

ME-5300 MAQUINAS

Capítulo 2. TURBINAS DE VAPOR

2.1 ANALISIS DE RENDIMIENTOS EN TURBINAS DE VAPOR

- **Rendimiento, Trabajo y Potencia Periférica (η_k)**

✓ En Turbinas de Acción **en ausencia** de “roce”, lo había definido y llegado a la expresión:

$$\eta_k = 2 \cdot \frac{u}{C_{ad}} \cdot \frac{(C_{U1} - C_{U2})}{C_{ad}}$$

✓ En Turbinas de Acción, **si se considera “roce”** en estatores y rotores, el rendimiento periférico se escribe:

$$\eta'_k = 2(1+\psi) \frac{u}{C_{ad}} \left[\phi \cos \alpha_1 - \frac{u}{C_{ad}} \right]$$

$$W'_k = \Delta h'_k = \Delta h_{ad} - Z_1 \quad \text{Pérdidas sólo debido a irreversibilidades internas (“roce”)}$$

De modo que :

$$\eta'_k = \frac{W'_k}{\Delta h_{ad}} = \frac{\Delta h_{ad} - Z_1}{\Delta h_{ad}} = 1 - \frac{Z_1}{\Delta h_{ad}} \quad (\text{En general : } \dot{Z} = \dot{m}_S \cdot Z)$$

$$\dot{W}'_k = \dot{m}_S \cdot \Delta h'_k = \dot{m}_S \cdot (\Delta h_{ad} - Z_1)$$

✓ Es necesario considerar la Pérdidas por Velocidad o Energía Cinética Residual (Z_2).

✓ La Pérdida por Velocidad o Energía Cinética Residual depende del tipo de turbina y de su configuración.

✓ Para el caso de una Turbina de Laval: $Z_2 = \frac{1}{2} \cdot C_2^2$

$$W_k = \Delta h_k = \Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2)$$

$$\eta_k = \frac{W_k}{\Delta h_{ad}} = \frac{\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2)}{\Delta h_{ad}} = 1 - \frac{(Z_1 + Z_2)}{\Delta h_{ad}}$$

$$\dot{W}_k = \dot{m}_s \cdot \Delta h_k = \dot{m}_s \cdot [\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2)]$$

✓ Otra manera de ver el rendimiento periférico en Turbinas de Acción es a través de los conceptos de Rendimiento de tobera (estatores) y de álabe (rotores):

$$\eta_k = \eta_{Tobera} \cdot \eta_{Alabes}$$

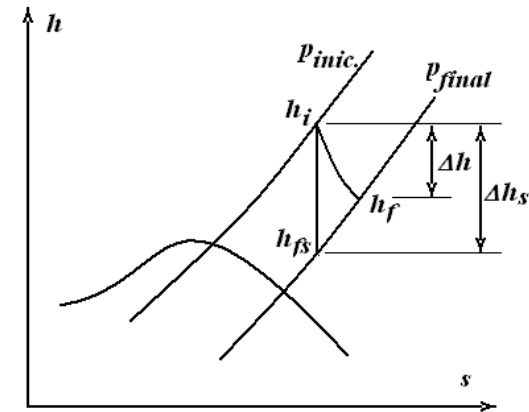
$$\eta_{tobera} = \frac{(h_{inic} + \frac{1}{2} C_{inic}^2) - h_{final}}{(h_{inic} + \frac{1}{2} C_{inic}^2) - h_{final,S}} = \frac{\Delta h + \frac{1}{2} C_{inic}^2}{\Delta h_S + \frac{1}{2} C_{inic}^2}$$

Si velocidad vapor entrada a la turbina es pequeño $C_{inic} \approx 0$

$$\Rightarrow \eta_{tobera} = \frac{\Delta h}{\Delta h_S} = \frac{\frac{1}{2} C^2}{\Delta h_S}$$

C = Velocidad a la salida de Toberas

$$\Rightarrow \eta_{Alabes} = \frac{2u \Delta C_u}{C^2}$$



- **Rendimiento Volumétrico (η_v)**

- ✓ Es necesario definir este rendimiento porque está ligado a las pérdidas Z_3 , es decir ligadas a las fugas de caudal másico:

$$\eta_v = \frac{\text{Caudal útil de vapor}}{\text{Caudal suministrado de vapor}} = \frac{\dot{m}_U}{\dot{m}_S}$$

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_S - \Delta\dot{m}}{\dot{m}_S} = \frac{\dot{m}_S - (\Delta\dot{m}_{\text{int}} + \Delta\dot{m}_{\text{ext}})}{\dot{m}_S}$$

- **Rendimiento Interno (η_i)**

- ✓ Se toman en cuenta todas las pérdidas internas:

$$W_i = \Delta h_i = \Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_{3,\text{int}} + Z_4)$$

$$\eta_i = \frac{W_i}{\Delta h_{ad}} = \frac{\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_{3,\text{int}} + Z_4)}{\Delta h_{ad}} = 1 - \frac{(Z_1 + Z_2 + Z_{3,\text{int}} + Z_4)}{\Delta h_{ad}}$$

$$\dot{W}_i = \dot{m}_S \cdot \Delta h_i = \dot{m}_S \cdot [\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_{3,\text{int}} + Z_4)]$$

