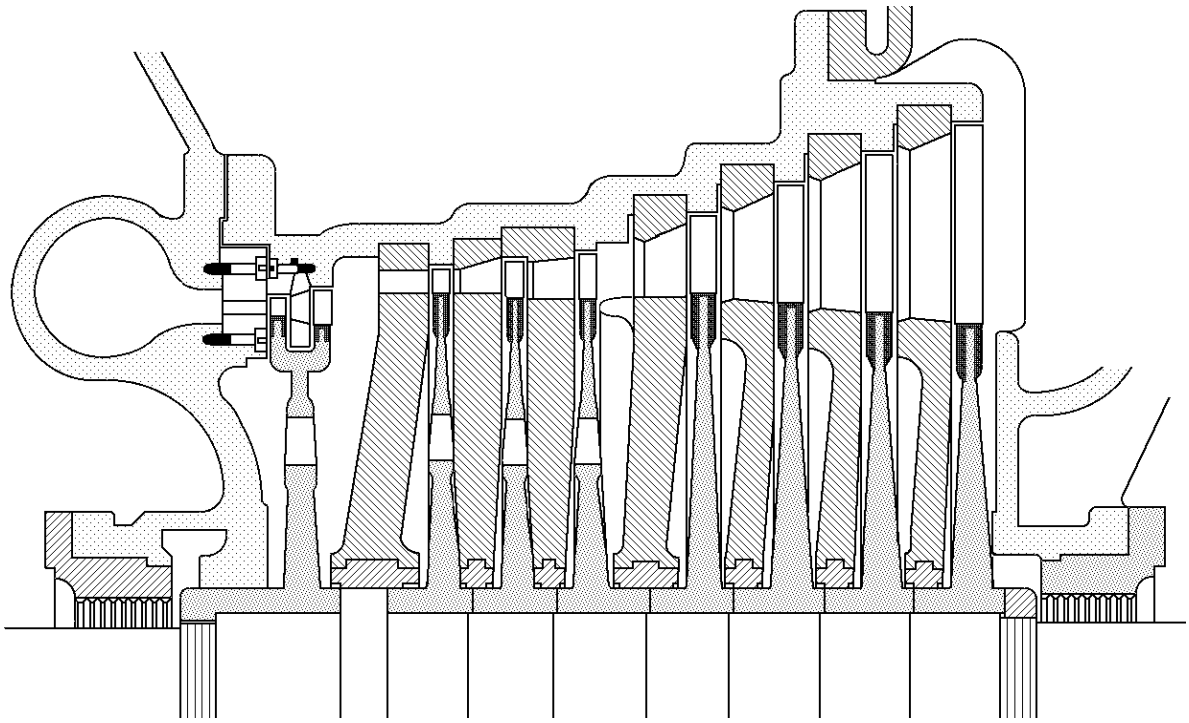
PROBLEMAS

DE

TURBINAS DE VAPOR

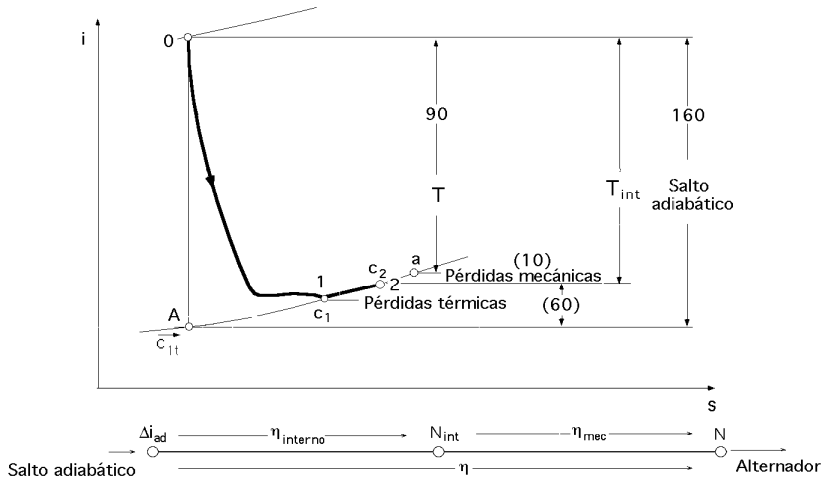


Pedro Fernández Díez

pfernandezdiez.es

1.- Una turbina de 2500 CV de potencia, funciona con un salto adiabático de 160 Kcal/kg, siendo el conjunto de las pérdidas térmicas de 60 Kcal/kg, y el rendimiento mecánico del 0,9.
Determinar el consumo de vapor por hora y por CV/hora.

RESOLUCIÓN



$\Delta i_{int} = T_{int} = \Delta i_{ad}$ - Pérdidas térmicas $= 160 - 60 = 100$ Kcal/kg

$T = T_{ind}\eta_{mec} = 100 \times 0{,}9 = 90$ Kcal/kg $\Rightarrow$ Pérdidas mecánicas $= 100 - 90 = 10$ Kcal/kg

Consumo de vapor por hora G_{hora}

Como: $1\ \frac{CV}{hora} = 75\ \frac{Kgm}{seg} \times 3600\ \frac{seg}{hora} \times \frac{1}{427}\ \frac{Kcal}{Kgm} = 632{,}3\ \frac{Kcal}{hora}$

$$G_{hora}\,T = 632{,}3\,N \quad \Rightarrow \quad G_{hora} = \frac{632{,}3\,N}{T} = \frac{632{,}3 \times 2500}{90}\ \frac{(Kcal/hora)\,CV}{Kcal/kg} = 17.555{,}5\ \frac{kg}{hora}$$

$$\text{ó también: } G_{hora} = \frac{632{,}3\,N}{\eta\,\Delta i_{ad}} = \frac{632{,}3\,N}{T} = \left| \begin{array}{c} N \text{ en (CV)} \\ \Delta i \text{ en Kcal/kg} \end{array} \right| = \frac{632{,}3 \times 2500}{90} = 17555{,}5\ \frac{kg}{hora}$$

Consumo de vapor por CV/hora: $G_{CV/hora} = \frac{G}{T} = \frac{632{,}3}{90}\ \frac{Kcal/hora}{Kcal/kg} = 7{,}02\ \frac{kg}{hora}$

****

2.- El consumo horario de una industria química es de 18000 kg de vapor a la presión de 15 kg/cm², y tiene una instalación que lo produce a 20 kg/cm² y 400ºC. Entre la estación generadora de vapor y los aparatos de utilización, se instala una turbina de contrapresión que tiene un rendimiento interno del 0,7 y un rendimiento mecánico del 0,95.
Determinar la potencia máxima que puede dar la turbina

RESOLUCIÓN

Punto 0: $(20\ kg/cm^2;\ 400ºC) \Rightarrow \begin{cases} v_0 = 151{,}1\ dm^3/kg \\ i_0 = 3248\ kJ/kg \\ s_0 = 7{,}126\ kJ/kgºC \end{cases}$

Punto A: $(15\ kg/cm^2;\ s_A = 7{,}126\ \frac{kJ}{kgºC}) \Rightarrow \begin{cases} v_A = 186{,}5\ dm^3/kg \\ i_A = 3148\ kJ/kg \end{cases}$

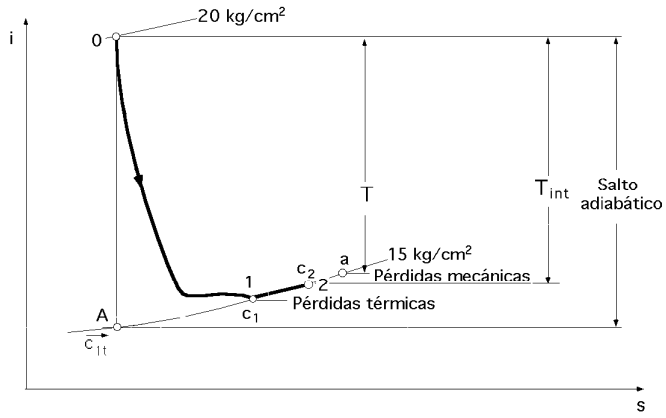
Salto adiabático: $\Delta i_{ad} = i_0 - i_A = 3248 - 3148 = 100$ kJ/kg

Salto interno: $T_{int} = \Delta i_{ad}\eta_{int} = 100 \times 0{,}7 = 70$ kJ/kg

Salto al freno o trabajo al freno: $T = T_{int}\eta_{mec} = 70 \times 0{,}95 = 66{,}6$ kJ/kg $= 15{,}88$ Kcal/kg

Consumo de vapor por CV/hora: $G_{CV/hora} = \dfrac{G}{T} = \dfrac{632,3}{15,88}\ \dfrac{Kcal/hora}{Kcal/kg} = 39,78\ \dfrac{kg}{hora}$

Consumo total = $G_{CV/hora}$ $N = 18.000\ \dfrac{kg}{hora} \quad \Rightarrow \quad N = \dfrac{18.000}{39,78} = 452,45$ CV

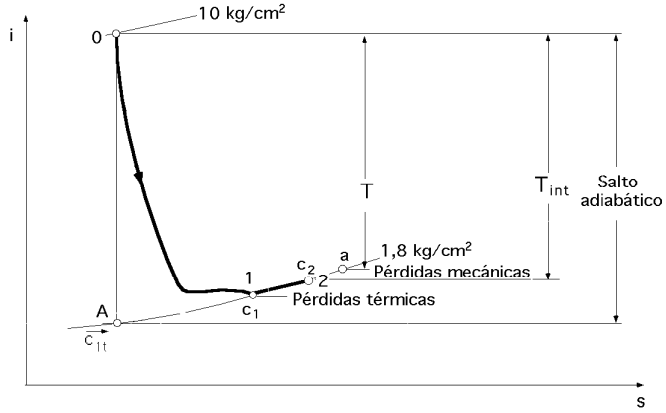


****

3.- En una turbina de vapor de un solo escalonamiento, el estado inicial del vapor (0) viene dado por p_0 = 10 kg/cm² y volumen específico v_0 = 0,32 m³/kg, y el estado final (2) viene dado por p_2 = 1,8 kg/cm² y volumen específico v_2 = 1,4 m³/Kg. El estado final adiabático teórico (A) viene dado por una presión de 1,80 kg/cm² y un volumen específico v = 1,2 m³/kg. El rendimiento mecánico es 0,90 y el coeficiente adiabático del vapor 1,30. Determinar: a) El rendimiento interno de la máquina ; b) El consumo por CV/hora

---

RESOLUCIÓN



a) El rendimiento interno de la máquina es

$$\Delta i_{ad} = i_0 - i_A = \frac{\gamma}{\gamma - 1}\ (p_0 v_0 - p_A v_A) = \frac{1,3}{1,3 - 1}\ \{(10 \times 0,32) - (1,8 \times 1,2)\}\ \frac{10^4}{427} = 105,5\ \frac{Kcal}{kg}$$

$$T_{int} = i_0 - i_2 = \frac{\gamma}{\gamma - 1}\ (p_0 v_0 - p_2 v_2) = \frac{1,3}{1,3 - 1}\ \{(10 \times 0,32) - (1,8 \times 1,4)\}\ \frac{10^4}{427} = 69\ \frac{Kcal}{kg}$$

$$\text{Rendimiento interno} = \eta_{int} = \frac{\text{Salto interno}}{\text{Salto adiabático}} = \frac{69}{105,5} = 0,6541 = 65,41\ \%$$

b) Consumo por CV/hora

$$G_{CV/hora} = \frac{G}{T} = \left| \ T = \eta_{mec}\, T_{int} = 0,9 \times 69\ Kcal/kg = 62,1\ Kcal/kg \ \right| = \frac{632,3}{62,1}\ \frac{Kcal/hora}{Kcal/kg} = 10,18\ \frac{kg}{hora}$$

****

4.- Una turbina de acción de un solo escalonamiento tiene un rendimiento interno máximo y un rendimiento mecánico de 0,90; se conocen los siguientes datos, $\beta_2 = \beta_1$; $\alpha_1 = 22^o$

Coeficiente de pérdidas en la tobera: $\varphi = 0,95$ *; en la corona:* $\psi = 0,90$

Diámetro de la turbina, 2,225 m; Nº de revoluciones por minuto: n = 3000

Determinar:

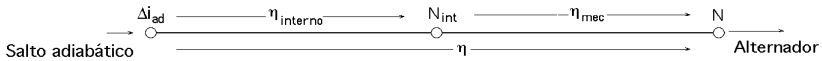
a) Valor de β_1 *y* α_2

b) El consumo por CV/hora

c) El consumo interno por CV/hora

d) El consumo teórico por CV/hora

RESOLUCIÓN



Condición de rendimiento máximo: $\eta_{int.(máx)} = (1 + \psi)\ \dfrac{\varphi^2 \cos^2 \alpha_1}{2} = (1 + 0,9)\ \dfrac{0,95^2 \text{ x } \cos^2 22^o}{2} = 0,737 = 73,7\%$

TRIÁNGULOS DE VELOCIDADES

Entrada:

$$u = \frac{D\,\pi\,n}{60} = \frac{2,225\ \pi \text{ x } 3000}{60} = 349,5\ \frac{m}{seg} < 400\ \frac{m}{seg}$$

$$c_1 = \frac{2\,u}{\cos \alpha_1} = \frac{2 \text{ x } 349,5}{\cos 22^o} = 753,9\ \frac{m}{seg}$$

$$w_1 = \sqrt{u^2 + c_1^2 - 2\,c_1 u \cos \alpha_1} = \sqrt{349,5^2 + 753,9^2 - (2 \text{ x } 753,9 \text{ x } 349,5 \cos 22^o)} = 449,33 \text{ m/seg}$$

$$\text{sen } \beta_1 = \frac{c_{1m}}{w_1} = \frac{753,9 \text{ sen } 22^o}{449,33} = 0,6285 \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 38,9^o$$

Salida: $\beta_2 = \beta_1 = 38,9^o$

$$w_2 = \psi\ w_1 = \left| \beta_1 + \beta_2 = 79,8^o \quad \Rightarrow \quad \psi = 0,9 \right| = 0,9 \text{ x } 449,33 = 404,4 \text{ m/seg}$$

$$c_2 = \sqrt{u^2 + w_2^2 - 2\,w_2 u \cos \beta_2} = \sqrt{349,5^2 + 404,4^2 - (2 \text{ x } 349,4 \text{ x } 404,4 \cos 38,9^o)} = 256,44 \text{ m/seg}$$

$$\text{sen } \alpha_2 = \frac{w_2 \text{ sen } \beta_2}{c_2} = \frac{404,4 \text{ sen } 38,9^o}{256,44} = 0,99 \quad \Rightarrow \quad \alpha_2 = 82^o$$

próximos a los 90º que exige el rendimiento máximo

b) Consumo por CV/hora

$$G_{CV/hora} = \frac{G}{T} = \left| \begin{array}{l} c_1 = 91,48\ \varphi_1 \sqrt{\Delta i_{ad}} \quad ; \quad \Delta i_{ad} = \left(\dfrac{753,9}{91,48 \text{ x } 0,95}\right)^2 = 75,12\ \dfrac{Kcal}{kg} \\ T = \Delta i_{ad}\ \eta = \Delta i_{ad}\ \eta_{int}\ \eta_{mec} = 75,12 \text{ x } 0,737 \text{ x } 0,9 = 49,83 \text{ Kcal/kg} \end{array} \right| = \frac{632,3}{49,83}\ \frac{Kcal/hora}{Kcal/kg} = 12,69\ \frac{kg}{hora}$$

c) Consumo interno por CV/hora

$$G_{interno\ (CV/hora)} = \frac{G}{T_{int}} = \left| T_{int} = \Delta i_{ad}\ \eta_{int} = 75,12 \text{ x } 0,737 = 55,36 \text{ Kcal/kg} \right| = \frac{632,3}{55,36}\ \frac{Kcal/hora}{Kcal/kg} = 11,42\ \frac{kg}{hora}$$

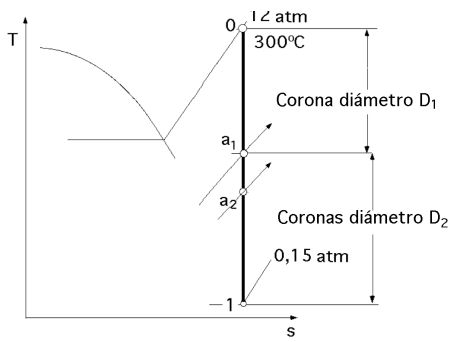
d) Consumo teórico por CV/hora: $G_{teórico\ (CV/hora)} = \dfrac{G}{\Delta i_{ad}} = \dfrac{632,3}{75,12}\ \dfrac{Kcal/hora}{Kcal/kg} = 8,41\ \dfrac{kg}{hora}$

****

5.- Una turbina de vapor de acción admite escalonamientos de vapor a 12 kg/cm² y temperatura de 300ºC, siendo la presión final de 0,15 kg/cm².

