Turbinas a vapor: Análise do escoamento

Introdução

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

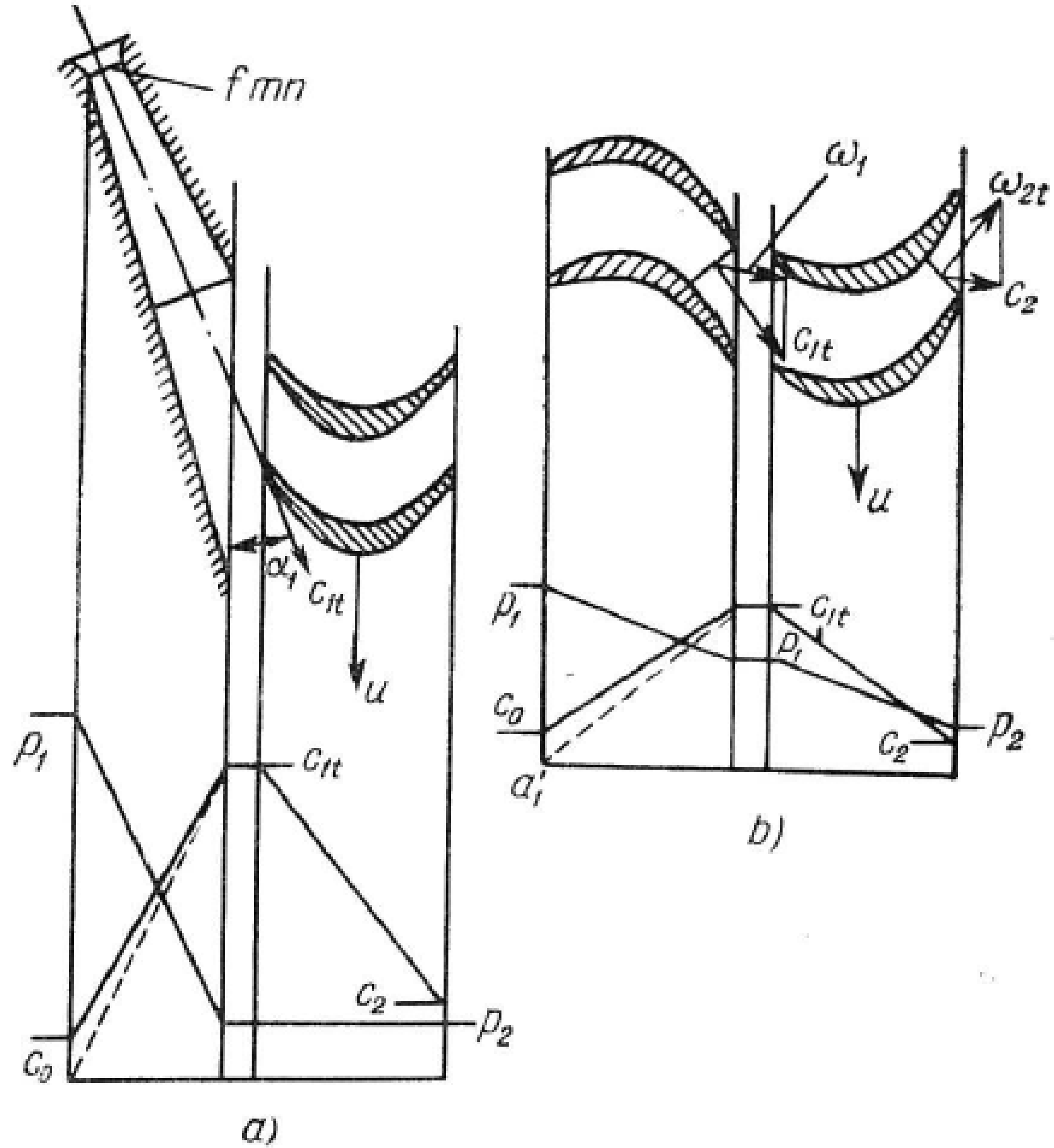


Fig. 193. Ecoulement de la vapeur dans une turbine:
a — étage à action; *b* — étage à réaction

