ENUNCIADO EJERCICIO 03

Representar los triángulos de velocidades de una turbina Curtis con tres escalonamientos de velocidad que desarrolla 1500 kW a 2500 rpm. Sabiendo que las condiciones del vapor a la entrada de la turbina son 60 bar y 400 ºC y que la presión de salida es de 5 bar.

Se supondrá que la turbina está funcionando en condiciones de máximo rendimiento y que los álabes y paletas inversoras son simétricos y sin pérdidas de velocidad en los mismos.

El rendimiento isoentrópico de la tobera es de 0,9 y el ángulo de salida de las mismas es α_1=20º

Determinar:

1. Las pérdidas en los distintos elementos de la turbina.
2. El diámetro medio del escalonamiento.
3. La potencia suministrada por cada uno de los escalonamientos.

Datos:

Condiciones a la entrada de la tobera

$t_0 = 400$ [C]

$p_0 = 60$ [bar]

Presión de salida de la turbina

$p_1 = 5$ [bar]

Ángulo de salida

$\alpha_{1;1} = 20$ [deg]

$h_0 = \mathbf{h}(\text{Steam}; T = t_0; P = p_0)$

$s_0 = \mathbf{s}(\text{Steam}; T = t_0; P = p_0)$

$h_1 = \mathbf{h}(\text{Steam}; s = s_0; P = p_1)$

$\Delta h_s = h_0 - h_1$

$$\Delta h_s \cdot \left| 1000 \cdot \frac{J}{kJ} \right| = \frac{c_{1;s}^2}{2}$$

Rendimiento isoentrópico de la turbina

$\phi = 0{,}9$

Coeficiente de simetría

$k = 1$

Coeficiente de pérdida de velocidad en corona directriz

$\psi = 1$

$c_{1;1} = \phi \cdot c_{1;s}$

Número de escalones de velocidad

$n = 3$

Velocidad periférica de rendimiento máximo

$$u = \frac{1}{2 \cdot n} \cdot c_{1;1} \cdot \cos(\alpha_{1;1})$$

$$W_{1;1}^2 = c_{1;1}^2 + u^2 - 2 \cdot u \cdot c_{1;1} \cdot \cos(\alpha_{1;1})$$

$$W_{1;1} \cdot \cos(\beta_{1;1}) + u = c_{1;1} \cdot \cos(\alpha_{1;1})$$

$W_{2;1} = W_{1;1} \cdot \psi$

$\beta_{1;1} = \beta_{2;1} \cdot k$

$c_{2;1}{}^2 = W_{2;1}{}^2 + u^2 - 2 \cdot u \cdot W_{2;1} \cdot \cos(\beta_{2;1})$

U en caso de ser >u tenerlo en cuenta en el triángulo de velocidades

$W_{2;1;u} = W_{2;1} \cdot \cos(\beta_{2;1})$

$W_{2;1} \cdot \cos(\beta_{2;1}) = u + c_{2;1} \cdot \cos(\alpha_{2;1})$

Primera corona directriz

$c_{1;2} = c_{2;1}$

$\alpha_{1;2} = \alpha_{2;1}$

$W_{1;2}{}^2 = c_{1;2}{}^2 + u^2 - 2 \cdot u \cdot c_{1;2} \cdot \cos(\alpha_{1;2})$

$W_{1;2} \cdot \cos(\beta_{1;2}) + u = c_{1;2} \cdot \cos(\alpha_{1;2})$

$W_{2;2} = W_{1;2} \cdot \psi$

$\beta_{1;2} = \beta_{2;2} \cdot k$

$c_{2;2}{}^2 = W_{2;2}{}^2 + u^2 - 2 \cdot u \cdot W_{2;2} \cdot \cos(\beta_{2;2})$

$W_{2;2;u} = W_{2;2} \cdot \cos(\beta_{2;2})$

$W_{2;2} \cdot \cos(\beta_{2;2}) = u + c_{2;2} \cdot \cos(\alpha_{2;2})$

Segunda corona directriz

$c_{1;3} = c_{2;2}$

$\alpha_{1;3} = \alpha_{2;2}$

$W_{1;3}{}^2 = c_{1;3}{}^2 + u^2 - 2 \cdot u \cdot c_{1;3} \cdot \cos(\alpha_{1;3})$

$W_{1;3} \cdot \cos(\beta_{1;3}) + u = c_{1;3} \cdot \cos(\alpha_{1;3})$

$W_{2;3} = W_{1;3} \cdot \psi$

$\beta_{1;3} = \beta_{2;3} \cdot k$

$c_{2;3}{}^2 = W_{2;3}{}^2 + u^2 - 2 \cdot u \cdot W_{2;3} \cdot \cos(\beta_{2;3})$

$W_{2;3;u} = W_{2;3} \cdot \cos(\beta_{2;3})$

$W_{2;3} \cdot \cos(\beta_{2;3}) = u + c_{2;3} \cdot \cos(\alpha_{2;3})$

Pérdidas en los distintos componentes

$$Y_E = \frac{c_{1;s}{}^2}{2} \cdot (1 - \phi^2) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