Se sabe que el primero de ellos de diámetro D_1 *tiene una relación cinemática 0,2, y una velocidad tangencial de 150 m/seg. Los rodetes de los escalonamientos restantes tienen el mismo diámetro* $D_2 = 1,2\ D_1$ *, y relación*

cinemática 0,4. Determinar el número de escalonamientos de la turbina



RESOLUCIÓN

En Tablas de vapor de agua

$$\begin{cases} v_0 = 213{,}9\ dm^3/kg \ ; \ i_0 = 3047\ kJ/kg \ ; \ s_0 = 7{,}033\ kJ/kg^oC \\ s_0 = s_1 = 7{,}033\ kJ/kg^oC \end{cases}$$

$$s_1 = s_{1'} + x_1\ (s_{1''} - s_{1'}) \quad \Rightarrow \quad x_1 = \frac{s_1 - s_{1'}}{s_{1''} - s_{1'}} = \frac{7{,}033 - 0{,}755}{8{,}007 - 0{,}755} = 0{,}87$$

$$i_1 = i_{1'} + x_1\ (i_{1''} - i_{1'}) = 226 + 0{,}87\ (2598{,}5 - 226) = 2280\ kJ/kg$$

Salto adiabático teórico:

$$\Delta I_{ad.teór} = i_0 - i_1 = 3047 - 2280 = 767\ kJ/kg$$

que se descompone en dos, uno para la corona de diámetro D_1 y otro, el resto, para las coronas de diámetro D_2, en la forma:

$$i_0 - i_1 = (i_0 - i_{a1}) + Z\ (i_{a1} - i_{a2})$$

siendo Z el nº de escalonamientos de presión de diámetros iguales D_2.

Primer escalonamiento (Acción), $\xi_1 = 0{,}2 = \dfrac{u_1}{c_1}$

$$c_1 = \frac{u_1}{\xi_1} = \frac{150\ m/seg}{0{,}2} = 750\ m/seg = 91{,}48\ \sqrt{\Delta i_{0\text{-}a_1}} \quad \Rightarrow \quad \Delta i_{0\text{-}a_1} = \left(\frac{750}{91{,}48}\right)^2 = 67{,}21\ \frac{Kcal}{kg} = 281{,}36\ \frac{kJ}{kg}$$

$$\text{Salto restante} = 767 - 281{,}36 = 485{,}64\ \frac{kJ}{kg} = Z\ (i_{a_1} - i_{a_2})$$

Velocidad periférica de los rodetes de diámetro D_2 ,

$$\begin{cases} u_1 = \dfrac{D_1}{2}\ \dfrac{\pi n}{30} \\ u_{1(a_1 - a_2)} = \dfrac{D_2}{2}\ \dfrac{\pi n}{30} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad u_{1(a_1 - a_2)} = u_1\ \frac{D_2}{D_1} = 150 \times 1{,}2 = 180\ m/seg$$

Para, $\xi_{1(a_1 - a_2)} = \xi_2 = 0{,}4 \quad \Rightarrow \quad c_{1(a_1 - a_2)} = \dfrac{u_{1(a_1 - a_2)}}{\xi_{1(a_1 - a_2)}} = \dfrac{180}{0{,}4} = 450\ m/seg = 91{,}48\ \sqrt{\Delta i_{(a_1 - a_2)}}$

$$\Delta i_{(a_1 - a_2)} = \left(\frac{450}{91{,}48}\right)^2 = 24{,}19\ \frac{Kcal}{kg} = 101{,}3\ \frac{kJ}{kg}$$

$$Z = \frac{485{,}64}{101{,}3} = 4{,}79 \quad (5\ \text{escalones})$$

Nº total de escalonamientos: 1 de la parte de ACCIÓN + 5 del RESTO IGUALES = 6

****

6.- En una turbina de vapor de agua, la entalpía inicial es de 768 Kcal/kg y la entalpía final es de 570 Kcal/kg, la cual gira a 3500 revoluciones por minuto. La turbina tiene 5 escalonamientos de presión, de los cuales, el primero lleva un doble escalonamiento de velocidad. La relación entre el diámetro del primer escalonamiento y los restantes escalonamientos es 0,85, siendo las relaciones cinemáticas de máximo rendimiento las siguientes:

ξ_1 = 1/9 para dos escalonamientos de velocidad (Curtis)

ξ_2 = 1/5 para cualquiera de los escalonamientos de velocidad restantes

Determinar los diámetros medios de los escalonamientos de esta turbina

RESOLUCIÓN

$$\left\{ u_1 = \frac{D_1}{2}\ \frac{\pi n}{30} \ ; \ u_{1^*} = \frac{D_{1^*}}{2}\ \frac{\pi n}{30} \right\} \quad \Rightarrow \quad u_1 = u_{1^*}\ \frac{D_1}{D_{1^*}} = 0{,}85\ u_{1^*}$$

Salto adiabático: $\Delta I = 768 - 570 = 198$ Kcal/kg =

= (Salto primer escalón con doble escalonamiento de velocidad) + (4 escalones de presión de ACCIÓN)

$$\Delta I = (i_1 - i_a) + 4\,\Delta i = \frac{c_1^2}{2\,g} + 4\,\frac{c_{1*}^2}{2\,g} = \left| c_1 = \frac{u_1}{x_1}\ ;\ c_{1*} = \frac{u_{1*}}{x_2} \right| = \left(\frac{u_1}{91{,}48\,x_1}\right)^2 + 4\left(\frac{u_{1*}}{91{,}48\,x_2}\right)^2 =$$

$$= \left(\frac{0{,}85\,u_{1*}}{91{,}48\,\frac{1}{9}}\right)^2 + 4\left(\frac{u_{1*}}{91{,}48\,\frac{1}{5}}\right)^2 = 0{,}0189\,u_{1*}^2 = 198\ \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \quad \Rightarrow \quad u_{1*} = 102{,}35\ \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

$$D_1^* = \frac{60\,u_{1*}}{\pi\,n} = \frac{60 \times 102{,}35}{3500\,\pi} = 0{,}5585\ \text{m} \quad ; \quad D_1 = 0{,}5585 \times 0{,}85 = 0{,}4747\ \text{m}$$

****

7) De una turbina de vapor de acción de álabes simétricos, que gira a 4.500 rpm, y funciona con una relación cinemática de máximo rendimiento, se conocen los siguientes datos:
Salto isentrópico en el distribuidor, 180 kJ/kg
Ángulo de salida del distribuidor: 18º; $\varphi = 0{,}97$
Condiciones del vapor a la entrada de la tobera: 35 bars ; 410ºC; Consumo de vapor: 16 kg/seg
Determinar:

a) Triángulos de velocidades. ¿Sería necesario un nuevo escalonamiento de velocidad?

b) Potencia y rendimiento interno, máximos

c) Altura de los álabes de la corona para una inyección de vapor total, siendo el volumen específico del vapor a la salida de la tobera, $v_1 = 0{,}086\ m^3/kg$

d) Altura de los álabes de la corona para una inyección de vapor parcial de 30º, siendo, $v_1 = 0{,}086\ m^3/kg$

e) Velocidad de embalamiento

RESOLUCIÓN

a) Triángulo de velocidades a la entrada

$$c_{1t} = 91{,}48\ \sqrt{\Delta i_{ad}} = 91{,}48\ \sqrt{\frac{180}{4{,}186}} = 600\ \text{m/seg} \quad ; \quad c_1 = \varphi\ c_{1t} = 0{,}97 \times 600 = 582\ \text{m/seg}$$

Relación cinemática de máximo rendimiento: $\xi_1 = \dfrac{u}{c_1} = \dfrac{\cos\alpha_1}{2} = \dfrac{\cos 18^\circ}{2} = 0{,}4755$

$$u = c_1\,\xi_1 = 582\ \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 0{,}4755 = 276{,}74\ \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

$$w_1 = \sqrt{u^2 + c_1^2 - 2\,c_1 u \cos\alpha_1} = \sqrt{276{,}74^2 + 582^2 - (2 \times 276{,}74 \times 582 \cos 18^\circ)} = 330\ \text{m/seg}$$

$$\text{sen}\,\beta_1 = \frac{c_1\ \text{sen}\,\alpha_1}{w_1} = \frac{582\ \text{sen}\,18^\circ}{330} = 0{,}545 \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 33^\circ$$

o también: $\text{cotg}\,\beta_1 = \text{cotg}\,\alpha_1 - \dfrac{u}{c_m} = \left| \begin{array}{l} c_1 = 582\ \text{m/seg} \\ c_{1m} = c_1\ \text{sen}\,\alpha_1 = 179{,}84\ \text{m/seg} \end{array} \right| = \text{cotg}\,18^\circ - \dfrac{276{,}74}{179{,}84} \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 33\text{n}$

Triángulo de velocidades a la salida: Alabes simétricos $\Rightarrow$ $\beta_1 = \beta_2 = 33^\circ$ $\Rightarrow$ $\psi = 0{,}88$

$$w_2 = \psi\ w_1 = 0{,}88 \times 330\ \text{m/seg} = 290{,}4\ \text{m/seg}$$

$$c_2 = \sqrt{u^2 + w_2^2 - 2\,w_2 u \cos\beta_2} = \sqrt{276{,}74^2 + 290{,}4^2 - (2 \times 276{,}74 \times 290{,}4 \cos 33^\circ)} = 161{,}6\ \text{m/seg}$$

$$\text{sen}\,\alpha_2 = \frac{w_2\ \text{sen}\,\beta_2}{c_2} = \frac{290{,}4\ \text{sen}\,33^\circ}{161{,}6} = 0{,}9787 \quad \Rightarrow \quad \alpha_2 = 78{,}16^\circ$$

b) Potencia interna máxima

$$T_{int} = \frac{u^2}{g}(1+\psi) = \frac{276{,}74^2}{g}(1+0{,}88) = 14692\ \frac{Kgm}{kg} = 34{,}4\ \frac{Kcal}{kg}$$

$$N_{int} = G\,T_{int} = 16\ \frac{kg}{seg} \times 14692\ \frac{Kgm}{kg} = 235072\ \frac{Kgm}{seg} = 2304{,}6\ kW$$

Rendimiento interno máximo: $\eta_{int.máx} = (1+\psi)\ \frac{\varphi^2 \cos^2 \alpha_1}{2} = (1+0{,}88)\ \frac{0{,}97^2 \times \cos^2 18^o}{2} = 0{,}80 = 80\%$

o también, teniendo en cuenta que el salto adiabático es: $\frac{180}{4{,}186} = 43\ \frac{Kcal}{kg}$

$$\eta_{int.máx} = \frac{\text{Salto interno}}{\text{Salto adiabático}} = \frac{34{,}4}{43} = 0{,}80$$

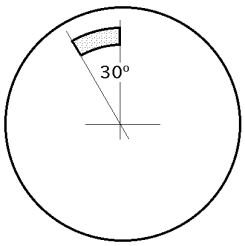
c) Altura de los álabes de la corona para una inyección de vapor total, siendo el volumen específico del vapor a la salida de la tobera, v_1= 0,086 m³/kg

Con admisión total: $G = \frac{\Omega\, c_{1m}}{v_1} = \frac{2\pi r\, a_1 c_{1m}}{v_1}$

$$a_1 = \frac{G\,v_1}{2\pi r\, c_{1m}} = \left| r = \frac{30\,u}{\pi n} = \frac{30 \times 276{,}74}{4500\,\pi} = 0{,}587\ m \right| = \frac{16\ (kg/seg) \times 0{,}086\ (m^3/kg)}{2\pi \times 0{,}5872 \times 582\ sen18^o} = 0{,}00207\ m$$

que es una altura de álabe demasiado pequeña, por lo que no procede la inyección total, sino la parcial

d) Altura de los álabes de la corona para una inyección de vapor parcial de 30º, siendo, v_1= 0,086 m³/kg



En esta nueva situación, la altura real del álabe será:

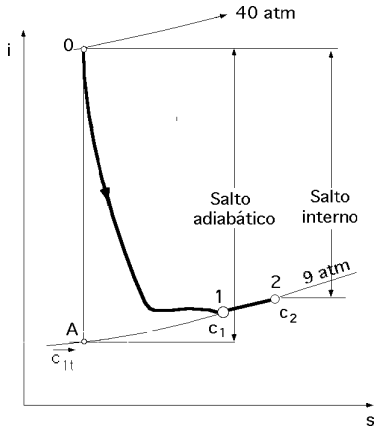
$$a_1 = \frac{G\,v_1}{2\pi r \frac{30}{360}\, c_{1m}} = \frac{16\ (kg/seg) \times 0{,}086\ (m^3/kg)}{2\pi \times 0{,}5872 \times \frac{30}{360} \times 582\ sen18^o} = 0{,}02488\ m$$

que es más razonable.

e) Velocidad de embalamiento

$$u_{emb} = c_1 \cos\alpha_1 \left(1 + \frac{\psi\ tg\ \alpha_1}{\sqrt{1 + tg^2\beta_2 - \psi^2}}\right) = 582 \cos 18^o \left(1 + \frac{0{,}88\ tg\ 18^o}{\sqrt{1 + tg^2\ 33 - 0{,}88^2}}\right) = 750{,}2\ \frac{m}{seg}$$

****



8.- Una turbina de acción de rodete único tiene las siguientes características:
Diámetro medio del rodete 1,8 m; $\varphi = 0{,}95$; $\alpha_1 = 17^o$; $\eta_{mec} = 0{,}85$
Estado termodinámico del vapor: $p_1 = 40\ kg/cm^2$, $T_1 = 400^oC$, $p_2 = 9\ kg/cm^2$
La turbina trabaja en condiciones de rendimiento interno máximo.
Determinar
a) Nº de revoluciones por minuto
b) Triángulos de velocidades
c) Pérdidas en la corona
d) Potencia y par motor para un consumo de 5 kg/seg

RESOLUCIÓN

Punto (0): 40 atm y 400ºC $\Rightarrow$ $\begin{cases} v_0 = 0{,}07334\ m^3/kg \\ i_0 = 3214\ kJ/kg = 767{,}8\ Kcal/kg \ ; \ s_0 = 6{,}769\ kJ/kgºC \end{cases}$

Para las 9 atm del punto A se tiene: $\begin{cases} s_{A'} = 2{,}094\ kJ/kgºC \\ s_{A''} = 6{,}623\ kJ/kgºC \end{cases}$

Como: $s_A = s_0 = 6{,}769\ \frac{kJ}{kg^oC}$ $\Rightarrow$ Vapor recalentado: $\begin{cases} s_A = 6{,}753\ kJ/kg^oC \\ i_A = 2835\ kJ/kg = 677{,}25\ Kcal/kg \\ v_A = 0{,}2307\ m^3/kg \end{cases}$

Salto adiabático teórico: $\Delta i_{ad.teór.} = 767{,}8 - 677{,}25 = 90{,}54$ Kcal/kg

Velocidad: $c_{1t} = 91{,}48\ \sqrt{90{,}54} = 870{,}45$ m/seg

Pérdidas en la tobera: $(1 - \varphi^2)\ \Delta i_{ad\ teór} = (1 - 0{,}95^2) \times 90{,}54 = 8{,}83$ Kcal/kg

$i_1 = 677{,}25 + 8{,}83 = 686{,}1$ Kcal/kg

o también:

$c_1 = \varphi\ c_{1t} = 0{,}95 \times 870{,}45 = 826{,}9$ m/seg $= 91{,}48\ \sqrt{i_0 - i_1}$

$i_0 - i_1 = 81{,}7$ Kcal/kg $\Rightarrow$ $i_1 = 767{,}8 - 81{,}7 = 686{,}1$ Kcal/kg

a) Nº de revoluciones por minuto: A partir de la condición de rendimiento máximo:

$$u_1 = \frac{c_1\ \cos\alpha_1}{2} = \frac{826{,}9\ \cos 17^o}{2} = 395{,}4\ \frac{m}{seg} < 400\ \frac{m}{seg}$$

$$n = \frac{60\ u}{D\ \pi} = \frac{60 \times 395{,}38}{1{,}8\ \pi} = 4195\ rpm$$

b) Triángulo de velocidades a la entrada

$$w_1 = \sqrt{u^2 + c_1^2 - 2\ c_1 u \cos\alpha_1} = \sqrt{395{,}38^2 + 826{,}9^2 - (2 \times 395{,}38 \times 826{,}9 \cos 17^o)} = 464{,}2\ m/seg$$

$$\text{sen}\ \beta_1 = \frac{c_{1m}}{w_1} = \frac{826{,}9\ \text{sen}\ 17^o}{464{,}2} = 0{,}5208 \Rightarrow \beta_1 = 31{,}38^o$$

Triángulo de velocidades a la salida: $\beta_1 = \beta_2 = 31{,}38^o \Rightarrow \psi = 0{,}88$; $w_2 = \psi\ w_1 = 0{,}88 \times 464{,}2 = 408{,}5$ m/seg

$$c_2 = \sqrt{u^2 + w_2^2 - 2\ w_2 u \cos\beta_2} = \sqrt{395{,}38^2 + 408{,}5^2 - (2 \times 395{,}38 \times 408{,}5 \cos 31{,}38^o)} = 217{,}7\ m/seg$$

$$\text{sen}\ \alpha_2 = \frac{w_2\ \text{sen}\ \beta_2}{c_2} = \frac{408{,}5\ \text{sen}\ 31{,}38^o}{217{,}75} = 0{,}9768 \Rightarrow \alpha_2 = 77{,}64^o$$

c) Pérdidas en la corona: $(1 - \psi^2)\ \frac{w_1^2}{2\ g} = (1 - 0{,}88^2)\ \frac{464{,}2^2}{2\ g} = 2480\ \frac{Kgm}{kg} = 5{,}8\ \frac{Kcal}{kg}$

Pérdidas a la salida: $\frac{c_2^2}{2\ g} = \frac{217{,}7^2}{2\ g} = 2419\ \frac{Kgm}{kg} = 5{,}67\ \frac{Kcal}{kg}$

d) Potencia y par motor, para un consumo de 1 kg/seg

$$T_{int} = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2\ g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2\ g} = \left(\frac{826{,}9^2 - 217{,}75^2}{2\ g} - \frac{464{,}2^2 - 408{,}5^2}{2\ g}\right) \frac{1}{427}\ \frac{Kcal}{kg} = 70{,}22\ \frac{Kcal}{kg}$$

Trabajo al freno $= \eta_{mec}\ T_{int} = 0{,}95 \times 70{,}22$ Kcal/kg $= 66{,}7$ Kcal/kg $= 28487$ Kgm/kg

Pérdidas mecánicas: $66{,}7 \times 0{,}05 = 3{,}335$ (Kcal/kg)

Comprobación: $T_{freno} = \Delta i_{ad\ teór} - \sum$ Pérdidas $= 90{,}54 - (8{,}83 + 5{,}8 + 5{,}67 + 3{,}33) = 66{,}9$ Kgm/kg

Potencia y par motor, para un consumo de 5 kg/seg

$$N = \frac{28487\ Kgm/kg \times 5\ kg/seg}{75} = 1899{,}6\ CV = 142435\ \frac{Kgm}{seg} \Rightarrow C = \frac{30\ T}{\pi\ n} = \frac{30 \times 142435\ Kgm/seg}{\pi \times 4280\ (1/seg)} = 317{,}8\ (mkg)$$

****

9.- Un rodete Curtis de dos escalones de velocidad, tiene un salto adiabático teórico total de 300 kJ/kg. El rendimiento de la tobera es del 90%. En las dos coronas móviles y en la corona inversora del distribuidor se tiene un coeficiente de reducción de velocidad $\psi = 0{,}87$

Los ángulos de salida de la tobera y de los álabes de la primera corona móvil, distribuidor y segunda corona móvil son respectivamente: $\alpha_1 = 18^o$; $\beta_2 = 20^o$; $\alpha_{1'} = 25^o$; $\beta_{2'} = 30^o$

La velocidad periférica en la mitad de los álabes de ambas coronas móviles es igual a 1/4 de la velocidad c_{1t}.
Determinar:

a) Los triángulos de velocidades
b) El trabajo realizado por el doble escalonamiento Curtis
c) La pérdida total en el mismo
d) El rendimiento interno.

