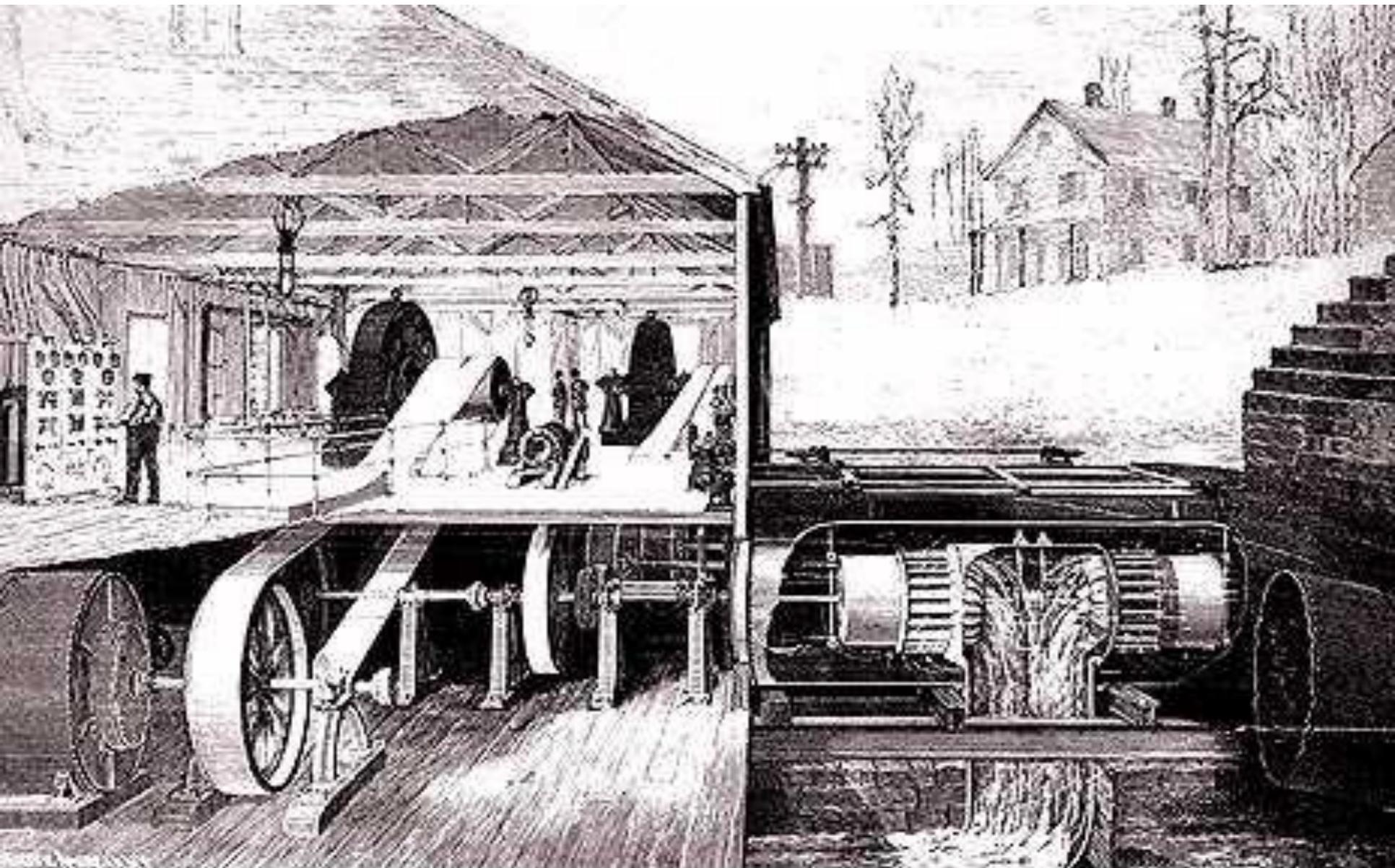


PEA 3560 : Engenharia de Energia Hidroeletrica



Parte 2

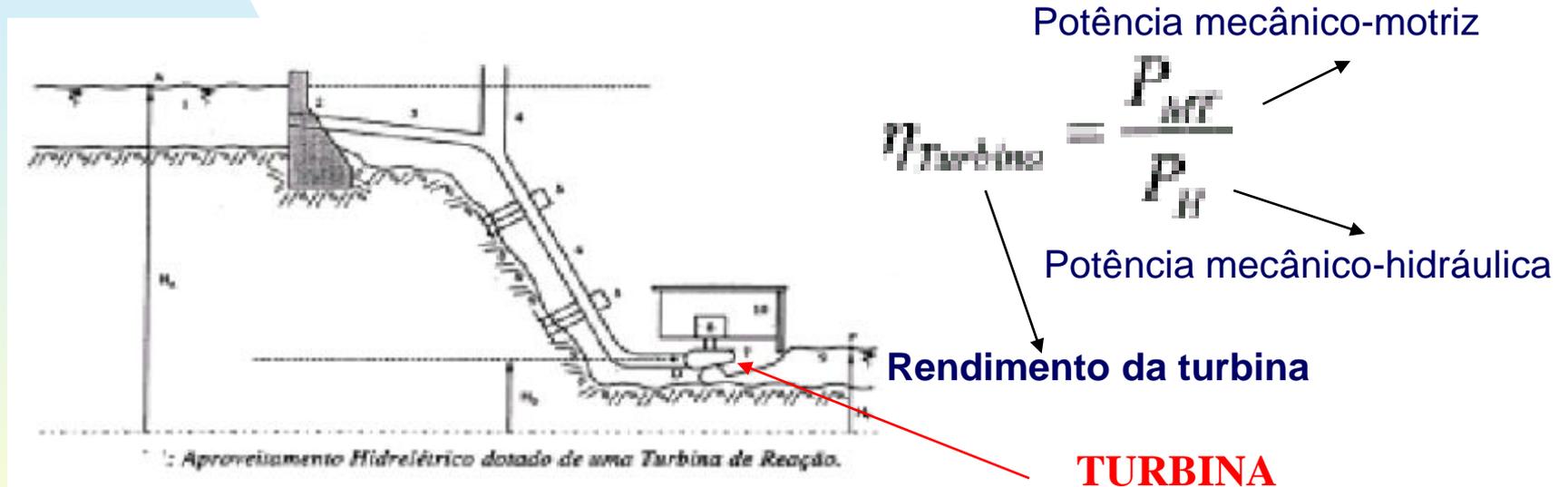
Turbinas Hidráulicas



TURBINA HIDRÁULICA

É uma máquina hidráulica, que, recebendo em sua porta de entrada energia mecânico-hidráulica de um fluido, converte essa energia em energia mecânico-motriz.

Como as turbinas são máquinas hidráulicas reais, a energia disponibilizada em seu eixo mecânico é menor do que aquela fornecida pelo fluido.



1- RESERVATÓRIO SUPERIOR	6- TUBULAÇÃO FORÇADA
2- BARRAGEM	7- TURBINA DE REAÇÃO
3- TUBULAÇÃO DE PRESSÃO	8- GERADOR
4- CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	9- CANAL DE FUGA
5- BLOCOS DE ANCORAGEM	10- CASA DE MÁQUINAS

