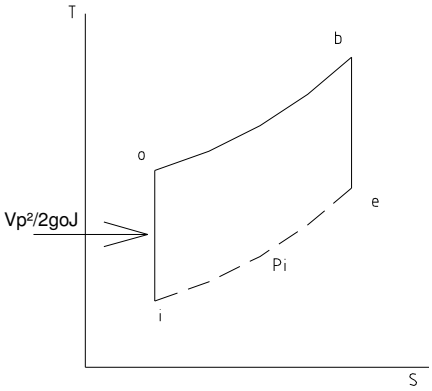
Si $r_{c/a} \prec\prec 1$

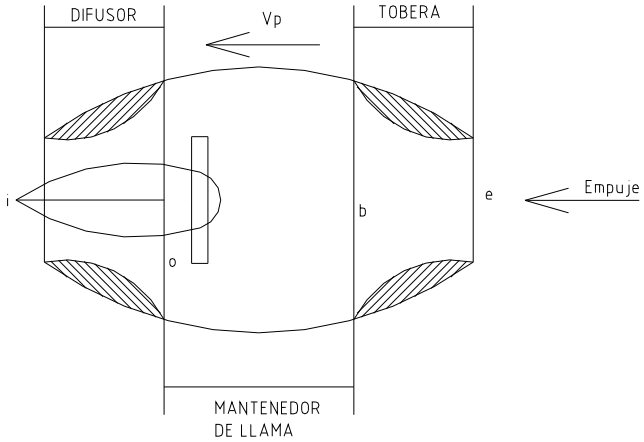
$$F = \dot{m}_a V_e \left(1 - \frac{V_P}{V_e} \right)$$

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

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

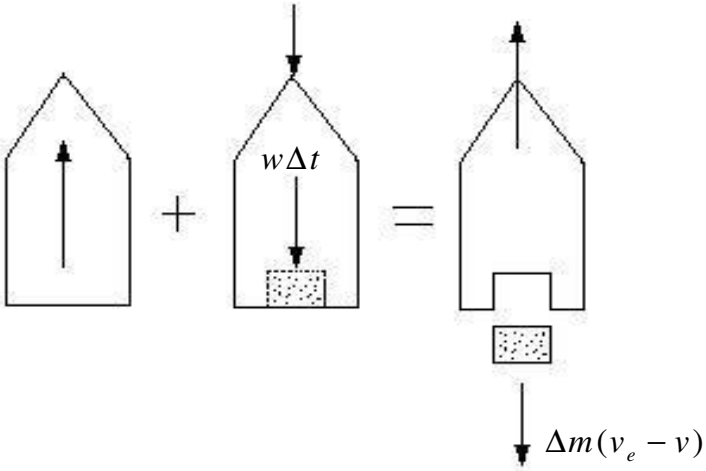
ESTATORREACTORES (Permite vuelos más altos)





COHETE

mv RΔt (m - Δm)($v + \Delta v$)



t $t + \Delta t$

$+\uparrow$: mv - RΔt - WΔt = (m - Δm)($v + \Delta v$) $- \Delta(v_e - v)$

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

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

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

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

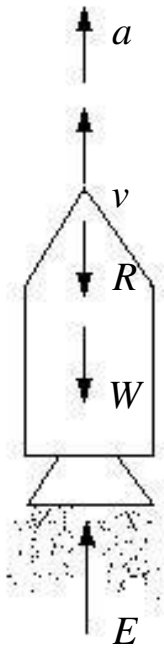
$$m\frac{dv}{dt} = -(R + W) + \frac{dm}{dt}v_e$$

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

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

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

$$E - R - W = ma$$



$$\text{F} = \frac{\text{dm}}{\text{dt}}\text{v}_\text{e} = \dot{m}v_e$$

$$\dot{w} = Fv_e v_p$$

b→e proceso isentrópico

$$Pv^k = cons\tan te \qquad PV^k = cons\tan te$$

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

Gas ideal: $v_e \; \alpha \; \Delta h$

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

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

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

Rendimiento de tobera:

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

*cualquier sus*tan*cia* gas ideal

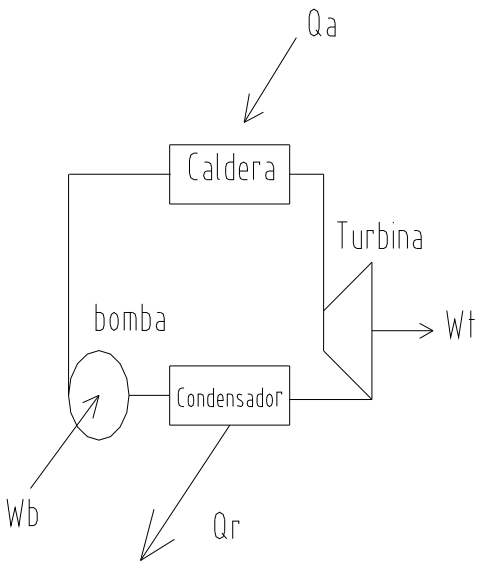
$$v_e' = \sqrt{2g_o J(h_b - h_e')} = \sqrt{2g_o J(h_b - h_e)\eta}$$

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

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

$$\eta = \frac{\Delta \text{h}'}{\Delta \text{h}} \qquad \Delta \text{h}' = \Delta \text{h}\eta$$

CICLO RANKINE
Dos procesos isentrópicos
Dos procesos isobáricos



$1 \rightarrow 2$ Proceso isentrópico

$S_1 = S_2 \qquad \Delta S = 0$

$2 \rightarrow 3$ Proceso isobárico

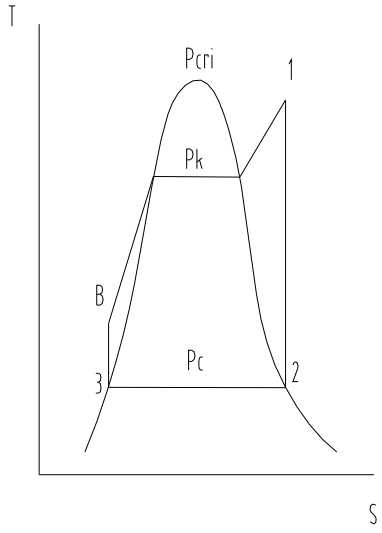
$P_2 = P_3 \qquad \Delta P = 0$

$3 \rightarrow B$ Proceso isentrópico

$S_3 = S_B \qquad \Delta S = 0$

$B \rightarrow 1$ Proceso isobárico

$P_B = P_1 \qquad \Delta P = 0$

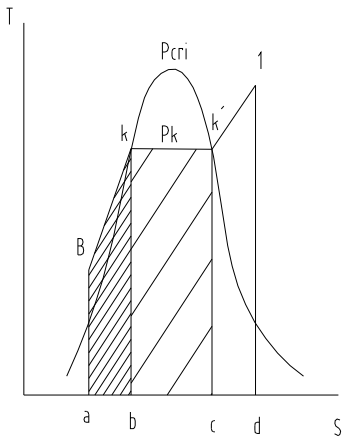


B : Subenfriado

K : Líquido saturado

K´: Vapor saturado

1 : Vapor recalentado



Area aBKb = $Q_{economizador}$

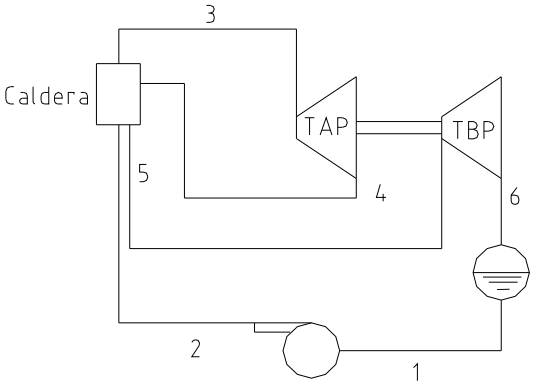
Area bKK´c = $Q_{evaporador}$

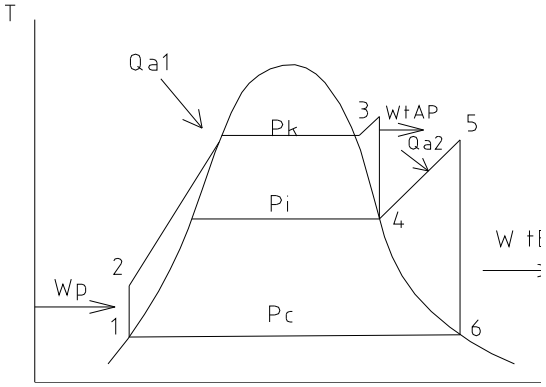
Area cK´1d = $Q_{sobrecalentador}$

Caldera Qa = Area aBKK´1d

$Q_A = Q_{economizador} + Q_{evaporador} + Q_{sobrecalentador}$

CICLO RANKINE CON RECALENTAMIENTO INTERMEDIO





$$h_3 + h_5 = h_4 + h_6 + w_t$$

$$w_t = \underbrace{(h_3 - h_4)}_{w_{tAP}} + \underbrace{(h_5 - h_6)}_{w_{tBP}}$$

$$w_t = w_{tAP} + w_{tBP}$$

$$w_p = h_2 - h_1 \approx v_2 (P_k - P_c)$$

$$w_N = w_t - w_p$$

$$e = \frac{w_N}{Q_a} = \frac{w_t - w_p}{Q_{a1} + Q_{a2}}$$

$$Q_A = Q_{A1} + Q_{A2}$$

$Q_{A2} = calor$ del recalentador

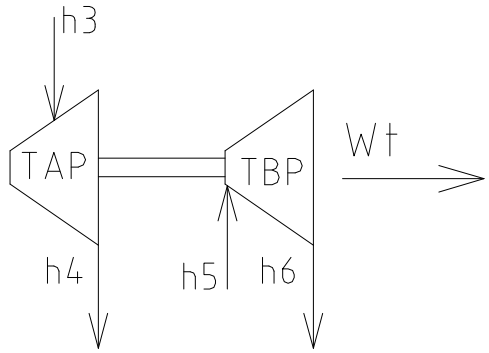
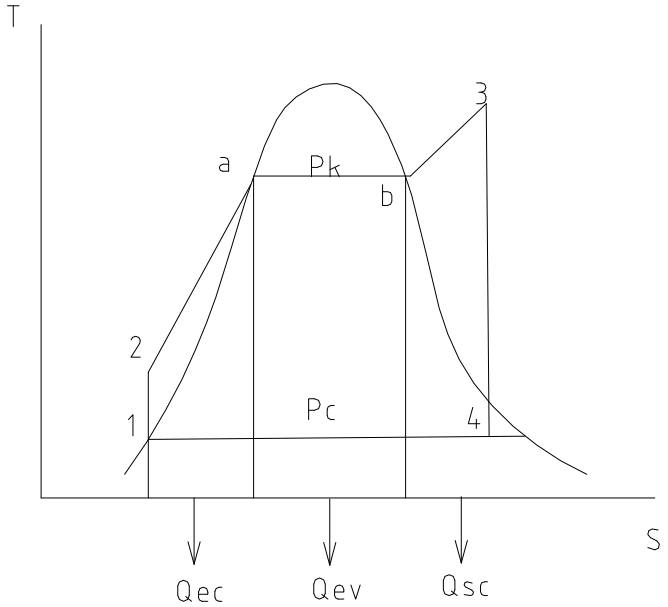