RESOLUCIÓN

a) Triángulos de velocidades

PRIMERA CORONA.- Entrada: $\alpha_1 = 18^o$, $c_{1t} = 91,48 \sqrt{\frac{300}{4,186}\ \frac{Kcal}{kg}} = 774,44\ \frac{m}{seg}$

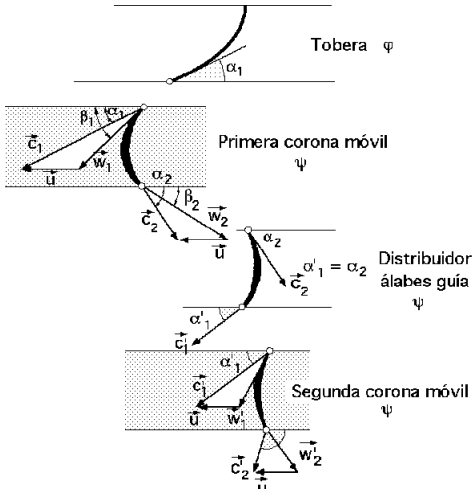
Velocidad periférica en las dos coronas móviles, $u_1 = 774,44 \times 0,25 = 193,6$ m/seg

Salto util en la tobera: $300 \times 0,9 = 270$ kJ/Kg $\Rightarrow$ $c_1 = 91,48 \sqrt{\frac{270}{4,186}} = 734,7$ m/seg

o sabiendo que, $\eta_{tobera} = \varphi_1^2$ $\Rightarrow$ $\varphi_1 = \sqrt{0,9} = 0,95$; $c_1 = 0,95 \times 91,48 \sqrt{\frac{300}{4,186}} = 734,7\ \frac{m}{seg}$

$w_1 = \sqrt{u^2 + c_1^2 - 2\, c_1 u \cos \alpha_1} = \sqrt{193,6^2 + 734,7^2 - (2 \times 193,6 \times 734,7 \cos 18^o)} = 553,8$ m/seg

$\text{sen}\ \beta_1 = \frac{c_1\ \text{sen}\ \alpha_1}{w_1} = \frac{734,7\ \text{sen}\ 18^o}{553,8} = 0,41$; $\beta_1 = 24,2^o$



PRIMERA CORONA.- Salida: $\beta_2 = 20^o$

$w_2 = \psi\ w_1 = 0,87 \times 553,8 = 481,8$ m/seg

$u_2 = u_1 = 193,6$ m/seg

$c_2 = \sqrt{u^2 + w_2^2 - 2\, w_2 u \cos \beta_2} = \sqrt{193,6^2 + 481,8^2 - (2 \times 193,6 \times 481,8 \cos 20^o)} = 307,1$ m/seg

$\text{sen}\ \alpha_2 = \frac{w_2\ \text{sen}\ \beta_2}{c_2} = \frac{481,8\ \text{sen}\ 20^o}{207,1} = 0,5365$; $\alpha_2 = 32,45^o$

DISTRIBUIDOR: $c_{1'} = \psi\ c_2 = 0,87 \times 307,1 = 267,18$ m/seg

SEGUNDA CORONA.- Entrada: $\alpha_{1'} = 25^o$

$c_{1'} = \psi\ c_2 = 0,87 \times 307,1 = 267,18$ m/seg

$u_{1'} = 193,6$ m/seg

$w_{1'} = \sqrt{u_{1'}^2 + c_{1'}^2 - 2\, u_{1'} c_{1'} \cos \alpha_{1'}} = \sqrt{193,6^2 + 267,18^2 - (2 \times 193,6 \times 267,18 \cos 25^o)} = 122,9$ m/seg

$$\text{sen}\,\beta_{1'} = \frac{c_{1'}\ \text{sen}\,\alpha_{1'}}{w_{1'}} = \frac{267{,}18\ \text{sen}\ 25^o}{122{,}9} = 0{,}9187 \quad \Rightarrow \quad \beta_{1'} = 66{,}74^o$$

SEGUNDA CORONA.- Salida: $\beta_{2'} = 30^o$

$w_{2'} = \psi\ w_{1'} = 0{,}87 \times 122{,}9 = 106{,}92$ m/seg

$u_{2'} = u_{1'} = 193{,}6$ m/seg

$$c_{2'} = \sqrt{u_{2'}^2 + w_{2'}^2 - 2\,u_{2'} w_{2'} \cos\beta_{2'}} = \sqrt{193{,}6^2 + 106{,}92^2 - (2 \times 193{,}6 \times 106{,}92 \cos 30^o)} = 114{,}28 \text{ m/seg}$$

$$\text{sen}\,\alpha_{2'} = \frac{w_{2'}\ \text{sen}\,\beta_{2'}}{c_{2'}} = \frac{106{,}92\ \text{sen}\ 30^o}{114{,}28} = 0{,}4678 \quad \Rightarrow \quad \alpha_{2'} = 27{,}9^o$$

b) Trabajo realizado por el doble escalonamiento Curtis

El trabajo interno desarrollado por las dos coronas móviles, en este caso, es el trabajo útil por ser el $\eta_{mec} = 1$. Como los álabes no son simétricos, se tiene que:

$$T_{int} = \frac{u}{g}\sum(c_{1u} + c_{2u}) = \left| \begin{array}{l} c_{1u} = 698{,}55 \text{ m/seg} \ ; \ c_{2u} = 259{,}15 \text{ m/seg} \\ c_{1'u} = 242{,}14 \text{ m/seg} \ ; \ c_{2'u} = -\,100{,}97 \text{ m/seg} \end{array} \right| =$$

$$= \frac{193{,}6}{g}(698{,}55 + 259{,}15 + 242{,}14 - 100{,}97)\ \text{m} = 21708{,}3\ \frac{\text{Kgm}}{\text{kg}} = 21708{,}3 \times \frac{4{,}186}{427}\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 212{,}82\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

c) Pérdidas en el escalonamiento

Sin necesidad de calcular las pérdidas de cada corona y las pérdidas por velocidad a la salida, la pérdida total se puede obtener directamente en la forma:

Pérdidas totales: 300 - 212,82 = 87,18 kJ/kg

que se puede desglosar en las siguientes pérdidas parciales:

Pérdidas en las toberas: $P_1 = \Delta i_{ad} = (1 - \eta_{tobera}) = 300\ (1 - 0{,}9) = 30\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Pérdidas en los álabes (1ª corona móvil): $P_2 = (1 - c^2)\ \frac{w_1^2}{2g} = (1 - 0{,}87^2)\ \frac{553{,}8^2}{2g} = 3804\ \frac{\text{Kgm}}{\text{kg}} = 37{,}29\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Pérdidas en el distribuidor inversor: $P_3 = (1 - \psi^2)\ \frac{c_2^2}{2g} = (1 - 0{,}87^2)\ \frac{307{,}1^2}{2g} = 1169\ \frac{\text{Kgm}}{\text{kg}} = 11{,}46\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Pérdidas en los álabes (2ª corona móvil): $P_4 = (1 - c^2)\ \frac{w_{1'}^2}{2g} = (1 - 0{,}87^2)\ \frac{122{,}9^2}{2g} = 187{,}34\ \frac{\text{Kgm}}{\text{kg}} = 1{,}836\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Si al final del escalonamiento Curtis la energía cinética se pierde totalmente:

Pérdidas salida (2ª corona móvil): $P_5 = \frac{c_2^2}{2g} = \frac{114{,}25^2}{2g} = 666\ \frac{\text{Kgm}}{\text{kg}} = 6{,}53\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Pérdidas totales: $30 + 37{,}29 + 11{,}46 + 1{,}836 + 6{,}53 = 87{,}11$ kJ/kg

d) Rendimiento interno: $\eta_{int} = \frac{T_{int}}{\Delta i_{ad.total}} = \frac{212{,}89}{300} = 0{,}7093 = 70{,}93\%$

****

10.- A una corona Curtis con dos escalonamientos de velocidad la sigue una cámara de remanso de donde pasa el vapor al resto de la turbina, se la suministran 5 kg/s de vapor a 60 bar y 400ºC. La turbina gira a 3000 rpm y el diámetro medio de la corona es de 1,5 m. La relación cinemática $\xi_1 = 0{,}25$. Los ángulos de salida de la tobera, de la primera corona móvil, de la corona inversora del distribuidor y de la segunda corona móvil son respectivamente

$\alpha_1 = 17^o$; $\beta_2 = 25^o$; $\alpha_1' = 22^o$; $\beta_2' = 38^o$

El coeficiente de reducción de velocidad en las dos coronas móviles y en la corona inversora del distribuidor es 0.85 y el rendimiento de la tobera 0,90. Se pierden además 30 kW por rozamiento de disco y ventilación. Determinar

a) El trabajo interno desarrollado por las dos coronas

b) El trabajo total, el trabajo adiabático teórico, el rendimiento de la turbina y la potencia generada

---

RESOLUCIÓN

Triángulos de velocidades

PRIMERA CORONA.- Entrada: $\alpha_1 = 17^o$

$$u_1 = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi \text{ x } 1,5 \text{ x } 3000}{60} = 235,6 \text{ m/seg}$$

$$c_1 = \frac{u}{0,25} = \frac{235,6}{0,25} = 942,5 \text{ m/seg}$$

$$w_1 = \sqrt{u^2 + c_1^2 - 2\, c_1 u \cos \alpha_1} = \sqrt{235,6^2 + 942,5^2 - (2 \text{ x } 235,6 \text{ x } 942,5 \cos 17^o)} = 720,45 \text{ m/seg}$$

$$\text{sen } \beta_1 = \frac{c_1 \text{ sen } \alpha_1}{w_1} = \frac{942,5 \text{ sen } 17^o}{720,45} = 0,3825 \quad ; \quad \beta_1 = 22,48^o$$

PRIMERA CORONA.- Salida: $\beta_2 = 25^o$

$$w_2 = \psi \; w_1 = 0,85 \text{ x } 720,45 = 612,38 \text{ m/seg}$$

$$c_2 = \sqrt{u^2 + w_2^2 - 2\, w_2 u \cos \beta_2} = \sqrt{235,6^2 + 612,38^2 - (2 \text{ x } 235,6 \text{ x } 612,38 \cos 25^o)} = 411 \text{ m/seg}$$

$$\text{sen } \alpha_2 = \frac{w_2 \text{ sen } \beta_2}{c_2} = \frac{612,38 \text{ sen } 25^o}{411} = 0,6296 \quad ; \quad \alpha_2 = 39^o$$

DISTRIBUIDOR .- $c_{1'} = \psi \; c_2 = 0,85 \text{ x } 411 = 349,35 \text{ m/seg}$

SEGUNDA CORONA.- Entrada: $\alpha_{1'} = 22^o$

Designamos con (‘) los resultados de la segunda corona móvil.

$c_{1'} = \psi \; c_2 = 0,85 \text{ x } 411 = 349,35 \text{ m/seg}$

$$w_{1'} = \sqrt{u^2 + c_{1'}^2 - 2\, c_{1'} u \cos \alpha_1} = \sqrt{235,6^2 + 349,35^2 - (2 \text{ x } 235,6 \text{ x } 349,35 \cos 22^o)} = 157,88 \text{ m/seg}$$

$$\text{sen } \beta_{1'} = \frac{c_{1'} \text{sen } \alpha_{1'}}{w_{1'}} = \frac{349,35 \text{ sen } 22^o}{157,88} = 0,8289 \quad \Rightarrow \quad \beta_1' = 56^o$$

SEGUNDA CORONA.- Salida: $\beta_{2'} = 38^o$

$$w_{2'} = \psi \; w_{1'} = 0,85 \text{ x } 157,88 = 134,2 \text{ m/seg}$$

$$c_{2'} = \sqrt{u^2 + w_{2'}^2 - 2\, w_{2'} \, u \cos \beta_{2'}} = \sqrt{235,6^2 + 134,2^2 - (2 \text{ x } 235,6 \text{ x } 134,2 \cos 38^o)} = 153,42 \text{ m/seg}$$

$$\text{sen } \alpha_{2'} = \frac{w_{2'} \text{ sen } \beta_{2'}}{c_{2'}} = \frac{134,2 \text{ sen } 38^o}{153,42} = 0,5385 \quad \Rightarrow \quad \alpha_{2'} = 32,58^o$$

a) Trabajo interno desarrollado por las dos coronas

$$T_{int} = \frac{u}{g} \sum (c_{1u} + c_{2u}) = \left| \begin{array}{l} c_{1u} = 901,3 \text{ m/seg} \; ; \; c_{2u} = 319,4 \text{ m/seg} \\ c_{1'u} = 323,9 \text{ m/seg} \; ; \; c_{2'u} = -129,28 \text{ m/seg} \end{array} \right| =$$

$$= \frac{235,6}{g} (901,3 + 319,4 + 323,9 - 129,28) = 34025 \; \frac{\text{Kgm}}{\text{kg}} = 34025 \text{ x } \frac{4,186}{427} \; \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 333,5 \; \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

b) Trabajo total

$$\text{Trabajo: } T = T_{int} - \text{Pérdidas mecánicas} = 333,33 \; \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \frac{30 \text{ kW}}{G} = 333,33 \; \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \frac{30 \text{ kW}}{5 \text{ kg/seg}} = 327,33 \; \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Potencia: $N = G\,T = 5\ \frac{kg}{seg} \times 327{,}33\ \frac{kJ}{kg} = 1636{,}65\ kW = 1{,}637\ MW$

Trabajo adiabático teórico: $T_{ad.teórico} = \frac{c_1^2/2g}{\eta_{tobera}} = \frac{942{,}5^2}{2\,g \times 0{,}9}\ \frac{(m/seg)^2}{m/seg^2} = 50357\ \frac{Kgm}{kg} = 493{,}67\ \frac{kJ}{kg}$

Rendimiento: $\eta = \frac{T}{\Delta i_{ad.teór}} = \frac{327{,}33}{493{,}67} = 0{,}663 = 66{,}3\%$

****

11.- En una turbina de vapor de reacción que funciona con flujo axial a 4500 rpm se conocen los siguientes datos: $\varphi = 0{,}90$; $\xi = 0{,}7$; $k = 0{,}90$

Álabes del primer escalonamiento: Altura, $a_1 = 0{,}018\ m$; $\alpha_1 = 21^o$

Volumen específico del vapor a la entrada = $0{,}1577\ m^3/kg$

Consumo de vapor, G = 125 Toneladas / hora. Relación entre los diámetros, $D_n / D_1 = 1{,}2$. *Para el primer escalón se cumple:* $\psi = 0{,}9$; $\beta_2 = \beta_1 - 29{,}5^o$.