FUNDAMENTOS

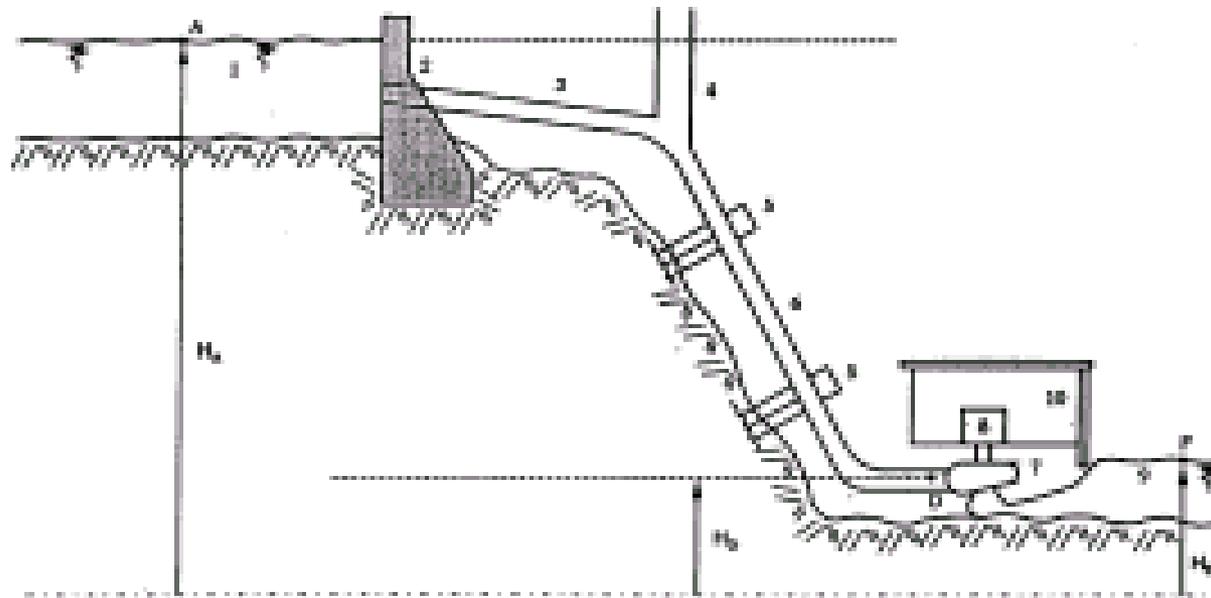


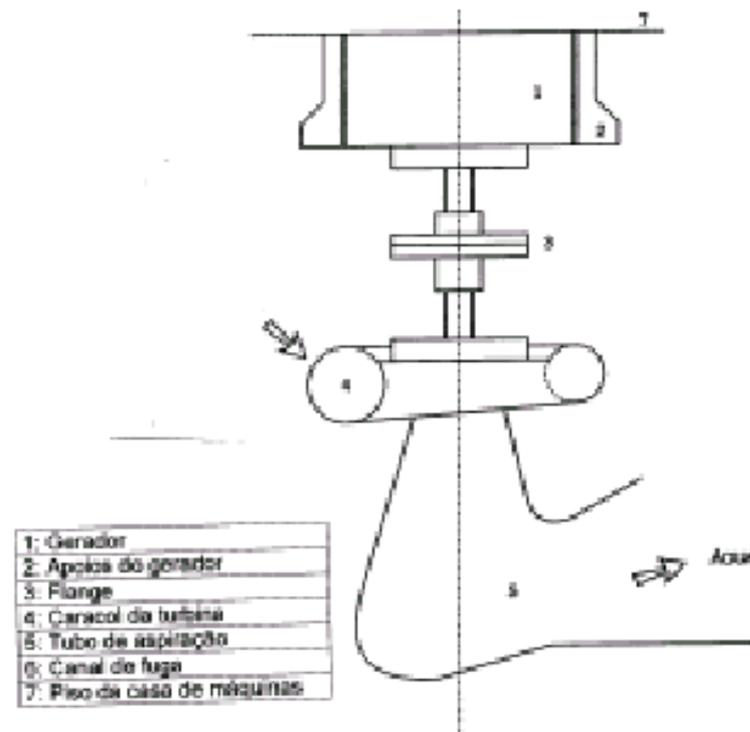
Figura 4.1: Aproveitamento Hidrelétrico dotado de uma Turbina de Reação.

1: Reservatório superior	6: Tubulação forçada
2: Barragem	7: Tubulação de reação
3: Tubulação de pressão	8: Gerador
4: Chaminé de equilíbrio	9: Canal de fuga
5: Blocos de Ancoragem	10: Casa de Máquinas

Disposição do conjunto turbina-gerador

De acordo com a potência a ser gerada, com limitações de espaço e com altura de queda d'água disponível é a posição do eixo gerador-turbina. Assim, podem-se encontrar, na atualidade, conjuntos gerador-turbina que operam com seu eixo motriz na posição:

- 1) Horizontal
- 2) Vertical
- 3) Inclínada em relação à vertical



Tipos de Turbinas

- **Ação:**
 - ◆ Quando o escoamento através do rotor ocorre sem variação de pressão; (Pelton; Michel- Banki)
- **Reação:**
 - ◆ Quando o escoamento através do rotor ocorre com variação de pressão. (Francis; Kaplan;)
- **Para Centrais Hidrelétricas de Baixa Queda:**
 - ◆ Tipo “S”;
 - ◆ Axial Bulbo;
 - ◆ Axial periférica ou straflo

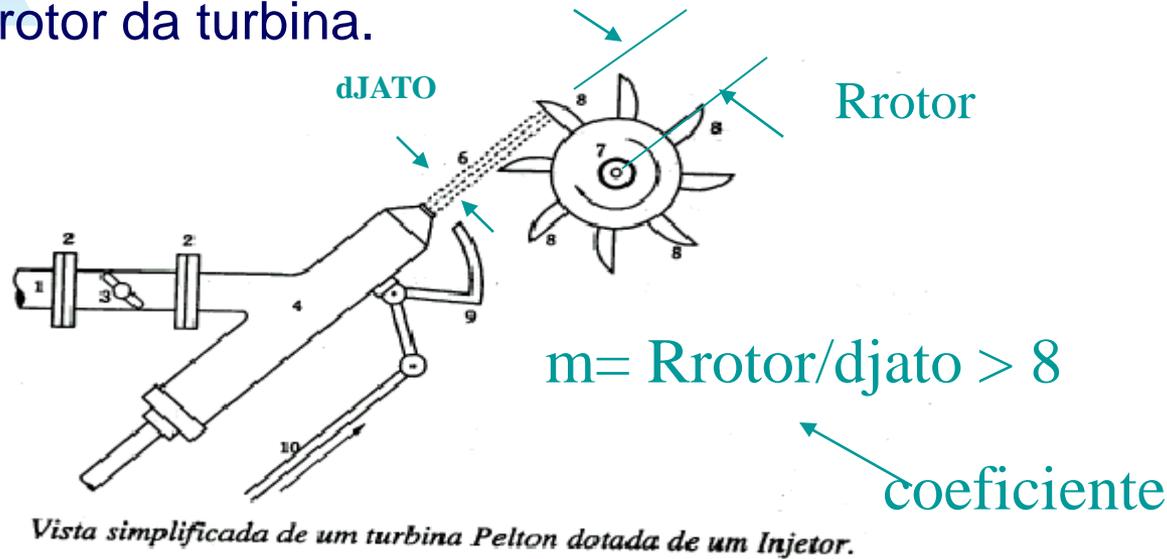
Pausa !!!!!

Máquinas Hidráulicas:

- **Bombas**
- **Turbinas**

Turbinas de Ação

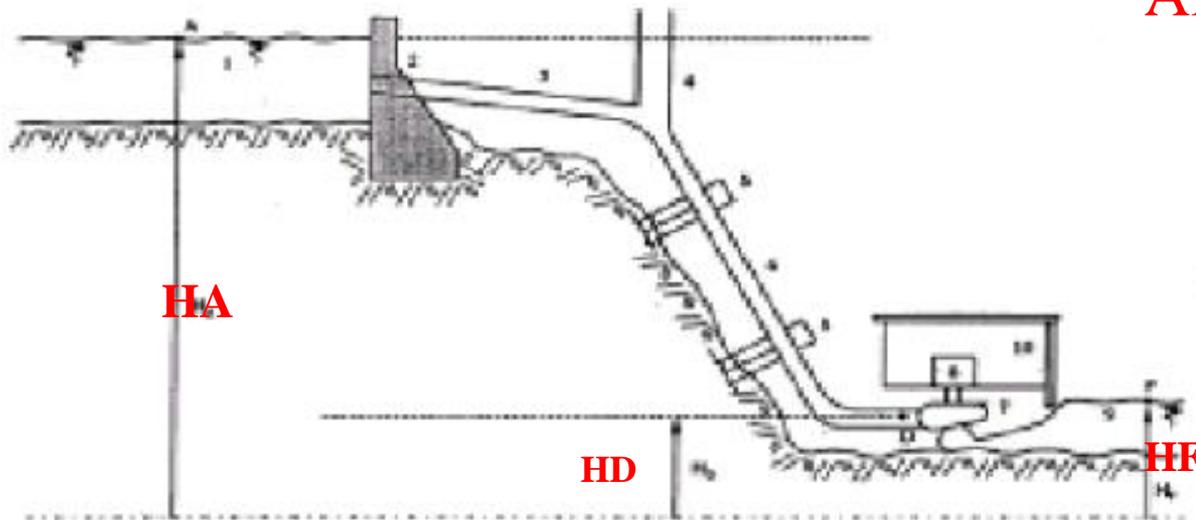
São conversores hidrodinâmicos que operam com a energia cinética da água, recebendo energia na forma mecânico-hidráulica e fornecendo na forma mecânico-motriz. Toda a energia potencial do aproveitamento, a menos das perdas na tomada d'água e nas canalizações de pressão e forçada, é transformada em energia cinética antes de chegar as conchas do rotor da turbina.



1: Tubulação forçada	6: Jato d'água
2: Flanges	7: Rotor Pelton
3: Válvula Borboleta	8: Aletas do Rotor
4: Injetor Pelton	9: Desviador
5: Eixo do Servomotor	10: Comando do Desviador

