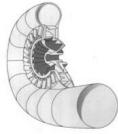


## TURBINAS FRANCIS



Disciplina: Sistemas Fluido-Mecânicos 1  
Aluno: **Jack Pogorelsky Jr**  
Professor: Gilnei  
Junho de 2004

2

## TURBINAS

- São máquinas que recebem energia de um fluido e transformam essa energia em trabalho mecânico.

3

## TURBINAS FRANCIS

- Mais Rápidas que as Turbinas Pelton
- Mais Lentas que as Turbinas Kaplan
- Trabalham no intervalo " $nq'$ "=21 até 120

4

## HISTÓRICO

- 1849: Francis idealiza a turbina Francis.
- O nome desta turbina hidráulica, deve-se à James Francis nascido na Inglaterra, e que emigrou mais tarde para os EUA

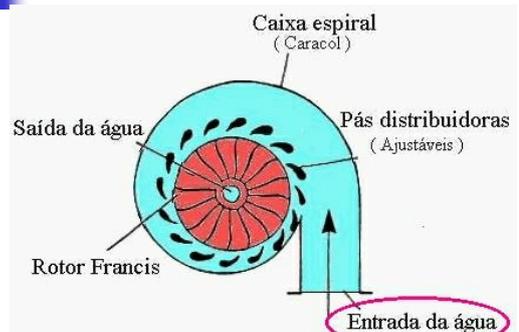
5

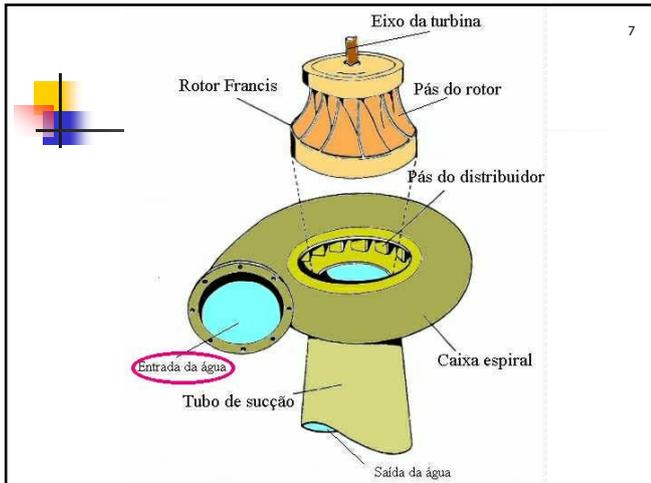
## ENTRADA

- A água entra no rotor pela periferia, após passar através da pás diretrizes as quais guiam o líquido para a entrada das pás do rotor

6

## ENTRADA

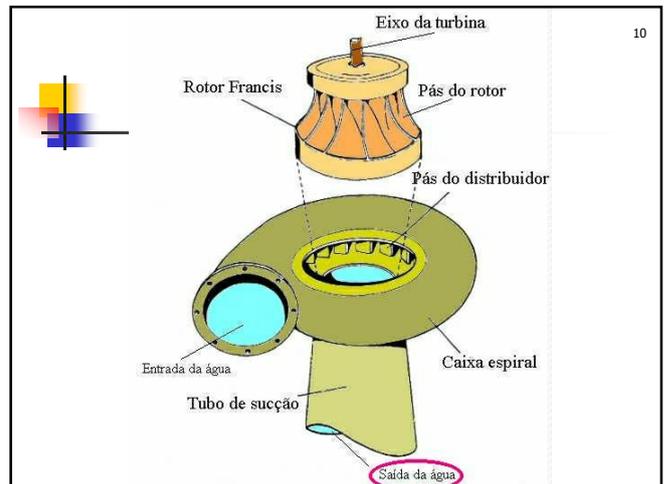
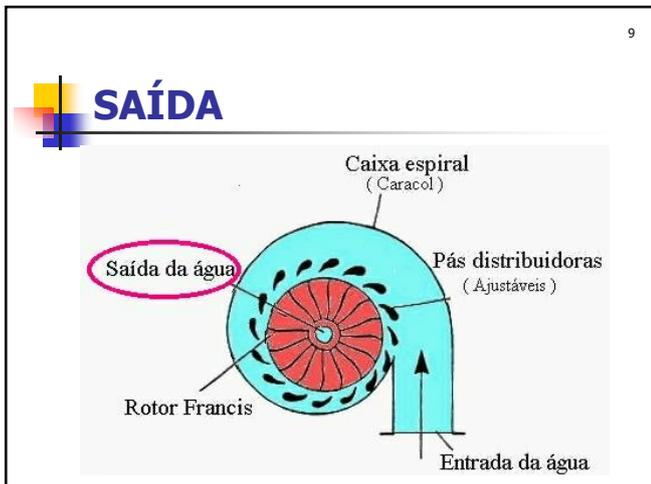