Determinar

a) Grado de reacción y velocidad c_1 *de entrada*

b) El número de escalonamientos si el salto adiabático es de 150 Kcal / kg y el diámetro medio del último escalonamiento

c) Potencia desarrollada por el primer escalón

RESOLUCIÓN

El diámetro del primer escalón es:

$$n\,D_1^2 = \frac{60\,G\,\xi\,v_1}{\pi^2 a_1\ k\ \text{sen}\,\alpha_1} = \frac{60 \times \frac{125000}{3600} \times 0{,}70 \times 0{,}1577}{\pi^2 \times 0{,}018 \times 0{,}90 \times \text{sen}\,21^o} = 4013{,}7 \quad \Rightarrow \quad D_1 = \sqrt{\frac{4013{,}7}{4500}} = 0{,}9444\ m$$

Triángulos de velocidades a la entrada del primer escalonamiento

$$u_1 = \frac{D_1}{2}\ \frac{\pi\,n}{30} = \frac{0{,}9444}{2}\ \frac{\pi \times 4500}{30} = 222{,}5\ \frac{m}{seg}$$

$$c_1 = \frac{u_1}{\xi_1} = \frac{222{,}5}{0{,}7} = 317{,}9\ m/seg \quad ; \quad c_{1m} = 317{,}9 \cos 21^o = 113{,}92\ m/seg$$

$$w_1 = \sqrt{u^2 + c_1^2 - 2\,c_1 u \cos\alpha_1} = \sqrt{222{,}5^2 + 317{,}9^2 - (2 \times 222{,}5 \times 317{,}9 \cos 21^o)} = 136\ m/seg$$

$$\text{sen}\,\beta_1 = \frac{c_{1m}}{w_1} = \frac{317{,}9\ \text{sen}\,21^o}{136} = 0{,}8377 \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 56{,}9n$$

o también: $\text{cotg}\,\beta_1 = \text{cotg}\,\alpha_1 - \frac{u}{c_{1m}} = \text{cotg}\,21^o - \frac{222{,}5}{113{,}92} = 0{,}6519 \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 56{,}9^o$

a) Grado de reacción, con: $c_{1m} = c_{2m}$***:***

$$\sigma = \frac{c_{1m}}{2\,u}\ (\text{cotg}\,\beta_2 - \text{cotg}\,\beta_1) = \left| \beta_2 = 56{,}9^o - 29{,}5^o = 27{,}4^o \right| = \frac{113{,}92}{2 \times 222{,}5}\ (\text{cotg}\,27{,}4^o - \text{cotg}\,56{,}9^o) = 0{,}327$$

Como a la entrada del primer escalón se puede suponer que la velocidad c_0 es despreciable, el salto adiabático del mismo es:

$$c_1 = \varphi\ \sqrt{2\,g\,\Delta i_{dist}} = \left| \Delta i_{dist} = (1 - \sigma)\,\Delta i_{ad.} \right| = \varphi\ \sqrt{2\,g\,(1 - \sigma)\,\Delta i_{ad.}} =$$

$$= 0{,}9 \times 91{,}48 \sqrt{(1 - 0{,}327)\,\Delta i_{ad.}} = 317{,}9\ \frac{m}{seg} \quad \Rightarrow \quad \Delta i_{ad.} = 22{,}15\ \frac{Kcal}{kg}$$

Triángulos de velocidades a la salida del primer escalonamiento

$u_2 = u_1 = 222{,}5\ m/seg$; $\beta_2 = \beta_1 - 29{,}5^o = 56{,}9^o - 29{,}5^o = 27{,}4^o$

$$w_2 = \left| \psi = \frac{w_2}{w_{2t}} \right| = \psi \sqrt{2\,g\,\Delta i_{corona} + w_1^2} = \psi \sqrt{8370\,\sigma\,\Delta i_{ad.} + w_1^2} = 0{,}9 \sqrt{(8370 \times 0{,}327 \times 22{,}15) + 136^2} = 253{,}14 \frac{m}{seg}$$

$$c_2 = \sqrt{u^2 + w_2^2 - 2\,u\,c_2 \cos\beta_2} = \sqrt{222{,}5^2 + 253{,}14^2 - (2 \times 222{,}5 \times 253{,}14 \cos 27{,}4^o)} = 116{,}5 \text{ m/seg}$$

$$\text{sen}\,\alpha_2 = \frac{c_{2m}}{c_2} = \frac{w_2\,\text{sen}\,\beta_2}{c_2} = \frac{253{,}14\,\text{sen}\,27{,}4^o}{116{,}5} = 0{,}999 \quad \Rightarrow \quad \alpha_2 = 89{,}45^o$$

b) Número de escalonamientos.-

Nº de Parsons: $X = \dfrac{2\,g\,(1-\sigma)}{\frac{1}{\xi^2\varphi^2} - (\frac{c_2}{u})^2} = \dfrac{2\,g\,(1-0{,}327) \times 427}{\frac{1}{0{,}7^2 \times 0{,}9^2} - (\frac{132{,}2}{222{,}5})^2} = 2600$

$$\frac{(\frac{u_n}{u_1})^{2n/(n-1)} - 1}{(\frac{u_n}{u_1})^{2/(n-1)} - 1} = \frac{X\,\Delta I}{u_1^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{1{,}2^{2n/(n-1)} - 1}{1{,}2^{2/(n-1)} - 1} = \frac{2600 \times 150}{222{,}5^2} = 7{,}88 \quad \Rightarrow \quad n = 7 \text{ escalones}$$

Diámetro medio del último escalonamiento: $\dfrac{D_7}{D_1} = 1{,}2$; $D_7 = 1{,}2 \times 0{,}9444 = 1{,}133$ m

Potencia desarrollada por el primer escalonamiento:

Si se trata de un escalón único:

$$T_{int} = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2\,g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2\,g} = \frac{317{,}9^2 - 116{,}5^2}{2\,g} - \frac{136^2 - 253{,}14^2}{2\,g} = 6789 \frac{Kgm}{kg} = 15{,}9 \frac{Kcal}{kg}$$

pero como la energía a la salida no se pierde, resulta:

$$T_{int} = \frac{c_1^2}{2\,g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2\,g} = \frac{317{,}9^2}{2\,g} - \frac{136^2 - 253{,}14^2}{2\,g} = 7482 \frac{Kgm}{kg} = 17{,}52 \frac{Kcal}{kg}$$

$$N_{int\,(escalón\ 1)} = T_{int}\ G = \frac{6789 \text{ Kgm/kg} \times \frac{125000}{3600} \text{ kg/seg}}{75 \text{ (Kgm/seg)/CV}} = 3143 \text{ CV} = 2{,}31 \text{ MW}$$

****

12.- Una turbina de vapor admite vapor recalentado a la presión de 150 atm abs y 550ºC, consume un gasto G de vapor de 40 kg/seg y funciona a 3000 rpm, siendo la presión en el condensador de 0,04 atm abs.
La parte de ACCIÓN tiene las siguientes características de tipo constructivo:

$$\varphi = 0{,}95 \ ; \ \alpha_1 = 17^o \ ; \ \beta_2 = \beta_1 - 5^o \ ; \ \xi = 0{,}478 \ ; \ u = 300 \ m/seg$$

La parte de REACCIÓN, $\sigma = 0{,}5$, tiene todos sus álabes semejantes, siendo sus características las siguientes:

$$\varphi = 0{,}90 \ ; \ \alpha_1 = 20^o \ ; \ \xi = 0{,}48 \ ; \ \alpha_1 = (\text{altura primeros álabes}) = 15\ mm \ ; \ k = 0{,}9$$

Determinar

a) Los triángulos de velocidades
b) La potencia proporcionada por la parte de acción y su rendimiento
c) El número de escalonamientos de presión de la parte de reacción sabiendo que: $u_n / u_1 = 1{,}25$
d) Triángulos de velocidades correspondientes al octavo escalón de reacción y potencia que proporciona

---

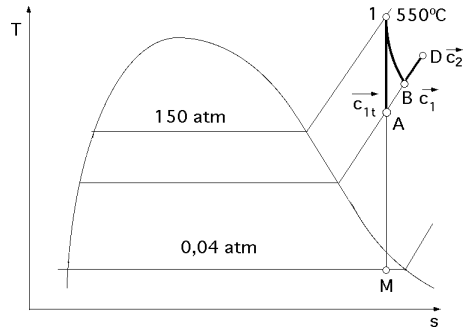
RESOLUCIÓN

$v_1 = 0{,}0229\ m^3/kg$; $i_1 = 3449$ kJ/kg = 824 Kcal/kg ; $s_1 = 6{,}52$ kJ/kgºC

$$s_{M'} = 0{,}4176 \frac{kJ}{kg^oC} \ ; \ s_{M''} = 8{,}473 \frac{kJ}{kg^oC} \ ; \ s_M = 6{,}52 \frac{kJ}{kg^oC} \quad \Rightarrow \quad \text{vapor húmedo}$$

$$s_M = s_{M'} + x_M\ (s_{M''} - s_{M'}) = 0{,}4176 \frac{kJ}{kg^oC} + x_M\ (8{,}473 - 0{,}4176) \frac{kJ}{kg^oC} = 6{,}52 \frac{kJ}{kg^oC} \quad \Rightarrow \quad x_M = 0{,}758$$

$$i_M = 121{,}5\ \frac{kJ}{kg} + (0{,}758 \times 2432{,}4)\ \frac{kJ}{kg} = 1965{,}25\ \frac{kJ}{kg} = 469{,}48\ \frac{Kcal}{kg}$$



ACCIÓN

Salto adiabático teórico en la parte de acción: $c_{1t} = 91{,}48\ \sqrt{\Delta i_{ad\,(1\text{-}A)}}$

$$\Delta i_{ad(1\text{-}A)} = i_1 - i_A = \frac{c_{1t}^2}{91{,}48^2} = \left| c_{1t} = \frac{c_1}{\varphi} = \frac{u}{\varphi\ \xi_1} = \frac{300}{0{,}95 \times 0{,}478} = 660{,}65\ \frac{m}{seg} \right| = \left(\frac{660{,}65}{91{,}48}\right)^2 = 52{,}15\ \frac{Kcal}{kg}$$

Triángulo de velocidades a la entrada

$$c_1 = 91{,}48\ \sqrt{\Delta i_{ad(1\text{-}B)}} = \frac{u}{\xi_1} = \frac{300}{0{,}478} = 627{,}6\ \frac{m}{seg} \quad \Rightarrow \quad \Delta i_{(1\text{-}B)} = \left(\frac{627{,}6}{91{,}48}\right)^2 = 47{,}06\ \frac{Kcal}{kg} = 197\ \frac{kJ}{kg}$$

$$w_1 = \sqrt{u^2 + c_1^2 - 2\ c_1 u \cos \alpha_1} = \sqrt{627{,}6^2 + 300^2 - (2 \times 627{,}6 \times 300 \cos 17^o)} = 351{,}83\ m/seg$$

$$\text{sen}\ \beta_1 = \frac{c_1\ \text{sen}\ \alpha_1}{w_1} = \frac{627{,}61\ \text{sen}\ 17^o}{351{,}83} = 0{,}5215 \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 31{,}44^o$$

Triángulo de velocidades a la salida

$$\beta_2 = \beta_1 - 5^o = 31{,}44^o - 5^o = 26{,}44^o \quad \Rightarrow \quad \beta_1 + \beta_2 = 31{,}44 + 26{,}44 = 57{,}88^o \quad \Rightarrow \quad \psi = 0{,}87$$

$$w_2 = \psi\ w_1 = 0{,}87 \times 351{,}83\ m/seg = 306{,}1\ m/seg$$

$$c_2 = \sqrt{u^2 + w_2^2 - 2\ u\ c_2\ \cos \beta_2} = \sqrt{300^2 + 306{,}1^2 - (2 \times 300 \times 306{,}1 \cos 26{,}44^o)} = 138{,}74\ m/seg$$

$$\text{sen}\ \alpha_2 = \frac{w_2\ \text{sen}\ \beta_2}{c_2} = \frac{306{,}1\ \text{sen}\ 26{,}44^o}{138{,}74} = 0{,}9823 \quad \Rightarrow \quad \alpha_2 = 79{,}2^o$$

b) Potencia proporcionada por la parte de acción

$$\Delta i_{ad(1\text{-}A)} = i_1 - i_A = 52{,}15\ \frac{Kcal}{kg} \quad \Rightarrow \quad i_A = 824{,}1 - 52{,}15 = 772\ \frac{Kcal}{kg} = 3231{,}6\ \frac{kJ}{kg}$$

$$i_B = i_1 - \Delta i_{real\,(1\text{-}B)} = 3449 - 197 = 3252\ \frac{kJ}{kg} = 776{,}87\ \frac{Kcal}{kg}$$

$$T_{int} = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2\ g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2\ g} = \frac{627{,}61^2 - 138{,}74^2}{2\ g} - \frac{351{,}83^2 - 306{,}1^2}{2\ g} = 17580\ \frac{Kgm}{kg} = 41{,}17\ \frac{Kcal}{kg} = 172{,}33\ \frac{kJ}{kg} = Di_{(1\text{-}D)}$$

$$\eta_{int} = \frac{41{,}17}{52{,}15} = 0{,}789 = 78{,}9\%$$

$$i_D = i_1 - \Delta i_{real\,(1\text{-}D)} = 824{,}1 - 41{,}17 = 782{,}53\ \frac{Kcal}{kg} = 3277{,}3\ \frac{kJ}{kg}$$

$$N_{int.(acción)} = G\ T_{int} = 40\ \frac{kg}{seg} \times 17580\ \frac{Kgm}{kg} = 703200\ \frac{Kgm}{seg} = 6{,}894\ MW = 9376\ CV$$

o también: $N_{int.(acción)} = \frac{G\ u}{g}\ (1 + \psi\ \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1})\ (c_1\ \cos \alpha_1 - u) =$

$$= \frac{40\ (kg/seg)\ x\ 300\ (m/seg)}{g\ (m/seg^2)}\ (1 + 0{,}87\ \frac{\cos 26{,}44^o}{\cos 31{,}44})\ (627{,}61 \cos 17^o - 300)\ \frac{m}{seg} = 703188\ \frac{Kgm}{seg} = 6{,}89\ MW$$

c) ESCALONAMIENTOS DE PRESIÓN EN LA PARTE DE REACCIÓN, sabiendo que: $u_n / u_1 = 1{,}25$

Para: $\left| \begin{array}{l} s_A = s_1 = 6{,}52\ (kJ/kg^oC) \\ i_A = 3231{,}6\ (kJ/kg)\ \ ;\ \ i_D = 3277{,}3\ (kJ/kg) \end{array} \right| \Rightarrow \quad p_A \simeq 84\ atm\ ;\ v_D \simeq 0{,}03636\ \frac{m^3}{kg}$

$$D_{1(1)} = \sqrt{\frac{60\ G\ \xi\ v_D}{\pi^2\ n\ a_1\ k\ \text{sen}\ \alpha_1}} = \sqrt{\frac{60\ x\ 40\ x\ 0{,}48\ x\ 0{,}03636}{\pi^2\ x\ 3000\ x\ 0{,}015\ x\ 0{,}9\ x\ \text{sen}\ 20^o}} = 0{,}5535\ m$$

$$u_{1\{1(reacción)\}} = \frac{D_{1(1)}}{2}\ \frac{\pi\ n}{30} = \frac{0{,}5535\ \pi\ x\ 3000}{60} = 86{,}95\ \frac{m}{seg}$$

$$\text{Número de Parsons: } X = \frac{4185}{\frac{1}{\xi_1^2}\ (\frac{1}{\varphi^2} - 1) + \frac{2 \cos \alpha_1}{\xi_1} - 1} = \frac{4185}{\frac{1}{0{,}48^2}\ (\frac{1}{0{,}9^2} - 1) + \frac{2 \cos 20^o}{0{,}48} - 1} = 1063{,}5$$

Número de escalonamientos.- Aumentando ligeramente los diámetros siguientes según una progresión geométrica de razón k^2, podemos situar los escalonamientos de forma que las aletas más largas estén en la parte más alejada de la entrada del vapor. Con esta distribución de diámetros se tiene la ventaja de una semejanza de los triángulos de velocidades en los diversos escalonamientos, (salvo en el primero que es de inyección total), lo que permite utilizar en los álabes perfiles semejantes, siempre que su altura no sea excesiva; ésto justifica la invariabilidad del nº de Parsons en los diversos escalonamientos.

$$\frac{(\frac{u_n}{u_1})^{2n/(n-1)} - 1}{(\frac{u_n}{u_1})^{2/(n-1)} - 1} = \frac{1{,}25^{2n/(n-1)} - 1}{1{,}25^{2/(n-1)} - 1} = \frac{X\ \Delta I}{u_1^2} = \frac{1063\ x\ (772 - 469{,}48)}{86{,}64^2} = 42{,}84 \quad \Rightarrow \quad n = 34$$

d) Triángulos de velocidades correspondientes al octavo escalón de reacción

$$k = (\frac{u_n}{u_1})^{1/(n\ -\ 1)} = 1{,}2\,5^{1/(n\ -\ 1)} = 1{,}2\,5^{1/(34\ -\ 1)} = 1{,}006785$$

Entrada: $\alpha_{1(8)} = 20^o$

$$u_{1(8)} = k^7 u_{1(1)} = 1{,}006785^7\ x\ 86{,}9 = 91{,}16\ m/seg$$

$$c_{1(8)} = \frac{91{,}16}{0{,}48} = 189{,}92\ \frac{m}{seg}$$

$$w_{1(8)} = \sqrt{u_{1(8)}^2 + c_{1(8)}^2 - 2\ c_{1(8)} u_{1(8)}\ \cos \alpha_1} = \sqrt{189{,}9^2 + 91{,}16^2 - (2\ x\ 189{,}9\ x\ 91{,}16 \cos 20^o)} = 108{,}78\ m/seg$$