- ✓ La pérdida $Z_{3,\text{int}}$ en general es difícil de evaluar y depende del tipo de turbina y de su configuración; incluso en Turbinas Curtis $Z_{3,\text{int}} \approx 0$.
- ✓ Otra posibilidad es no considerar $Z_{3,\text{int}}$, pero usar \dot{m}_U en lugar de \dot{m}_S , de modo que:

$$\dot{W}_i = \dot{m}_U \cdot \Delta h_i = \dot{m}_U \cdot [\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_4)]$$

- ✓ O bien, usando el concepto de rendimiento volumétrico:

$$\dot{W}_i = \dot{m}_U \cdot [\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_4)] = \eta_V \cdot \dot{m}_S \cdot [\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_4)]$$

- **Rendimiento Efectivo, al Eje o al Freno (η_f):**

- ✓ Se toman en cuenta todas las pérdidas, internas y externas:

$$W_f = \Delta h_f = \Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_{3,int} + Z_4 + Z_{3,ext} + Z_5 + Z_6)$$

$$\eta_f = \frac{W_f}{\Delta h_{ad}} = \frac{\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_{3,int} + Z_4 + Z_{3,ext} + Z_5 + Z_6)}{\Delta h_{ad}}$$

$$\eta_f = \frac{W_f}{\Delta h_{ad}} = 1 - \frac{(Z_1 + Z_2 + Z_{3,int} + Z_4 + Z_{3,ext} + Z_5 + Z_6)}{\Delta h_{ad}}$$

$$\dot{W}_f = \dot{m}_S \cdot \Delta h_f = \dot{m}_S \cdot [\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_{3,int} + Z_4 + Z_{3,ext} + Z_5 + Z_6)]$$

- ✓ Las mismas observaciones son válidas aquí para ambas pérdidas Z_3 ($Z_{3,int}$ y $Z_{3,ext}$)
- ✓ Otra posibilidad es no considerar $Z_{3,int}$, pero usar \dot{m}_U en lugar de \dot{m}_S , de modo que:

$$\dot{W}_f = \dot{m}_U \cdot \Delta h_f = \dot{m}_U \cdot [\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_6)]$$

- ✓ O bien, usando el concepto de rendimiento volumétrico:

$$\dot{W}_f = \dot{m}_U \cdot [\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_6)] = \eta_V \cdot \dot{m}_S \cdot [\Delta h_{ad} - (Z_1 + Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_6)]$$

- **Rendimiento Mecánico (η_m)**

- ✓ Se trata de la energía perdida por fricción del eje con cojinetes y rodamientos
- ✓ Íntimamente relacionado con la pérdida Z_6 :

$$\eta_m = \frac{\Delta h_f}{\Delta h_i} = \frac{W_f}{W_i} \quad \Rightarrow \quad \eta_m = \frac{\Delta h_f / \Delta h_{ad}}{\Delta h_i / \Delta h_{ad}} = \frac{\eta_f}{\eta_i}$$

$$\Rightarrow \eta_f = \eta_i \eta_m$$

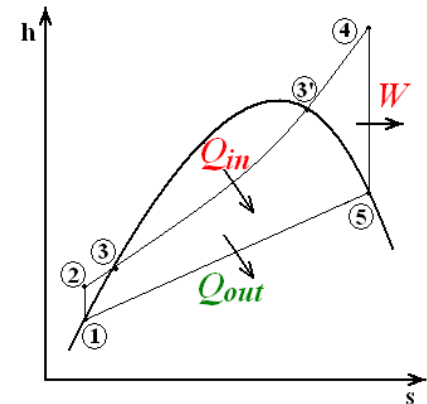
- **Rendimiento Indicado (η_{ind}):**

- ✓ Se trata de definir los rendimientos con respecto al ciclo, es decir con respecto a toda la energía puesta a disposición de la(s) turbina(s)

$$\eta_{ind} = \frac{\Delta h_i}{\Delta h_{total}} = \frac{W_i}{\Delta h_{total}}$$

$$\Delta h_{total} = \underbrace{\Delta h_{ad} + \Delta h_{condensador}}$$

$$(h_4 - h_5) + (h_5 - h_1) = h_4 - h_1$$



- **Rendimiento Térmico (η_{Th})**

$$\eta_{Th} = \frac{\Delta h_{ad}}{\Delta h_{total}} = \frac{(h_4 - h_5)}{(h_4 - h_1)}$$

$$\Rightarrow \eta_{ind} = \frac{\Delta h_i}{\Delta h_{total}} = \frac{\Delta h_i}{\Delta h_{total}} \cdot \frac{\Delta h_{ad}}{\Delta h_{ad}} = \frac{\Delta h_i}{\Delta h_{ad}} \cdot \frac{\Delta h_{ad}}{\Delta h_{total}} = \eta_i \cdot \eta_{Th}$$

- **Rendimiento Económico (η_W)**

$$\eta_W = \frac{\Delta h_f}{\Delta h_{total}}$$

$$\Rightarrow \eta_W = \frac{\Delta h_f}{\Delta h_{total}} = \frac{\Delta h_f}{\Delta h_{total}} \cdot \frac{\Delta h_{ad}}{\Delta h_{ad}} = \frac{\Delta h_f}{\Delta h_{ad}} \cdot \frac{\Delta h_{ad}}{\Delta h_{total}} = \eta_f \cdot \eta_{Th} = \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{Th}$$

$$\Rightarrow \eta_W = \eta_i \cdot \eta_v \cdot \eta_m \cdot \eta_{Th} \quad (\text{Sólo si } Z_3 \text{ no son consideradas expresamente})$$