

Turbinas a vapor: Análise do escoamento

Introdução

- Componentes principais para a TV (**apenas a turbina**)
 - Estatores (bocais ou pás fixas)
 - Turbinas (rotores+palhetas)

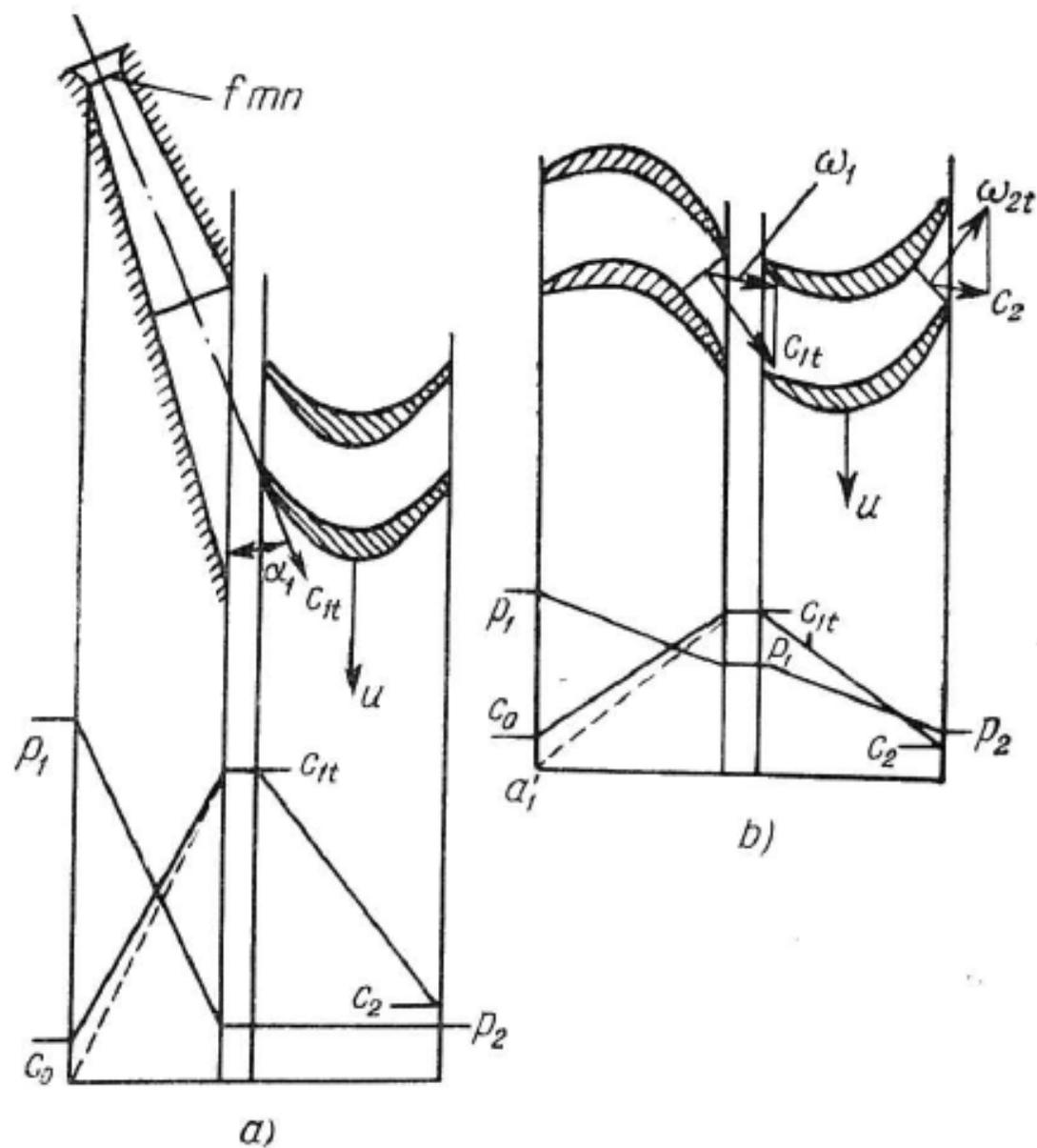


Fig. 193. Ecoulement de la vapeur dans une turbine:
 a — étage à action; b — étage à réaction