Para, $\sigma = 0{,}5$; $\alpha_1 = \beta_2 = 20^o$; $\alpha_2 = \beta_1$

$$\text{sen}\ \beta_{1(8)} = \frac{c_{1(8)}\ \text{sen}\ \alpha_{1(8)}}{w_{1(8)}} = \frac{189{,}9\ x\ \text{sen}\ 20^o}{108{,}78} = 0{,}5967 \quad ; \quad \beta_{1(8)} = 36{,}66^o$$

Salida: $\alpha_{2(8)} = 36{,}66^o \quad ; \quad \beta_{2(8)} = 20^o$

$$c_{2(8)} = w_{1(8)} = 108{,}78\ \frac{m}{seg}$$

$$u_{2(8)} = u_{1(8)} = 91{,}16\ \frac{m}{seg}$$

$$w_{2(8)} = c_{1(8)} = 189{,}9\ \frac{m}{seg}$$

Potencia interna de este escalonamiento si fuese uno solo:

$$N_{int(8)} = G\ \frac{u_{1(8)}}{g}\ (2\ c_{1(8)} \cos \alpha_{1(8)} - u_{1(8)}) = 40\ \frac{kg}{seg}\ \frac{91{,}16\ (m/seg)}{g\ (m/seg^2)}\ (2\ x\ 189{,}92 \cos 20^o - 91{,}16)\ \frac{m}{seg} =$$

$$= 98890\ Kgm/seg = 969{,}5\ kW$$

o también: $N_{int(8)} = G\ (\frac{c_1^2 - c_2^2}{2\ g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2\ g}) = \left| \begin{array}{l} c_1 = w_2 \\ w_1 = c_2 \end{array} \right| = G\ \frac{c_1^2 - c_2^2}{g} = 40\ \frac{189{,}9^2 - 108{,}78^2}{9{,}8} = 98920\ \frac{Kgm}{seg}$

pero como forma parte de un conjunto de escalones, la energía a la salida se aprovecha en el escalón siguiente:

$$N_{int(8)} = G\left(\frac{c_1^2}{2g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}\right) = \left|\begin{matrix} c_1 = w_2 \\ w_1 = c_2 \end{matrix}\right| = 40\ \frac{189{,}9^2 - \frac{108{,}78^2}{2}}{9{,}8} = 123043\ \frac{Kgm}{seg} = 1{,}206\ MW$$

****

13.- En una central térmica con turbina de vapor, se realiza un ensayo para determinar el estado de la turbina; en el punto de funcionamiento nominal se tiene:

Entrada del vapor en la turbina, p_3= 100 bar y T_3 = 500ºC ; Presión del condensador, 0,05 bar

Gasto de vapor, 330 kg/seg; potencia al freno, 350 MW.

Suponiendo que la turbina de vapor trabaja formando parte de un ciclo Rankine, se pide:

a.- Despreciando el trabajo de accionamiento de la bomba y sabiendo que el rendimiento mecánico de la turbina es 0,97, estimar su rendimiento y el global de la instalación.

b.- Suponiendo que la turbina tiene dos cuerpos de baja presión de doble flujo, y que el área transversal de paso del vapor a la salida del último escalón de la turbina es de 7 m^2 , determinar la velocidad de salida c_2 del vapor, y la energía perdida en caso de no recuperarse en el difusor.

c.- Un escalón intermedio de la turbina tiene las siguientes características:

Grado de reacción σ = 0,5

Diámetro medio del escalón 1,2 m

Ángulo de salida del distribuidor, 25º.

Se puede admitir, con suficiente grado de aproximación, que la velocidad de salida se recupera totalmente en el siguiente escalón, y que la velocidad de circulación axial es constante.

Sabiendo que el escalón trabaja en el punto de relación cinemática de máximo rendimiento y que el régimen de giro de la turbina es de 3000 rpm, calcular:

c.1.- Trabajo efectivo del escalón.

c.2.- La velocidad de salida del escalón, y el ángulo α_2.

c.3.- Suponiendo que el coeficiente de pérdida de velocidad en el rotor y en el estator es, φ = 0,95, ¿cuáles son el rendimiento periférico del escalón y el salto isentrópico?.

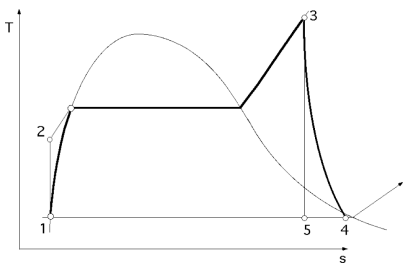
RESOLUCIÓN

a.- Rendimiento de la turbina, y rendimiento global de la instalación. Se desprecia el trabajo de accionamiento de la bomba

Haciendo uso del diagrama de Mollier, los datos a la entrada en la turbina son:

Punto 3: $\left| p_3 = 100 \text{ bars} \ ; \ T_3 = 500ºC \right| \ \Rightarrow \ i_3 = 3380 \text{ kJ/kg} \ ; \ s_3 = 6{,}596 \text{ kJ/kgºC}$

Punto 5: $p_5 = 0{,}05 \text{ bars} \ ; \ s_5 = s_3 = 6{,}596\ \frac{kJ}{kgºC} \ ; \ \left\{ \begin{matrix} s_{5'} = 0{,}476 \text{ (kJ/kgºC)} \\ s_{5''} = 8{,}394 \text{ (kJ/kgºC)} \end{matrix} \right\} \ \Rightarrow \ x_5 = \frac{6{,}596 - 0{,}476}{8{,}394 - 0{,}476} = 0{,}773$



$$i_5 = 137{,}8 + 0{,}773\ (2560{,}9 - 137{,}8) = 2010{,}7 \text{ (kJ/kg)}$$

$$N = G\ T_{int}\ \eta_{mec} = G\ (i_3 - i_4)\ \eta_{mec} = G\ (i_3 - i_5)\ \eta_{int}\ \eta_{mec}$$

$$\eta_{int} = \frac{N}{(i_3 - i_5)\ \eta_{mec} G_e} = \frac{350 \text{ x } 10^3 kW}{(3380 - 2010{,}7) \text{ x } 0{,}97 \text{ x } 330} = 0{,}798 = \frac{i_3 - i_4}{i_3 - i_5} \ \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ i_4 = i_3 - 0{,}798\ (i_3 - i_5) = 3380 - 0{,}798\ (3380 - 2010{,}7) = 2287{,}3 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{Térmico\ ciclo\ teórico} = \frac{i_3 - i_5}{i_3 - i_1} = \left| i_1 = 137{,}8\ \frac{kJ}{kg} \right| = \frac{3380 - 2010{,}7}{3380 - 137{,}8} = 0{,}4223$$

$$\eta_{instalación} = \eta_{térmico}\ \eta_{interno}\ \eta_{mecánico} = 0{,}4223 \text{ x } 0{,}798 \text{ x } 0{,}97 = 0{,}327$$

b.- Suponiendo que la turbina tiene dos cuerpos de baja presión de doble flujo, y que el área transversal de paso del vapor a la salida del último escalón de la turbina es de 7 m^2 , la velocidad de salida del vapor, y la energía

perdida en caso de no recuperarse en el difusor, se determinan en la forma:

A la salida del último escalonamiento (punto 4) se tiene: $x_4 = \frac{i_4 - i_{4'}}{i_{4''} - i_{4'}} = \frac{2287,3 - 137,8}{2560,9 - 137,8} = 0,887$

$v_4 = v_{4'} + x_4 (v_{4''} - v_{4'}) = 1,0053 + 0,887 (28196 - 1,0093) = 25010 \text{ dm}^3/\text{kg} = 25 \text{ m}^3/\text{kg}$

$p_4 = 0,05 \text{ atm}$; $i_4 = 2287,3 \text{ kJ/kg} \quad \Rightarrow \quad v_4 = 25 \text{ m}^3/\text{kg}$

Aplicando la ecuación de continuidad y teniendo en cuenta que la turbina tiene dos cuerpos de baja presión, cada uno de ellos de doble flujo, el área total de salida es: $\Omega_5 = 4 \times 7 = 28 \text{ m}^2$

Por trabajar con máximo rendimiento: $a_2 = 90^\circ$; $c_2 = c_{2m}$

Velocidad de salida: $G_e = \frac{\Omega_s \times c_s}{v_s} = \frac{\Omega_s \times c_2}{v_4} \quad \Rightarrow \quad c_2 = \frac{G_e v_4}{\Omega_s} = \frac{330 \times 25}{28} = 294,6 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$

Energía perdida: $P_{salida} = \frac{c_2^2}{2\,g} = \frac{294,6^2}{2\,g} = 4428 \text{ m} \frac{\text{kg}}{\text{kg}} = 43,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

c.- Para un escalonamiento con grado de reacción 0,5 y recuperación de la velocidad de salida se tiene que la velocidad periférica de máximo rendimiento es:

$2\ u = c_1 \cos \alpha_1 + w_2 \cos \beta_2 = 2\, c_1 \cos \alpha_1$

$u = c_1 \cos \alpha_1 \quad ; \quad c_1 = \frac{u}{\cos \alpha_1} = \left| u = Rw = 0,6 \frac{3000\,\pi}{30} = 188,5 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \right| = \frac{188,5}{\cos 25} = 208 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$

c.1.- Trabajo interno del escalonamiento

$x_1 = \frac{s_1 - s_{1'}}{s_{1''} - s_{1'}} = \frac{1,5292 - 0,1539}{1,948 - 0,1539} = 07665$

c.2.- La velocidad de salida del escalón, y el ángulo de la misma.

En condiciones de rendimiento máximo: $c_2 = c_{2m}$ y $\sigma = 0,5$ se tiene:

$c_2 = c_1 \text{ sen } \alpha_1 = 208 \times \text{sen } 25^\circ = 87,9 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \quad ; \quad \alpha_2 = 90^\circ$

c.3.- Suponiendo que el coeficiente de pérdida de velocidad en el rotor y en el estator es $\varphi = 0,95$:

Rendimiento interno máximo, $\eta_{int} = \frac{\cos^2 \alpha_1}{\cos^2 \alpha_1 + \theta} = \left| \theta = \frac{1 - \varphi^2}{\varphi^2} = \frac{1 - 0,95^2}{0,95^2} = 0,108 \right| = 0,8838 = 88,38\%$

Salto isentrópico, $\Delta i_{adiab} = \frac{T_{int}}{\eta_{int}} = \frac{35,54}{0,8838} = 40,17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

****

14.- El vapor de agua a la entrada de una turbina viene especificado por una presión de 140 kg/cm² y una temperatura de 500ºC, siendo las condiciones de entrada en el condensador de superficie de 0,1 kg/cm² y temperatura de 120ºC.

El gasto de vapor es de 14 kg/seg

La turbina es mixta con parte de acción y parte de reacción, siendo n = 3810 rpm

Determinar:

a) Potencia aproximada de esta turbina en CV

b) Sabiendo que las características de la parte de acción de álabes simétricos $\beta_1 = \beta_2$ son:

$\varphi = 0,95$; $\alpha_1 = 17^\circ$; $\eta_{int} = 0,74$; $x = 0,478$; $u = 400$ m / seg

calcular:

b-1) Los triángulos de velocidades de la parte de acción

b-2) El salto interno de la parte de acción

c) La parte de reacción tiene los siguientes datos:

$\varphi = 0,90$; $\alpha_1 = 20^\circ$; $\xi = 0,7$; $\psi = 0,9$; $k = 0,9$; altura álabes primer escalón = 12 mm

c.1.- Diámetro del primer escalón y velocidad periférica del mismo

c-2.- Nº de Parsons de la parte de reacción con $\sigma = 0,5$

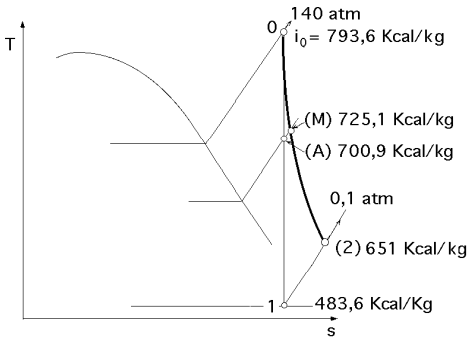
c-3.- Nº de escalonamientos de la parte de reacción sabiendo que, $u_n / u_1 = 1,3$

d) En el condensador de superficie el agua condensada sale a una temperatura de 26ºC, mientras que la temperatura del agua de refrigeración pasa de $t_e = 12ºC$ *a* $t_s = 25ºC$*. ¿Cuál es la relación entre el peso del agua de refrigeración y el del vapor condensado?*

RESOLUCIÓN

$i_0 = 3322$ kJ/kg = 793,6 Kcal/kg

$$\left.\begin{array}{l} i_2 = \{\ 120ºC\ ;\ p_2 = 0,1\ atm\ \} = 2726\ kJ/kg = 651\ Kcal/kg \\ i_{2''} = 2513\ Kcal/kg \end{array}\right\} \Rightarrow \text{Vapor recalentado}$$



$$x_1 = \frac{s_1 - s_{1'}}{s_{1''} - s_{1'}} = \frac{1,5292 - 0,1539}{1,948 - 0,1539} = 07665$$

$i_1 = i_{1'} + x_1\ (i_{1''} - i_{1'}) = 45,45 + 0,7665\ (617 - 45,45) = 483,6$ Kcal/kg

Salto adiabático total : $\Delta I = 793,6 - 483,6 = 310$ Kcal/kg

a) Potencia aproximada de esta turbina en CV.- El rendimiento termodinámico (salto interno) de la turbina es:

$$\eta_{termod} = \eta_{int} = \frac{i_0 - i_2}{i_0 - i_1} = \frac{793,6 - 651}{793,6 - 483,6} = 0,4608 = 46,08\%$$

Salto interno: (793,6 - 651) = 142,6 Kcal/kg

$$\text{Pot. aproximada} = 142,6\ \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \times 14\ \frac{\text{kg}}{\text{seg}} = 1996,4\ \frac{\text{Kcal}}{\text{seg}} = 8,357\ \text{MW}$$

b-1) Triángulos de velocidades de la parte de ACCIÓN

Entrada

$$w_1 = \sqrt{u_1^2 + c_1^2 - 2\ u_1\ c_1\ \cos\alpha_1} = \left\{ c_1 = \frac{u}{\xi_1} = \frac{400}{0,478} = 836,82\ \text{m/seg} \right\} =$$

$$= \sqrt{400^2 + 836,82^2 - 2 \times 400 \times 836,82 \cos 17º} = 469,1\ \text{m/seg}$$

$$\text{sen}\ \beta_1 = \frac{c_1\ \text{sen}\ \alpha_1}{w_1} = \frac{836,82\ \text{sen}\ 17º}{469,1} = 0,5215 \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = 31,44º$$

Salida: $\beta_2 = \beta_1 = 31,44º \quad \Rightarrow \quad \beta_1 + \beta_2 = 62,88 \quad \Rightarrow \quad \psi = 0,88$

$w_2 = \psi\ w_1 = 0,88 \times 469,1 = 412,8$ m/seg

$$c_2 = \sqrt{u^2 + w_2^2 - 2\ u\ c_2\ \cos\beta_2} = \sqrt{400^2 + 412,8^2 - (2 \times 400 \times 412,8 \cos 31,43º)} = 220,5\ \text{m/seg}$$

$$\text{sen}\ \alpha_2 = \frac{w_2\ \text{sen}\ \beta_2}{c_2} = \frac{412,8\ \text{sen}\ 31,44º}{220,5} = 0,9765 \quad \Rightarrow \quad \alpha_2 = 77,5º$$

b-2) Salto interno de la parte de acción

$$c_{1t} = 91,48\ \sqrt{\Delta i_{adiad}} = \frac{c_1}{\varphi} \quad ; \quad \Delta i_{adiad} = \left(\frac{c_1}{91,48\ \varphi}\right)^2 = \left(\frac{836,82}{91,48 \times 0,95}\right)^2 = 92,7\ \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

Saltos parte de acción: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Salto interno: } 92,7 \times \eta_{int} = 92,7 \times 0,74 = 68,5\ \text{Kcal/kg}\ ;\ i_M = 793,6 - 68,5 = 725,1\ \text{Kcal/kg} \\ \text{Salto adiabático} = 92,7\ \text{Kcal/kg}\ ;\ i_A = 793,6 - 92,7 = 700,9\ \text{Kcal/kg} \end{array} \right.$

c.1.- Diámetro del primer escalón de REACCIÓN y velocidad periférica del mismo

La presión de entrada en el primer escalonamiento de reacción tiene que ser mayor que:

$p_k = 0,545\ p_1 = 0,545 \times 140 = 76,3$ atm

siendo el volumen específico v_M, aproximado: $\begin{cases} i_A = 700{,}9 \text{ Kcal/kg} \\ s_A = 1{,}5292 \text{ Kcal/kgºC} \end{cases} \Rightarrow 80 < p_A < 84 \quad ; \quad v_M \simeq 0{,}033 \ \frac{m^3}{kg}$