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)

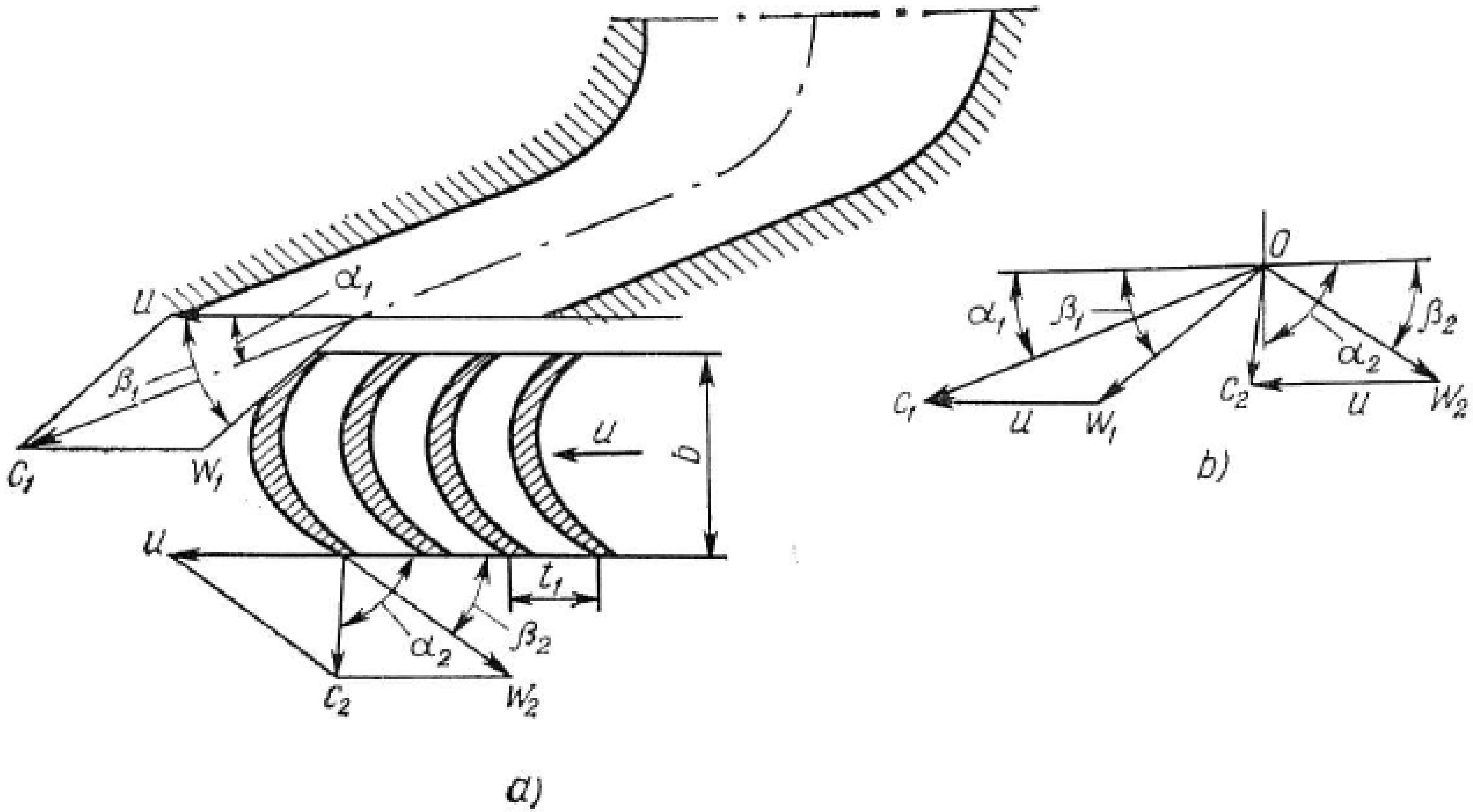
- Mas na realidade, esc. não é isentrop.