Bocais (pás fixas ou estatores)

- 1ª lei com $\Delta PE = \dot{Q} = \dot{W}_{outros} = 0$
- 0 => fronteira montante do duto
- 1 => fronteira jusante do duto

$$V_{1s} = \sqrt{2(h_0 - h_{1s}) + V_0^2}$$

- OBS: se $V_0 \ll V_{1s}$

$$V_{1s} \approx \sqrt{2(h_0 - h_{1s})}$$

Bocais (pás fixas ou estatores)

- Mas na realidade, esc. não é isentrop.

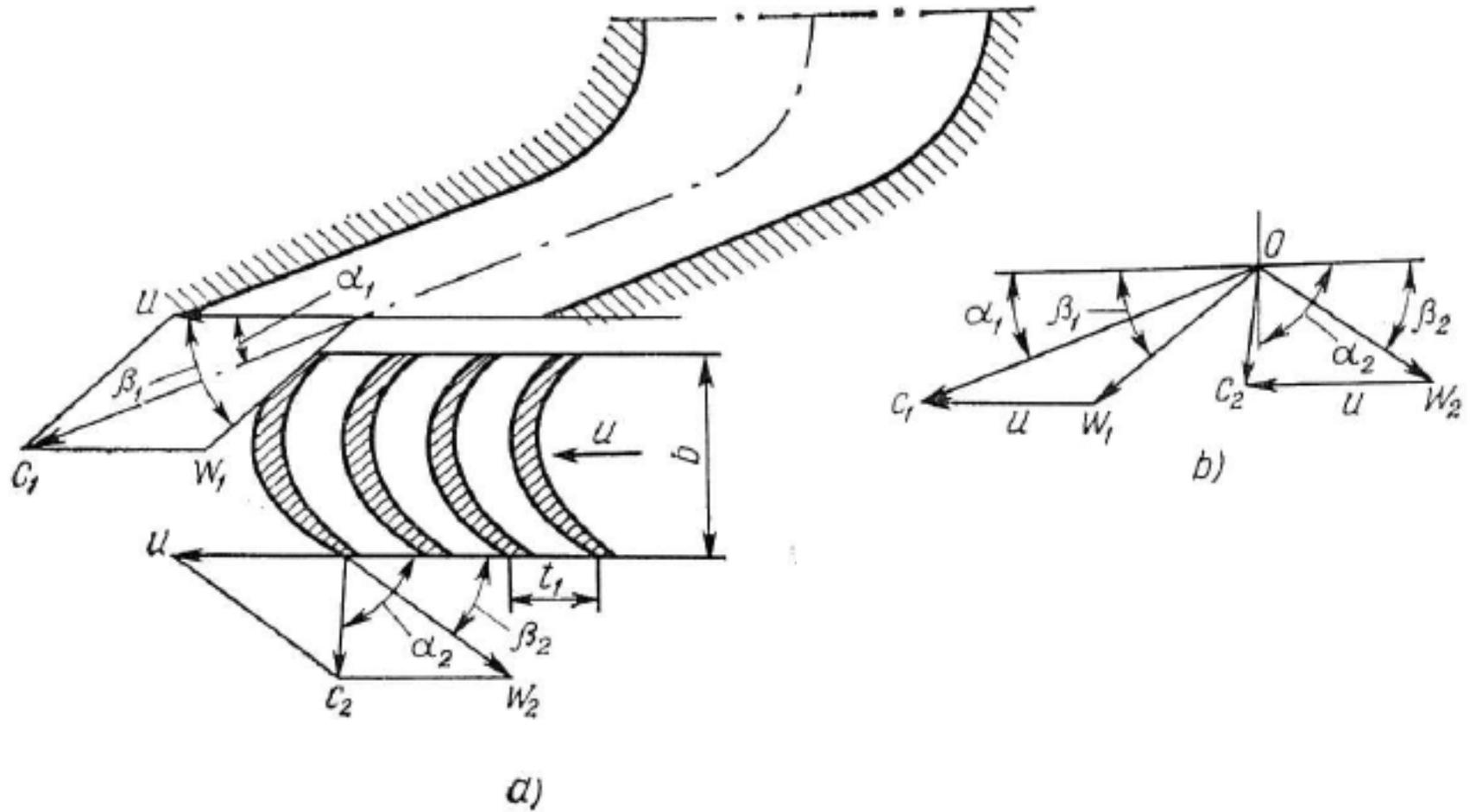
$$V_1 = \phi V_{1s}$$

- Onde ϕ = coeficiente de velocidade
– $0,91 \leq \phi \leq 0,98$

- A perda de KE associada ao bocal é calculada como:

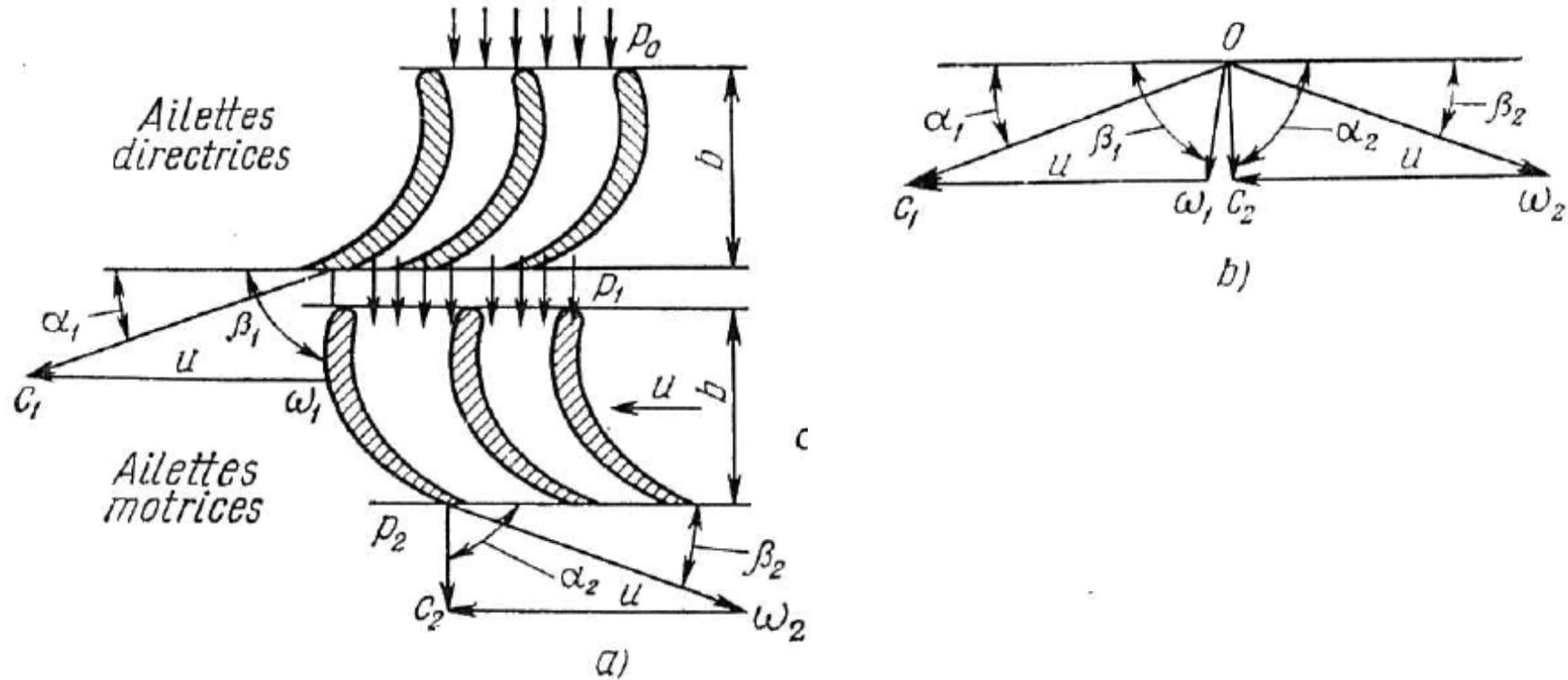
$$Lh_b = \frac{1}{2} (V_{1s}^2 - V_1^2)$$