Pérdidas en primera corona móvil

$$Y_{R;1} = \frac{W_{1;1}{}^2}{2} \cdot (1 - \psi^2) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

Pérdidas en primera corona directriz

$$Y_{D;1} = \frac{c_{2;1}{}^{2}}{2} \cdot (1 - \psi^{2}) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

Pérdidas en segunda corona móvil

$$Y_{R;2} = \frac{W_{1;2}{}^{2}}{2} \cdot (1 - \psi^{2}) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

Pérdidas en segunda corona directriz

$$Y_{D;2} = \frac{c_{2;2}{}^{2}}{2} \cdot (1 - \psi^{2}) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

Pérdidas en tercera corona móvil

$$Y_{R;3} = \frac{W_{1;3}{}^{2}}{2} \cdot (1 - \psi^{2}) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

Pérdidas de velocidad en salida

$$Y_{2} = \frac{c_{2;3}{}^{2}}{2} \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

$$W_{u;1} = u \cdot (c_{1;1} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{1;1}) - c_{2;1} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{2;1})) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

$$W_{u;2} = u \cdot (c_{1;2} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{1;2}) - c_{2;2} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{2;2})) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

$$W_{u;3} = u \cdot (c_{1;3} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{1;3}) - c_{1;3} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{2;3})) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

$$W_{u} = W_{u;1} + W_{u;2} + W_{u;3}$$

Potencia de la turbina

$$N_{e} = 1500 \quad [kW]$$

$$N_{e} = \dot{m} \cdot w_{u}$$

$$rpm = 2500$$

$$w = 2 \cdot \pi \cdot \frac{rpm}{60}$$

$$u = w \cdot D_{medio} \cdot 1 / 2$$

$$N_{e;1} = \dot{m} \cdot u \cdot (c_{1;1} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{1;1}) - c_{2;1} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{2;1})) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

$$N_{e;2} = \dot{m} \cdot u \cdot (c_{1;2} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{1;2}) - c_{2;2} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{2;2})) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

$$N_{e;3} = \dot{m} \cdot u \cdot (c_{1;3} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{1;3}) - c_{2;3} \cdot \mathbf{cos}(\alpha_{2;3})) \cdot \left| 0{,}001 \cdot \frac{kJ}{J} \right|$$

RESOLUCION EN EES

```
"Datos a la entrada de la turbina"

t_0 = 400 [C]
p_0 = 60 [bar]
p_1 = 5 [bar]                                    "Presión de salida de la turbina"

alpha_1_1 = 20 [deg]                             "Ángulo de salida"

h[0]=Enthalpy(Steam;T=t_0;P=p_0)
s[0]=Entropy(Steam;T=t_0;P=p_0)

h[1]=Enthalpy(Steam;s=s[0];P=p_1)

DELTAh_s = h[0] - h[1]

DELTAh_s * convert(kJ;J) = c_1_s^2 / 2

phi = 0,9                                        "Rendimiento isoentrópico de la
turbina"

k = 1                                            "Coeficiente de simetría"

psi = 1                                          "Coeficiente de pérdida de velocidad
en corona directriz"

c_1_1 = phi * c_1_s

"Número de escalones de velocidad"

n = 3

"Velocidad periférica de rendimiento máximo"

u = 1/ (2 * n) * c_1_1 * cos(alpha_1_1)

W_1_1^2 = c_1_1^2 + u^2 - 2*u*c_1_1 * cos(alpha_1_1)

W_1_1 * cos(beta_1_1) + u = c_1_1 * cos(alpha_1_1)

W_2_1 = W_1_1 * psi

beta_1_1 = beta_2_1 * k

c_2_1^2 = W_2_1^2 + u^2 - 2 * u * W_2_1 * cos(beta_2_1)

W_2_1_u = W_2_1 * cos(beta_2_1)                  "U en caso de ser >u tenerlo en cuenta
en el triángulo de velocidades"

W_2_1 * cos(beta_2_1) = u + c_2_1 * cos(alpha_2_1)

"Primera corona directriz"

c_1_2 = c_2_1

alpha_1_2 = alpha_2_1
```

```
W_1_2^2 = c_1_2^2 + u^2 - 2*u*c_1_2 * cos(alpha_1_2)

W_1_2 * cos(beta_1_2) + u = c_1_2 * cos(alpha_1_2)

W_2_2 = W_1_2 * psi

beta_1_2 = beta_2_2 * k

c_2_2^2 = W_2_2^2 + u^2 - 2 * u * W_2_2 * cos(beta_2_2)

W_2_2_u = W_2_2 * cos(beta_2_2)

W_2_2 * cos(beta_2_2) = u + c_2_2 * cos(alpha_2_2)

"Segunda  corona directriz"

c_1_3 = c_2_2

alpha_1_3 = alpha_2_2

W_1_3^2 = c_1_3^2 + u^2 - 2*u*c_1_3 * cos(alpha_1_3)

W_1_3 * cos(beta_1_3) + u = c_1_3 * cos(alpha_1_3)

W_2_3 = W_1_3 * psi

beta_1_3 = beta_2_3 * k

c_2_3^2 = W_2_3^2 + u^2 - 2 * u * W_2_3 * cos(beta_2_3)

W_2_3_u = W_2_3 * cos(beta_2_3)

W_2_3 * cos(beta_2_3) = u + c_2_3 * cos(alpha_2_3)

"Pérdidas en los distintos componentes"

"Pérdidas en el estator"

Y_E = c_1_s^2/2 * (1 - phi^2) *convert(J;kJ)

Y_R_1 = W_1_1^2 / 2 * (1 - psi^2)*convert(J;kJ)     "Pérdidas en primera corona móvil"
Y_D_1 = c_2_1^2 / 2 * (1 - psi^2)*convert(J;kJ)     "Pérdidas en primera  corona directriz"
Y_R_2 = W_1_2^2 / 2 * (1 - psi^2)*convert(J;kJ)     "Pérdidas en segunda corona móvil"
Y_D_2 = c_2_2^2 / 2 * (1 - psi^2)*convert(J;kJ)     "Pérdidas en seguna  corona directriz"
Y_R_3 = W_1_3^2 / 2 * (1 - psi^2)*convert(J;kJ)     "Pérdidas en tercera corona móvil"

Y_2 = c_2_3^2/2*convert(J;kJ)                        "Pérdidas de velocidad en salida"

W_u_1 = u * (c_1_1 * cos(alpha_1_1) - c_2_1 * cos(alpha_2_1)) * convert(J;kJ)
W_u_2 = u * (c_1_2 * cos(alpha_1_2) - c_2_2 * cos(alpha_2_2)) * convert(J;kJ)
W_u_3 = U * (c_1_3 * cos(alpha_1_3) - c_1_3 * cos(alpha_2_3)) * convert(J;kJ)

W_u = W_u_1 + W_u_2 + W_u_3

"Potencia de la turbina"
N_e = 1500 [kW]
```