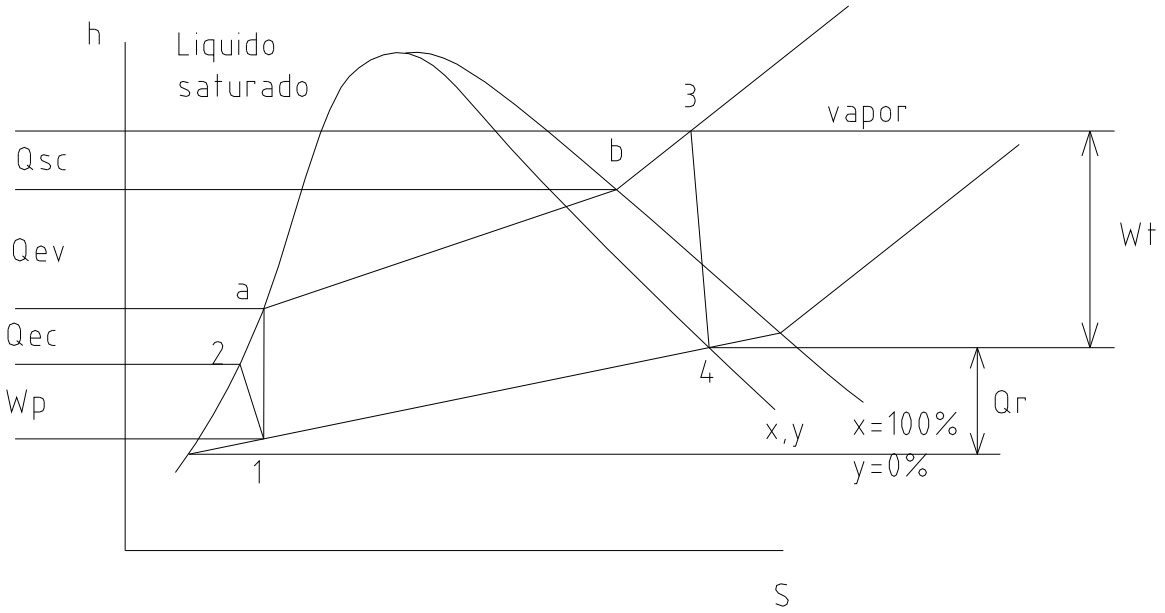
DIAGRAMA DE MOLLIER



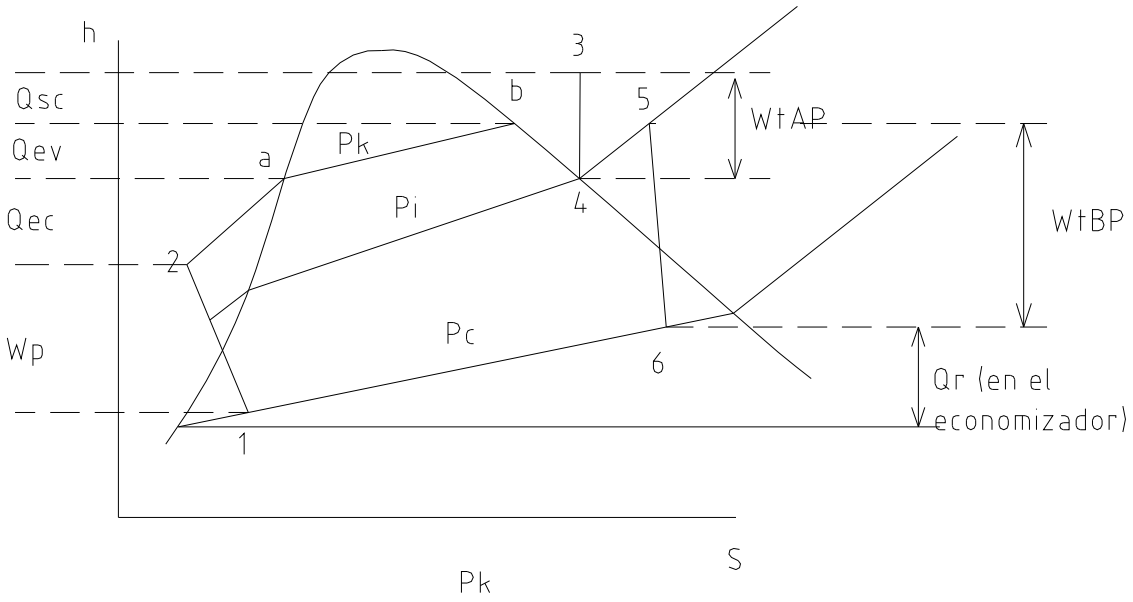
$Q_{ec} = calor$ en el economizador

$Q_{ev} = calor$ en el evaorador

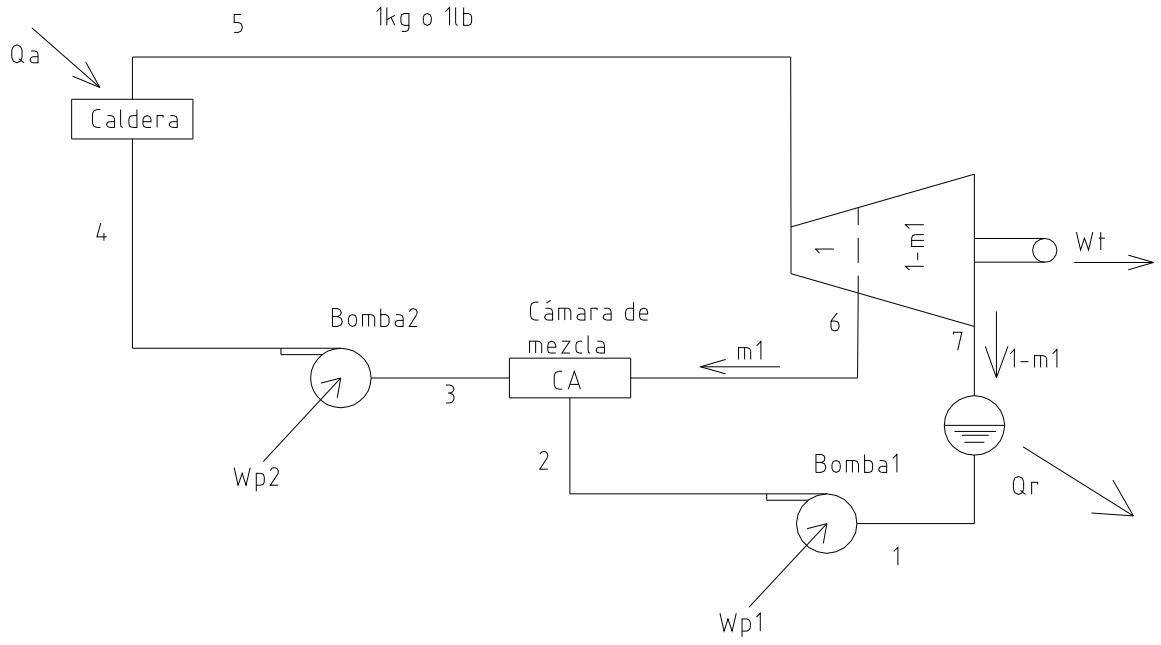
Q_{sc} = calor en el sobrecalentador

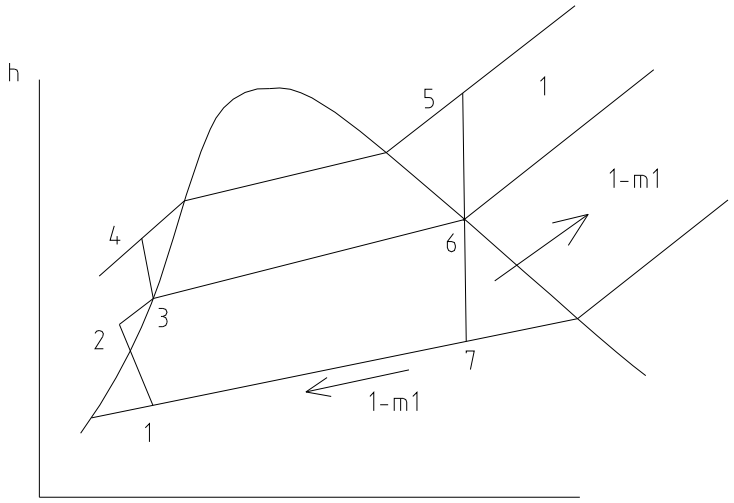


CICLO RANKINE CON RECALENTAMIENTO INTERMEDIO (MOLIER)

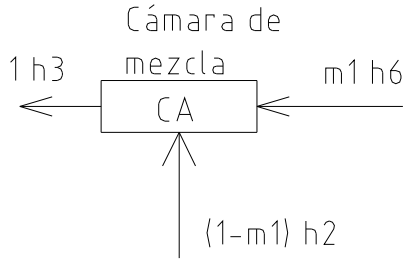


CICLO CON REGENERACIÓN





$$m_1 = \frac{\text{kg vapor sangrado}}{kg\ \text{vapor}} \quad \text{o} \quad \frac{\text{lb vapor sangrado}}{lb\ \text{vapor}}$$



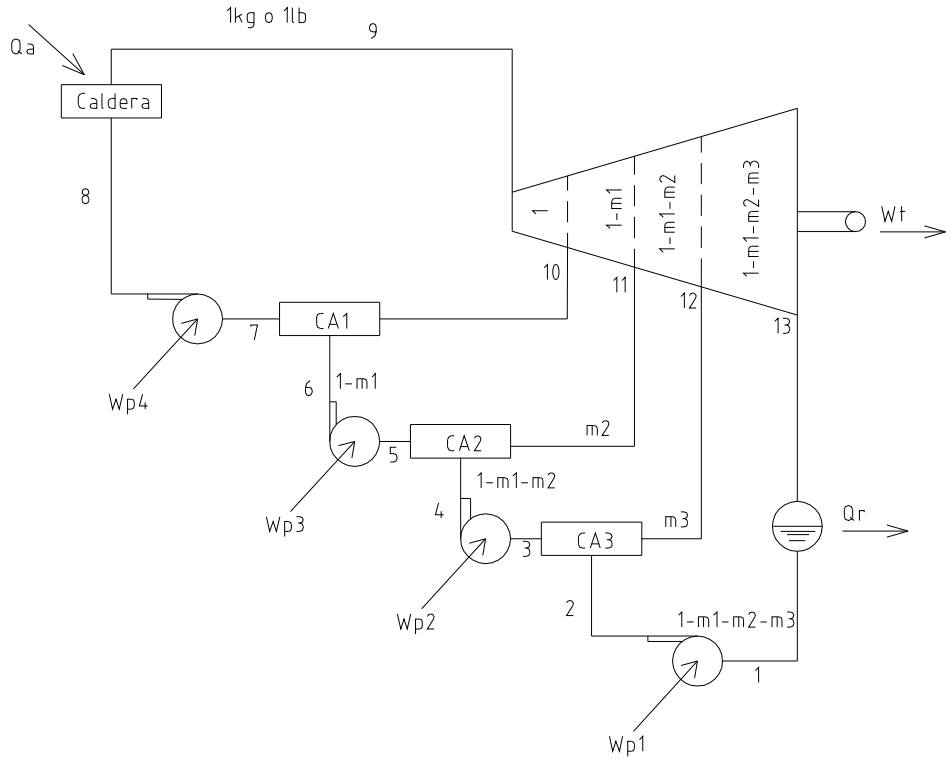
$$m_1 h_6 + (1 - m_1) h_2 = 1 h_3$$
$$m_1 (h_6 - h_2) + h_2 = h_3$$
$$m_1 = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} =$$ cantidad de vapor que hay que sacar para regenerar el ciclo

$$Q_A + wp1 + wp2 = wt + Q_R$$
$$Q_A - Q_R = wt - \sum wp$$
$$\sum Q = w_N$$

Aproximando $\quad m_1 \approx \dfrac{h_3 - h_1}{h_6 - h_1} \qquad \mathrm{e} = \dfrac{\mathrm{w_N}}{\mathrm{Q_A}}$

$$w_t = 1(h_5 - h_6) + (1 - m_1)(h_6 - h_7) \quad \left[\frac{kcal}{kg} \ \frac{\mathrm{BTU}}{\mathrm{lb}}\right]$$
$$w_{p1} = (h_2 - h_1)(1 - m_1) \approx (1 - m_1) v1 (P_i - P_c)$$
$$wp2 = (h_4 - h_3) \approx v3 (P_k - P_i)$$
$$Q_R = (h_7 - h_1)(1 - m_1)$$
$$Q_A = (h_5 - h_4) \quad \left[\frac{kcal}{kg} \ \frac{\mathrm{BTU}}{\mathrm{lb}}\right]$$