Triângulo de velocidades



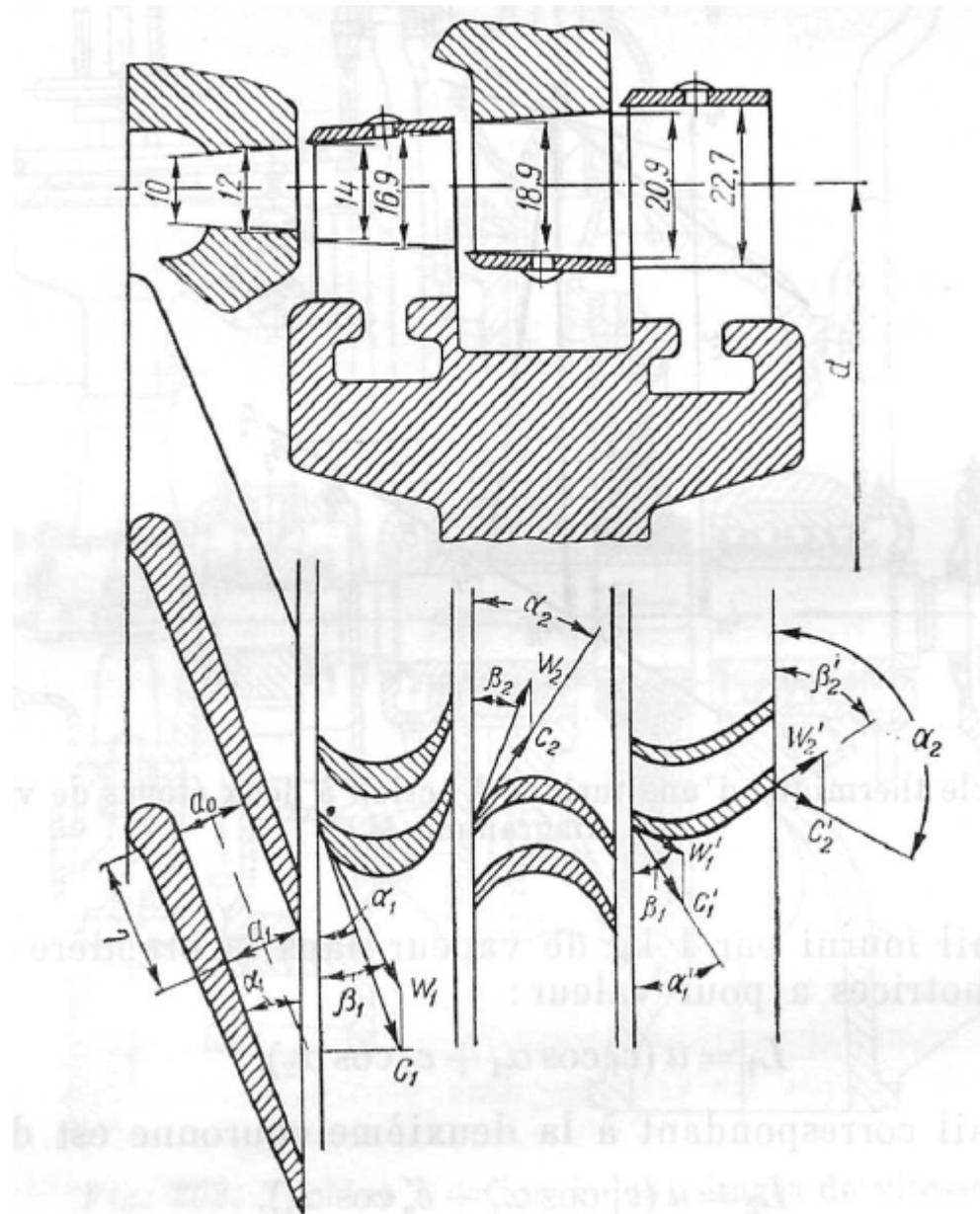
Turbina de ação

Triângulo de velocidades

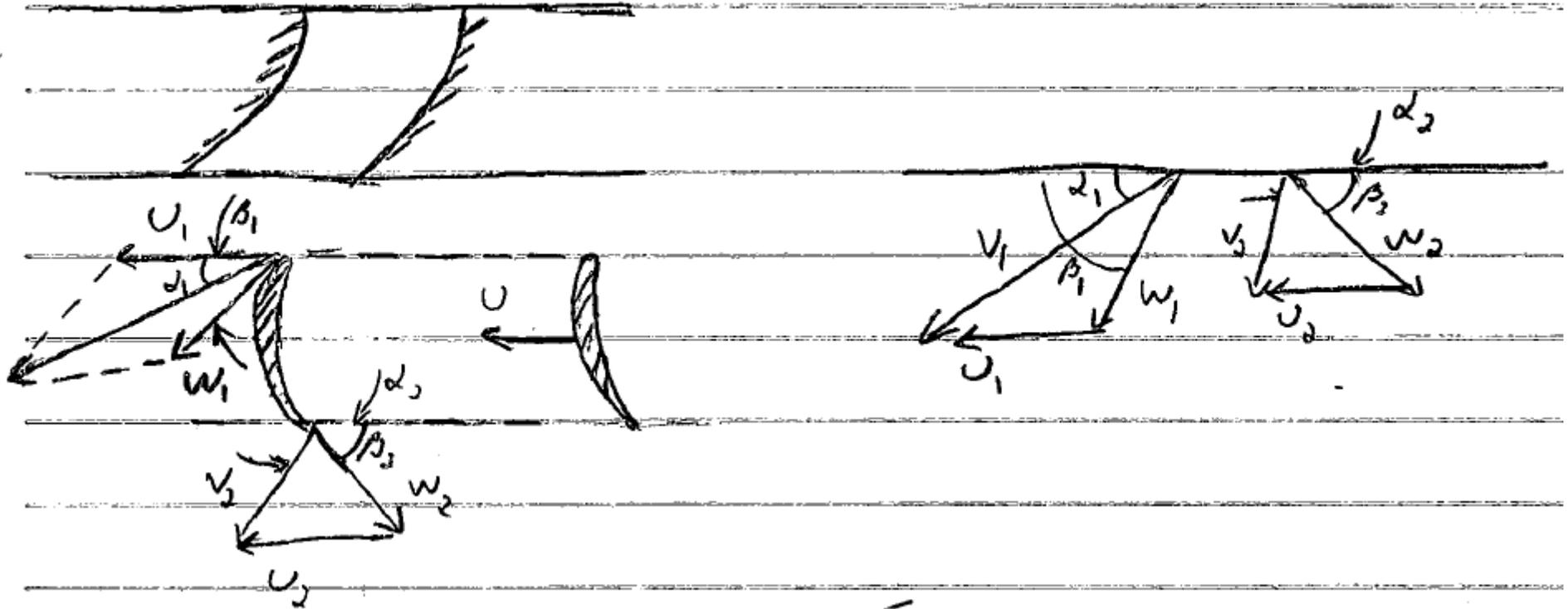


Turbina de reação

Triângulo de velocidades



Triângulo de velocidades: turbina axial



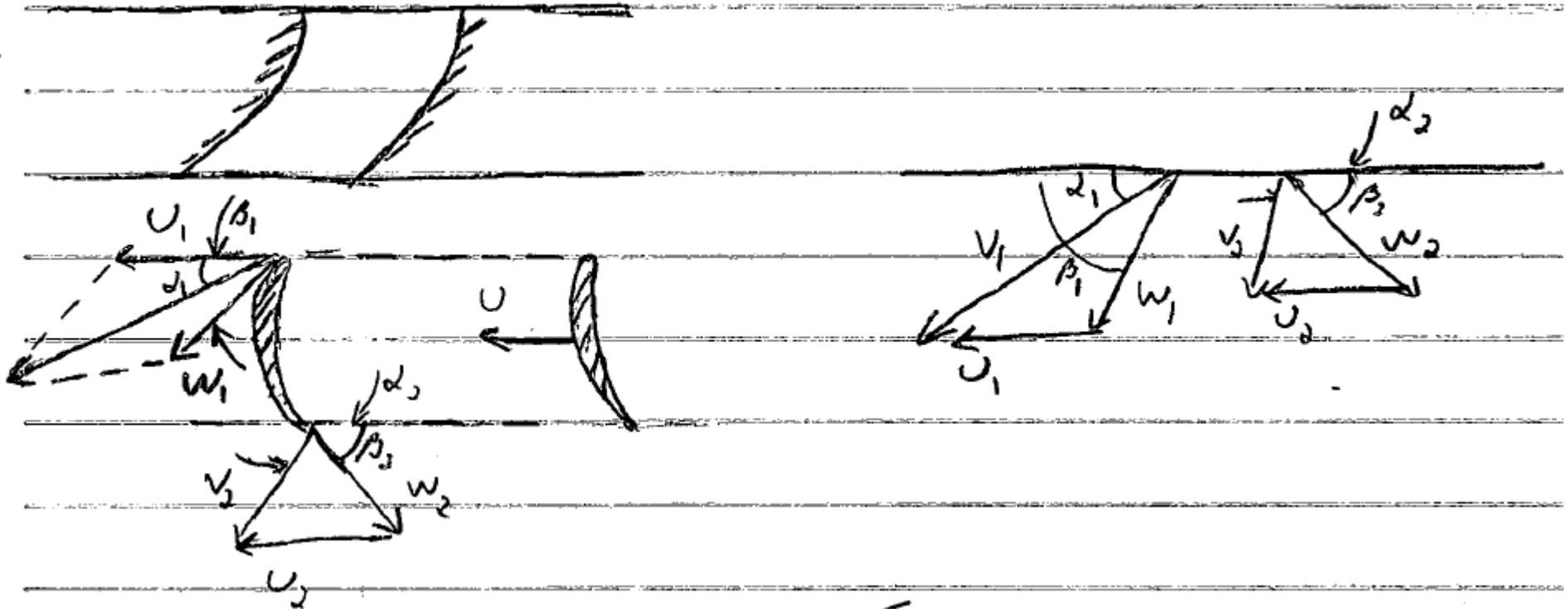
$$\sin \beta_1 = \frac{V_1}{W_1} \sin \alpha_1$$

$$W_1 = \sqrt{V_1^2 + U_1^2 - 2V_1U_1 \cos \alpha_1}$$

$$\sin \beta_2 = \frac{V_2}{W_2} \sin \alpha_2$$

$$V_2 = \sqrt{W_2^2 + U_2^2 - 2W_2U_2 \cos \beta_2}$$

Triângulo de velocidades: turbina axial