En el primer escalonamiento de reacción la inyección es total

$$n D_{1_M}^2 = \frac{n D_{1_M} \ G}{\pi a_{1_M} k c_{1_M} \ \text{sen} \ \alpha_{1_M} \ \gamma_{vapor_M}} = \left| D_{1_M} = \frac{60 \ u_{1_M}}{\pi n} \right| = \frac{60 G \xi_{1_M} v_M}{\pi^2 a_{1_M} k \ \text{sen} \ \alpha_{1_M}} = \frac{60 \times 14 \text{ kg/seg} \times 0{,}70 \times 0{,}033 \text{ m}^3/\text{kg}}{\pi^2 \times 0{,}012 \times 0{,}9 \times \text{sen } 20^o} =$$

$$= 532{,}25 \quad \Rightarrow \quad D_1 = 0{,}3738 \text{ m}$$

Velocidad tangencial del primer escalonamiento: $u_{1_{M\ (reacción)}} = \frac{0{,}3738}{2} \ \frac{3810 \pi}{30} = 74{,}56 \ \frac{m}{seg}$

c-2.- Nº de Parsons de la parte de reacción con $\sigma = 0{,}5$

$$X = \frac{4185}{\frac{1}{\xi_1^2} \left(\frac{1}{\varphi^2} - 1\right) + \frac{2 \cos \alpha_1}{\xi_1} - 1} = \frac{4185}{\frac{1}{0{,}7^2} \left(\frac{1}{0{,}9^2} - 1\right) + \frac{2 \cos 20^o}{0{,}7} - 1} = 1934{,}15$$

c-3.- Nº de escalonamientos de la parte de reacción sabiendo que: $u_n/u_1 = 1{,}3$

Salto adiabático teórico total en la parte de reacción: $\Delta I = 700{,}9 - 483{,}6 = 217{,}3$ Kcal/kg

$$\frac{\left(\frac{u_n}{u_1}\right)^{2n/n-1} - 1}{\left(\frac{u_n}{u_1}\right)^{2/n-1} - 1} = \left| \begin{array}{l} u_n = k \ u_{n-1} = k^{n-1} u_1 \\ k = \left(\frac{u_n}{u_1}\right)^{1/(n-1)} = 1{,}3^{1/(n-1)} \end{array} \right| = \frac{1{,}3^{2n/n-1} - 1}{1{,}3^{2/n-1} - 1} = \frac{X \Delta I}{u_1^2} = \frac{1934{,}5 \times 217{,}3}{74{,}56^2} = 75{,}61 \quad \Rightarrow \quad n = 57$$

d) En el condensador de superficie el agua condensada sale a una temperatura de 26ºC, mientras que la temperatura del agua de refrigeración pasa de $t_e = 12$ºC a $t_s = 25$ºC. La relación entre el peso del agua de refrigeración y el del vapor condensado es:

$$q_{agua} = \frac{i_{C_1} - i_{C_2}}{T_{sal} - T_{ent}} = \left| \begin{array}{l} i_{C_1} = 651 \ \frac{Kcal}{kg} \quad ; \quad i_{C_2} = c_{p_{agua}} \ 26ºC = 26 \ \frac{Kcal}{kg} \\ T_{sal} = 25ºC \quad ; \quad T_{ent} = 12ºC \end{array} \right| = \frac{651 - 26}{25 - 12} = 48{,}07 \ \frac{kg_{\text{agua refrigeración}}}{kg_{\text{vapor condensado}}}$$

****

15.- Un gasto másico de vapor recalentado de 7,5 kg/seg a la presión de 50 kg/cm² y 450ºC de temperatura, penetra en una turbina y posteriormente es aprovechado con fines industriales a la presión de 6,5 kg/cm². La turbina funciona a 6000 rpm

Se pide:

a) Potencia aproximada de esta turbina, para un rendimiento termodinámico del 75%.

b) Triángulo de velocidades a la entrada y salida de la parte de acción, $\beta_1 = \beta_2$, en el que supondremos los siguientes datos:

$$\varphi = 0{,}95 \ ; \ \alpha_1 = 17° \ ; \ \xi = 0{,}478 \ ; \ u = 200 \text{ m/seg} \ ; \ \text{altura del álabe, } a = 0{,}015 \text{ m}$$

c) Rendimiento interno de la parte de acción

d) Sección de salida de la tobera, y nº de toberas máximo que puede llevar la parte de acción

e) Pérdidas mecánicas

f) Presión, temperatura y volumen específico a la salida de este escalonamiento.

g) Valor del nD^2 de la parte de reacción, sabiendo que:

$\varphi = 0{,}9$; $\alpha_1 = 20°$; $\psi = 0{,}9$; $\xi = 0{,}7$; $k = 0{,}9$; $\sigma = 0{,}5$; *altura del álabe primer escalón,* $a = 0{,}015$ m

h) Diámetro del primer escalón y velocidad periférica del mismo

i) Nº de escalonamientos de reacción, suponiendo que todos son iguales

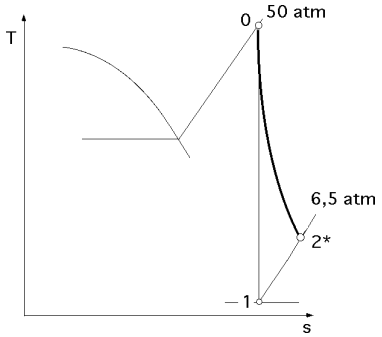
j) Nº de escalonamientos de reacción en el supuesto de que $u_n/u_1 = 1{,}20$

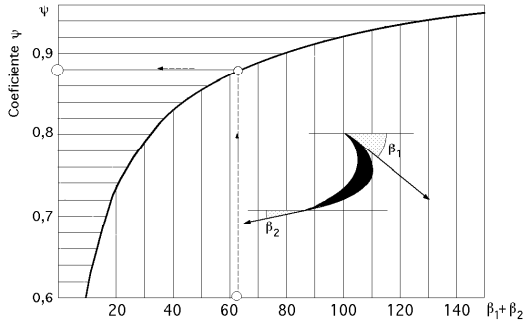
k) Rendimiento interno y salto interno en los escalones 2 y 14

RESOLUCIÓN

a) Potencia aproximada de esta turbina, para un rendimiento termodinámico del 75%.

Para, $p_0 = 50\ \frac{kg}{cm^2}$; $T_0 = 450ºC$ $\Rightarrow$ $\begin{cases} i_0 = 792\ (Kcal/kg) = 3315{,}3\ kJ/kg \\ s_0 = 1{,}6302\ (Kcal/kgºK) \end{cases}$



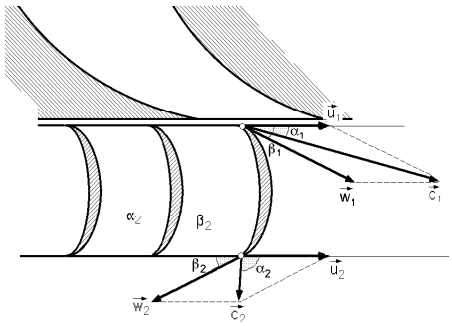


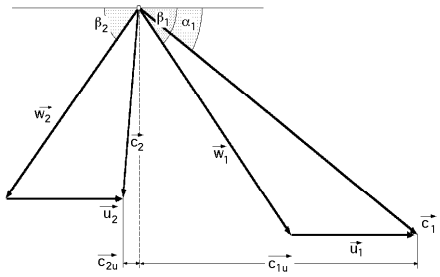
Para, $p_1 = 6{,}5\ \frac{kg}{cm^2}$; $s_0 = s_1 = 1{,}6302\ \frac{Kcal}{kgºK}$ $\Rightarrow$ $\begin{cases} s_{1''} = 1{,}609\ (Kcal/kgºK) \\ i_1 = 667{,}5\ (Kcal/kg) \end{cases}$ $\Rightarrow$ Estado (1), vapor recalentado

Salto adiabático teórico: 792 - 667,5 = 124,5 Kcal/kg

Salto interno: $H = 124{,}5 \times 0{,}75 = 93{,}37\ \frac{Kcal}{kg}$

Potencia aproximada: $N = 93{,}37\ \frac{Kcal}{kg} \times 7{,}5\ \frac{kg}{seg} \times 427\ \frac{Kgm}{Kcal} = 299.033\ \frac{Kgm}{seg} = 3.987\ CV = 2{,}93\ MW$





b) Triángulo de velocidades a la entrada y salida de la parte de ACCIÓN, $\beta_1 = \beta_2$, en el que se conocen los siguientes datos:

$\varphi = 0{,}95$; $\alpha_1 = 17º$; $\xi = 0{,}478$; $u = 200$ m/seg ; altura del álabe: $a = 0{,}015$ m ; $n = 6000$ rpm

Entrada : $c_1 = \frac{u}{\xi} = \frac{200}{0{,}478} = 418{,}4$ m/seg $\Rightarrow$ $c_{1t} = \frac{c_1}{\varphi} = \frac{418{,}4}{0{,}95} = 440{,}43$ m/seg

$\Delta i_{ad.\ acción} = (\frac{440{,}43}{91{,}48})^2 = 23{,}13\ \frac{Kcal}{kg}$

$w_1 = \sqrt{u_1^2 + c_1^2 - 2\,u_1\,c_1 \cos\alpha_1} = \sqrt{200^2 + 418{,}4^2 - (2 \times 200 \times 418{,}8 \cos 17º)} = 234{,}54$ m/seg

$\operatorname{sen}\beta_1 = \frac{c_1\ \operatorname{sen}\alpha_1}{w_1} = \frac{418{,}4 \times \operatorname{sen} 17º}{234{,}54} = 0{,}8533$ $\Rightarrow$ $\beta_1 = 31{,}44º$

Como, $\beta_1 = \beta_2$ $\Rightarrow$ $\beta_1 + \beta_2 = 63{,}28º$ $\Rightarrow$ $\psi = 0{,}88$

Salida : $\beta_2 = \beta_1 = 31{,}44º$; $w_2 = \psi\ w_1 = 0{,}88 \times 234{,}54 = 206{,}4$ m/seg

$c_2 = \sqrt{u_2^2 + w_2^2 - 2\,u_2\,w_2 \cos\beta_2} = \sqrt{200^2 + 206^2 - (2 \times 200 \times 206 \cos 31{,}44º)} = 110{,}9$ m/seg

$\operatorname{sen}\alpha_2 = \frac{w_2\ \operatorname{sen}\beta_2}{c_2} = \frac{206 \times \operatorname{sen} 31{,}44º}{110{,}9} = 0{,}9689$ $\Rightarrow$ $\alpha_2 = 75{,}67º$

c) Rendimiento interno de la parte de acción

Trabajo interno: $T_{int} = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2\,g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2\,g} = \frac{418{,}4^2 - 111{,}78^2}{2\,g} - \frac{234{,}54^2 - 211^2}{2\,g} = 7760\ \frac{Kgm}{kg} = 18{,}17\ \frac{Kcal}{kg}$

Rendimiento interno, $\eta_{int} = \frac{18{,}17}{23{,}13} = 0{,}785$

$\eta_{int} = 2\,\varphi^2 \xi_1 (1 + \psi\ \frac{\cos\beta_2}{\cos\beta_1})(\cos\alpha_1 - \xi_1) = 2 \times 0{,}95^2 \times 0{,}478\ (1 + 0{,}9)(\cos 17^o - 0{,}478) = 0{,}784 = 78{,}4\%$

d) Sección de salida de la tobera

Velocidad de salida de la tobera, $c_1 = 418{,}4$ m/seg

Sección de salida de la guía rectilínea de la tobera: $\Omega_{guía} = \frac{G\,v_{sal}}{c_1} = \frac{7{,}5\ (kg/seg) \times 0{,}0834\ (m^3/kg)}{418{,}4\ (m/seg)} = 0{,}001495\ m^2$

Sección de salida de la tobera: $\frac{\Omega_{guía}}{sen\ 17^o} = \frac{1{,}495.10^{-3} m^2}{sen\ 17^o} = 0{,}00511\ m^2$

Presión crítica: $p_k = 0{,}546\ p_1 = 0{,}546 \times 50 = 27{,}3\ kg/cm^2$

que es un valor menor que la presión a la salida de la parte de acción y en consecuencia la tobera se reduce a un conducto convergente

Nº de toberas máximo que puede llevar la parte de acción

Diámetro medio en la sección de salida de la tobera: $D = \frac{2\,u}{\frac{\pi\,n}{30}} = \frac{2 \times 200}{\frac{\pi \times 6000}{30}} = 0{,}636$ m

Suponiendo que la sección en la guía rectilínea sea cuadrada (para reducir las pérdidas transversales fi una disminución de las pérdidas por rozamiento), la longitud del arco de inyección correspondiente a esta sección a la salida será aproximadamente rectangular, de valor:

$a \times (\text{arco inyección}) = 5{,}11.10^{-3} m^2 \quad \Rightarrow \quad \text{arco inyección} = 5{,}11.10^{-3} / 0{,}015 = 0{,}3408$ m

Nº de toberas que entran en la circunferencia de inyección:

$$\text{Nº de toberas} = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\text{Longitud de la circunferencia}}{\text{Arco de inyección}} = \frac{0{,}636\,p}{0{,}3408} = 5{,}86 \quad \Rightarrow \quad 6 \text{ toberas} \quad ; \quad \varepsilon = 0{,}17065$$

es decir, el arco de inyección en grados es de, 360º/6 = 60º.

Sin embargo, para el gasto G = 7,5 kg/seg sólo se necesita 1 tobera, de las 6 posibles que entrarían en la circunferencia.

e) Pérdidas mecánicas

Las ***pérdidas mecánicas por rozamientos de los discos*** se determinan mediante la expresión,

$$P_1 = 3.10^{-7} D^{1,4} u^{2,8} \gamma = 3.10^{-7} \times 0{,}636^{1,4} \times 200^{2,8} \times \frac{1}{0{,}08624} = 5{,}1184\ \frac{Kcal}{seg} = \frac{5{,}1184}{7{,}5}\ \frac{Kcal}{kg} = 0{,}6824\ \frac{Kcal}{kg}$$

Las ***pérdidas de ventilación*** vienen originadas por el rozamiento de las aletas que no están sometidas a la inyección del vapor; se pueden determinar mediante la expresión:

$$P_2 = 1{,}35.1\ 0^{-5}\ D^{0,7}\ a\ u^{2,8}\ \gamma\ (1 - \varepsilon)\ \frac{Kcal}{seg} =$$

$$= 1{,}35.10^{-5} \times 0{,}636^{0,7} \times 0{,}015 \times 200^{2,8}\ \frac{1}{0{,}0834}\ (1 - 0{,}17065)\ \frac{Kcal}{seg} = 4{,}067\ \frac{Kcal}{seg} = \frac{4{,}067\ Kcal/seg}{7{,}5\ kg/seg} = 0{,}5423\ \frac{Kcal}{kg}$$

Las ***pérdidas debidas a la inyección parcial*** se determinan mediante la ecuación:

$$P_3 = 100\ \varepsilon\ (\varepsilon^{-0,07} - 1)\ \frac{\text{Salto interno}}{100}\ \frac{Kcal}{kg} = 100 \times 0{,}17065\ (0{,}17065^{-0,07} - 1)\ \frac{17{,}11\ Kcal/kg}{100} = 0{,}3847\ \frac{Kcal}{kg}$$

y son debidas a los remolinos producidos en los álabes de la corona móvil por la trayectoria diferente de las primeras ráfagas y de las últimas.

Pérdidas mecánicas totales: 0,6824 + 0,5423 + 0,3847 = 1,61 Kcal/kg

Con estos resultados el salto total es: $\Delta i_{total} = 18{,}17 - 1{,}61 = 16{,}56$ Kcal/kg

Rendimiento total parte de ACCION: $\eta_{total} = \dfrac{16,54}{23,13} = 0,715 = 71,5\%$

Rendimiento mecánico parte de ACCION: $\eta_{mec} = \dfrac{0,715}{0,785} = 0,911 = 91,1\%$

f) Presión, temperatura y volumen específico a la salida de este escalonamiento.