CICLO CON GENERACIÓN



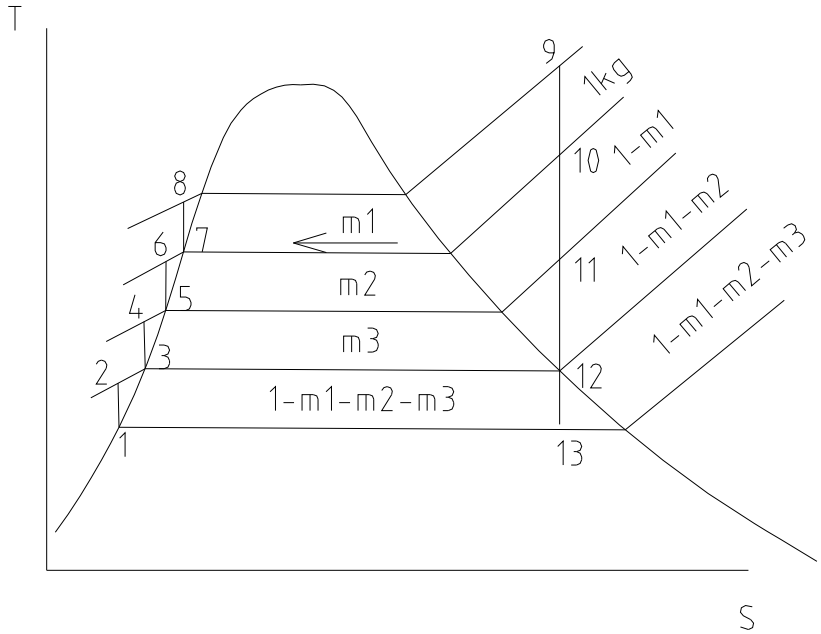


DIAGRAMA T S

$$Q_A + \sum_{i=1}^{4} WP_i = W_t + Q_R$$

$$Q_A - Q_R = Wt - \sum_{i=1}^{4} WP_i$$

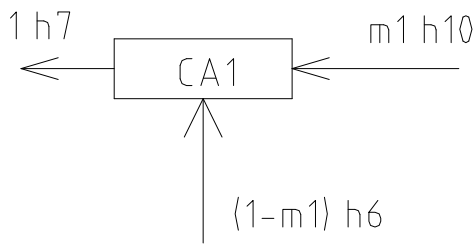
$$\sum Q = W_N$$

$$1(h_7) = m_1(h_{10} + h_6(1 - m_1)$$

$$1h7 = m_1 h_{10} + h_6 - h_6 m_1$$

$$m_1 = \frac{h_7 - h_6}{h_{10} - h_6}$$

$$m_1 \approx \frac{h_7 - h_5}{h_{10} - h_5} \quad \left[\frac{\text{kg de vapor saturado}}{kg \text{ de vapor}}\right]$$



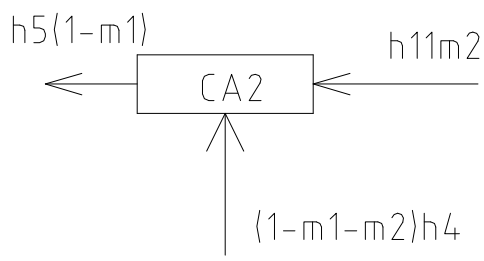
$$h_5(1 - m_1) = h_{11} m_2 + (1 - m_1 - m_2) h_4$$

$$h_5(1 - m_1) = h_{11} m_2 + h_4(1 - m_1) - h_4 m_2$$

$$(1 - m_1)(h_5 - h_4) = m_2(h_{11} - h_4)$$

$$m_2 = \frac{(1 - m_1)(h_5 - h_4)}{h_{11} - h_4}$$

$$m_2 \approx \frac{(1 - m_1)(h_5 - h_3)}{h_{11} - h_3}$$



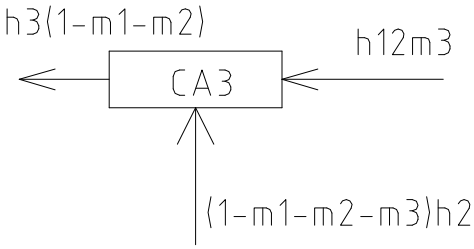
$$h_3(1 - m_1 - m_2) = h_{12} m_3 + h_2(1 - m_1 - m_2 - m_3)$$

$$h_3(1 - m_1 - m_2) = h_{12} m_3 + h_2(1 - m_1 - m_2) - h_2 m_3$$

$$(1 - m_1 - m_2)(h_3 - h_2) = m_3(h_{12} - h_2)$$

$$m_3 = \frac{(1 - m_1 - m_2)(h_3 - h_2)}{h_{12} - h_2}$$

$$m_3 \approx \frac{(1 - m_1 - m_2)(h_3 - h_1)}{h_{12} - h_1}$$



$$Wt = 1(h_9 - h_{10}) + (1 - m_1)(h_{10} - h_{11}) + (1 - m_1 - m_2)(h_{11} - h_{12}) + (1 - m_1 - m_2 - m_3)(h_{12} - h_{13})$$

$$Wt = \left[\tfrac{kcal}{kg}; \tfrac{BTU}{lb}; \tfrac{Kj}{kg}\right]$$

$$w_{p4} = 1(h_8 - h_7) \approx v_7(P_k - P_i)$$

$$w_{p3} = (1 - m_1)(h_6 - h_5) \approx (1 - m_1) v_5 (P_{i1} - P_{i2})$$

$$wp2 = (1 - m1 - m2)(h4 - h3) \approx (1 - m1 - m2) v3 (Pi2 - Pi3)$$

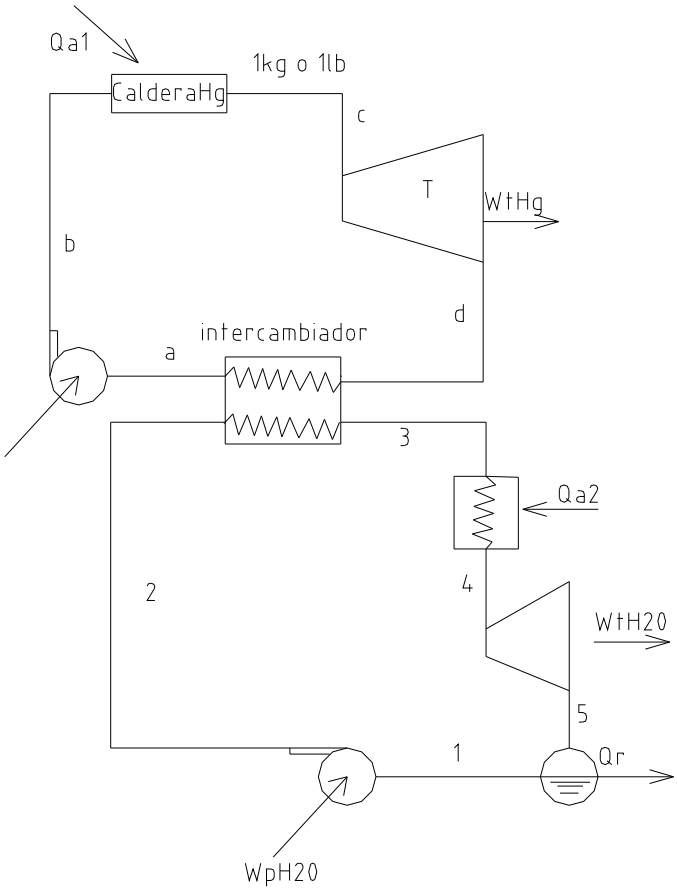
$$w_{p1} = (1 - m_1 - m_2 - m_3)(h_2 - h_1) \approx (1 - m_1 - m_2 - m_3) v_1 (P_{i3} - P_c)$$

$$Q_A = h_9 - h_8 \quad \left[\tfrac{kcal}{kg}; \tfrac{BTU}{lb}; \tfrac{Kj}{kg}\right]$$

$$Q_R = (1 - m_1 - m_2 - m_3)(h_{13} - h_1) \left[\tfrac{kcal}{kg}; \tfrac{BTU}{lb}; \tfrac{Kj}{kg}\right]$$

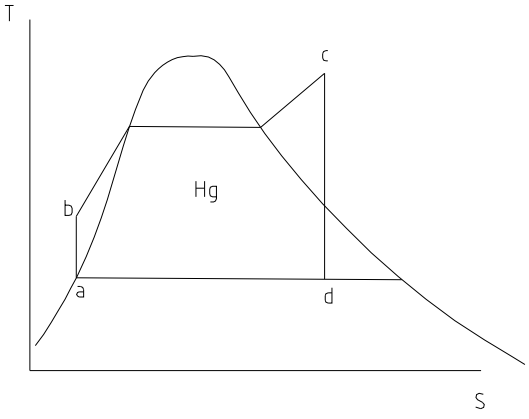
CICLO BINARIO

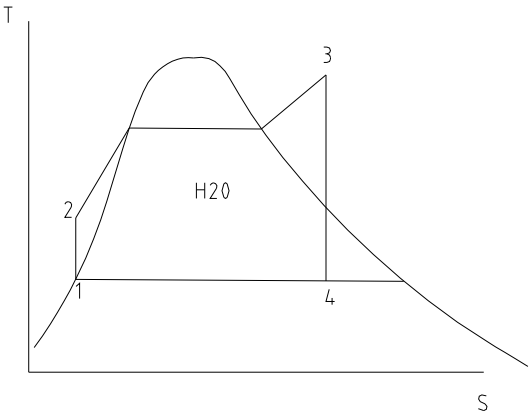
Dos ciclos Rankine, uno con un fluido superior y otro con un fluido inferior.



El balance energético será:

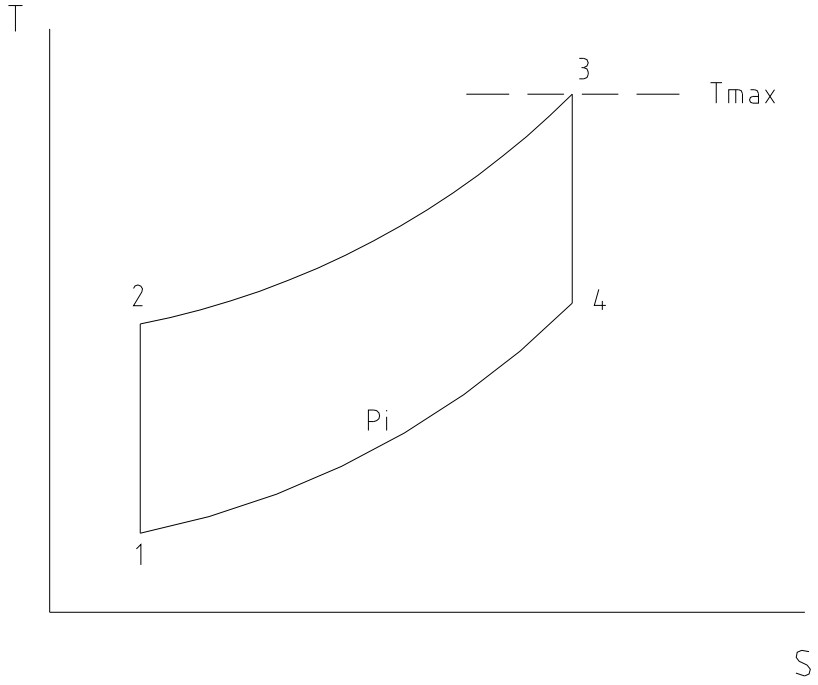
$$Q_{A1} + Q_{A2} + W_{pHg} + W_{pH_2O} = W_{THg} + W_{TH_2O} + Q_R$$





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 Cp = 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.