$$\vec{V} = V_r \vec{e}_r + V_u \vec{e}_\theta + V_a \vec{e}_z$$

$$\vec{M}_{vc} = \vec{r} \times \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int (\vec{r} \times \vec{V}) \rho dV + \oint (\vec{r} \times \vec{V}) \rho \vec{V}_r \cdot d\vec{A}$$

Potência

- Considere:
 - RP, PUF
 - Torque devido a forças de massa e superfície desprezíveis
 - Eixo z = eixo axial da turbina

- Então: para $\vec{r} = r\vec{e}_r + z\vec{e}_z$

$$M_{z,vc} = \oint rV_u d\dot{m} = \dot{m}(r_2V_{2u} - r_1V_{1u})$$

$$\dot{W}_T = \omega M_z = \dot{m}(U_1V_{1u} - U_2V_{2u})$$

- OBS: para turbinas axiais, $U_2=U_1=U$

$$\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = U(V_{1u} - V_{2u})$$

Turbinas de ação

- Para turbinas de ação, temos nas palhetas:
 - $A_1=A_2$
 - $P_1=P_2$
 - $T_1=T_2$
 - E, se escoamento na palheta for isentrópico: $W_1=W_{2s}$, onde aqui “W” representa a velocidade relativa
 - Mas existem perdas entre 1 e 2
 - Velocidade relativa em 2 é menor que W_{2s}
 - Define-se um coeficiente experimental ψ
$$W_2 = \psi W_{2s} = \psi W_1$$
 - Onde $0,80 < \psi < 0,96$
 - ψ é chamado de “coeficiente de velocidade”