Valores mínimos para os coeficientes m , função da altura topográfica

H(m)	400	500	600	750	1000	1500	2000
M(mínimo)	8	9	10	11	14	19	24

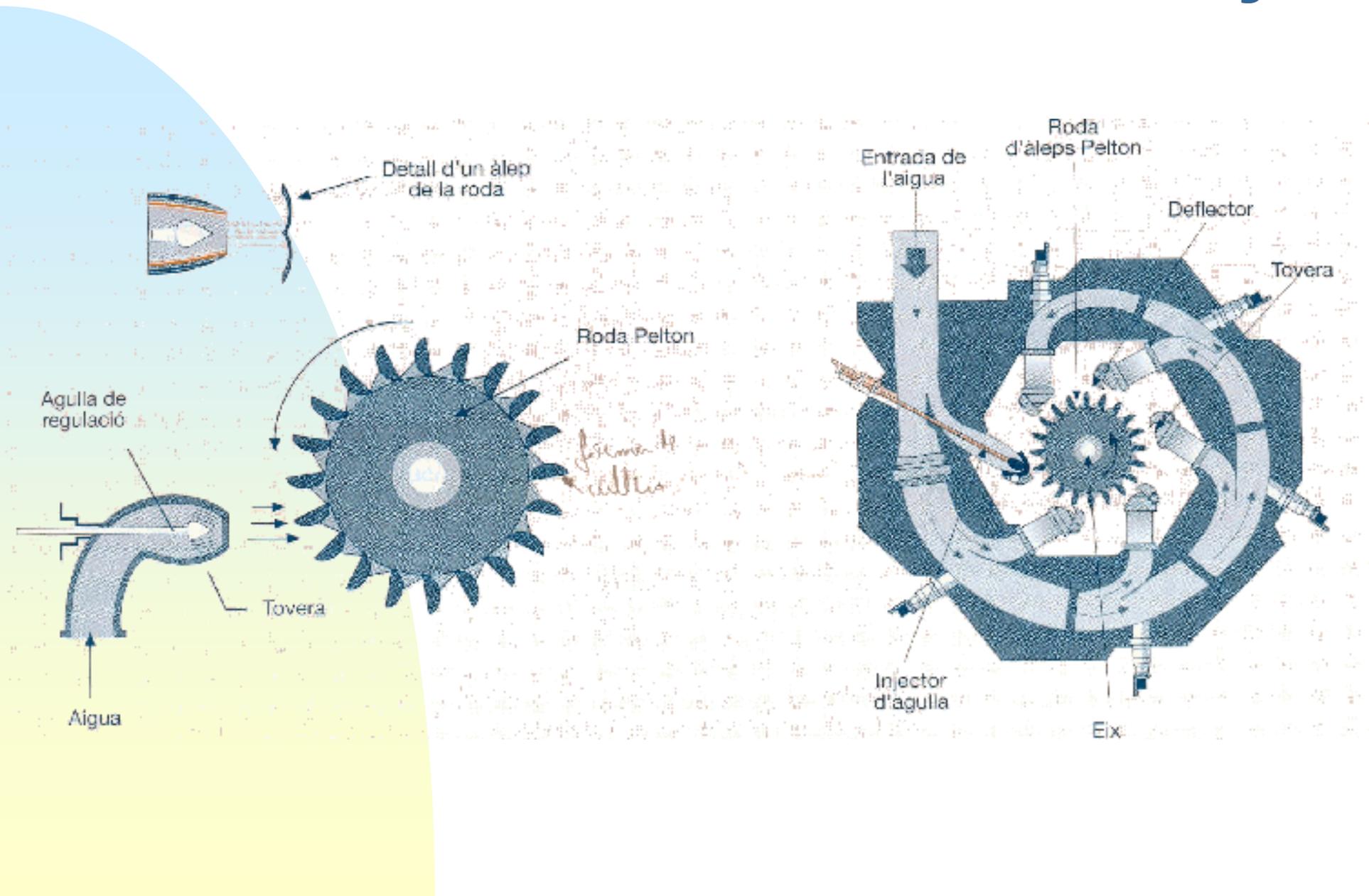


Altura topográfica

$$H_{TOP}(A) = H_A - H_D$$

1: Aproveitamento Hidrelétrico dotado de uma Turbina de Reação.

Turbinas Hidráulicas de Ação



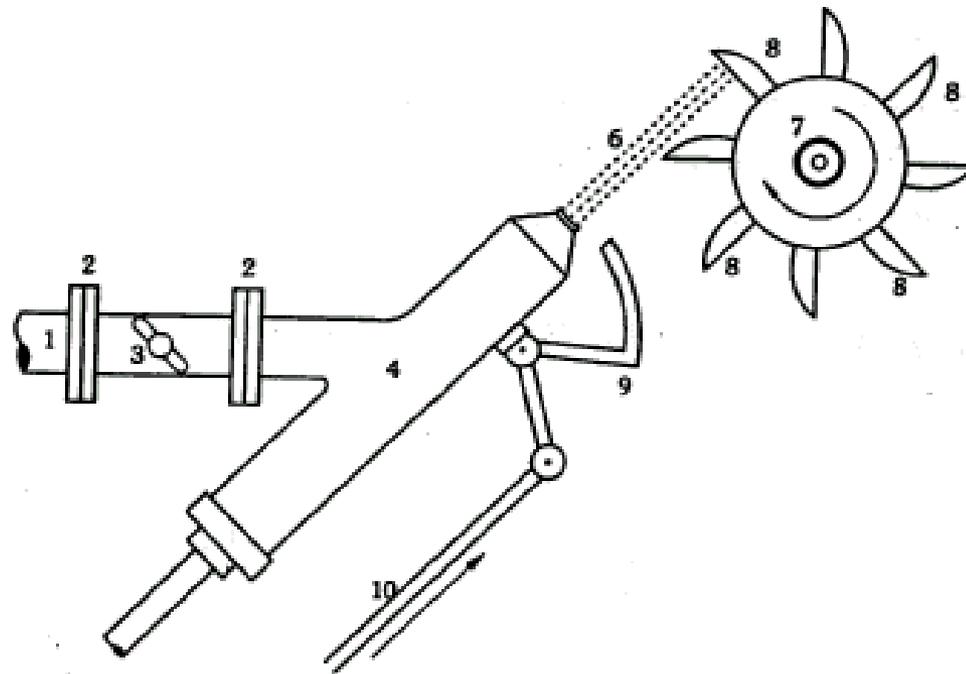
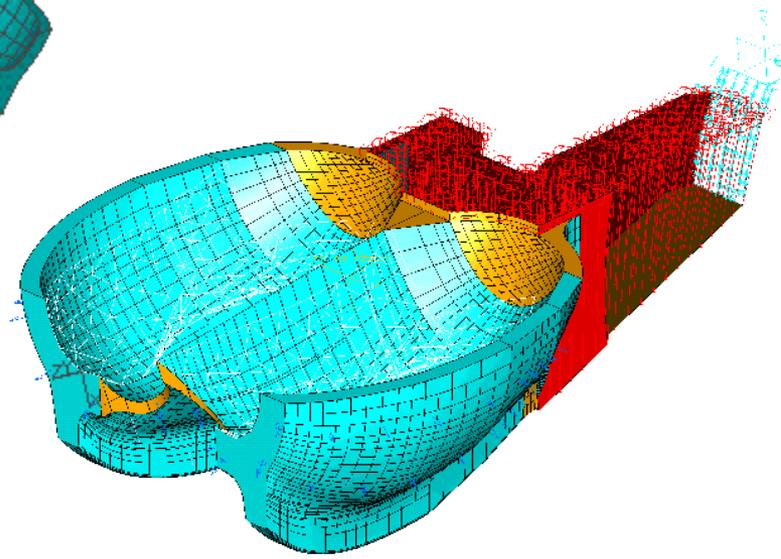
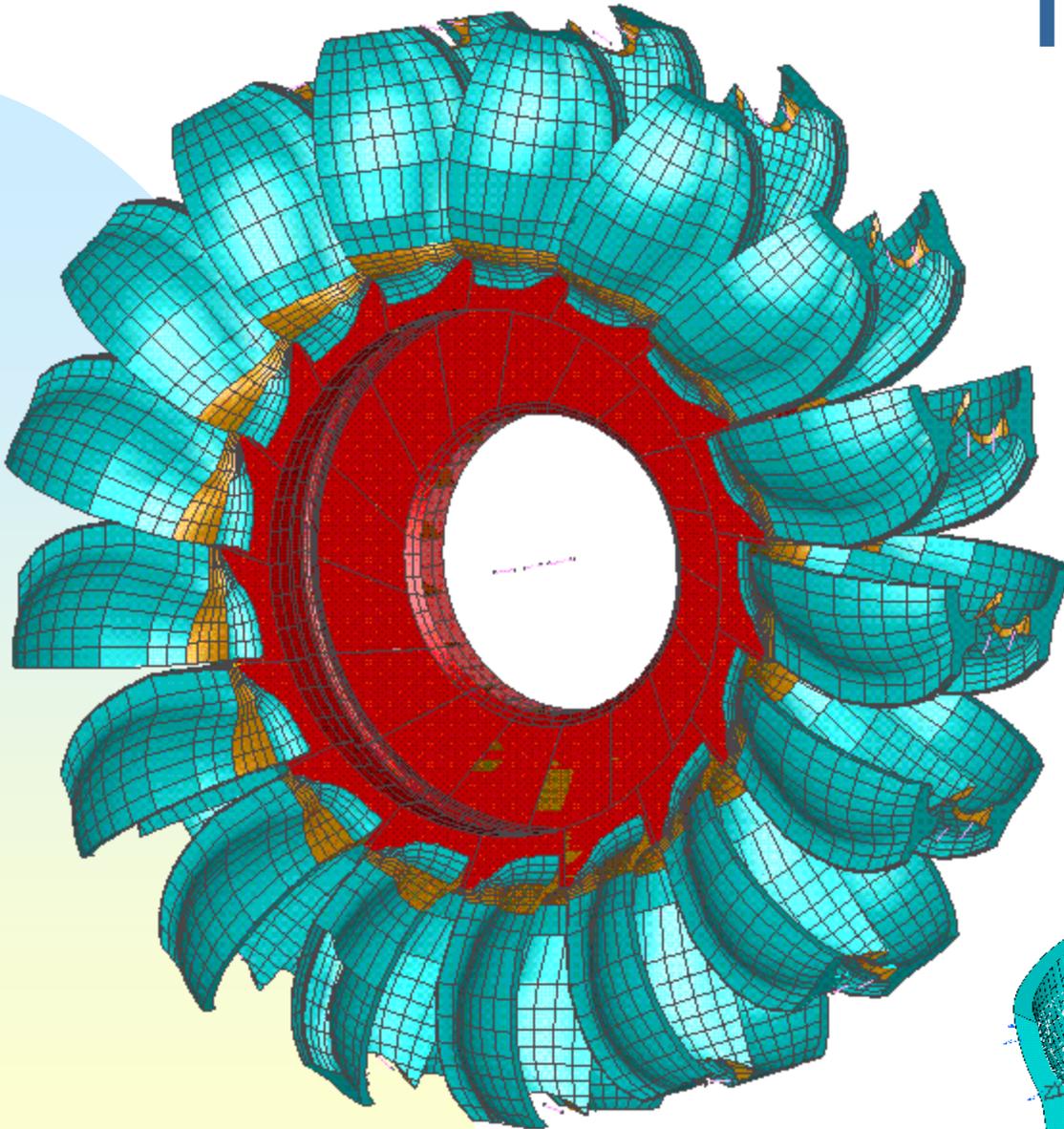


Figura 5.1: Vista simplificada de um turbina Pelton dotada de um Injetor.