Tmáx=1300°F+460=1760°R



Estado 1
P_1=15 psia
T_1=100+460=560°R

$$W\max \rightarrow T_2 = \sqrt{T_1 T_3} = \sqrt{560 * 1760} \qquad T_2 = 992.7°R$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \qquad T_4 = \frac{T_3 T_1}{T_2} = \frac{T_3 T_1}{\sqrt{T_1 T_3}} = \sqrt{T_1 T_2} = 992.7°R$$

Estado 2
T_2=992.7 °R

$$T_2 = T_1 r_p^{\frac{K-1}{K}} \qquad \frac{T_2}{T_1} = r_p^{\frac{K-1}{K}} \qquad r_p = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{K}{K-1}} = \left(\frac{992.7}{560}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}}$$

$$r_p = 7.41 = \frac{P_2}{P_1} \qquad P_2 = 7.41*15 \qquad P_2 = 111.2\text{psia}$$

Estado 3
T_2=1160°R
P_3=11.2psia

Estado 4
P_4=P_1=15psia

$$T_4 = \frac{T_3}{r_p^{\frac{K-1}{K}}} \rightarrow \qquad T_4 = 992.7°R$$

$$e = \frac{W_N}{Q_A} \quad \rightarrow e = \frac{Cp(T_3 - T_4) - Cp(T_2 - T_1)}{Cp(T_3 - T_2)} = \frac{(1760 - 992.7) - (992.7 - 560)}{1760 - 992.7}$$

$$e = 43\%$$

$$WT = 0.24(1760 - 992.7) = 184.2 \tfrac{BTU}{LB}$$

$$WC = 0.24(992.7 - 560) = 103.8 \tfrac{BTU}{LB}$$

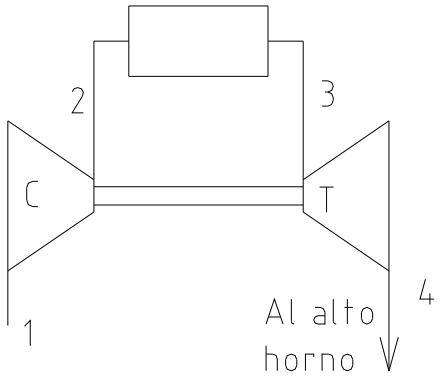
$$WN = 184.2 - 103.8 = 80.35 \tfrac{BTU}{LB}$$

$$\dot{\omega} = 10 \tfrac{lb}{s}$$

$$\dot{W} = \dot{\omega} * W = 10 \tfrac{lb}{s} * 80.35 \tfrac{BTU}{LB} * 778 \tfrac{lbf\text{ -ft}}{BTU} * \frac{1hp}{550 \tfrac{lbf\text{ -ft}}{ss}}$$

$$\dot{W} = 1136.587hp$$

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 rp del compresor. Determine la relación de presión del compresor cuando n_c sea del 85% y n_t del 90%.



Estado (1)

$$P_1 = 15\frac{lb}{in^2}abs$$
$$T_2 = 60 + 460 = 520^{\circ} R$$

Estado (2)

$$P_2 = r_P P_1 = 15 r_P$$
$$T_2 = T_1 r_P^{\frac{K-1}{K}} = 520 r_P^{\frac{2}{7}}$$

Estado (3)

$$P_3 = P_2 = 15 r_P$$
$$T_3 = 1500 + 460 = 1960^{\circ} R$$

Estado (4)

$$P_4 = 30\frac{lb}{in^2}abs$$

$$T_4 = \frac{T_3}{r_{P1}^{\frac{K-1}{K}}} = \frac{1960}{r_{P1}^{2/7}}$$

$$W_C = C_p(T_2 - T_1) = C_P\left[520 r_P^{2/7} - 520\right] = 0.24 \times 520\left(r_P^{2/7} - 1\right)$$

$$W_t = C_P(T_3 - T_4) = C_P\left[1960 - \frac{1960}{r_P^{2/7}}\right] = 0.24 \times 1960\left(1 - \frac{1}{r_{P1}^{2/7}}\right)$$

$$\eta_C = \eta_t = 100\% \rightarrow W_t = W_C$$

$$0.24 \times 520\left(r_{Pc}^{2/7} - 1\right) = 0.24 \times 1960\left(1 - \frac{1}{r_{Pt}^{2/7}}\right)$$

$$r_{Pc}^{2/7} - 1 = \frac{1960}{520}\left(1 - \frac{1}{r_{Pt}^{2/7}}\right)$$

$$r_{Pc} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{15}$$

$$r_{Pt} = \frac{P_3}{p_4} = \frac{P_2}{30}$$

$$\left(\frac{P_2}{15}\right)^{2/7} - 1 = 3.76\left[1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{30}\right)^{2/7}}\right]$$

$$\frac{P_2^{\,2/7}}{15^{2/7}} - 1 = 3.76 - \frac{3.76 \times 30^{2/7}}{P_2^{\,2/7}}$$

$$\frac{P_2^{\,2/7} - 15^{2/7}}{15^{2/7}} = \frac{3.76 P_2^{\,2/7} - 3.76 \times 30^{2/7}}{P_2^{\,2/7}}$$

$$\left(P_2^{\,2/7}\right)^2 - 15^{2/7} \cdot P^{2/7} = 3.76 \times 15^{2/7} \times P_2^{\,2/7} - 3.76 \times 30^{2/7} \times 15^{2/7}$$

$$\left(P_2^{\,2/7}\right)^2 - 2.16 P_2^{\,2/7} = 8.15 P_2^{\,2/7} - 21.5$$

$$\left(P_2^{\,2/7}\right)^2 - 10.31 r_P^{\,2/7} + 21.5 = 0$$

$$P_2^{\,2/7} = \frac{10.31 \pm \sqrt{10.31^2 - 4 \times 21.5}}{2} \Rightarrow P_2^{\,2/7} = 7.4 \rightarrow P_2^{\,2/7} = 2.9$$

$$P_2 = 7.4^{7/2} = 1102.3 \frac{lb}{in^2} abs$$

$$P_2 = 2.9^{7/2} = 41.5 \frac{lb}{in^2} abs$$

$$r_P = \frac{41.5}{15} = 2.7$$

$b)$

$$\eta_C = 85\%, \eta_t = 90\%$$

$$\eta_C = \frac{W_C}{W_C'} \rightarrow W_C' = \frac{W_C}{\eta_C}$$

$$\eta_t = \frac{W_t'}{W_t} \rightarrow W_t' = \eta_t W_t$$

$$W_t' = W_C'$$

$$\frac{W_C}{\eta_C} = \eta_t W_t$$

$$W_C = \eta_C . \eta_t . W_t$$

$$0.24 \times 520 \left[\left(\frac{P_2}{15} \right)^{2/7} - 1 \right] = 0.85 \times 0.90 \times 0.24 \times 1960 \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{30} \right)^{2/7}} \right]$$

$$\frac{p_2 - 15^{2/7}}{15^{2/7}} = 0.85 \times 0.90 \times \frac{1960}{520} \left[\frac{P_2^{\,2/7} - 30^{2/7}}{P_2^{\,2/7}} \right]$$

$$\left(P_2^{\,2/7} \right)^2 - 2.16 P_2^{\,2/7} = 6.22 P_2^{\,2/7} - 16.4$$

$$\left(P_2^{\,2/7} \right)^2 - 8.38 P_2^{\,2/7} + 16.4 = 0$$

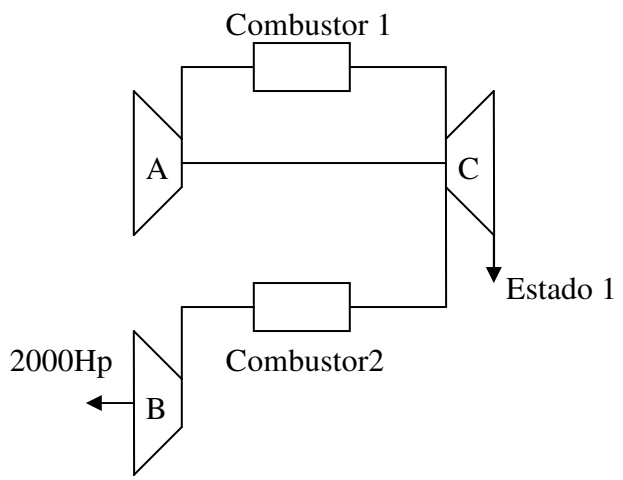
$$P_2^{\,2/7} = \frac{8.38 \pm \sqrt{8.38^2 - 4 \times 16.4}}{2}$$

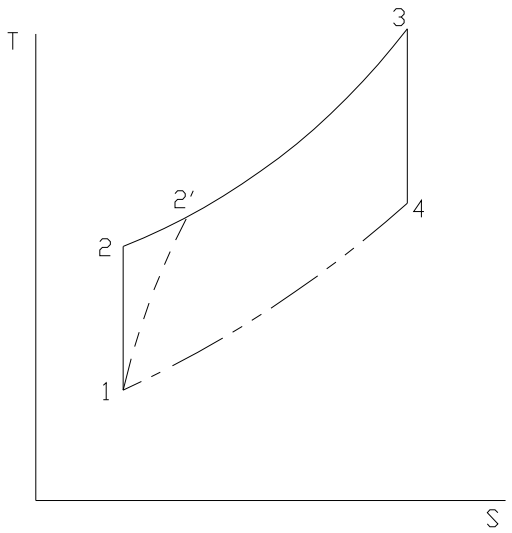
$$P_2^{\,2/7} = 5.26 \rightarrow P_2 = 5.26^{7/2} = 333.7$$

$$P_2^{\,2/7} = 3.11 \rightarrow P_2 = 53.047$$

$$r_P' = \frac{P_2}{P_1} = \frac{53.1}{15} = 3.53$$

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 perdida 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

$$P_1 = 15\frac{lb}{in^2}abs$$

$$T_1 = 100 + 460 = 560°R$$

Estado 2

$$P_2 = r_p \times P_1 = 5 \times 15 = 75\frac{lb}{in^2}abs$$

$$T_2 = T_1 \times r_P^{\frac{K-1}{K}} = 560(5)^{\frac{2}{7}} = 886°R$$

Estado 3

$$P_3 = P_2 = 75\frac{lb}{in^2}abs$$
$$T_3 = 1300 + 460 = 1760°R$$

Estado 4

$$P_4 = P_1 = 15\frac{lb}{in^2}abs$$

$$T_4 = \frac{T_3}{r_P^{\frac{K-1}{K}}} = \frac{1760}{5^{\frac{2}{7}}} = 1111.2°R$$

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´

$$\eta_c = \frac{W_c}{W'_c} = \frac{c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T'_2 - T_1)}$$

$$T_2' = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_C} = 560 + \frac{886 - 560}{0.83} = 952.5°R$$

$$W'_{tA} = X\frac{lb}{lb} = c_p(T_3 - T'_4) \qquad \frac{BTU}{lb}$$

$$W'_c = c_p(T'_2 - T_1) \qquad \frac{BTU}{lb}$$

$$W'_{tB} = (1 - X)c_p(T_3 - T'_4) \qquad \frac{BTU}{lb}$$

$$W'_{tA} = W'_C$$

$$Xc_p(T_3 - T'_4) = c_p(T'_2 - T_1)$$

$$X = \frac{T'_2 - T_1}{T_3 - T'_4} = \frac{952.5 - 560}{1760 - 1221}$$

$$X = 0.72\frac{lbA}{lbB}$$

$$(1 - X) = 1.0 - 0.72 = 0.28\frac{lbB}{lbC}$$

$$W'_{tB} = 0.28 \times 0.24 \times (1760 - 1221.4) = 36.19\frac{BTU}{lb}$$

$$\overset{*}{W}_{tB} = 2000Hp$$

$$\overset{*}{\omega}_B = \frac{\overset{*}{W}_{tB}}{W'_{tB}} = \frac{2000Hp}{36.1\frac{BTU}{lb}} \times \frac{550\frac{lb - ft}{s}}{Hp} \times \frac{1BTU}{778lb - ft}$$

$$\overset{*}{\omega}_B = 39.1\frac{lb}{s}$$

$$\overset{*}{\omega}_C = 39.1\frac{lbB}{s} \times \frac{1lbC}{0.28lbB} = 139.6$$

$$\overset{*}{\omega}_A = 0.72\frac{lbB}{lbC} \times 139.6\frac{lbC}{s} = 100.5\frac{lb}{s}$$

$$Q_A = c_p(T_3 - T'_2)$$

$$Q_A = 0.24(1760 - 952.5) = 193.7\frac{BTU}{lb}$$

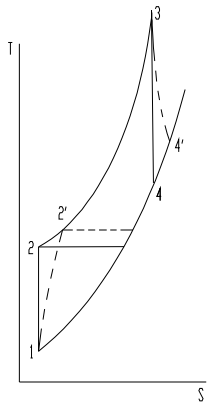
$$\overset{*}{Q}_1 = 193.7\frac{BTU}{lb} \times 100.5\frac{lb}{s} = 19466.85\frac{BTU}{s}$$

$$\overset{*}{Q}_2 = 193.7\frac{BTU}{lb} \times 39.1\frac{lb}{s} = 7573.67\frac{BTU}{s}$$

$$e = \frac{W_n}{Q_1 + Q_2} = 5.2\%$$

El aire entra en un motor a gas fijo a 500 ° R y 14.7 Psia, la r_p =7.95 y la temperatura real en un punto de descarga del compresor es de 1000°R, los productos de la combustión entran a la turbina a 2000 ° R y se expande hasta la presión de 14 Psia, se utiliza regeneración con 60 % de efectividad y no se consideran caídas de presión y la temperatura real de escape es 1320 ° R. Muestre todos los estados en un diagrama T-S.