Turbinas de ação

- Primeira lei aplicada ao VC móvel (solidário à pá) e supondo $s=cte$:

$$h_{2s} + \frac{W_{2s}^2}{2} = h_1 + \frac{W_1^2}{2}$$

$$h_1 = h_{2s}$$

- Pois $W_1 = W_{2s}$
- Mas, na realidade o escoamento não se dá a $s=cte$ devido a perdas por atrito

Turbinas de ação

- Podemos estimar as perdas por atrito nas pás (entre as seções 1 e 2) como:

$$Lh_{pa} = \frac{W_{2s}^2 - W_2^2}{2} = \frac{(1 - \psi^2)W_1^2}{2}$$

- Por outro lado, a primeira lei aplicada ao VC fixo, englobando o rotor, e considerando $s = \text{cte}$, fornece o máximo trabalho:

$$\left(\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}}\right)_s = \frac{V_1^2 - V_{2s}^2}{2}$$

- onde, V_1 é a saída do estator, logo: $V_1 = \phi V_{1s}$ e
 $Lh_b = \frac{1}{2}(V_{1s}^2 - V_1^2)$

Turbinas de ação

- Logo:

$$\left(\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}}\right)_s = \frac{V_{1s}^2 - V_{2s}^2}{2} - Lh_b$$

- E assim, se considerarmos as perdas por atrito viscoso (há ainda as perdas mecânicas...)

$$\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = \frac{V_{1s}^2 - V_{2s}^2}{2} - Lh_b - Lh_{pa} = (U_1 V_{1u} - U_2 V_{2u})$$

Turbinas de reação

- Parte da expansão ocorre nas pás do reator
 - Expansão mais suave que nas turbinas de ação
- Em geral, as turbinas não são de reação pura
 - Efeitos de reação e de impulso estão combinados

- Define-se “grau de reação”:

$$\rho = \frac{\Delta h_{pa}}{\Delta h_{total}}$$

- Relação entre transformação de energia nas pás e transformação de energia total

Turbinas de reação

- Na turbina de reação, $W_1 \neq W_{2s}$
- Primeira lei aplicada ao VC móvel (solidário à pá) e supondo $s=cte$:

$$h_{2s} + \frac{W_{2s}^2}{2} = h_1 + \frac{W_1^2}{2}$$

$$W_{2s} = \sqrt{2(h_1 - h_{2s}) + W_1^2}$$

- Mas existem perdas entre 1 e 2
 - Velocidade relativa em 2 é menor que W_{2s}
 - Define-se um coeficiente experimental ψ
$$W_2 = \psi W_{2s}$$
 - Onde $0,80 < \psi < 0,96$
 - ψ é chamado de “coeficiente de velocidade”

Turbinas de reação

- Podemos estimar as perdas por atrito nas pás (entre as seções 1 e 2) como:

$$Lh_{pa} = \frac{W_{2s}^2 - W_2^2}{2} = \frac{(1 - \psi^2)W_{2s}^2}{2}$$

- E assim, da mesma forma como foi feito para turbinas de ação:

$$\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = h_{1s} - h_{2s} + \frac{V_{1s}^2 - V_{2s}^2}{2} - Lh_{tb} - Lh_{pa} = (U_1 V_{1u} - U_2 V_{2u})$$

- Onde:

$$Lh_{tb} = h_{1s} - h_1 + \frac{1}{2}(V_{1s}^2 - V_1^2)$$

Perdas de energia em Turbinas a Vapor

- Atrito viscoso em bocais
 - Já visto
- Atrito viscoso em pás
 - Já visto
- Perda de energia em válvulas reguladoras
 - Regulagem da carga sobre a turbina é feita por controle de vazão do vapor admitido
 - Se a carga sobre a turbina diminuir => diminui-se a vazão de vapor para evitar excesso de rotação
 - As válvulas causam resistência => aumento do ΔP

Perdas de energia em Turbinas a Vapor

- Perdas mecânicas
 - Perdas associadas a atritos mecânicos
 - Mancais e dispositivos de vedação
 - Engrenagens e transmissões
- Demais perdas
 - Ligadas a vazamentos, perdas de carga, etc.
- Ensaio em laboratório fornecem correlações adequadas para estes tipos de perda.