1: Tubulação forçada	6: Jato d'água
2: Flanges	7: Rotor Pelton
3: Válvula Borboleta	8: Aletas do Rotor
4: Injetor Pelton	9: Desviador
5: Eixo do Servomotor	10: Comando do Desviador

Turbina Pelton



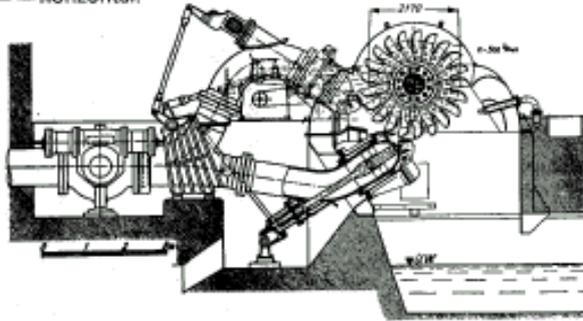


Figura 6.222 Tipo de turbina Pelton, de eixo horizontal, com dois injetores

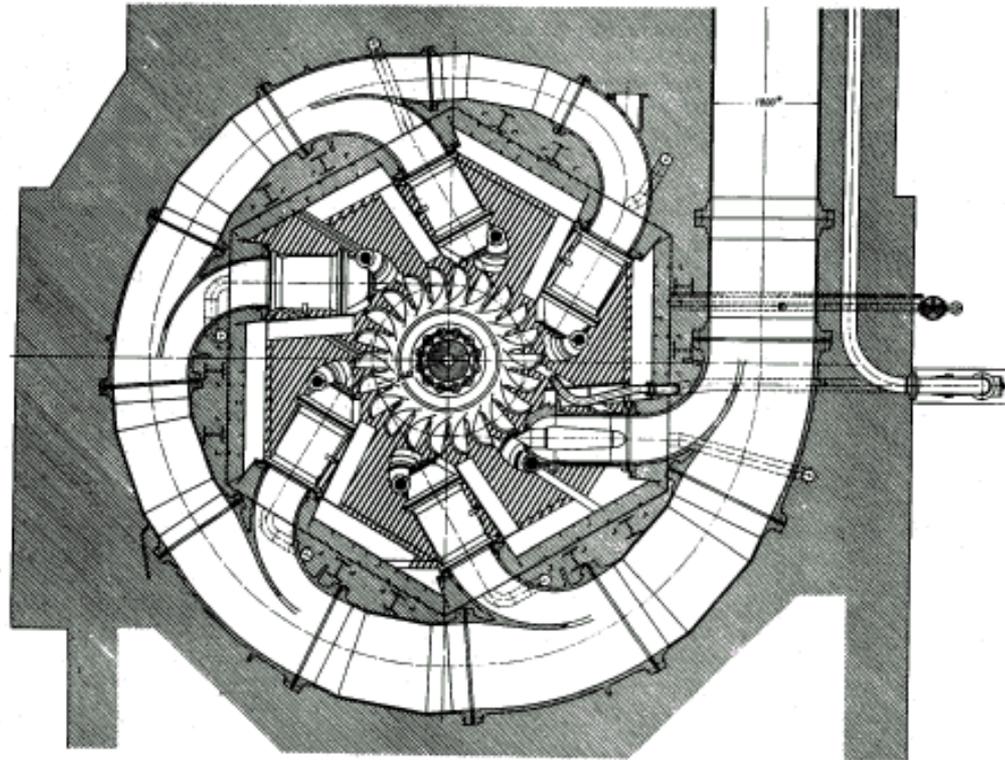
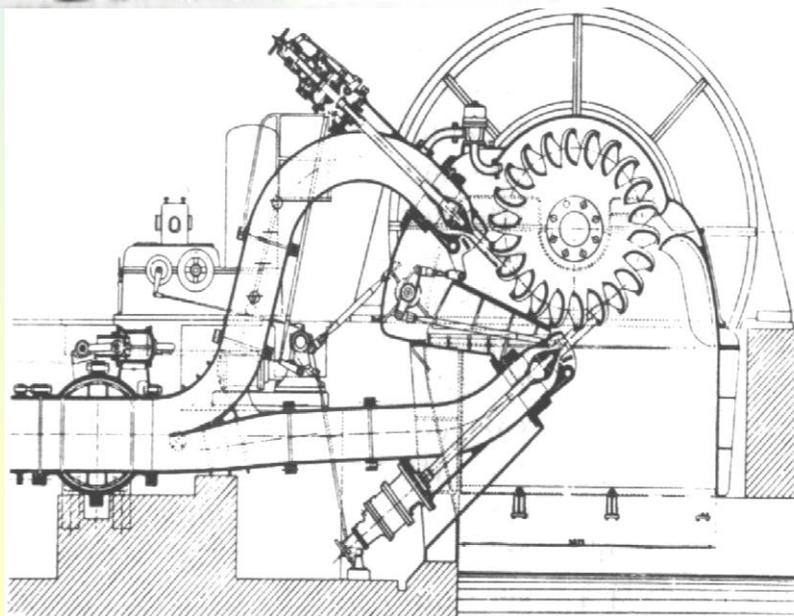
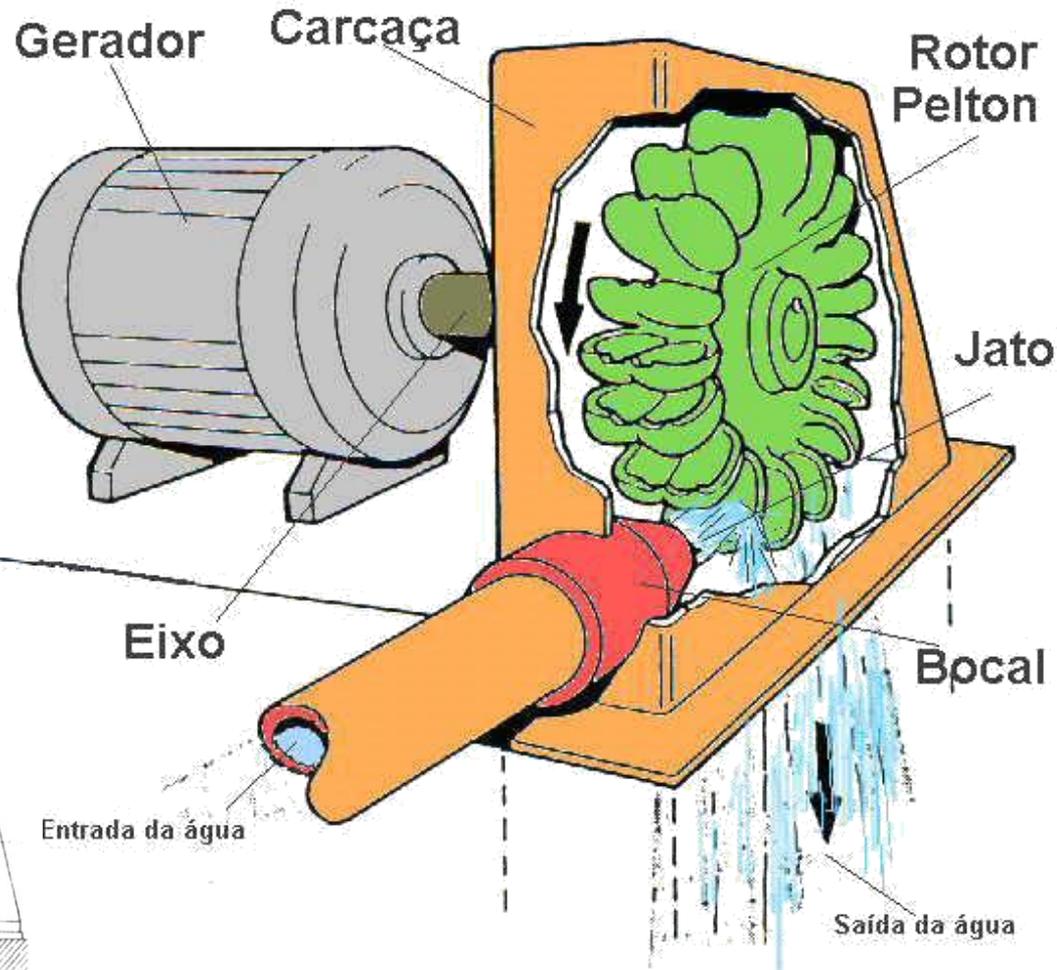
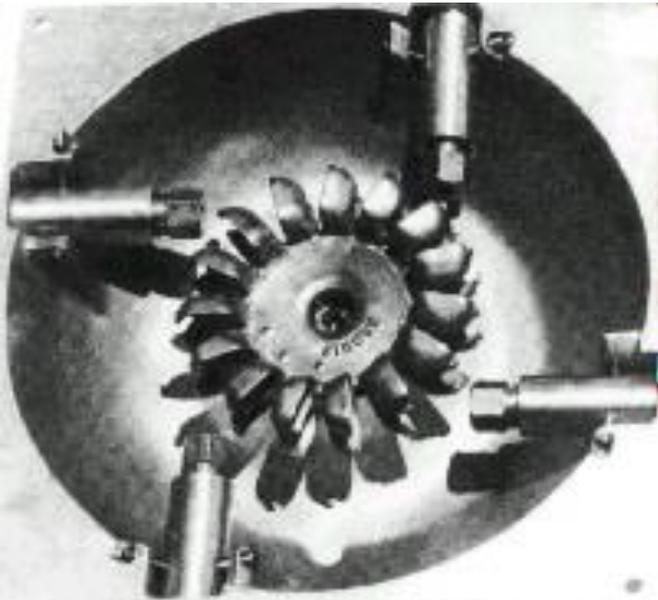
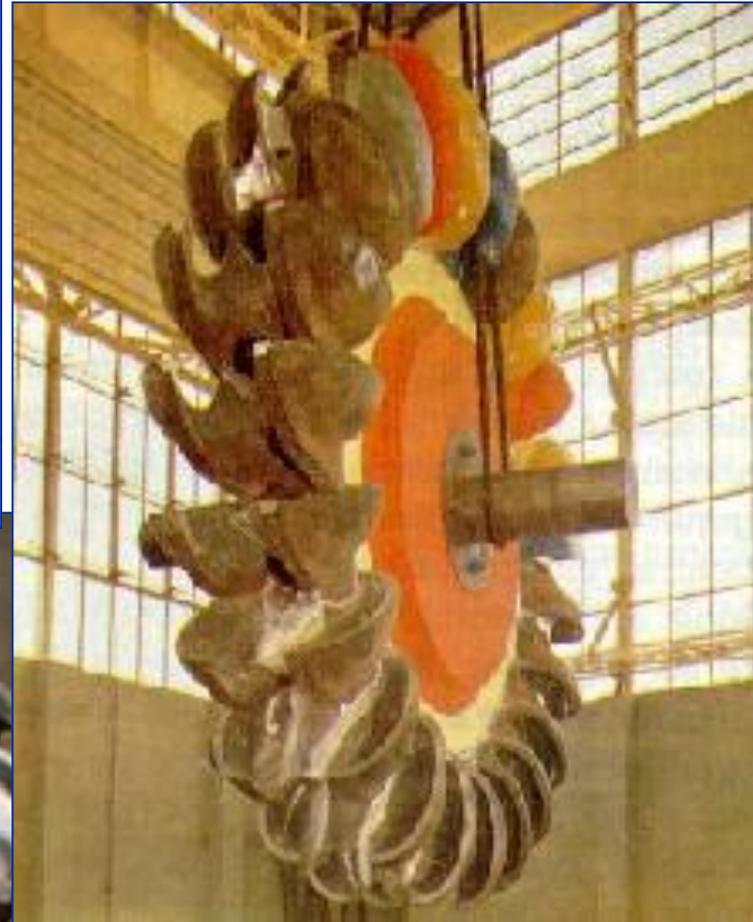
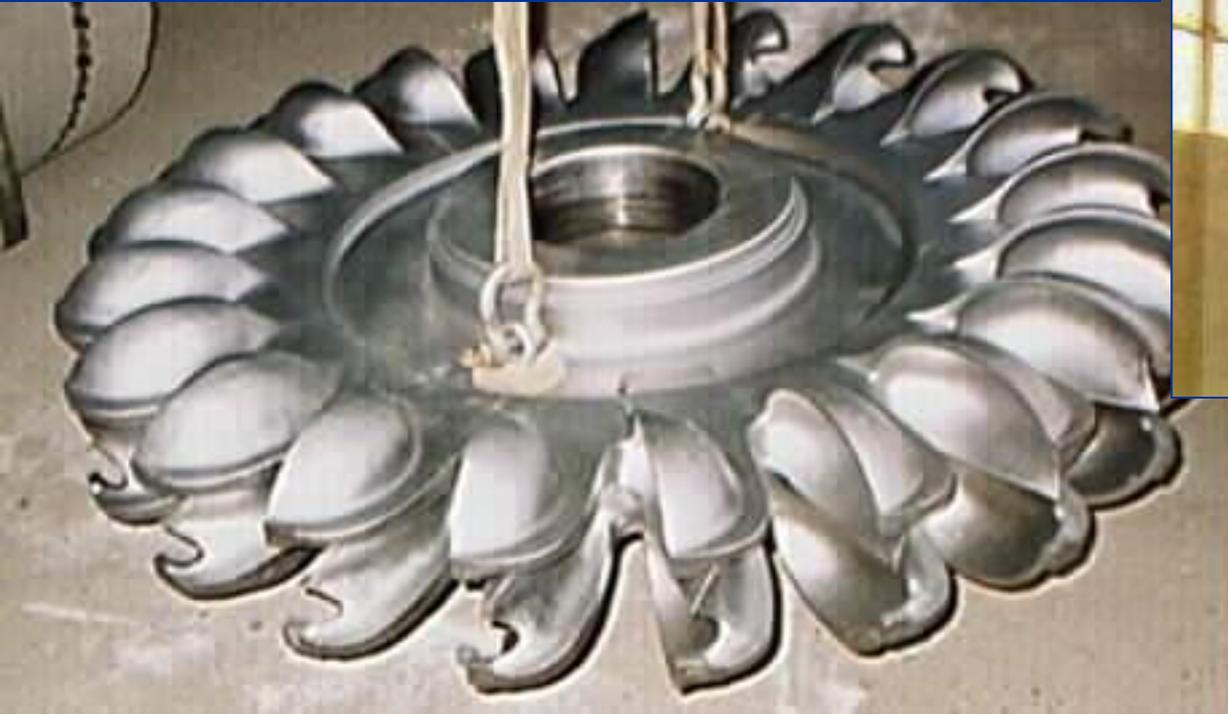