1) Para el ciclo ideal Brayton determine Wneto y e
2) Hallar η_c y η_t
3) W´neto y Q'_A, e´
4) Cuál sería el e sin regeneración
5) Si la potencia es 5KHp que volumen de aire en ft^3 entra al compresor.



PARA EL CICLO IDEAL

Estado 1.

P_1= 14.7 lb / in^2 abs

T_1 = 500 ° R

Estado 2.

$$r_p * P_1 = 7.95 * 14.7 = 116.8 \frac{lb}{in^2} abs$$

$$T_2 = T_1 * r_p^{K-1/K}$$

T_2 = 500* (7.95) $^{1.4-1/1.4}$ = 904° R

Estado 3.

P_3 = P_2 = 116.8 lb / in^2 abs

T_3 = 2000° R

Estado 4.

P_4 = 14.7 lb / in^2 abs

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

T_4 = 2000° R / $7.95^{2/7}$ =1106° R

Wt = Cp ($T_3 - T_4$)

Wt = 0.24 Btu / lb (2000-1106)

Wt = 214.56 Btu / lb

Wc = Cp ($T_2 - T_1$)

Wc = 0.24 (904-500) = 96.9 Btu / lb

Q_A = Cp ($T_3 - T_2$) = 0.24 (2000-904)

Q_A = 263.04 Btu / lb

a) Wn = Wt - W c = 214.56 – 96.9 =117.67

$$e = \frac{Wn}{Q_A} = \frac{117.67}{263.04} = 0.44$$

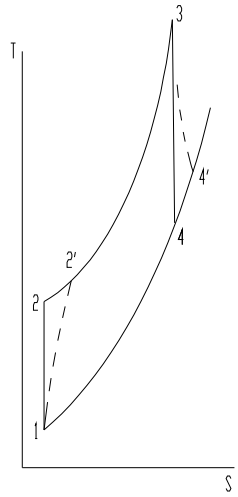
b) TENIENDO EN CUENTA η_c, η_t

T_2' = 1000° R

T_4' = 1320° R

Estado 2′

$P_2' = P_2$ = 116.8 lb / in^2 abs



Estado 4′

$P_4' = P_4$ = 14.7 lb / in^2 abs

$T_4 = 1320.°$ 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

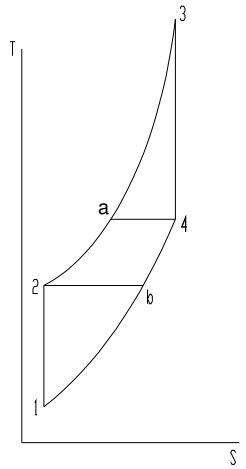
$Wt' = Cp\ (T_3 - T_4')$ = 0.24 (2000-1320) = 163.2

$W_C' = Cp\ (T_2' - T_1)$ = 0.24 (1000 -500) 120

$Wn' = Wt' - Wc'$ = 163.2 -120 = 43.2

$$e = \frac{W'n}{Q_A'} = \frac{43.2}{240} = 0.18$$

RENDIMIENTO CON GENERACION DE 100 % PARA CICLO IDEAL

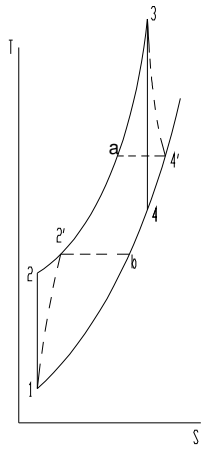


Ta = T_4 = 1106 ° R
Tb = T_2 = 904 ° R

Q_A = Cp (T_3 – Ta) = 0.24 (2000- 1106) = 214.56

$$e = \frac{Wn}{Q_A} = \frac{117.67}{214.56} = 0.548$$

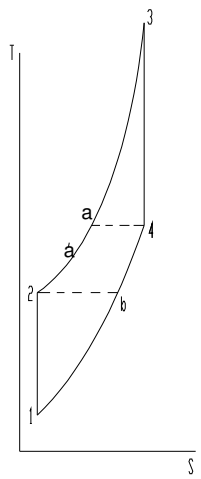
RENDIMIENTO CON GENERACION DEL 100 %, PERO CON η_c, η_t



Q_A' = Cp (T_3 – Ta)
Ta = T_4' = 1320° 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 η_c, η_t = 100%



$$\eta_r = \frac{Cp(Ta' - T_2)}{Cp(T_4 - Tb)}$$

Tb = T_2

$$\eta_r = \frac{Ta' - T2}{T4 - T2}$$

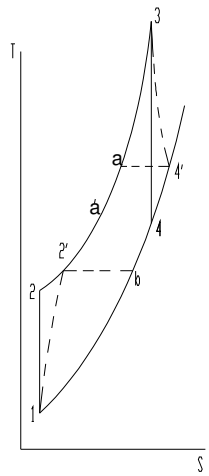
$$Ta' = T_2 + \eta_r (T_4 - T_2)$$

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° R

Q_A' = Cp (T_3 – Ta′) = 0.24 (2000 – 1192) = 193.92

Wn′ = Wt - Wc′ = 43.2

$$e' = \frac{W'n}{Q_A'} = \frac{43.2}{193.92} = 0.222$$

$$\dot{W}_n' = 5000Hp$$

$$\dot{\omega} = \frac{\dot{W}_n'}{W_n} = \frac{5000Hp}{43.2btu/lb} * \frac{1btu}{778lb.ft} * \frac{550lb.ft/s}{Hp}$$

$$\dot{\omega} = 81.83\frac{lb}{s} * \frac{60s}{1\min} = 4909\frac{lb}{\min}$$

$$P_1V_1 = \omega RT_1$$

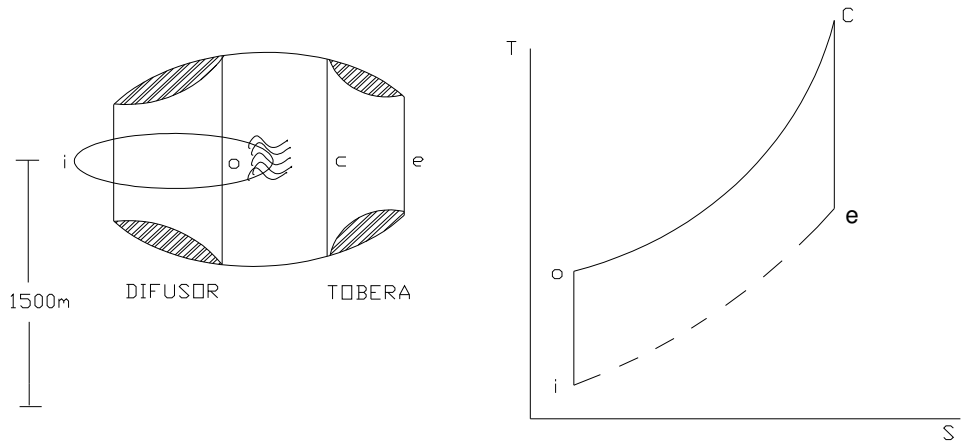
$$\dot{V}_1 = \frac{4909 lb/\min * 53.3 lb - ft/lb°R * 500°R}{14.7 lb/in^2 * 144 in^2/tf^2} = 61803 \frac{ft^3}{\min}$$

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^2 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 Kg_c/Kg_a



Estado i

Pi = 0.105 Kg / cm^2 abs

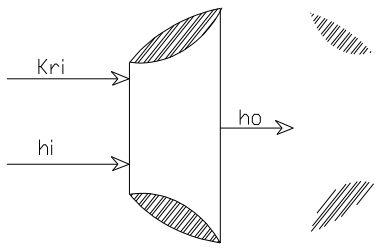
Ti = 220 ° k

Proceso i a 0

S = cte

$$T_b = T_i r_p^{k-1/k}$$

Difusor



Kri + hi = hc
hc –hi = Kri

$$C_p\left(T_o - T_i\right) = \frac{Vp^2}{2goJ}$$

$$T_o - T_i = \frac{Vp^2}{2goJCp}$$

$$T_o = T_i + \frac{Vp^2}{2goJCp}$$

Ti = 220 ° k

$$T_o = 220 + \frac{780^2 m^2 / s^2}{2 * 9.8 m/s^2 * 427 kgm/Kcal * 0.24 kcal/Kg°K}$$

To = 522.8 ° K

$$r_p = \left(\frac{To}{Ti}\right)^{k/k-1} = \left(\frac{522.8}{220}\right)^{7/2} = 20.6$$

Po = 20.6 *0.105 = 216 Kg/cm^2 abs

Estado O

Po = 2.16 Kg / cm^2 abs
To = 522.8 ° K

Estado C

Pc = Po = 2.16 Kg / cm^2 abs
$P_{c/a}$ = 0.017 Kg c / kg

Q_A = 0.017 Kg c / kg * $10280 \frac{Kcal}{Kg}$

$Q_A = 174.8 \ \frac{Kcal}{Kg}$

$Q_A = Cp\ (Tc - To)$

$$Tc = To + \frac{Q_A}{Cp}$$

$$Tc = 522.8 + \frac{174.8}{0.24} = 1251°K$$

Proceso C a e

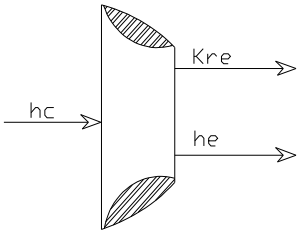
S = cte

$$Te = \frac{Tc}{rp^{k-1/k}} = \frac{1251}{20.6^{2/7}} = 527.4°K$$

Estado e

Pe = 0.105 Kg / cm^2 abs
Te = 527.4 ° K

TOBERA



hc = he + Kre

$$Kre = hc - he = \frac{Ve^2}{2goJ}$$

Ve = velocidad de escape relativa al motor

$$Ve = \sqrt{2goJ(hc - he)} = \sqrt{2goJCp(Tc - Te)}$$

$$Ve = \sqrt{2 * 9.8 m/s * 427 Kg/Kcal * 0.24 Kcal/Kg°K (1251 - 527.4°K)}$$

Ve =1205.5 m/seg

$$F = \frac{\omega}{go}\left[(1+0.017)1205.5 - 780\right] m/seg$$

F= 45.5 kg

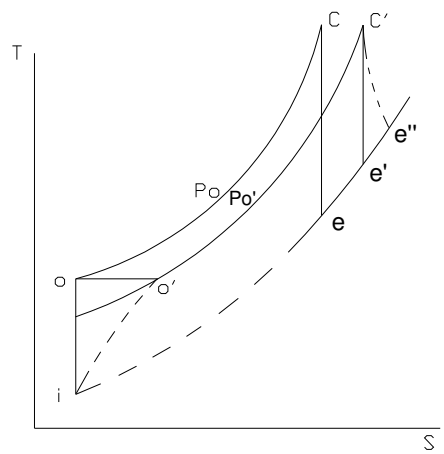
$$\eta_r = \frac{Po' - Pi}{Po - Pi}$$

$$Po' = P_i + \eta_r \left(Po - Pi\right)$$

Po′ = 0.105 +0.94 (2016 – 0.105) = 2.03 Kg / cm^2 abs

Estado O′

Po′ = 2.03 Kg / cm^2 abs
To′ = To = 522.8° c



Q_A = 174.8 Kcal / Kg
Q_A = Cp (Tc′ - To′)

$$Tc' = To' + \frac{QA}{Cp}$$

$$Tc' = 522.8 + \frac{174.8}{0.24}$$

Tc′ = 1251.1 ° R

Estado c′

Tc′ = 1251.1 ° R

$Pc' = Po' = 2.03\ Kg / cm^2\ abs$

Proceso c′ a e′

S = c te

$$Te' = \frac{1251.1}{\left(\frac{2.03}{0.15}\right)^{2/7}} = 594.3°K$$

$$\eta_t = \frac{hc' - he''}{hc' - he'} = \frac{Cp(Tc' - Tc'')}{Cp(Tc' - Te')}$$

$$Te'' = Tc' + \eta_t (Tc' - Te')$$

Te'' = 1251.1 – 0.90 (1251.1 – 594.3)