Salto total parte de acción: $23,13 \times 0,715 = 16,54$ Kcal/kg

$i_a = 792 - 23,13 = 768,87$ Kcal/kg $= 3218,5$ kJ/kg ; $i_{a'} = 792 - 16,54 = 775,46$ Kcal/kg $= 3246$ kJ/kg

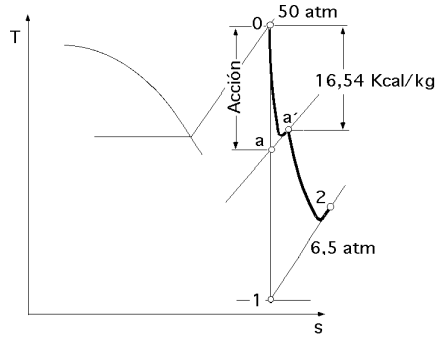
En el punto (a) se tiene: $\left\{ \begin{array}{l} i_a = 768,87 \text{ Kcal/kg} = 3218,5 \text{ kJ/kg} \\ s_a = s_0 = 1,6302 \text{ Kcal/kgºC} = 6,823 \text{ kJ/kgºC} \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} p_a \simeq 36 \text{ kg/cm}^2 \\ T_a \simeq 400ºC \\ v_a \simeq 0,082 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right.$

En el punto (a') se tiene: $\left\{ \begin{array}{l} i_{a'} = 3246 \text{ kJ/kg} \\ p_{a'} \simeq 36 \text{ kg/cm}^2 \end{array} \right\} \Rightarrow v_{a'} \simeq 0,0834 \text{ m}^3/\text{kg}$

g) Valor del nD^2 de la parte de reacción, sabiendo que:

$\varphi = 0,90$; $\alpha_1 = 20º$; $\psi = 0,90$; $\xi = 0,70$; $k = 0,9$; $\sigma = 0,5$; altura del álabe del primer escalón: 15 mm

En el primer escalonamiento de reacción la inyección es total



$$n D_1^2 = \frac{n D_1 \ G}{\pi a_1 k c_1 \ \text{sen}\ \alpha_1 \ \gamma_{vapor\,(1)}} = \frac{60\ G\ \xi_1 v_1}{\pi^2 a_1 k \ \text{sen}\ \alpha_1} = \frac{60 \times 7,5 \text{ kg/seg} \times 0,70 \times 0,0834 \text{ m}^3/\text{kg}}{\pi^2 \times 0,015 \times 0,9 \times \text{sen } 20º} = 576,5 \text{ m}^2$$

h) Diámetro del primer escalón: $D_1 = \sqrt{\dfrac{576,5}{6000}} = 0,31$ m

Velocidad tangencial del primer escalonamiento: $u_{1(\text{reacción})} = \dfrac{0,31}{2} \ \dfrac{6000\ \pi}{30} = 97,39 \ \dfrac{m}{seg}$

i) Nº de escalonamientos de reacción, si suponemos que todos son iguales ($\sigma = 0,5$)

$X = 2\ g\ \varphi^2 \xi^2 (1 - \sigma) = 427\ g \times 0,9^2 \times 0,7^2 = 1660,85$

Salto adiabático teórico total en la parte de reacción: 768,87 - 667,72 = 101,15 Kcal/kg

$$Z = \frac{X\ \Delta I_{ad(total)}}{u^2} = \frac{1660,85 \times 101,15}{97,39^2} = 17,4 \Rightarrow \text{18 escalones iguales, con } \Delta i_{ad(1\ escalón)} = \frac{101,15}{18} = 5,6 \ \frac{Kcal}{kg}$$

j) Nº de escalonamientos de reacción en el supuesto de que, $u_n/u_1 = 1,20$

Nº de Parsons de la parte de reacción con $\sigma = 0,5$.

$$X = \frac{427\ g}{(\frac{c_1}{u})^2 (\frac{1}{\varphi^2} - 1) + 2\ \frac{c_1}{u} \cos \alpha_1 - 1} = \frac{4185}{\frac{1}{0,7^2} (\frac{1}{0,9^2} - 1) + \frac{2 \cos 20º}{0,7} - 1} = 1934$$

$$\frac{(\frac{u_n}{u_1})^{2n/n-1} - 1}{(\frac{u_n}{u_1})^{2/n-1} - 1} = \left| \begin{array}{l} u_n = k\ u_{n-1} = k^{n-1} u_1 \\ k = (\frac{u_n}{u_1})^{1/(n-1)} = 1,2^{1/(n-1)} \end{array} \right| = \frac{1,2^{2n/n-1} - 1}{1,2^{2/n-1} - 1} = \frac{X\ \Delta I}{u_1^2} = \frac{1934 \times 101,15}{97,39^2} = 20,62 \Rightarrow n = 15$$

$$k = (\frac{u_n}{u_1})^{1/(n-1)} = 1{,}2^{1/(17-1)} = 1{,}01146$$

Con este valor obtenemos los diferentes escalonamientos de presión en la forma:

Primer escalón, con admisión total

$$u_{(1)} = 97{,}39\ \frac{m}{seg} \quad ; \quad c_{1(1)} = \frac{u_{(1)}}{\xi_1} = \frac{97{,}39}{0{,}7} = 139{,}12\ \frac{m}{seg}$$

$$w_{1_{(1)}} = \sqrt{c^2_{1_{(1)}} + u^2_{1_{(1)}} - 2\ c_{1_{(1)}}\, u_{1_{(1)}} \cos\alpha_1} = \sqrt{139{,}12^2 + 97{,}39^2 - (2 \times 139{,}12 \times 97{,}39 \cos 20º)} = 58{,}12 \text{ m/seg}$$

$$(\sigma = 0{,}5) \ \Rightarrow \ w_{1_{(1)}} = c_{2_{(1)}} = 58{,}12 \text{ m/seg} \quad ; \quad w_{2_{(1)}} = c_{1_{(1)}} = 139{,}12 \text{ m/seg}$$

$$\text{o también: } w_{2_{(1)}} = \psi \sqrt{8370\ \frac{u^2_{2_{(1)}}}{X} + w^2_{1_{(1)}}} = 0{,}9 \sqrt{8370\ \frac{97{,}39^2}{3868{,}27} + 58{,}12^2} = 139{,}12 \text{ m/seg}$$

$$\text{Salto adiabático: } c_{1_{(1)}} = \varphi \sqrt{g\, \Delta i_{ad\,(1)}} \quad \Rightarrow \quad \Delta i_{ad\,(1)} = \frac{(c_{1_{(1)}}/\varphi)^2}{427g} = \frac{(139{,}12/0{,}9)^2}{427g} = 5{,}71\ \frac{Kcal}{kg}$$

Segundo escalón, con admisión parcial

$$u_{(2)} = k\, u_{(1)} = 1{,}01146 \times 97{,}39 = 98{,}51\ \frac{m}{seg}$$

$$c_{1_{(2)}} = \frac{98{,}51}{0{,}7} = 140{,}72\ \frac{m}{seg}$$

$$w_{1_{(2)}} = \sqrt{c^2_{1_{(2)}} + u^2_{1_{(2)}} - 2\ c_{1_{(2)}}\, u_{1_{(2)}} \cos\alpha_1} = \sqrt{140{,}72^2 + 98{,}5^2 - (2 \times 140{,}72 \times 98{,}5 \cos 20º)} = 58{,}6 \text{ m/seg}$$

ó a partir de:

$$w_{2_{(2)}} = \psi \sqrt{8370\ \frac{u^2_2}{X} + w^2_{1_{(2)}}} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} w^2_{1_{(2)}} = (\frac{w_{2_{(2)}}}{\psi})^2 - 8370\ \frac{u^2_{(2)}}{X} = (\frac{140{,}7}{0{,}9})^2 - 8370\ \frac{98{,}51^2}{3868{,}27} = 3446{,}8 \\ w_{1_{(2)}} = 58{,}7 \text{ m/seg} \end{cases}$$

y así sucesivamente.

Salto adiabático correspondiente al escalón (2)

$$c_{1_{(2)}} = \varphi \sqrt{g\, \Delta i_{ad_{(2)}} + c^2_{2_{(2)}}} \quad \Rightarrow \quad \Delta i_{ad_{(2)}} = \frac{(c_{1_{(2)}}/j)^2 - c^2_{2_{(1)}}}{427\ g} = \frac{(140{,}72/0{,}9)^2 - 58{,}6^2}{427g} = 5\ \frac{Kcal}{kg}$$

$$T_{int_{(2)}} = \frac{c^2_{1_{(2)}} - (c^2_{2_{(2)}}/2)}{g} = \frac{140{,}72^2 - (58{,}6^2/2)}{g} = 1845\ \frac{Kgm}{kg} = 4{,}32\ \frac{Kcal}{kg}$$

ya que la energía dinámica a la salida se aprovecha en el siguiente escalón

$$\text{Rendimiento, } \eta_{int} = \frac{4{,}32}{5} = 0{,}86$$

Los saltos adiabáticos irán creciendo a medida que aumentan las velocidades

Para el escalón (14) , (escalón intermedio):

$$u_{(14)} = k^{13} u_{(1)} = 1{,}01146^{13} \times 98{,}51 = 114{,}24 \text{ m/seg}$$

$$c_{1(14)} = \frac{u_{(14)}}{\xi} = \frac{114{,}24}{0{,}7} = 163{,}2\ \frac{m}{seg} = w_2$$

$$w_{1(14)} = \sqrt{114{,}24^2 + 163{,}2^2 - (2 \times 114{,}24 \times 163{,}2 \cos 20)} = 68{,}15 \text{ m/seg} = c_{2(14)}$$

$$\Delta i_{ad(14)} = \frac{(c_{1(14)}/\varphi)^2 - c_{2(14)}^2}{427\ g} = \frac{(163{,}2/0{,}9)^2 - 68{,}15^2}{427g} = 6{,}75\ \frac{Kcal}{kg}$$

$$T_{int(14)} = \frac{c_{1(14)}^2 - (c_{2(14)}^2/2)}{g} = \frac{163{,}2^2 - (68{,}15^2/2)}{g} = 2480{,}8\ \frac{Kgm}{kg} = 5{,}8\ \frac{Kcal}{kg}$$

$$\text{Rendimiento del escalón (14)} = \frac{5{,}8}{6{,}75} = 0{,}86$$

****

16.- A una turbina de vapor ya construida se superpone una nueva TV de alta presión. El rendimiento interno de la antigua turbina es $\eta_{i(ant)}$ = 75% y el de la nueva $\eta_{i(nueva)}$ = 82%. La presión a la entrada de la turbina nueva es p_A= 150 bar y la temperatura T_A= 450ºC, y la presión a la salida p_B'= 40 bar. A continuación el vapor se recalienta a presión constante, entrando en la turbina antigua de baja presión a 400ºC, siendo la presión final en el condensador 0,2 bar. La turbina antigua desarrolla una potencia de 50.000 kW.

Determinar:

a) La potencia desarrollada por la nueva turbina superpuesta

b) El ahorro en consumo específico de calor en kJ/kW logrado con la superposición de la nueva turbina.

RESOLUCIÓN

El proceso termodinámico correspondiente a la instalación se representa en la figura en el diagrama i-s
Designaremos con (') a la turbina moderna y por (") a la antigua.

a) Potencia desarrollada por la nueva turbina superpuesta.- Con los datos del problema se determinan:

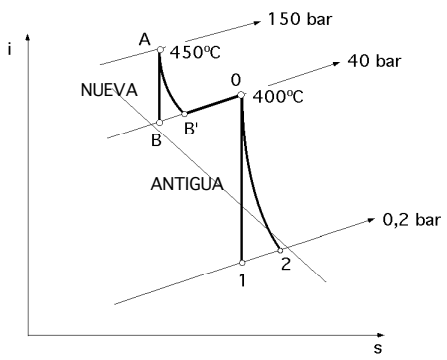
Punto A $\begin{cases} 150\ bar \\ 450ºC \end{cases} \Rightarrow v_A = 0{,}01844\ m^3/kg\ ;\ i_A = 3157\ kJ/kg\ ;\ s_A = 6{,}142\ kJ/kgºC$

Punto 0 $\begin{cases} 40\ bar \\ 400ºC \end{cases} \Rightarrow v_0 = 0{,}07334\ m^3/kg\ ;\ i_0 = 3214\ kJ/kg\ ;\ s_0 = 6{,}769\ kJ/kgºC$

Punto B $\begin{cases} 40\ bar \\ s_B = 6{,}142 \end{cases} \Rightarrow s_{B'} = 2.797\ kJ/kgºC\ ;\ s_{B''} = 6{,}07\ kJ/kgºC\ ;$ Vapor RECALENTADO $i_B = 2840\ kJ/kg$

Punto B', $i_{B'} = i_A - \eta_T (i_A - i_B) = 3157 - 0{,}82\ (3157 - 2840) = 2897\ kJ/kg$

Punto 1 $\begin{cases} s_1 = s_0 = 6{,}769\ kJ/kgºC \\ s_{1'} = 0{,}8321\ ;\ s_{1''} = 7{,}907 \\ i_{1'} = 251{,}5\ kJ/kg\ ;\ i_{1''} = 2609{,}1\ kJ/kg \end{cases} \Rightarrow$ Vapor HÚMEDO : $x_1 = \frac{s_1 - s_{1'}}{s_{1''} - s_{1'}} = \frac{6{,}769 - 0{,}8321}{7{,}907 - 0{,}8321} = 0{,}838$



$i_1 = 251{,}5 + (0{,}838 \times 2357{,}7) = 2227{,}4\ kJ/kg$

Nueva: $\Delta i_{ad(')} = i_A - i_B = 3157 - 2840 = 317\ kJ/kg \Rightarrow$

$\Rightarrow$ Salto interno (') $= 0{,}82 \times 317 = 260\ kJ/kg$

Antigua: $\Delta i_{ad(")} = i_0 - i_1 = 3214 - 2227{,}4 = 986{,}6\ kJ/kg \Rightarrow$

$\Rightarrow$ Salto interno (") $= 0{,}75 \times 986{,}6 = 740\ kJ/kg$

$i_{B'} = 3157 -$ Salto interno (') $= 3157 - 260 = 2897\ kJ/kg$

El consumo de vapor se obtiene a partir de la turbina antigua, en la forma:

$$\text{Consumo de vapor (se desprecian las pérd. mecánicas): } G = \frac{N''}{\text{Salto interno (")}} = \frac{50000\ kW}{740\ kJ/kg} = 67{,}57\ \frac{kg}{seg}$$

Potencia de la nueva turbina: $N' = 67{,}57\ kg/seg \times 260\ kJ/kg = 17567{,}56\ kW$

b) Ahorro en consumo específico de calor en kJ/kW logrado con la superposición de la nueva turbina.

Designaremos por $q_{1''}$ el consumo específico de calor por kW de la turbina antigua

Designaremos por q_1 el consumo específico de calor por kW en la instalación con la turbina nueva

El calor aplicado por la caldera a la turbina antigua: $Q_{1''} = i_0 - i_{1'} = 3214 - 251{,}46 = 2962{,}54$ kJ/kg

$$1\ \frac{kW}{hora} = 102\ \frac{Kgm}{seg}\ x\ 3600\ \frac{seg}{hora}\ x\ \frac{1}{427}\ \frac{Kcal}{Kgm} = 860\ \frac{Kcal}{hora} = 860\ \frac{Kcal}{hora}\ x\ 4{,}186\ \frac{kJ}{Kcal} = 3600\ \frac{kJ}{hora}$$

y el consumo específico por kW: $q_{1''} = \dfrac{Q_{1''}\ kJ/kg}{\text{Salto interno (kJ/kg)}\ \dfrac{1\ kW}{3600\ kJ}} = \dfrac{2962{,}54\ kJ/kg}{740\ (kJ/kg)\ \dfrac{1\ kW}{3600\ kJ}} = 14.412{,}4\ \dfrac{kJ}{hora}$

El calor aplicado por la caldera a toda la instalación Q_1 es:

$Q_1 = (i_A - i_{1'}) + (i_0 - i_{B'}) = (3157 - 251{,}46) + (3214 - 2897) = 3222{,}5$ kJ/kg

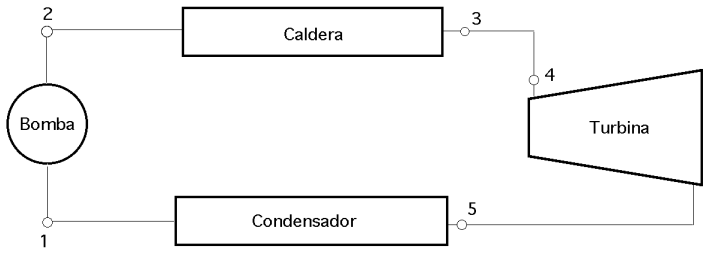
y el consumo específico de la instalación por kW: $q_1 = \dfrac{3222{,}5}{\dfrac{260 + 740}{3600}} = 11.600\ \dfrac{kJ}{kW}$

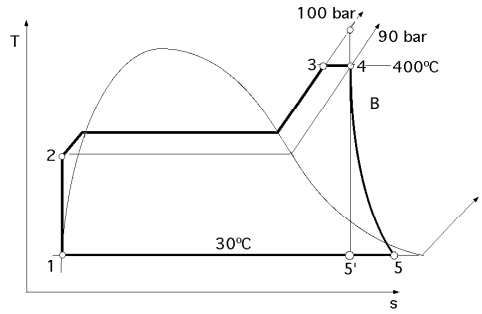
El ahorro energético es: 14412,4 - 11600 = 2812,4 kJ/kW

****

17.- Hallar el balance exergético de una instalación de turbina de vapor, sabiendo que:
Potencia calorífica del fuel, 40000 kJ/kg
Temperatura de la combustión, 1800ºC
Pérdidas de calor en la caldera, 12%
Presión del vapor a la salida de la caldera, 100 bar, y temperatura del vapor a la salida de la caldera, 400ºC
Presión a la entrada de la turbina, 90 bar, y temperatura a la entrada de la turbina, 400ºC
Temperatura a la entrada del condensador, 30ºC
Rendimiento isentrópico de la turbina, 80%
Condiciones ambientales, (estado muerto), 1 bar, 20ºC
Trabajo de bombeo; despreciable.