Figura 6.223 Tipo de turbina Pelton, de eixo vertical, com seis injetores

Turbina Pelton



Turbina Pelton

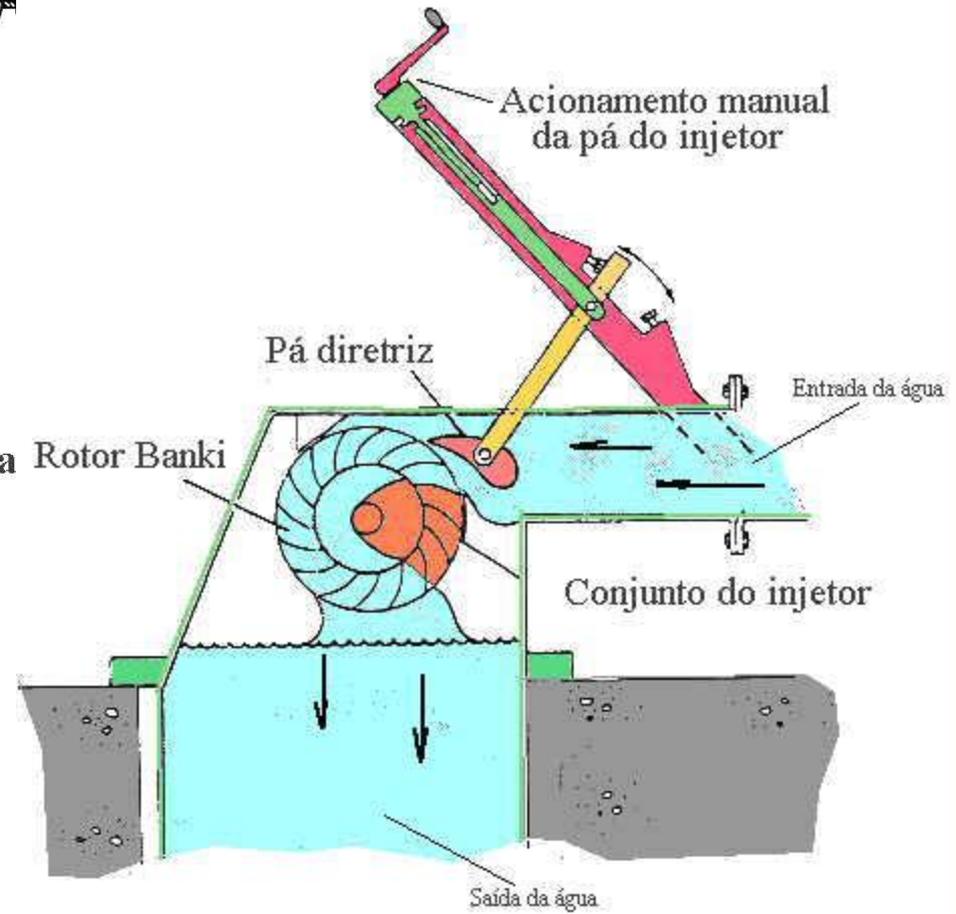
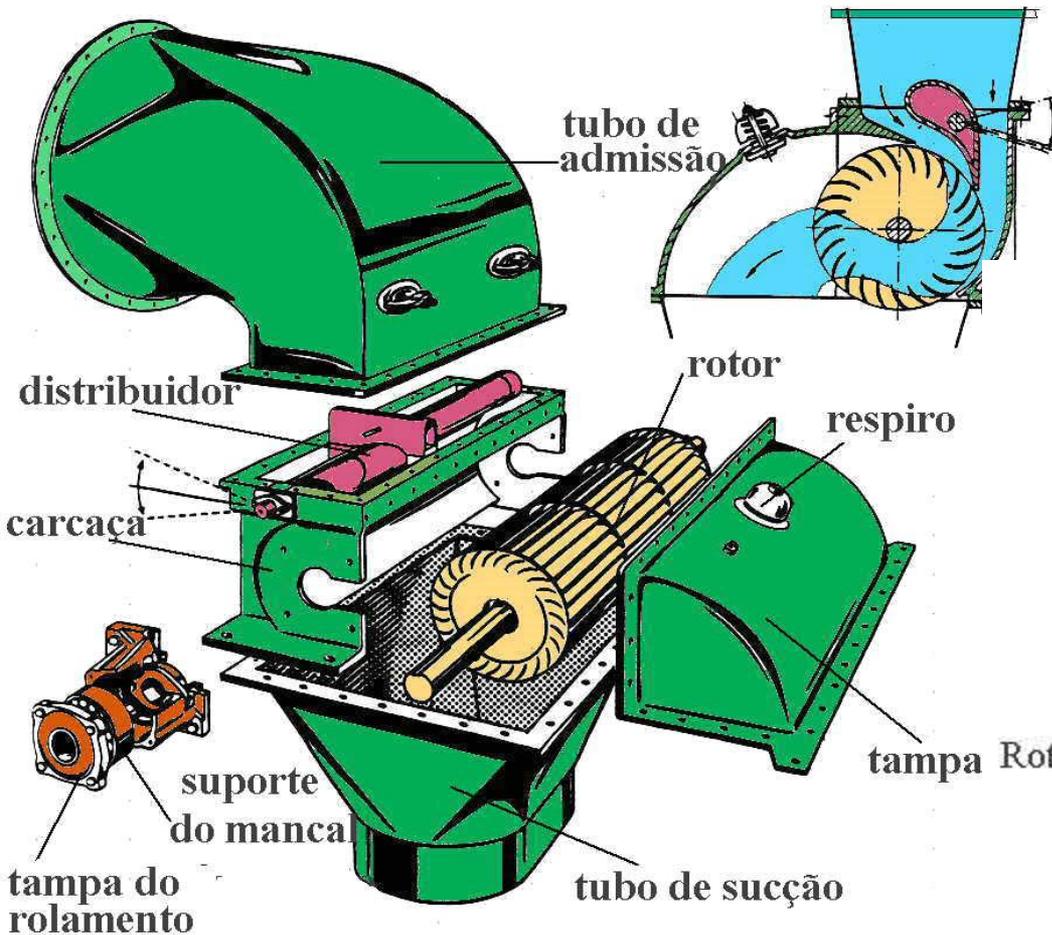