Te'' **= 659.9 ° K**

Ve″ = $\sqrt{2 * 9.8 * 127 * 0.24(1251.1 - 659.9)}$

Ve″ = 1089 m/s

$$F' = \frac{1}{9.8}\left[(1 + 0.017)1089 - 780\right] = 33.41kg$$

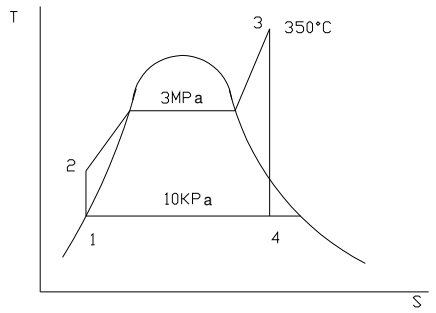
$$\dot{W} = F' * V$$

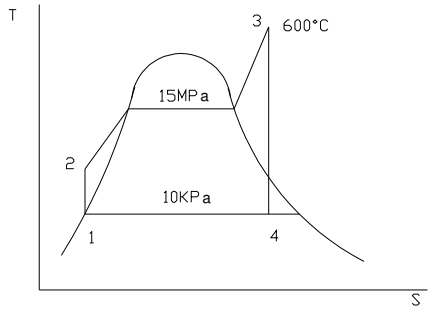
$$\dot{W} = 33.41Kg * 780m/s * \frac{1Cv}{75Kg.m/s} = 347.4Cv$$

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 Kpa
h_1 = 191.87 KJ/Kg por tabla

$V_1 = 0.00101 \ \frac{m^3}{Kg}$
P_1 = 10 Kpa

S_f = 0.6493 KJ / Kg°K
h_f = 191.89 KJ / Kg
h_{fg} = 2392.8
s_{fg} = 7.5009

Estado 2

P_2 = 3 Mpa
$S = S_1 = 0.6493$, $V_2 = V_1$

$Wp = V_1 (P_2 - P_1) = 0.00101 \ \frac{m^3}{Kg} \ [3000 - 10] KN / m^2$

Wp = 3.019 KJ / Kg

$Wp = h_2 - h_1 = V_1 (P_2 - P_1)$
$h_2 = h_1 + Wp = 191.83 + 3.019$
$h_2 = 194.85$

Estado 3

$P_3 = 3$ Mpa $\quad h_3 = 3115$ KJ / Kg
$T_3 = 350$ ° c $\quad s_3 = 6.7428$ KJ / Kg°K

Estado 4

$P_4 = 10$ KPa
$S_4 = S_f + X_4 S_{fg}$

$$X_4 = \frac{S_4 - S_f}{S_{fg}} = \frac{6.7428 - 0.6493}{7.5009} = 0.81$$

$h_4 = h_f + X_4 S_{fg}$
$h_4 = 191.83 + 0.81 + 2392.8$
$h_4 = 2129.9$ KJ / Kg

$Wt = h_3 - h_4 = 3115.3 - 194.85 = 2928.45$

$$e = \frac{Wn}{Q_A} = \frac{982.38}{2920.45} = 0.33$$

b) Estado 2

$P_2 = 15$ MPa
$S_2 = S_1$, $V_2 = V_1$
$Wp = V_1 (P_2 - P_1) = 0.00101 \frac{m^3}{Kg} (15000\text{-}10)$ KN/ m^2

$h_2 = h_1 + Wp = 191.83 + 15.13 = 206.96$

Estado 3

$P_3 = 15$ MPa

Ahora se recalienta hasta 600° c
$T_3 = 600$ ° C
$h_3 = 3682.3$ KJ / Kg
$S_3 = 6.6776$ KJ / Kg°K

Estado 4

$P_4 = 10$ KPa

$S_4 = S_3 = S_f + X_4 \; S_{fg}$

$$X_4 = \frac{6.6776 - 0.6493}{7.5009} = 0.80$$

$h_4 = 191.83 + 0.80*2392.8$

$h_4 = 2106.07$

$Wt = h_3 - h_4 = 3682.3 - 2106.07 = 1576.23$

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:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt}\int_{Vvc} \vec{v}\rho dv + \int_{Svc} \vec{v}\left(\rho * \vec{v} \bullet \hat{n}\right)dA$$

Para estado estacionario tenemos que:

$$\frac{d}{dt}\int_{Vvc} \vec{v}\rho dv = 0$$

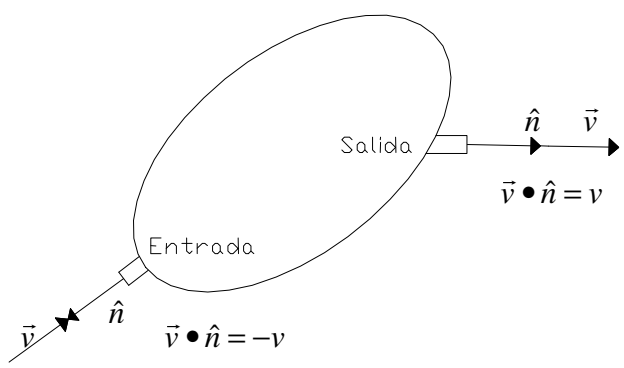
Entonces $\sum \vec{F}$ se simplifica en la siguiente ecuación:

$$\sum \vec{F} = \int_{Svc} \vec{v}\left(\rho * \vec{v} \bullet \hat{n}\right)dA = \int_{Svc} \vec{v}\, dm$$

Para una entrada y una salida tenemos que:

$$\sum \vec{F} = \int_{ent} \vec{v}\, d\dot{m} + \int_{sal} \vec{v}\, d\dot{m}$$

Teniendo en cuenta que: $d\dot{m} = \rho\vec{v} \bullet \hat{n}dA$



$\sum \vec{F} = \int_{ent} \vec{v}\, d\dot{m} + \int_{sal} \vec{v}\, d\dot{m}$ (1) a la entrada tengo:

$d\dot{m} = \rho\vec{v} \bullet \hat{n}dA = -\rho v dA$ (2) y a la salida tengo:

$d\dot{m} = \rho\vec{v} \bullet \hat{n}dA = \rho v dA$ (3)

reemplazando 2 y 3 en 1:

$$\sum \vec{F} = \int_{ent} \vec{v}\left(\rho * -vdA\right) + \int_{sal} \vec{v}\rho * vdA$$

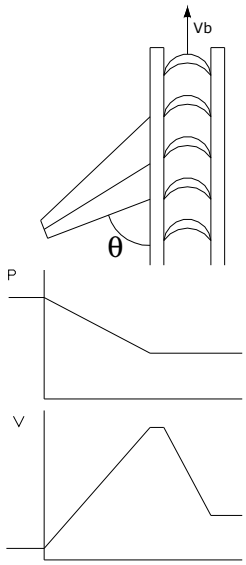
Si $\vec{v}$ es uniforme para las secciones de entrada y salida tenemos:

$$\sum \vec{F} = \vec{v}\int_{ent}\left(\rho * -vdA\right) + \vec{v}\int_{sal} \rho * vdA = \sum \vec{F} = v_{ent}(-\dot{m}) + v_{sal}(\dot{m}) = \left(v_{sal} - v_{ent}\right)\dot{m} \qquad (4)$$

De donde tenemos que la ecuación 4 es la ecuación de continuidad donde:

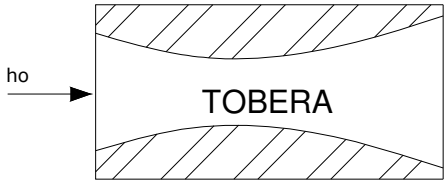
$$\dot{m} = \dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal}$$

5.1.2. Diagrama de velocidad de una turbina de acción de una etapa



Análisis de energía en la tobera

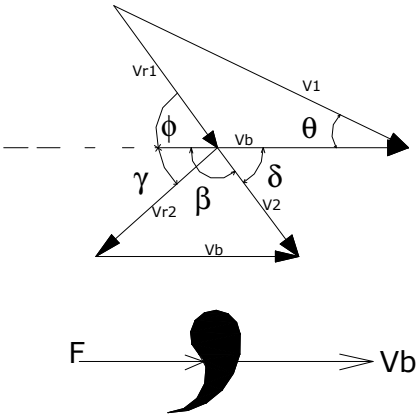
Condiciones de Estancamiento



$$h_o = h_i + k_i$$

$$k_i = \frac{v_1^2}{2g_o J}$$

$\frac{v_1^2}{2g_o J} = h_o - h_i$ 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 $\sqrt{h_0 - h_i}$ 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
θ = Angulo formado por V_b y V_1
ϕ = Angulo formado por V_b y V_{r1}
γ = Angulo formado por V_b y V_{r2}
δ = Angulo formado por V_b y V_2

$$F = \dot{m}(v1\cos\theta - v2\cos\delta)[N]$$

$$\dot{W}_b = Fv_b = [\dot{m}(v1\cos\theta - v2\cos\delta)v_b]$$

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

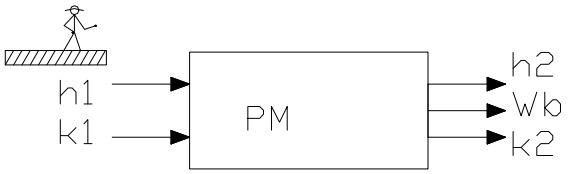
Esto se da cuando $\delta = 90$ y v_2 es perpendicular a v_b donde la potencia $\dot{W} = Fv_b$, y la velocidad de paleta es $v_b = \dot{m}(v_1 \cos\theta - v_2 \cos\delta)$ pero $v_2 \cos\delta$ es cero.

5.1.4. Rendimiento

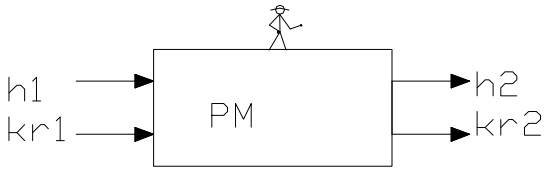
$$\eta_b = \frac{W_b}{K_1} = \frac{W_b}{v_1^2 / 2g_0 J}$$ Rendimiento de paleta

$$\eta_S = \frac{W_S}{-\Delta hs}$$ Rendimiento de etapa

5.1.5. Ecuación de Energía Para Paletas



$$k_1 + h_1 = k_2 + h_2 + W_b$$
$$W_b = (k_1 - k_2) + (h_1 - h_2)$$



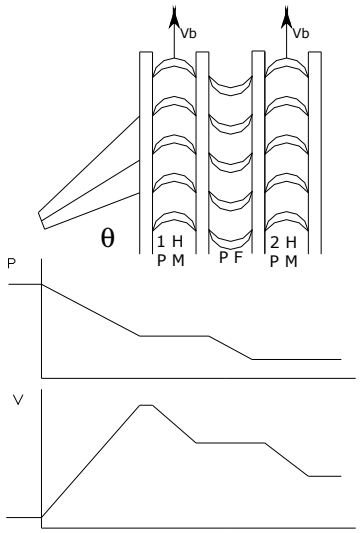
$$k_{r1} + h_1 = k_{r2} + h_2$$
$$(h_1 - h_2) = (k_{r2} - k_{r1})$$

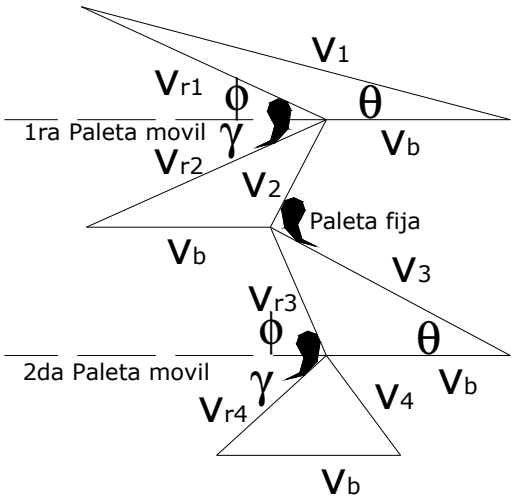
Entonces tenemos que $W_b = (k_1 - k_2) + (k_{r2} - k_{r1})$ que es igual a:

$$W_b = \frac{(v_1{}^2 - v_2{}^2) + (v_{r2}{}^2 - v_{r1}{}^2)}{2g_0}$$

5.2. ETAPA CURTIS O ETAPA DE VELOCIDAD COMPUESTA

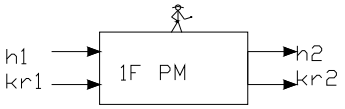
Los cálculos de la etapa Curtis están basados en el diagrama de velocidades.