N_e = m_dot * w_u

rpm = 2500

w = 2 * pi *rpm / 60

u = w * D_medio * 1/2

N_e_1 = m_dot * u * ((c_1_1 * cos(alpha_1_1) - c_2_1 * cos(alpha_2_1))) * convert(J;kJ)
N_e_2 = m_dot * u * (((c_1_2 * cos(alpha_1_2) - c_2_2 * cos(alpha_2_2)))) * convert(J;kJ)
N_e_3 = m_dot * u * (((c_1_3 * cos(alpha_1_3) - c_2_3 * cos(alpha_2_3)))) * convert(J;kJ)

Resultados

alpha_1_1=20 [deg]
alpha_1_2=28,63 [deg]
alpha_1_3=47,52 [deg]
alpha_2_1=28,63 [deg]
alpha_2_2=47,52 [deg]
alpha_2_3=90 [deg]
beta_1_1=23,59 [deg]
beta_1_2=323,9 [deg]
beta_1_3=65,4 [deg]
beta_2_1=23,59 [deg]
beta_2_2=323,9 [deg]
beta_2_3=65,4 [deg]
c_1_1=942 [m/s]
c_1_2=672,4 [m/s]
c_1_3=436,9 [m/s]
c_1_s=1047 [m/s]
c_2_1=672,4 [m/s]
c_2_2=436,9 [m/s]
c_2_3=322,2 [m/s]
DELTAh_s=547,8 [kJ/kg]
D_medio=1,127 [m]
k=1
m_dot=11,49 [kg/sec]
n=3
N_e=1500 [kW]
N_e_1=500 [kW]
N_e_2=500 [kW]
N_e_3=500 [kW]
phi=0,9
psi=1
p_0=60 [bar]
p_1=5 [bar]
rpm=2500 [rad/sec]
t_0=400 [C]
u=147,5 [m/s]
w=261,8 [rad/sec]
W_1_1=805 [m/s]
W_1_2=547,5 [m/s]
W_1_3=354,4 [m/s]
W_2_1=805 [m/s]
W_2_1_u=737,7 [m/s]

W_2_2=547,5 [m/s]
W_2_2_u=442,6 [m/s]
W_2_3=354,4 [m/s]
W_2_3_u=147,5 [m/s]
W_u=130,6 [kJ/kg]
W_u_1=43,53 [kJ/kg]
W_u_2=43,53 [kJ/kg]
W_u_3=43,53 [kJ/kg]
Y_2=51,9 [kJ/kg]
Y_D_1=0 [kJ/kg]
Y_D_2=0 [kJ/kg]
Y_E=104,1 [kJ/kg]
Y_R_1=0 [kJ/kg]
Y_R_2=0 [kJ/kg]
Y_R_3=0 [kJ/kg]

h[i]	s[i]
[kJ/kg]	[kJ/kg-K]
3177	6,54
2629	