Alguns aproveitamentos Hidrelétricos Pelton, no Brasil

APROVEITAMENTO	Nº DE TURBINAS	H _{top} m	VAZÃO m ³ /seg	LOCAL (Estado)
CUBATÃO I	9	720	12,0	São Paulo
CUBATÃO II	6	684	12,7	São Paulo
PARIGOT DE SOUZA	4	715	10,0	Paraná
FONTES	9	310	6,3	Rio de Janeiro

Com turbinas Pelton de eixo vertical, tem-se conseguido vencer alturas superiores a 1500m e vazões relativamente grandes de tal forma que as turbinas desenvolvam potências em torno de 100.000CV ou mais.

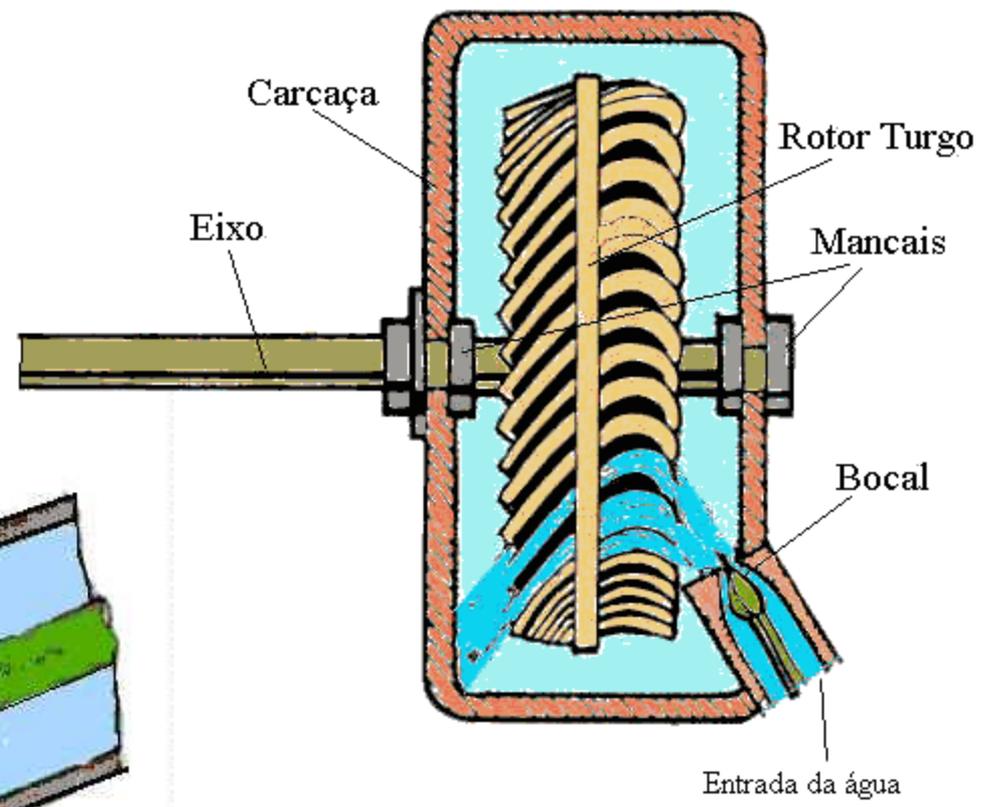
Turbina Michell-Banki



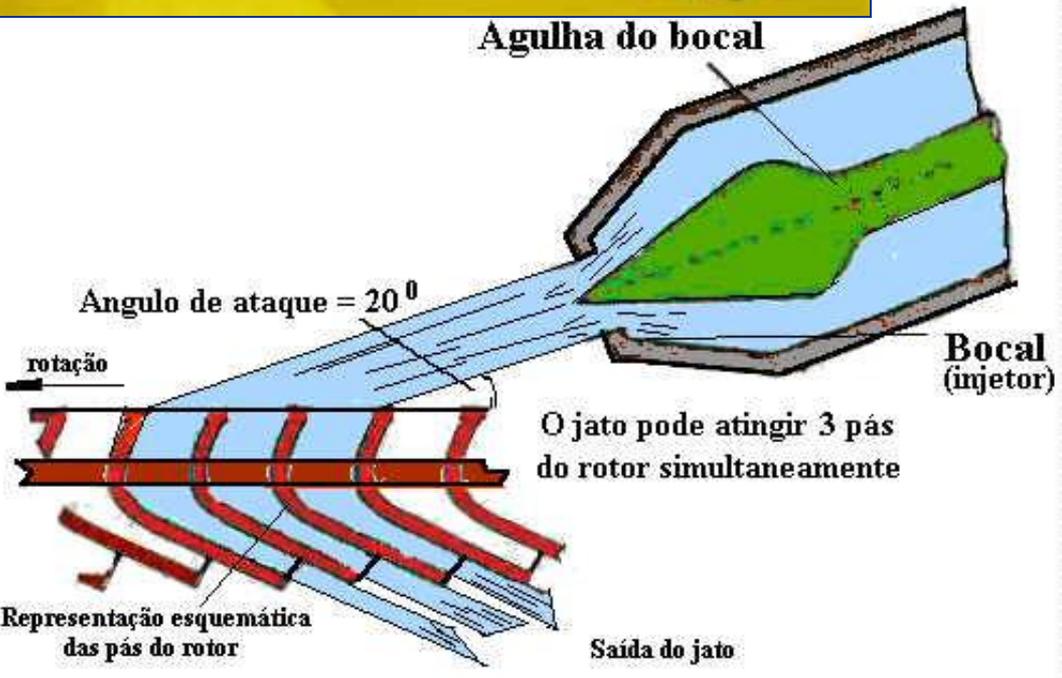
Turbina Michell-Banki



Turbina Turgo



Agulha do bocal



Angulo de ataque = 20°

rotação

Bocal (injetor)