Las potencias y el trabajo pueden ser hallados con base en los diagramas de energía.

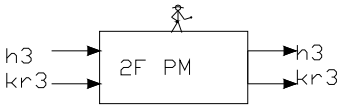
$$k_1 + h_1 = k_2 + h_2 + W_{b1}$$
$$W_{b1} = (k_1 - k_2) + (h_1 - h_2)$$



$$k_{r1} + h_1 = k_{r2} + h_2$$
$$(h_1 - h_2) = (k_{r2} - k_{r1})$$

$$k_2 + h_2 = k_3 + h_3$$
$$h_2 - h_3 = k_3 - k_2$$

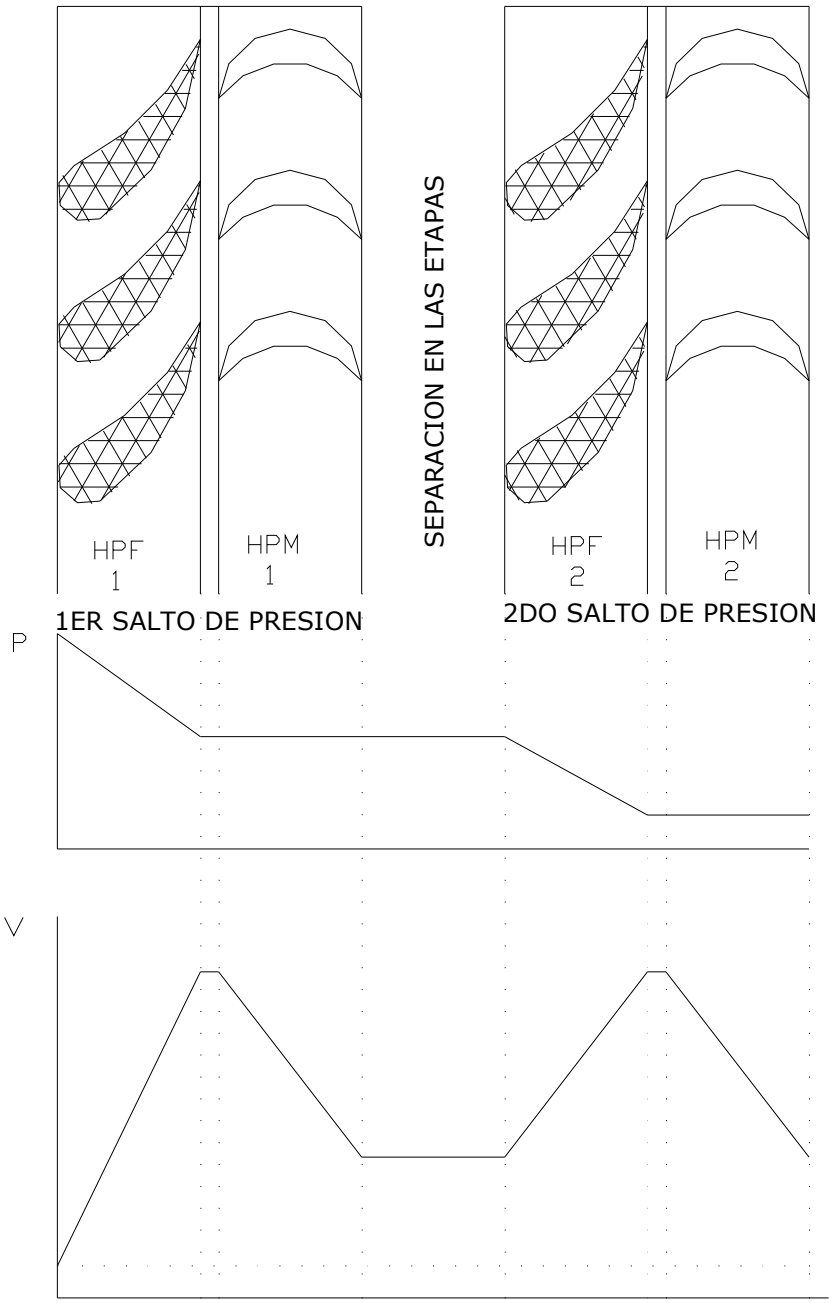
$$k_3 + h_3 = k_4 + h_4 + W_{b2}$$
$$W_{b2} = (k_3 - k_4) + (h_3 - h_4)$$



$$k_{r3} + h_3 = k_{r4} + h_4$$
$$(h_3 - h_4) = (k_{r4} - k_{r3})$$

5.3. TURBINA RATEAU

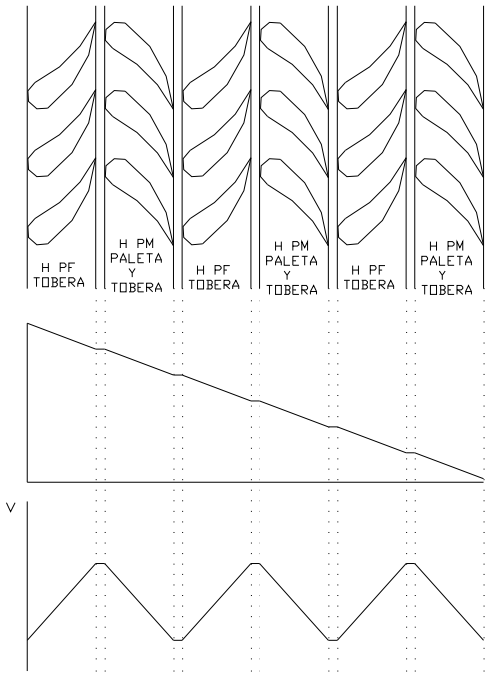
Esta turbina obtiene un Δh grande por medio de una serie de pequeñas expansiones. Hay un grupo de toberas para cada expansión y una hilera de paletas o rodetes para cada grupo.

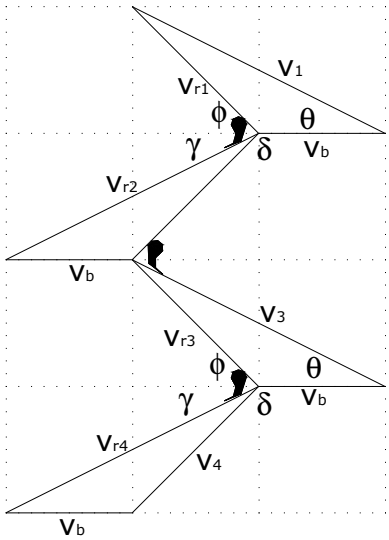


5.4. TURBINAS DE REACCIÓN

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.

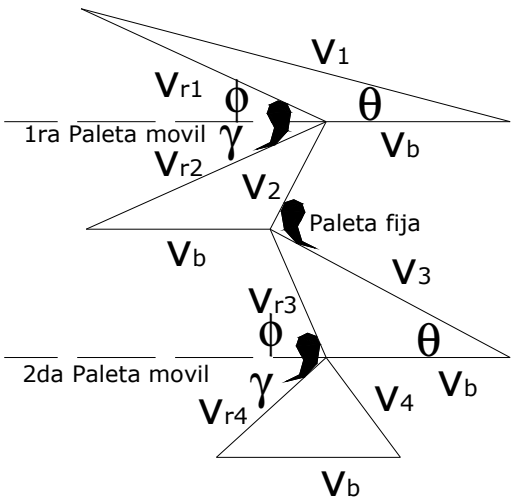
Una etapa o salto esta conformado por una hilera fija y una móvil.





Si la proporción de Δh 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:
$v_{r2} = v_1$ 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.



$$h_1 = 1000\frac{btu}{lb}$$

$$v_1 = 2400\frac{ft}{s}$$

$$v_b = 600\frac{ft}{s}$$

$$\theta 1 = \theta 2 = 20^\circ$$

$$\eta_{fm} = 0.9$$

$$\eta_{ff} = 0.93$$

$$\varpi = 10\frac{lb}{s}$$

Del primer triangulo obtengo $v_{r1} sen\phi_1 = 2400 sen 20$ y $v_{r1}\cos\phi_1 = 2400\cos 20 - 600$

$$tg\phi_1 = \frac{2400 sen 20}{2400\cos 20 - 600} \Rightarrow \phi_1 = tg^{-1}\frac{2400 sen 20}{2400\cos 20 - 600} \Rightarrow \phi_1 = 26.4^\circ$$

$$v_{r1} = \frac{2400 sen 20}{sen\phi} \Rightarrow v_{r1} = 1846.2\frac{ft}{s}$$

$$\eta_{fm} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}} \Rightarrow v_{r2} = \eta_{fm} v_{r1} = 0.9 * 1846.2\frac{ft}{s} \Rightarrow v_{r2} = 1716\frac{ft}{s}$$ También se tiene que $\phi = \gamma$

$$v_2 sen\beta = 763.4\frac{ft}{s}$$

$$v2\cos\beta = (1537.8 - 600)\frac{ft}{s}$$

$$tg\beta = \frac{763.4\frac{ft}{s}}{1537.8 - 600\frac{ft}{s}} \Rightarrow \beta = tg^{-1} = \frac{763.4\frac{ft}{s}}{1537.8 - 600\frac{ft}{s}} \Rightarrow \beta = 39.14^\circ$$

$$v2 = \frac{(1537.8 - 600)\frac{ft}{s}}{\cos 39.14^\circ} \Rightarrow v2 = 1209.4\frac{ft}{s}$$

$$\eta_{ff} = \frac{v_3}{v_2} \Rightarrow v_2 = \eta_{ff} v_2 = 0.93 * 1209.4 \frac{ft}{s} \Rightarrow v_3 = 1088.6 \frac{ft}{s}$$

Del tercer triangulo obtengo $v_{r3} sen\phi_2 = 1088.43 sen 20$ y $v_{r3} \cos\phi_2 = 1088.46 \cos 20 - 600$

$$tg\phi_2 = \frac{1088.46 sen 20}{1088.46 \cos 20 - 600} \Rightarrow \phi_2 = tg^{-1} \frac{1088.16 sen 20}{1088.46 \cos 20 - 600} \Rightarrow \phi_2 = 41.36^\circ \Rightarrow \gamma_2 = \phi_2 = 41.36^\circ$$

$$v_{r3} = \frac{1088.46 sen 20}{sen 41.36} \Rightarrow v_{r3} = 563.3 \frac{ft}{s}$$

$$v_4 sen\delta_2 = 346.16$$

$$v_4 \cos\delta_2 = 600 - 393.19$$

$$tg\delta_2 = \frac{346.16}{600 - 393.19} \Rightarrow \delta_2 = 59.14^\circ$$

$$v_4 = \frac{346.16}{sen 59.14^\circ} \quad = 403.25 \frac{ft}{s}; v_{r4} = \eta_{fm} * v_{r3} = 0.9 * 563.3 \Rightarrow \quad ; v_{r4} = 523.86 \frac{ft}{s}$$

La fuerza ejercida sobre la primera hilera de paletas es $F_{b1} = \frac{\dot{\omega}}{g_o} (v_1 \cos\theta - v_2 \cos\delta_1)$

$$F_{b1} = \frac{10 \frac{lb}{s}}{32.2 \frac{ft}{s^2}} (2400 \cos 20 - v 1209.4 \cos 140.86) \frac{ft}{s} \Rightarrow F_{b1} = 991.7 lb$$

PRIMERA HILERA DE PALETAS MÓVILES:

La potencia en la paleta es: $\dot{W}_{b1} = F_{b1} * v_{b1} \Rightarrow \dot{W}_{b1} = 991.7 lb * 600 \frac{ft}{s} * \frac{1 hp}{550 \frac{lb \cdot ft}{s}} = 1081.8 hp$

<u>Ecuaciones De Energía:</u>

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:

$$W_{b1} = \frac{(v_1^2 - v_2^2) + (v_{r2}^2 - v_{r1}^2)}{2 g_0} = \frac{(2400^2 - 12094^2) + (1716.9^2 - 1846^2)}{2 * 32.2 \frac{ft}{s^2} *} \frac{ft^2}{s^2} * 10 \frac{lb}{s} = 595752 \frac{lb \cdot ft}{s}$$