8

## SAÍDA

- As pás diretrizes distribuem a água de forma simétrica simultaneamente em todas as pás do rotor.
- A água transfere parte da sua energia para o rotor e deixa a turbina pelo tubo de sucção.



11

## Turbina Francis

12

## DADOS INICIAIS

- Altura de Elevação " $H$ " de 40,0m
- Fluxo líquido máximo " $V_{1/1}$ " = 3,00m<sup>3</sup>/s"
- Altura de sucção geodésica máxima de " $(es)_{máx}$ " de 2,00m
- Altitude do local de instalação acima do nível do mar " $h$ " de 450m

## CÁLCULOS INICIAIS

- Pressão Atmosférica Média
- Energia de Segurança a Cavitação
- Coeficiente de Sucção
- Rotação Máxima Permissível
- Velocidade Angular
- Trabalho Específico Interno
- Rotação Específica
- Cálculo do Diâmetro do Eixo

## Pressão Atmosférica Média

Altitude	Pressão Atmosférica Média
0 metros	1013 mbar
500 metros	953 mbar
1000 metros	897 mbar

## Pressão Atmosférica Média

- Para 450m a Pressão Atmosférica Média é 93500 bar

## Energia de segurança à cavitação

$$\Delta y = \frac{pa - pr}{\rho} - g \times (es)_{máx}$$

Onde:

$\Delta y$  é a energia de segurança à cavitação, em  $m/s^2$   
 $(es)_{máx}$  é a altura de sucção geodésica máxima, em  $m$   
 $g$  é a aceleração da gravidade, em  $m/s^2$   
 $pa$  é a pressão atmosférica máxima, em  $bar$   
 $pr$  é a pressão de vapor, em  $bar$   
 $\Delta y$  é a energia de segurança à cavitação, em  $m^2/s$   
 $\rho$  é a massa específica do líquido, em  $kg/m^3$

## Energia de segurança à cavitação

$$\Delta y = \frac{93500 - 2340}{1000} - 9,81 \times 2,00 = 71,54 m^2 / s$$

## Coeficiente de Sucção "Sq" Estimado

- O coeficiente de sucção "Sq" utilizado deve estar entre 0,6 e 0,9.
- Utilizou-se 0,85

## Rotação Máxima Permissível "n"

$$n = \frac{Sq}{\sqrt{V_{1/1}}} \times \Delta y^{3/4}$$

Onde:

$n$  é a rotação máxima permissível para a turbina, em *rps*

$\Delta y$  é a energia de segurança à cavitação, em  $m^2/s$

$Sq$  é o coeficiente de sucção, *adimensional*

$V_{1/1}$  é o fluxo líquido máximo, em  $m^3/s$

$\Delta y$  é a energia de segurança à cavitação, em  $m/s^2$

## Rotação Máxima Permissível "n"

$$n = \frac{0,85}{\sqrt{3}} \times 71,54^{3/4} = 12,07 rps$$

## Velocidade Angular " $\omega$ "

$$\omega = 2\pi \times n$$

Onde:

$\omega$  é a velocidade angular, em *rps*

$n$  é a rotação máxima permissível para a turbina, em *rps*

## Velocidade Angular " $\omega$ "

$$\omega = 2\pi \times 12 = 75,4 rps$$

## Trabalho Específico Interno "Y"

$$Y = g \times H$$

Onde:

$Y$  é o trabalho específico interno, em  $m^2/s^2$

$g$  é a aceleração da gravidade, em  $m/s^2$

$H$  é altura de elevação, em  $m$

## Trabalho Específico Interno "Y"

$$Y = 9,81 \times 40 = 392,4 m^2 / s^2$$

## Rotação Específica " $(nq)_{1/1}$ "

$$(nq)_{1/1} = 333n \frac{\sqrt{V_{1/1}}}{Y^{3/4}}$$

Onde:

$(nq)_{1/1}$  é a rotação específica, *adimensional*  
 $n$  é a rotação máxima permissível para a turbina, em *rps*  
 $V_{1/1}$  é o fluxo líquido máximo, em *m<sup>3</sup>/s*  
 $Y$  é o trabalho específico interno, em *m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>*

## Rotação Específica " $(nq)_{1/1}$ "

$$(nq)_{1/1} = 333 \times 12 \frac{\sqrt{3}}{392,4^{3/4}} = 78,5$$

## Correção do Coeficiente de Sucção

$$Sq = \frac{n\sqrt{V_{1/1}}}{\Delta y^{3/4}}$$

Onde:

$\Delta y$  é a energia de segurança à cavitação, em *m<sup>2</sup>/s*  
 $n$  é a rotação máxima permissível para a turbina, em *rps*  
 $V_{1/1}$  é o fluxo líquido máximo, em *m<sup>3</sup>/s*  
 $Sq$  é o coeficiente de sucção, *adimensional*

## Correção do Coeficiente de Sucção

$$Sq = \frac{12\sqrt{3}}{71,54^{3/4}} = 0,845$$

## Potência Útil

$$P_{1/1} = \rho \times V_{1/1} \times Y \times \eta_{1/1}$$

Onde:

$P_{1/1}$  é a potência útil, em *W*  
 $V_{1/1}$  é o fluxo líquido máximo, em *m<sup>3</sup>/s*  
 $Y$  é o trabalho específico interno, em *m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>*  
 $\eta_{1/1}$  é o rendimento do acoplamento, *adimensional*

## Potência Útil

$$P_{1/1} = 1000 \times 3,00 \times 392,4 \times 0,86$$

$$P_{1/1} = 1012392 \text{ W}$$

## Cálculo do diâmetro do Eixo

$$d = \frac{c \times \sqrt[3]{\frac{P_{1/1}/1000}{n \times 60}}}{100}$$

Onde:

$d$  é o diâmetro do eixo, em  $m$

$P_{1/1}$  é a potência útil, em  $W$

$n$  é a rotação máxima permissível para a turbina, em  $rps$

$c$  é uma constante que depende da tensão admissível, *adimensional*

A a tensão admissível para turbinas de um estágio está entre  $200kgf/cm^2$  e  $400kgf/cm^2$  e os valores de "c" entre 11 e 14.

Utilizou-se  $300kgf/cm^2$  para a tensão admissível e 12,5 para "c"

## Cálculo do diâmetro do Eixo

$$d = \frac{12,5 \times \sqrt[3]{\frac{1012392/1000}{12 \times 60}}}{100} = 0,14m$$

## CÁLCULOS DO ROTOR

- Fluxo Líquido de Cálculo " $V$ "
- Rotação Específica do Ponto de Cálculo " $nq$ "
- Ângulo na Aresta de Sucção " $\beta_1$ "
- Coeficiente de Saída " $\epsilon^2$ "
- Velocidade do Fluido na Sucção " $C_0$ "
- Diâmetro na Passagem para o Tubo de Sucção " $D_{1a}$ "
- Ângulo na Aresta de Pressão " $\beta_2$ "
- Velocidade do Fluido na Aresta de Pressão " $C_{3m}$ "
- Velocidade Tangencial na Aresta de Pressão " $u_{2i}$ "
- Número de Pás " $Z$ "

## Fluxo Líquido de Cálculo " $V$ "

$$\frac{V}{V_{1/1}} = 0,84$$

Onde:

$V$  é o fluxo líquido de cálculo, em  $m^3/s$

$V_{1/1}$  é o fluxo líquido máximo, em  $m^3/s$

$(nq)_{1/1}$	30	60	90	120
$V/V_{1/1}$	0,80	0,83	0,85	0,87

## Fluxo Líquido de Cálculo " $V$ "

$$\frac{V}{V_{1/1}} = 0,84 \therefore V = V_{1/1} \times 0,84$$

$$V_{1/1} \times 0,84 = 3,00 \times 0,84 = 2,52m^3 / s$$

## Rotação Específica do Ponto de Cálculo " $nq$ "

$$nq = 333n \frac{\sqrt{V}}{Y^{3/4}}$$

Onde:

$nq$  é a rotação específica do ponto de cálculo, *adimensional*

$n$  é a rotação máxima permissível para a turbina, em  $rps$

$V$  é o fluxo líquido de cálculo, em  $m^3/s$

$Y$  é o trabalho específico interno, em  $m^2/s^2$

## Rotação Específica do Ponto de Cálculo "nq"

37

$$nq = 333 \times 12 \frac{\sqrt{2,52}}{392,4^{3/4}} = 71,95$$

## Ângulo Na Aresta de Sucção "β<sub>1</sub>"

38

O ângulo na aresta de sucção "β<sub>1</sub>" é dado em função de "nq"

Como "nq" é 71,95 então "β<sub>1</sub>" é 21°

Nq	20,8	27,6	41,4	55,5	69,7	84,1	103,0	114,2
β <sub>1</sub> (graus)	30,0	23,4	22,3	21,5	21,3	19,9	18,9	18,6

## Coefficiente de Saída "ε<sup>2</sup>"

39

$$\varepsilon^2 = 0,00116 \left( \frac{\delta_r \times nq}{\sqrt{k}} \operatorname{tg} \beta_1 \right)^{4/3}$$

Onde:

ε<sup>2</sup> é o coeficiente de saída, *adimensional*

β<sub>1</sub> é o ângulo na aresta de sucção, em *graus*

nq é a rotação específica do ponto de cálculo, *adimensional*

δ<sub>r</sub> é o coeficiente de vórtice relativo, *adimensional*

k é o coeficiente de estrangulamento transversal, *adimensional*

O coeficiente de vórtice relativo "δ<sub>r</sub>" e o coeficiente de estrangulamento transversal "k" para turbinas Francis são iguais a 1.

## Coefficiente de Saída "ε<sup>2</sup>"

40

$$\varepsilon^2 = 0,00116 \left( \frac{1 \times 71,95}{\sqrt{1}} \operatorname{tg} 21^\circ \right)^{4/3} = 0,0968$$

## Velocidade do Fluido na Sucção "C<sub>0</sub>'

41

$$C_0 = \sqrt{2 \times Y \times \varepsilon^2}$$

Onde:

C<sub>0</sub> é a velocidade do fluido na sucção, em *m/s*

ε<sup>2</sup> é o coeficiente de saída, em *adimensional*

Y é o trabalho específico interno, em *m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>*

## Velocidade do Fluido na Sucção "C<sub>0</sub>'

42

$$C_0 = \sqrt{2 \times 392,4 \times 0,0968} = 8,72 \text{ m/s}$$

### Diâmetro na Passagem para o Tubo de Sucção " $D_{1a}$ "

43

$$D_{1a} = \sqrt{\frac{V}{C_0} \times \frac{4}{\pi}}$$

Onde:

$D_{1a}$  é o diâmetro na passagem para o tubo de sucção, em  $m$   
 $C_0$  é a velocidade do fluido na sucção, em  $m/s$   
 $V$  é o fluxo líquido de cálculo, em  $m^3/s$

### Diâmetro na Passagem para o Tubo de Sucção " $D_{1a}$ "

44

$$D_{1a} = \sqrt{\frac{2,52}{8,72} \times \frac{4}{\pi}} = 0,606m$$

### Ângulo da Aresta de Pressão " $\beta_2$ "

45

O ângulo na aresta de pressão " $\beta_2$ " deve ser próximo de  $90^\circ$ .