O jato pode atingir 3 pás do rotor simultaneamente

Representação esquemática das pás do rotor

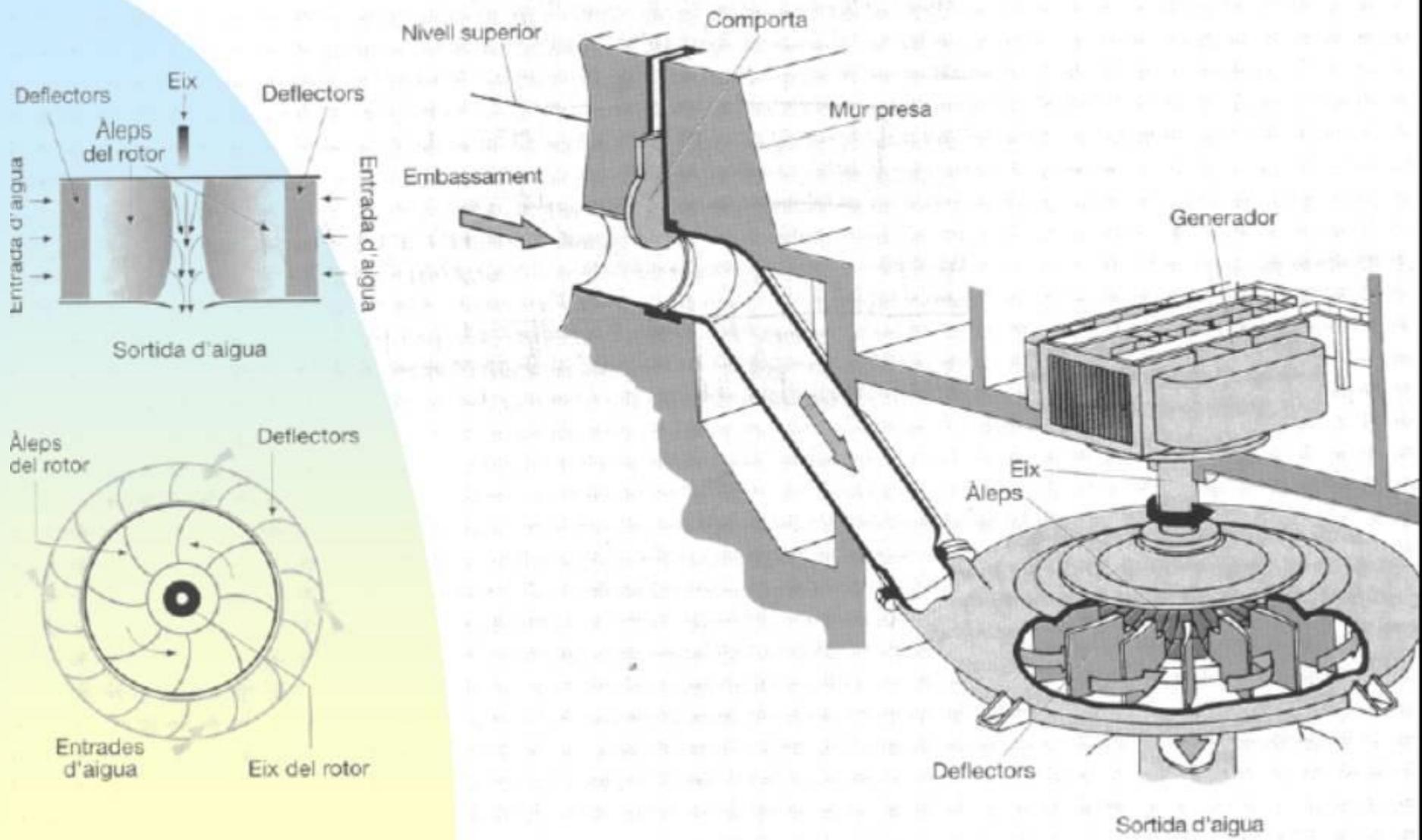
Saída do jato

TURBINAS HIDRÁULICAS DE REAÇÃO

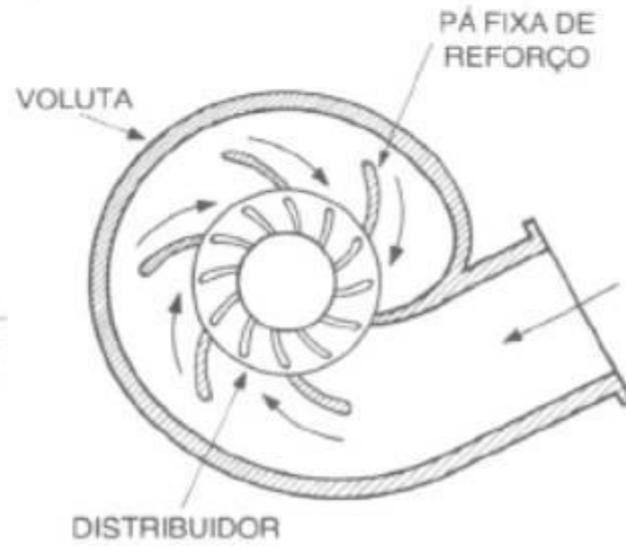
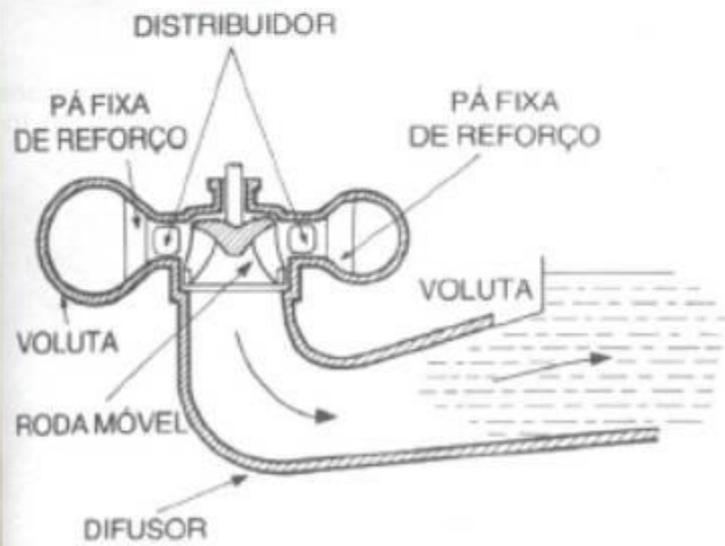
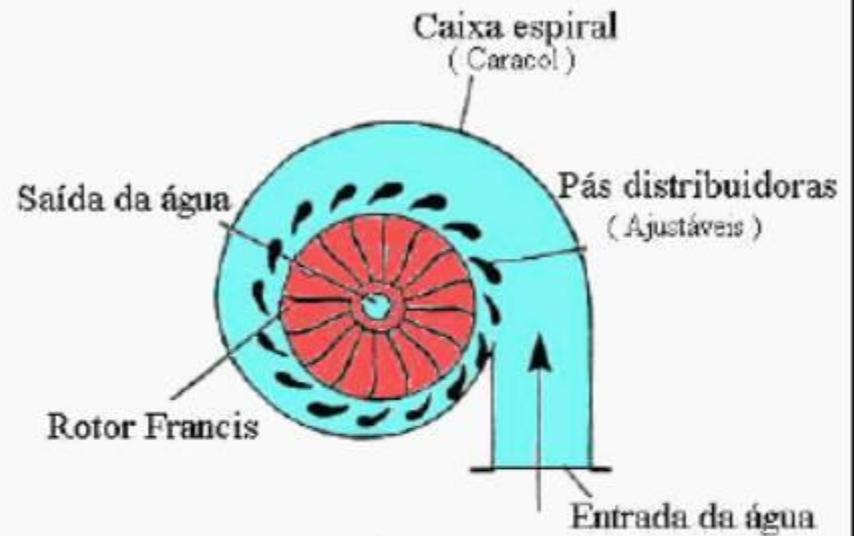
Turbina de reação é uma máquina hidráulica que converte energia mecânico-hidráulica, das formas cinética e de pressão, em energia mecânico-motriz. A água, à saída do rotor, pode estar a pressão positiva, negativa ou nula em relação a pressão atmosférica.



Turbinas Hidráulicas de Reação



Turbina Francis

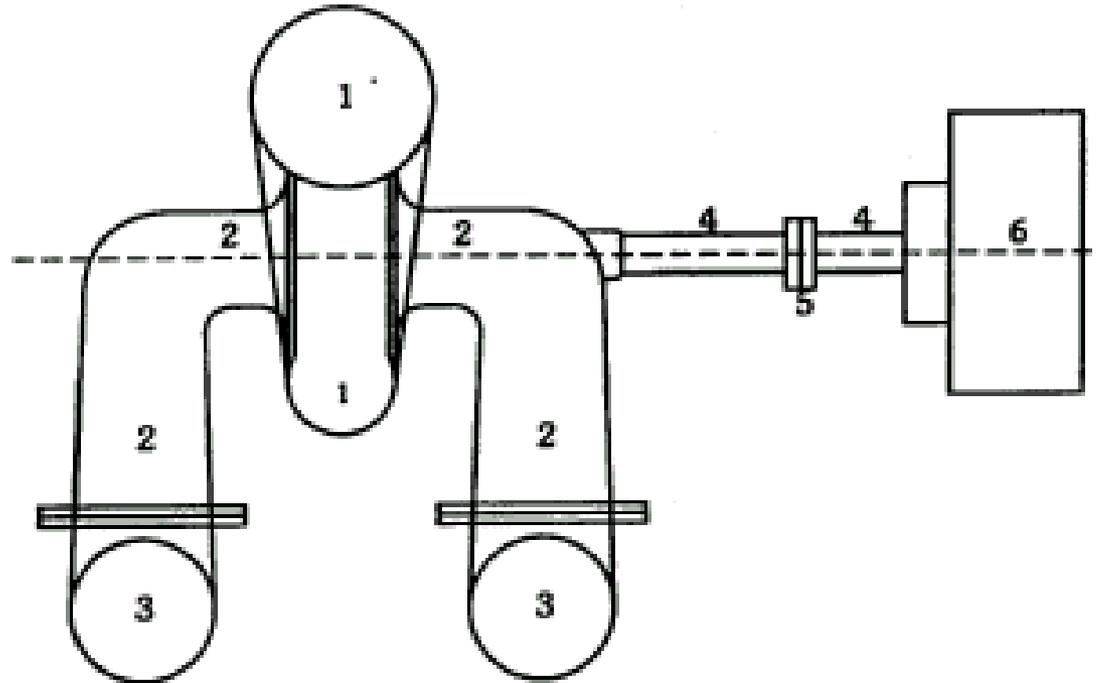


Evolução Modelos

Turbina Francis



TURBINAS DE REAÇÃO



*Figura 6.2: Turbina Francis a Eixo Horizontal operando com dois Rotores.
Gentileza: LINDNER - Joaçaba - S. C. – Brasil.*