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

- Onde ϕ = coeficiente de velocidade
  - $0{,}91 \leq \emptyset \leq 0{,}98$
- A perda associada ao bocal é calculada como:

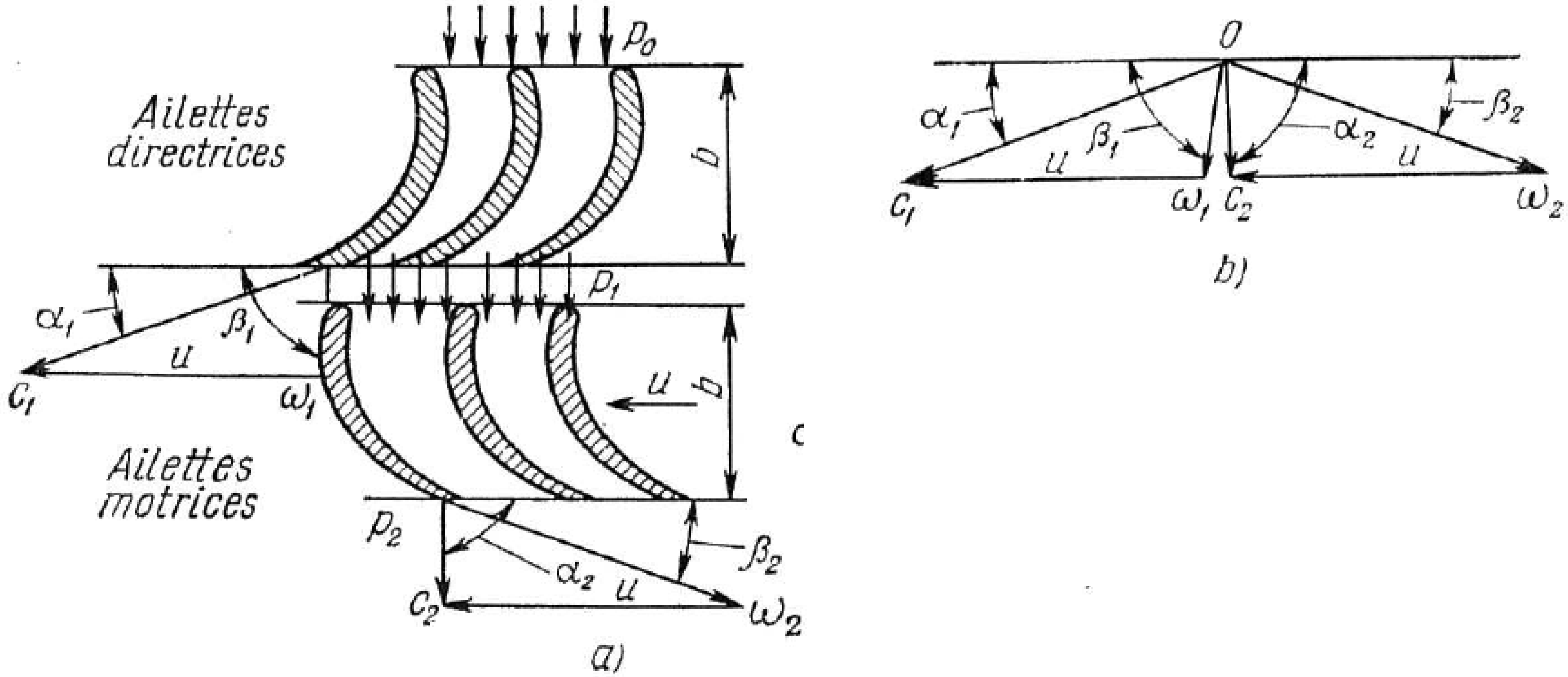
$$Lh_b = \frac{1}{2}\left({V_{1s}}^2 - {V_1}^2\right)$$