Foi utilizado " $\beta_2$ " de  $86^\circ$

### Velocidade do Fluido na Aresta de Pressão " $C_{3m}$ "

46

$$C_{3m} = 0,94 \times C_0$$

Onde:

$C_{3m}$  é a velocidade do fluido na aresta de pressão, em  $m/s$   
 $C_0$  é a velocidade do fluido na sucção, em  $m/s$

(nq) <sub>1/1</sub>	70	80	90	100	110	120
$C_{3m}/C_0$	1,00	0,93	0,86	0,83	0,80	0,78

### Velocidade do Fluido na Aresta de Pressão " $C_{3m}$ "

47

$$C_{3m} = 0,94 \times 8,72 = 8,20m / s$$

### Velocidade Tangencial na Aresta de Pressão " $u_{2i}$ "

48

$$u_{2i} = \frac{C_{3m}}{2 \times \text{tg} \beta_2} + \sqrt{\left(\frac{C_{3m}}{2 \times \text{tg} \beta_2}\right)^2 + Y}$$

Onde:

$u_{2i}$  é a Velocidade Tangencial na Aresta de Pressão, em  $m/s$   
 $C_{3m}$  é a velocidade do fluido na aresta de pressão, em  $m/s$   
 $Y$  é o trabalho específico interno, em  $m^2/s^2$   
 $\beta_2$  é o ângulo na aresta de pressão, em *graus*

## Velocidade Tangencial na Aresta de Pressão " $u_{2i}$ "

49

$$u_{2i} = \frac{8,20}{2 \times \text{tg}86^\circ} + \sqrt{\left(\frac{8,20}{2 \times \text{tg}86^\circ}\right)^2 + 392,4} = 20,10 \text{ m/s}$$

## Número de Pás

50

$$Z = 2k_z \frac{r_m}{e} \text{sen} \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}$$

o coeficiente empírico " $k_z$ " deve estar entre 5 e 6,5. Foi utilizado 6.

Onde:

$Z$  é o número de pás

$k_z$  é um coeficiente empírico, *adimensional*

$r_m$  é o raio do centro de gravidade, em *m*

$e$  é o comprimento da linha de corrente média, em *m*

$\beta_1$  é o ângulo na aresta de sucção, em *radianos*

$\beta_2$  é o ângulo na aresta de pressão, em *radianos*

## Número de Pás

51

$$Z = 2 \cdot 6 \frac{0,230}{0,163} \text{sen} \frac{1,501 + 0,440}{2} = 16,4$$

O rotor terá 17 pás

## Rotor Francis

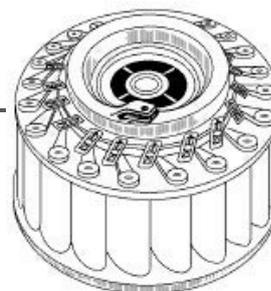
52



## SISTEMA DIRETOR

É formado por uma coroa circular com aletas móveis para regular a entrada de fluido. A regulagem é feita mediante inclinação das aletas.

## SISTEMA DIRETOR



## CÁLCULOS DO SISTEMA DIRETOR

-Diâmetro Externo na Aresta de Pressão " $D_{2a}$ "  
-Largura do Sistema Diretor

## Diâmetro Externo na Aresta de Pressão " $D_{2a}$ "

Para rotações específicas do nonto de cálculo " $nq$ " maiores que 55 é necessário considerar " $D_{2a}$ " um pouco menor que " $D_{1a}$ ".

Como " $D_{1a}$ " é 0,606m utilizou-se " $D_{2a}$ " como 0,596m

## Largura do Sistema Diretor " $b$ "

$$b = \frac{V}{\pi \times D_{2a} \times C_{3m}}$$

Onde:

$b$  é a largura do sistema diretor, em  $m$

$D_{2a}$  é o diâmetro externo na aresta de pressão, em  $m$

$C_{3m}$  é a velocidade do fluido na aresta de pressão, em  $m/s$

$V$  é o fluxo líquido de cálculo, em  $m^3/s$

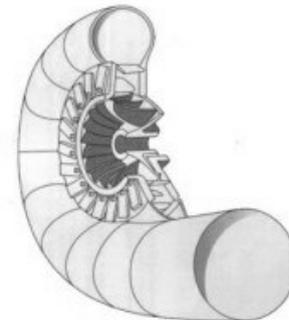
## Largura do Sistema Diretor " $b$ "

$$b = \frac{2,52}{\pi \times 0,596 \times 8,20} = 0,164m$$

## CAIXA ESPIRAL

A entrada do fluido no rotor é radial através de uma caixa espiral, cuja seção diminui de forma progressiva com a finalidade de manter fixa a velocidade.