$\dot{W}_{b1} = 595752 \frac{lb \cdot ft}{s} * \frac{1 hp}{550 \frac{lb \cdot ft}{s}} = 1083 hp$ se puede hallar la entalpía h_2 de la siguiente manera:

$(h_1 - h_2) = (k_{r2} - k_{r1}) = \frac{(v_{r2}^2 - v_{r1}^2)}{2 g_0 J} \Rightarrow h_2 = h_1 - \frac{(v_{r2}^2 - v_{r1}^2)}{2 g_0 J}$ reemplazando en esta ecuación tenemos que:

$$h_2 = 1000\frac{btu}{lb} - \frac{\left(1716.9^2 - 1846.2^2\right)\frac{ft^2}{s^2}}{2*32.2\frac{ft}{s^2}*778\frac{lb\cdot ft}{btu}} \Rightarrow h_2 = 1009.18\frac{btu}{lb} \triangleleft$$

El rendimiento de paleta es: $\eta_{b1} = \frac{W_{b1}}{\frac{v1^2}{2g_o}} \Rightarrow \eta_{b1} = \frac{59575.2\,ft}{\frac{2400^2\,\frac{ft^2}{s^2}}{2*32.2\frac{ft}{s}}} = 0.66 \Rightarrow \eta_{b1} = 66\%$

HILERA DE PALETAS FIJAS

$$k_2 + h_2 = k_3 + h_3 \Rightarrow h_3 = h_2 + k_2 - k_3 = h_2 + \frac{\left(v_2{}^2 - v_3{}^2\right)}{2g_0 J}$$

$$h_3 = 1009.18\frac{btu}{lb} + \frac{\left(1209.4^2 - 1088.46^2\right)\frac{ft^2}{s^2}}{2*32.2\frac{ft}{s^2}*778\frac{lb\cdot ft}{btu}} \Rightarrow h_3 = 1014.72\frac{btu}{lb} \triangleleft$$

SEGUNDA HILERA DE PALETAS MÓVILES

$F_{b2} = \frac{\dot{\omega}}{g_o}\left(v_3\cos\theta - v_4\cos\delta_2\right)$ reemplazando valores ene esta ecuación obtenemos:

$$F_{b2} = \frac{10\frac{lb}{s}}{32.3\frac{ft}{s^2}}\left(1088.46\cos 20 - 403.25\cos 59.14\right)\frac{ft}{s} \Rightarrow F_{b2} = 253.4lb$$

$$\dot{W}_{b2} = F_{b2} * v_b \Rightarrow \dot{W}_{b2} = 253.4lb*600\frac{ft}{s}*\frac{1hp}{550\frac{lb\cdot ft}{s}} = 276.46hp$$

<u>Ecuaciones De Energía:</u>

El trabajo producido es: $W_{b2} = \left(k_3 - k_4\right) + \left(h_3 - h_4\right) = \left(k_{r4} - k_{r3}\right) + \left(k_3 - k_4\right)$ lo que se traduce en:

$$W_{b2} = \frac{\left(v_3{}^2 - v_4{}^2\right) + \left(v_{r4}{}^2 - v_{r3}{}^2\right)}{2g_0} = \frac{\left(1088.46^2 - 403.46^2\right) + \left(523.86^2 - 563.3^2\right)\frac{ft^2}{s^2}}{2*32.2\frac{ft}{s^2}*}*10\frac{lb}{s} = 15115.85\frac{lb\cdot ft}{s}$$

$\dot{W}_{b2} = 151158.5\frac{lb \cdot ft}{s} * \frac{1hp}{550\frac{lb \cdot ft}{s}} = 274.86hp$ Se puede hallar la entalpía h_4 de la siguiente manera: $(h_3 - h_4) = (k_{r4} - k_{r3}) = \frac{\left(v_{r4}{}^2 - v_{r3}{}^2\right)}{2g_0 J} \Rightarrow h_{r4} = h_{r3} - \frac{\left(v_{r4}{}^2 - v_{r3}{}^2\right)}{2g_0 J}$ reemplazando en

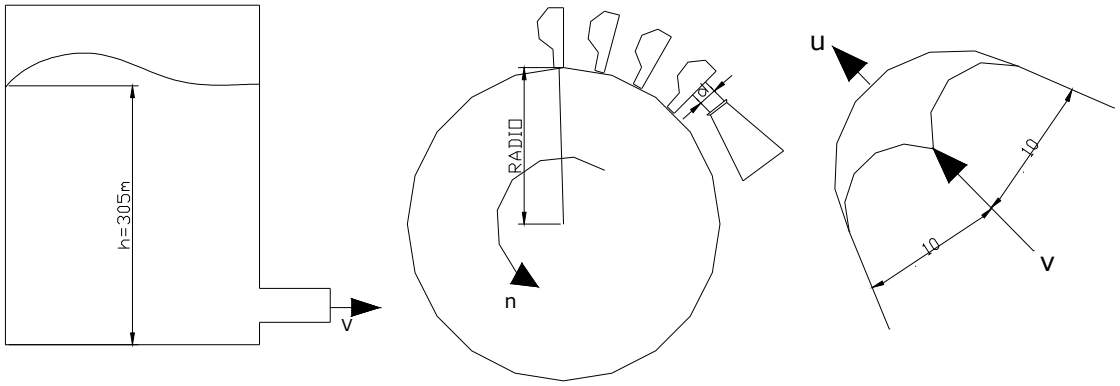
$$h_4 = 1014.72\frac{btu}{lb} - \frac{\left(563.3^2 - 523.86^2\right)\frac{ft^2}{s^2}}{2*32.2\frac{ft}{s^2}*778\frac{lb \cdot ft}{btu}} \Rightarrow h_4 = 1015.57\frac{btu}{lb} \triangleleft$$

El rendimiento de paleta es: $\eta_{b2} = \frac{W_{b2}}{\frac{v_3{}^2}{2g_o}} \Rightarrow \eta_{b1} = \frac{15115.8ft}{\frac{1088.46^2\frac{ft^2}{s^2}}{2*32.2\frac{ft}{s}}} = 0.82 \Rightarrow \eta_{b2} = 82\%$

El trabajo total de paleta es:

$$\dot{W}_b = \dot{W}_{b1} + \dot{W}_{b2} \Rightarrow \dot{W}_b = 1083.18hp + 276.46hp \Rightarrow \dot{W}_b = 1369.54hp$$

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.

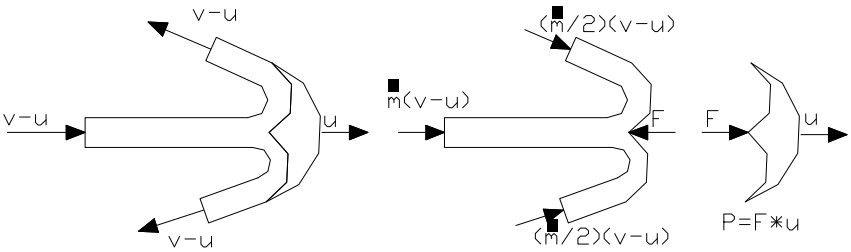


$$u = \frac{\omega D}{2} = \frac{\pi n D}{60}$$

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2*9.81*305}\,\frac{m}{s} = 77.3\frac{m}{s} = velocidad\ \ del\ chorro$$

$$u = 0.48v \quad ; u = 0.47*77.3 = 36.3 = velocidad \quad de \quad paleta$$

$$D = \frac{60u}{\pi n} = \frac{60*36.3}{\pi 270} = 2.56m$$



$A = \frac{\pi d^2}{4}$ Pero también tenemos que $Q = Av$ y $\dot{m} = \rho Q = \rho AV$ de esto tenemos:

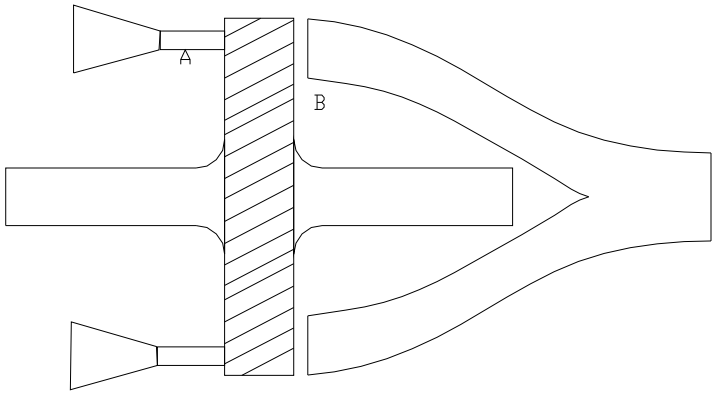
$$F = \dot{m}(v-u) + \frac{\dot{m}}{2}(v-u)\cos 10 + \frac{\dot{m}}{2}(v-u)\cos 10 = \dot{m}(v-u) + \dot{m}(v-u)\cos 10 = \dot{m}(v-u)(1+\cos 10)$$

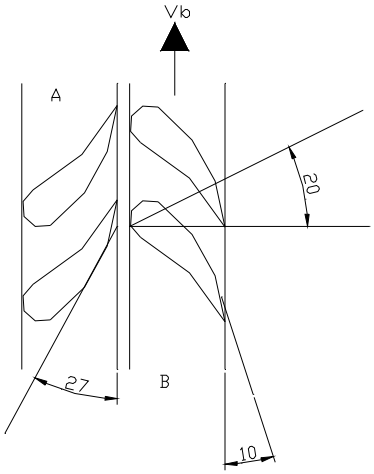
$P = F * u = \dot{m}(v-u)(1+\cos 10)u \Rightarrow P_{util} = 22000Kw$ Y si P es el 85 y el 90% tenemos que $P = \frac{P_{util}}{0.85*0.9} = \frac{22000Kw}{0.85*0.9} = 28758Kw = \dot{m}u(v-u)(1+\cos 10)$ Si v=77.3, u=36.3 y $\dot{m} = \rho Q = \rho AV$ tenemos que $P = \rho AVu(v-u)(1+\cos 10)$ despejamos el área y reemplazamos valores:

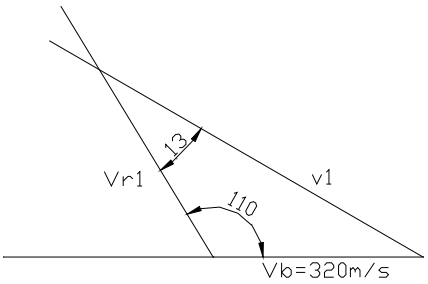
$$A = \frac{P}{\rho Vu(v-u)(1+\cos 10)} = \frac{28758x10^3 \frac{Nm}{s}}{1000\frac{kg}{m^3} * 77.3\frac{m}{s} * 36.3\frac{m}{s}(77.3+36.3)\frac{m}{s}} \Rightarrow A = 0.126m^2$$

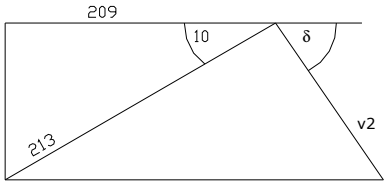
$A = \frac{\pi d^2}{4}$ Despejamos d de esta ecuación para obtener: $d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \Rightarrow d = 0.4 \triangleleft$

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° 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 m/s a un radio de 38cm. Si el flujo de gas rebosa las paletas es de 13.6 kg/s. Determine la potencia útil teórica de la turbina.









$$\frac{v_b}{sen13} = \frac{v_1}{sen110} = \frac{v_{r1}}{sen27}$$

$$v_1 = 320\frac{sen110}{sen43} = 440\frac{m}{s}$$

$$v_{r1} = 320\frac{sen27}{sen43} = 213\frac{m}{s}$$

$$v_2 \cos\delta = 320 - 209.7 = 36.9$$

$$tg\delta = \frac{36.9}{320 - 209.7} = 18.5$$

$$v_2 = \frac{36.9}{sen18.5} = 113.9\frac{m}{s}$$

$$F = \dot{m}(v_1\cos\theta - v_2\cos\delta_1) = 13.6\frac{kg}{s}(440\cos 27 - 113.9\cos 18.5)\frac{m}{s} \Rightarrow F = 3872N$$

$$P = F * vb = 3872N * 320\frac{m}{s} \Rightarrow P = 1236Kw \triangleleft$$

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 YTECNOLOGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECANICA
2005