Triângulo de velocidades



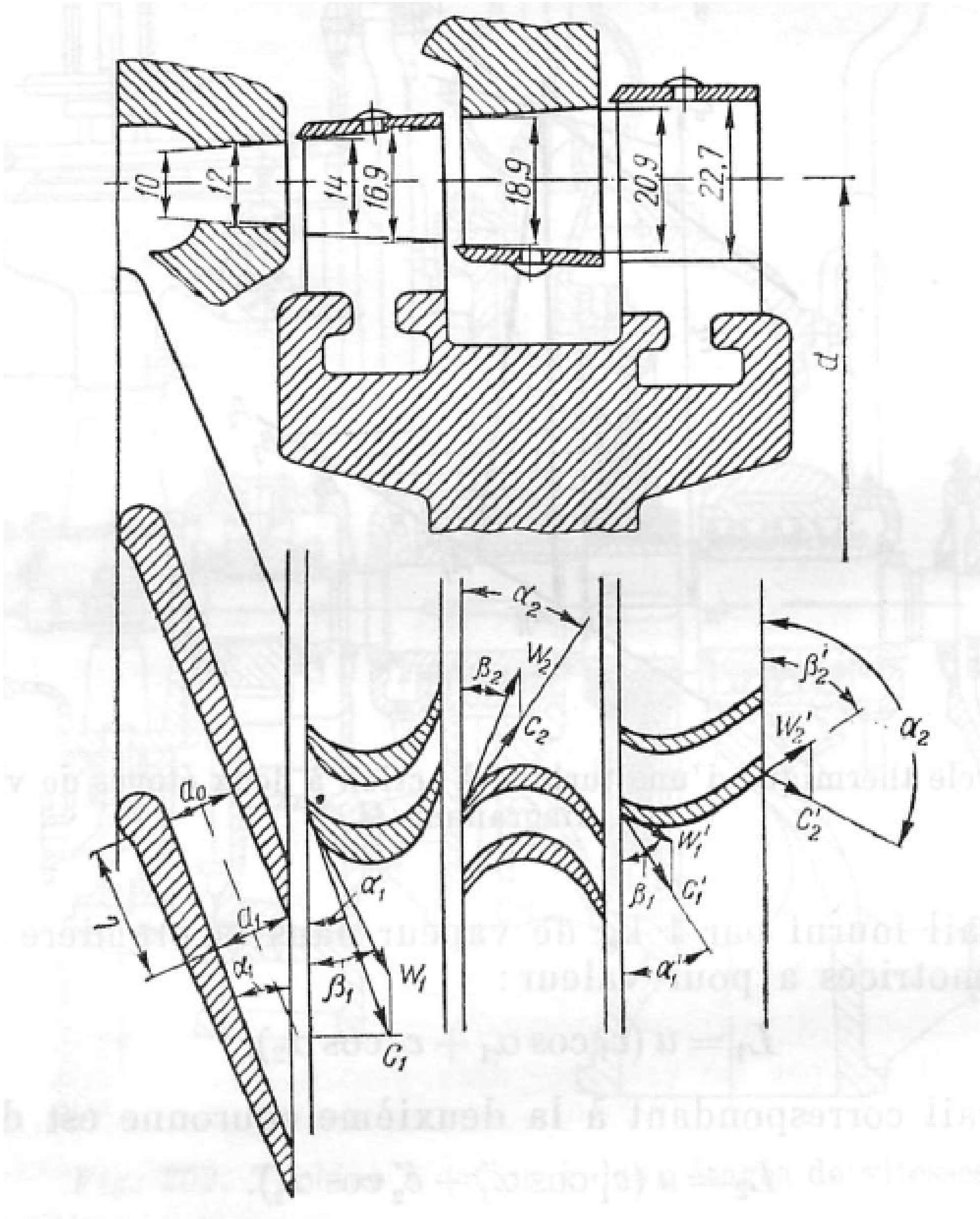
Turbina de ação

Triângulo de velocidades

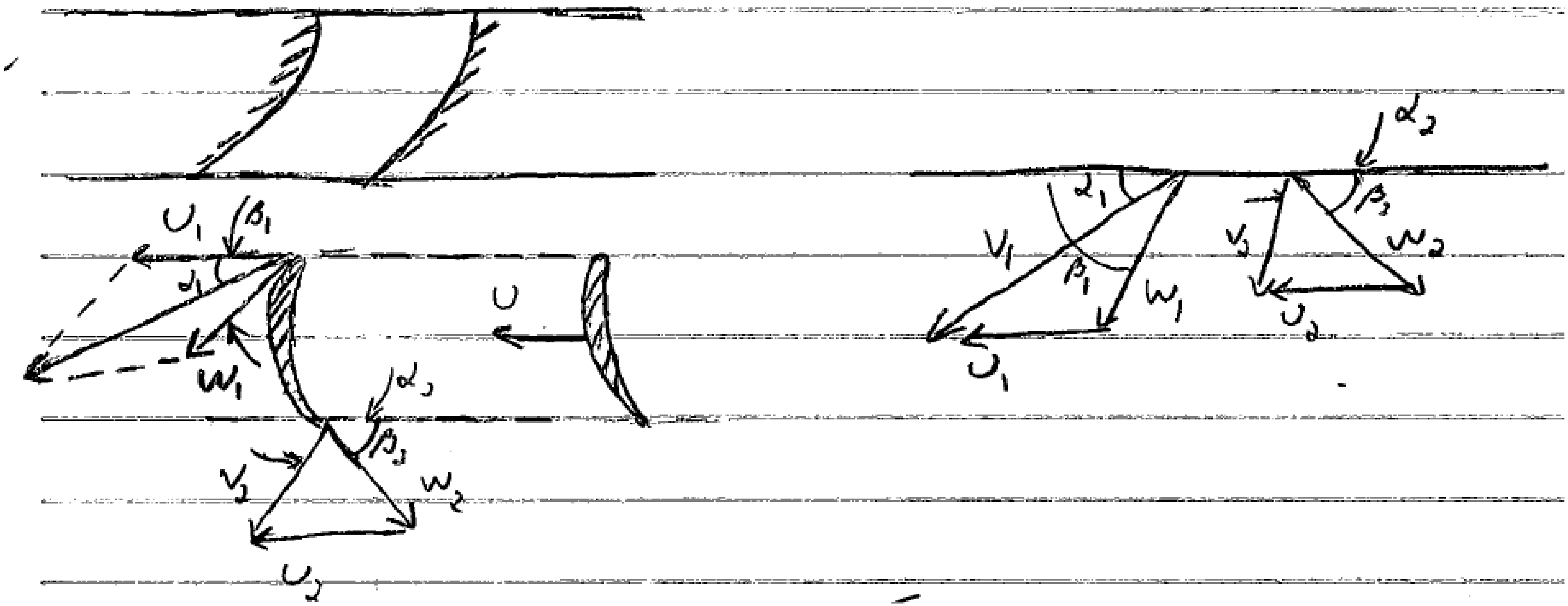


Turbina de reação

Triângulo de velocidades



Triângulo de velocidades: turbina axial



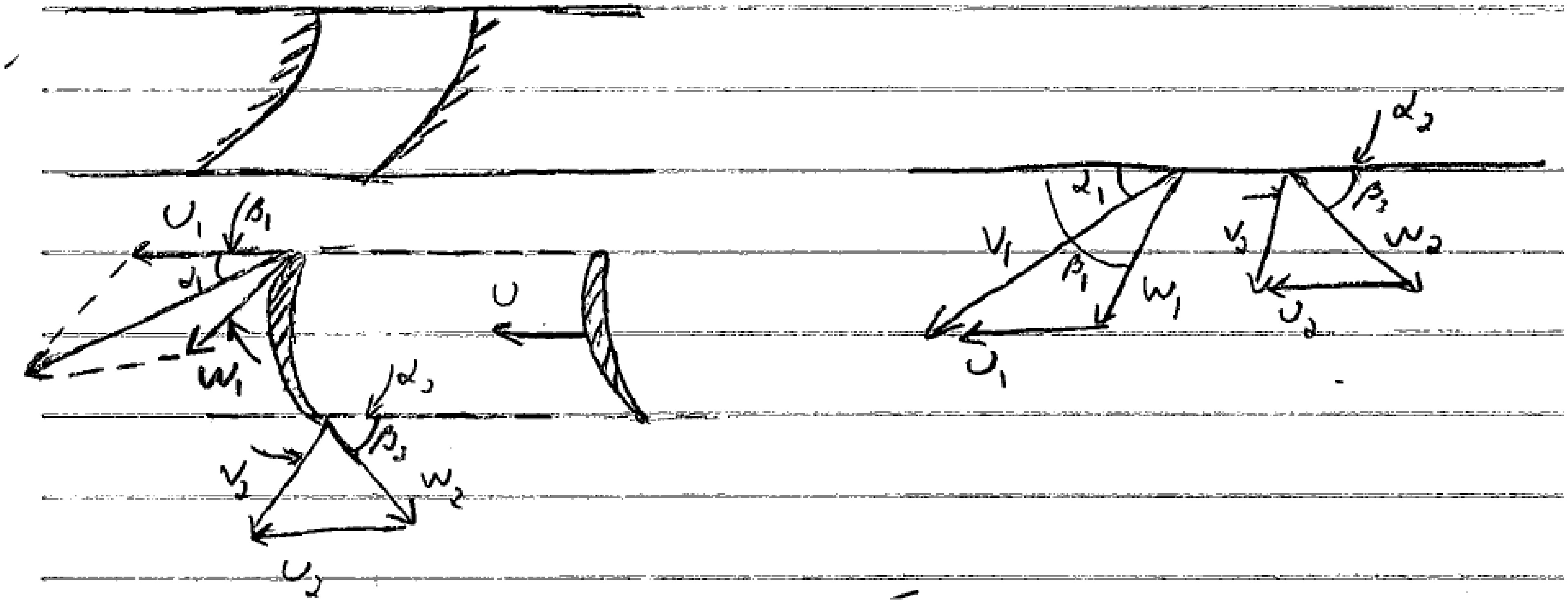
$$\sin \beta_1 = \frac{V_1}{W_1} \sin \alpha_1$$

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

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

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

Triângulo de velocidades: turbina axial



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

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t}\int(\vec{r} \times \vec{V})\rho d\forall + \oint(\vec{r} \times \vec{V})\rho\vec{V}_r \cdot \overrightarrow{dA}$$

Potência

- Considere:
  - RP, PUF
  - Torque devido a forças de massa e superfície desprezíveis
  - Eixo z = eixo axial do compressor
- Então: para $\vec{r} = r\vec{e}_r + z\vec{e}_z$

$$M_z = \oint rV_u d\dot{m} = \dot{m}(r_2 V_{2u} - r_1 V_{1u})$$

$$\dot{W}_T = \omega M_z = \dot{m}(U_2 V_{2u} - U_1 V_{1u})$$

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

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

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=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: $V_1 = \emptyset V_{1s}$ e $Lh_b = \frac{1}{2}\left(V_{1s}{}^2 - V_1{}^2\right)$

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...)

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

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:

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

- Onde:

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

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.
- Ensaios em laboratório fornecem correlações adequadas para estes tipos de perda.