## CAIXA ESPIRAL



## CÁLCULOS DA CAIXA ESPIRAL

- Velocidade na Caixa Espiral, "*vvol*"
- Diâmetro da Caixa Espiral, "*dv*"
- Vazão em cada ponto "*Qi*"
- Diâmetro em cada ponto, "*Di*"

## Velocidade na Caixa Espiral "*vvol*"

$$vvol = 0,20 \cdot \sqrt{2 \cdot Y}$$

Onde:

*vvol* é a velocidade na caixa espiral, em *m/s*  
*Y* é o trabalho específico interno, em *m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>*

## Velocidade na Caixa Espiral "*vvol*"

$$vvol = 0,20 \cdot \sqrt{2 \cdot 392,4} = 5,6 \text{ m/s}$$

## Diâmetro da Caixa Espiral "*dv*"

$$dv = D_{1a} + (2 \times b)$$

Onde:

*dv* é o diâmetro da caixa espiral, em *m*  
*D<sub>1a</sub>* é o diâmetro do rotor, em *m*  
*b* é a largura do sistema diretor, em *m*

## Diâmetro da Caixa Espiral "*dv*"

$$dv = 0,606 + (2 \times 0,164) = 0,934 \text{ m}$$

## Vazão em cada ponto "*Qi*"

A vazão em cada ponto "*Qi*" é calculada conforme a equação. Considerando o diâmetro dividido em 8 partes de 45° cada.

$$Qi = \frac{Qt}{i}$$

Onde:

*Qi* é a vazão em cada ponto, em *m<sup>3</sup>/s*  
*Qt* é a vazão total, em *m<sup>3</sup>/s*  
*i* é o número correspondente a cada divisão, *adimensional*

## Vazão em cada ponto "Qi"

Divisões (graus)	0	45	90	135	180	225	270	315	360
Qi (m³/s)	0	0,375	0,750	1,125	1,500	1,875	2,250	2,625	3,000

## Diâmetro em cada ponto "Di"

O diâmetro em cada ponto "Di" é calculado em cada um dos oito pontos conforme a equação. Considerando o diâmetro dividido em 8 partes de 45° cada e suas respectivas vazões.

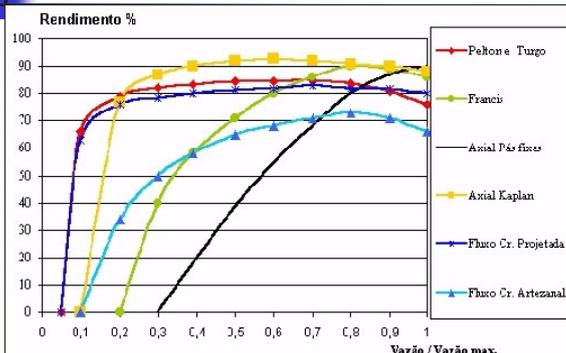
$$D_i = \sqrt{\frac{4Q_i}{\pi \times vvol}}$$

Onde:  
 Di é o diâmetro em cada ponto, em m  
 Qi é a vazão em cada ponto, em m³/s  
 vvol é a velocidade na caixa espiral, em m/s

## Diâmetro em cada ponto "Di"

Divisões (graus)	0	45	90	135	180	225	270	315	360
Qi (m³/s)	0	0,375	0,750	1,125	1,500	1,875	2,250	2,625	3,000
Di (m)	0	0,292	0,413	0,506	0,584	0,653	0,715	0,773	0,826

## RENDIMENTO



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Pfeleiderer, Carl. **Máquinas de fluxo**. Rio de Janeiro : LTC, 1979. 454 p.
- USP. (<http://www.usp.br>). São Paulo.  
[www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-25072002-142649/publico/02PrimeirosCap.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-25072002-142649/publico/02PrimeirosCap.pdf)  
[www.poli.usp.br/d/pme2237/PME2237\\_-\\_Experiencia3.pdf](http://www.poli.usp.br/d/pme2237/PME2237_-_Experiencia3.pdf)

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Prof. Mello Júnior (<http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr>). São Paulo.
- Revista de Eletricidad, Electrónica y Automática (<http://www.reea.6x.to/>). Espanha