RESOLUCIÓN





Al despreciarse el trabajo de la bomba el punto (2) se confunde con el (1)

$$x_{5*} = \frac{s_{5*} - s_{5*'}}{s_{5*''} - s_{5*'}} = \frac{6{,}293 - 0{,}437}{8{,}455 - 0{,}437} = 0{,}73$$

$i_{5*} = i_{5*'} + x_{5*}\ (i_{5*''} - i_{5*'}) = 124{,}75 + 0{,}73\ (2556{,}44 - 124{,}75) = 1900$ kJ/kg$_{vapor}$

$i_5 = i_4 - \eta_T\ (i_4 - i_{5'}) = 3121 - 0{,}8\ (3121 - 1900) = 2144{,}3$ kJ/kg$_{vapor}$

$$x_{5*} = \frac{i_5 - i'_5}{s''_5 - s'_5} = \frac{2144{,}3 - 125{,}7}{2556{,}4 - 125{,}7} = 0{,}8304$$

$s_5 = s_{5'} + x_5\ (s_{5''} - s_{5'}) = ... = 7{,}096$ kJ/kgºC

Punto	Temperatura ºC	Presión, bar	Entalpía, kJ/kg	Entropía, kJ/kgºC	Título
1	30	0,0424	125,7	0,437	

2	30	0,0424	125,7	0,437	
3	400	100	3100	6,218	
4	400	90	3121	6,293	
5'	30	0,0424	1900	6,293	0,73
5	30	0,0424	21443	7,096	

Punto	$Ex = \{(i - i_0) - T_0 (s - s_0)\}\ G_v$ (kJ/ kg_{fuel})
1-2	(125,7 - 83,8) - 293 (0,437 - 0,294) = 0,001 kJ/kg vapor = 0,001 x 11,835 = 0,01183 kJ/kg fuel
3	(3100 - 83,8) - 293 (6,218 - 0,294) = 1280,5 kJ/kg vapor = 1280,5 x 11,835 = 15.154 kJ/kg fuel
4	(3121 - 83,8) - 293 (6,293 - 0,294) = 1279,5 kJ/kg vapor = 1279,5 x 11,835 = 15.142,8 kJ/kg fuel
5	(2144 - 83,8) - 293 (7,096 - 0,294) = 67,2 kJ/kg vapor = 67,2 x 11,835 = 799 kJ/kg fuel

Calor absorbido por el vapor en la caldera:

$Q_1 = G_v (i_3 - i_1)$ = Calor desprendido en la combustión, menos las pérdidas = 40000 x 0,88 = 35200 kJ/kg_{fuel}

Masa de vapor por kg_{fuel}: $G_v = \dfrac{Q_1}{i_3 - i_1} = \dfrac{35200\ kJ/kg_{fuel}}{(3100 - 125,7)\ kJ/kg_{vapor}} = 11,84\ \dfrac{kg_{vapor}}{kg_{fuel}}$

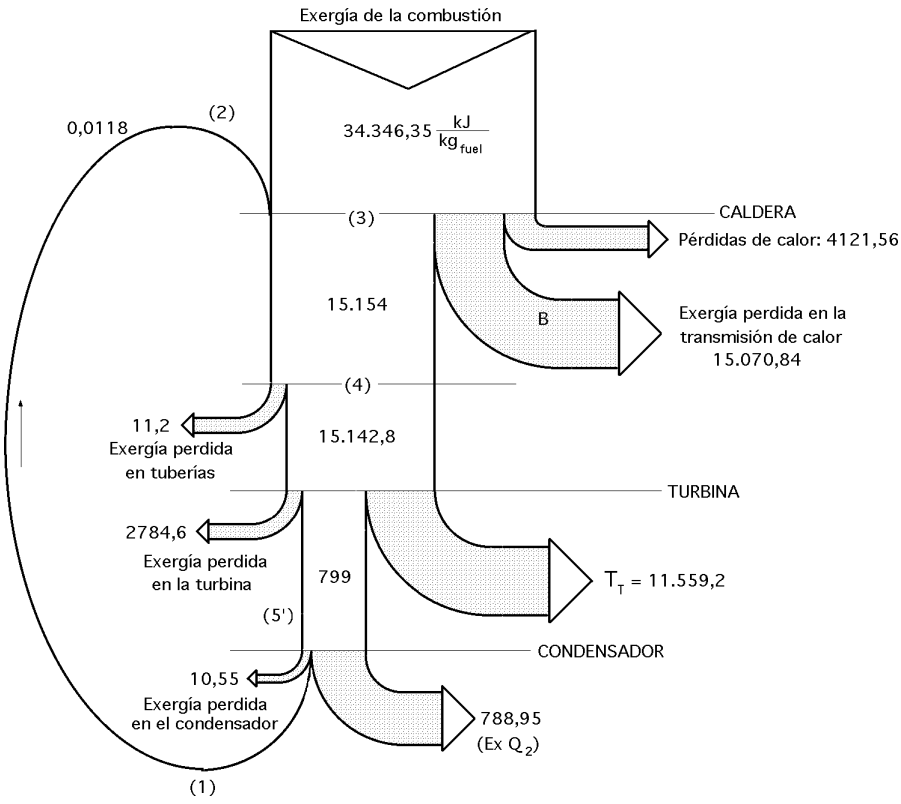
Exergías en los distintos puntos de la instalación: $Ex = \{(i - i_0) - T_0 (s - s_0)\}\ G_v\ \dfrac{kJ}{kg_{fuel}}$

Exergía de la combustión: $Ex_{combustión} = Q_1 \left(1 - \dfrac{T_0}{T_{combustión}}\right) = 40000 \left(1 - \dfrac{293}{1800 + 273}\right) = 34346,35\ \dfrac{kJ}{kg_{fuel}}$

Exergía (pérdidas de calor) en la caldera = 34346,35 x 0,12 = 4121,56 $\dfrac{kJ}{kg_{fuel}}$

Trabajo en la turbina = $G_v (i_4 - i_5) = 11,84\ \dfrac{kg_{vapor}}{kg_{fuel}}\ (3121 - 2144,3)\ \dfrac{kJ}{kg_{vapor}} = 11559,2\ \dfrac{kJ}{kg_{fuel}}$

Calor cedido al condensador: $Q_2 = G_v (i_5 - i_1) = 11,84\ (2144,3 - 125,7) = 23890,1\ \dfrac{kJ}{kg_{fuel}}$



Exergía del calor cedido al condensador $= 23890{,}1\ (1 - \frac{293}{303}) = 788{,}45\ \frac{kJ}{kg_{fuel}}$

Pérdida de exergía en la caldera $= (ex_{(2)} - ex_{(3)}) + Ex_{combustión} = (0 - 15154) + 34346{,}35 = 19192{,}4\ \frac{kJ}{kg_{fuel}}$

Esta pérdida de exergía en la caldera se compone de dos sumandos: (Pérdidas de calor por rendimiento caldera) + (Exergía perdida en la transmisión de calor desde la combustión a la caldera), por lo que:

Pérdida exergía combustión caldera $= 19192{,}4 - 4121{,}56 = 15070{,}84\ \frac{kJ}{kg_{fuel}}$

Pérdida exergía en tuberías $= ex_{(3)} - ex_{(4)} = 15154 - 15142{,}8 = 11{,}2\ \frac{kJ}{kg_{fuel}}$

Pérdida exergía en la turbina $= (ex_{(4)} - ex_{(5)}) - T_{Turb} = 15142{,}8 - 799 - 11559{,}2 = 2784{,}6\ \frac{kJ}{kg_{fuel}}$

$$\text{Rendimiento exergético} = \frac{T_{útil}}{Ex_{combustión}} = \frac{11.559{,}2}{34.346{,}35} = 0{,}337 = 33{,}7\%$$

****

18.- El vapor de una turbina penetra en la misma a la presión de 80 atm y temperatura 400ºC, y se expansiona hasta la presión de 3 atm, con un rendimiento del 85%. El primer escalonamiento de regulación, CURTIS, está diseñado para que en el mismo se realice una expansión 2/1, es decir, pasa de 80 a 40 atm en condiciones normales.

a) Si la turbina se regula en forma cuantitativa (admisión parcial) hasta reducir el gasto de vapor al 70% del valor de diseño, determinar el grado de carga de la turbina y el rendimiento interno, suponiendo que el escalonamiento de regulación funciona con un rendimiento del 65%.

b) Si la turbina se regula en forma cualitativa (laminado en la válvula de admisión) hasta reducir el gasto de vapor al 70% del valor de diseño, determinar el grado de carga de la turbina y el rendimiento interno, suponiendo que se mantienen las condiciones del apartado a.

RESOLUCIÓN

a) ***Si la turbina se regula en forma cuantitativa*** (admisión parcial) hasta reducir el gasto de vapor al 70% del valor de diseño, quiere decir que habrá una nueva presión de regulación. En estas circunstancias las condiciones del vapor a la entrada A se mantienen, pero no a la salida, pasándose no a una presión de 40 atm que era la de regulación de diseño, sino a otra inferior $p_{1'}$.

Entalpía punto A: 80 atm y 400ºC $\Rightarrow$ $\begin{cases} i_A = 3139\ kJ/kg \\ s_A = 6{,}364\ kJ/kgºC \end{cases}$

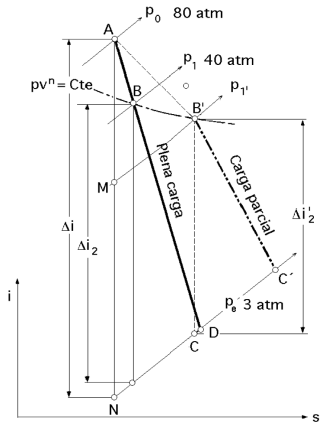
Punto N: $\begin{cases} 3\ atm \\ s_N = s_A = 6{,}364\ \frac{kJ}{kgºC} \end{cases}$ $\xrightarrow{\text{vapor HUMEDO}}$ $\begin{cases} x_N = \frac{6{,}364 - 1{,}672}{6{,}992 - 1{,}672} = 0{,}882 \\ i_N = 561{,}4 + (0{,}882 \times 2163{,}9) = 2470\ \frac{kJ}{kg} \end{cases}$

Punto D: $\eta = \frac{i_A - i_D}{i_A - i_N} \Rightarrow i_D = i_A - \eta\ (i_A - i_N) = 3139 - 0{,}85 \times (3139 - 2470) = 2570{,}35\ \frac{kJ}{kg}$

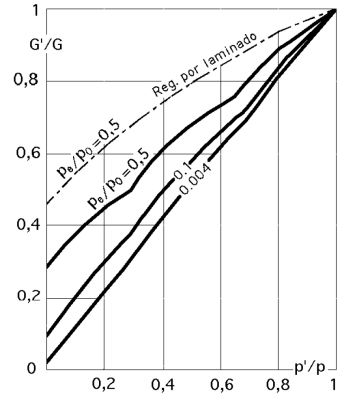
La presión $p_{1'}$ se calcula en la forma:

$$\left.\begin{aligned} \frac{p_{1'}^2}{p_e^2} - \frac{G'^2}{b^2} = 1 \\ \frac{p_1^2}{p_e^2} - \frac{G^2}{b^2} = 1 \end{aligned}\right\} \xrightarrow{\text{eliminando b}} \frac{p_{1'}^2 - p_e^2}{p_1^2 - p_e^2} = \frac{G'^2}{G^2} \quad ; \quad \frac{p_{1'}^2 - 3^2}{40^2 - 3^2} = 0{,}7^2 \Rightarrow p_{1'} = 28{,}08\ atm$$

que es la nueva presión de salida del primer escalón; ésto quiere decir que al disminuir el gasto, la relación de presiones 2/1 no se mantiene, pasando p_1 a valer $p_{1'} = 28{,}08$ atm.



Línea de expansión (Regulación por admisión parcial)



Valores de regulación por admisión parcial

Punto M: 28,08 atm y $s_M = 6{,}364\ \frac{kJ}{kg^oC} \Rightarrow i_M = 2883\ \frac{kJ}{kg}$

Como el escalón de regulación funciona con un rendimiento del 65%, se tiene:

$$0{,}65 = \frac{i_A - i_{B'}}{i_A - i_M} = \frac{3139 - i_{B'}}{3139 - 2883} \Rightarrow \begin{cases} i_{B'} = 3139 - 0{,}65\ (3139 - 2883) = 3139 - 166{,}5 = 2972{,}6\ kJ/kg \\ s_{B'} = 6{,}5627\ kJ/kg^oK \end{cases}$$

siendo el salto interno de este escalón de 166,5 kJ/kg.

Punto C: 3 atm y $s_C = s_{B'} = 6{,}5627\ \frac{kJ}{kg^oC} \Rightarrow$ Vapor HÚMEDO $\Rightarrow \begin{cases} x_C = \frac{6{,}5627 - 1{,}672}{6{,}992 - 1{,}672} = 0{,}92 \\ i_C = 561{,}4 + (0{,}92 \times 2163{,}9) = 2550{,}6\ \frac{kJ}{kg} \end{cases}$

El salto isentrópico puesto a disposición del resto de los escalonamientos es,

$$i_{B'} - i_C = Di_{2'} = 2972{,}6 - i_C = 2972{,}6 - 2550{,}6 = 422\ \frac{kJ}{kg}$$

Punto C' $\Rightarrow \eta = \frac{i_{B'} - i_{C'}}{i_{B'} - i_C} \Rightarrow 0{,}85 = \frac{2972{,}6 - i_{C'}}{2972{,}6 - 2550} \ ; \ i_{C'} = 2614\ \frac{kJ}{kg}$

El salto interno de la máquina es: $i_A - i_{C'} = 3139 - 2614 = 525\ \frac{kJ}{kg}$

El grado de carga es = $\frac{N'}{N_{diseño}} = \frac{G'}{G}\ \frac{\Delta i_{int}}{\Delta i_{adiab}} = 0{,}7\ \frac{525}{i_A - i_N} = 0{,}7\ \frac{525}{3139 - 2570{,}35} = 0{,}6462$

a partir de la cual se puede calcular la nueva potencia

Rendimiento interno de la turbina, $\eta_{int} = \frac{i_A - i_{C'}}{i_A - i_N} = \frac{3139 - 2614}{3139 - 2470} = 0{,}7847 = 78{,}47\%$

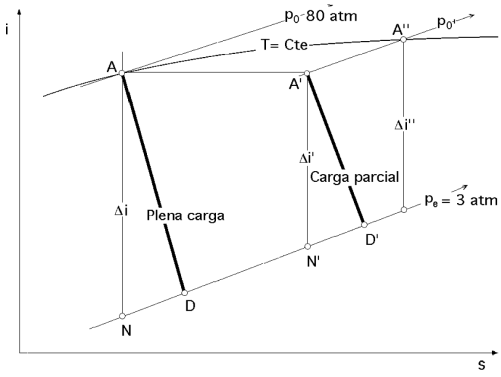
b) ***Si la turbina se regula en forma cualitativa*** (laminado en la válvula de admisión) hasta reducir el gasto de vapor al 70% del valor de diseño, con un rendimiento interno 0,7847, se tiene:

$$\frac{\Delta p_{0'}}{\Delta p_0} = \frac{G'\ \Delta i'\ \eta'}{G\ \Delta i\ \eta} = \left| \begin{matrix} \Delta i' = \Delta i \\ \eta' = \eta \end{matrix} \right| = \frac{G'}{G} \Rightarrow \frac{p_{0'} - 3}{80 - 3} = \frac{G'}{G} = 0{,}7 \Rightarrow p_{0'} = 56{,}9\ atm$$

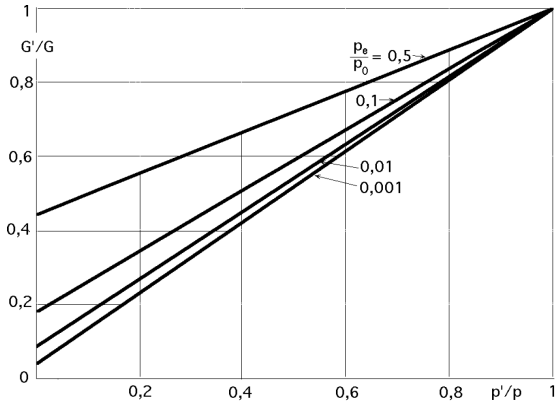
Punto A': $\begin{cases} i_A = i_{A'} = 3139\ kJ/kg \\ p_{A'} = 56{,}9\ atm \end{cases} \xrightarrow{\text{Vapor recalentado}} s_{A'} = 6{,}52\ \frac{kJ}{kg^oC}$

Punto N': $\begin{cases} p_e = 3\ atm \\ s_{N'} = 6{,}52\ kJ/kg^oC \end{cases} \xrightarrow{\text{Vapor HUMEDO}} \begin{cases} x_{N'} = \frac{6{,}52 - 1{,}672}{6{,}992 - 1{,}672} = 0{,}9112 \\ i_{N'} = 561{,}4 + (0{,}9112 \times 2163{,}9) = 2533{,}3\ \frac{kJ}{kg} \end{cases}$

Rendimiento interno de la turbina: $\eta_{int} = \frac{i_{A'} - i_{D'}}{i_{A'} - i_{N'}} = \frac{3139 - i_{D'}}{3139 - 2533{,}3} = 0{,}7847 \Rightarrow i_{D'} = 2663{,}7\ \frac{kJ}{kg}$



Línea de expansión
(Regulación por laminado en la válvula de admisión)



Representación de G´/G en función de $p_{0'}$

El grado de carga es: $\frac{N'}{N_{diseño}} = \frac{G'}{G}\frac{\Delta i_{int}}{\Delta i_{adiab}} = 0{,}7\ \frac{i_{A'} - i_{D'}}{i_A - i_D} = 0{,}7\ \frac{3139 - 2663{,}7}{3139 - 2570{,}35} = 0{,}5851$

y el rendimiento del ciclo: $\eta = \frac{i_{A'} - i_{D'}}{i_A - i_N} = \frac{3139 - 2663{,}7}{3139 - 2470} = 0{,}71 = 71\%$

****