ROTOR FRANCIS

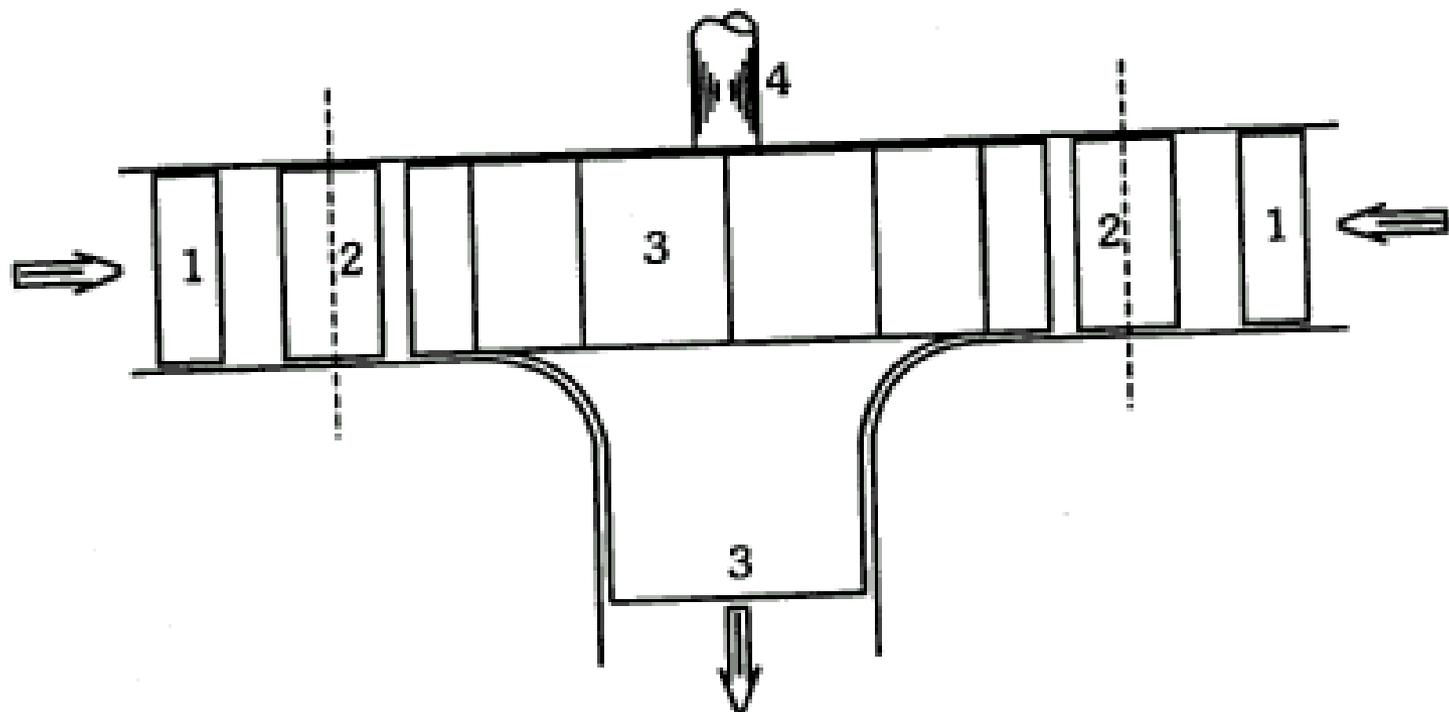
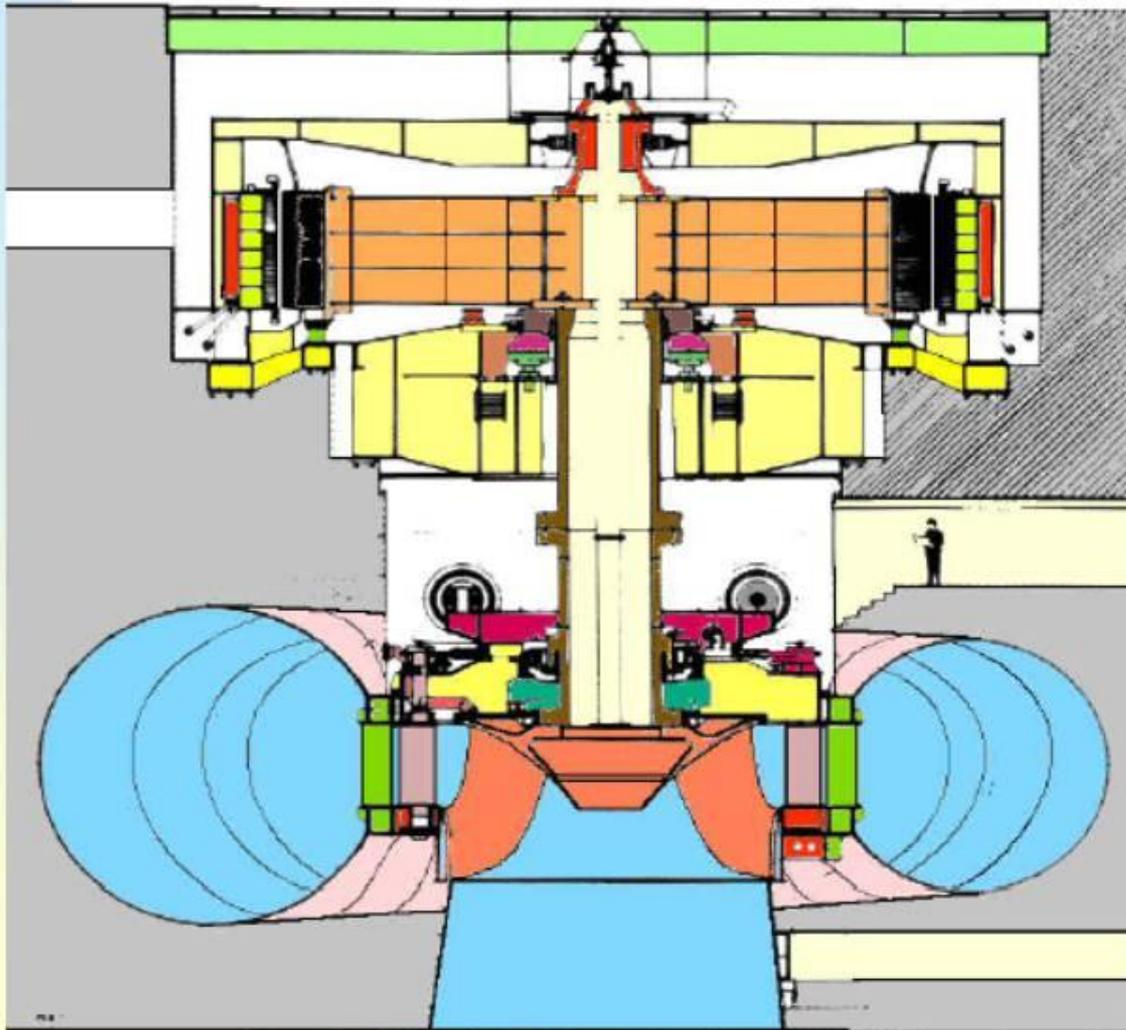


Figura 6.4: Rotor Francis e alguns dispositivos acessórios.

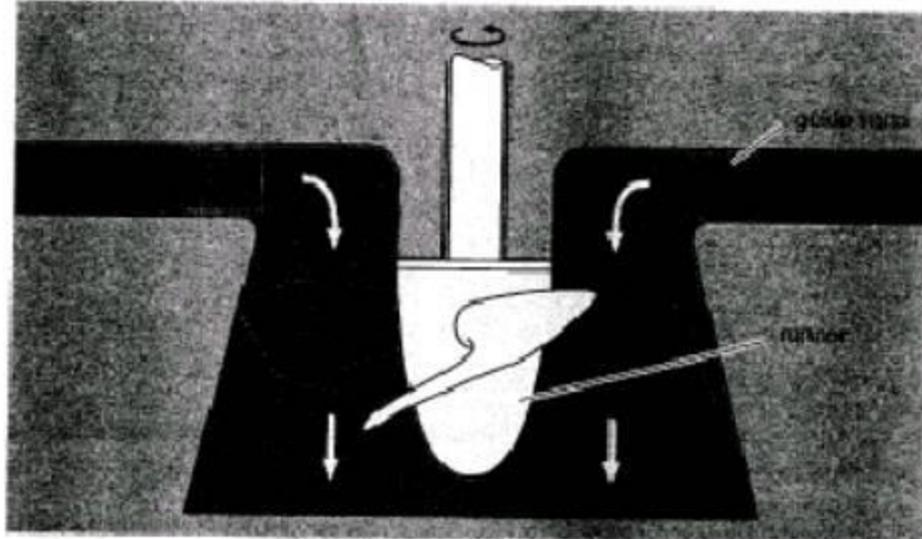
Conjunto Turbina-Gerador de Itaipu



- $P_n = 740 \text{ MW}$
- $Q = 660 \text{ m}^3/\text{s}$
- $H = 118 \text{ m}$
- $n = 92,3 \text{ rpm (60 Hz)}$

TURBINA KAPLAN

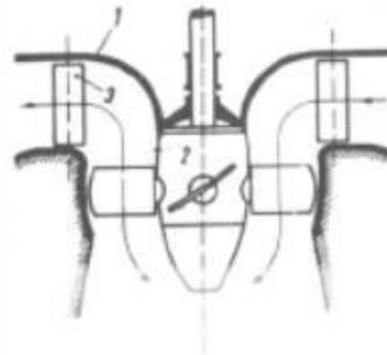
Figure 5.24 A 'propeller' or axial-flow turbine



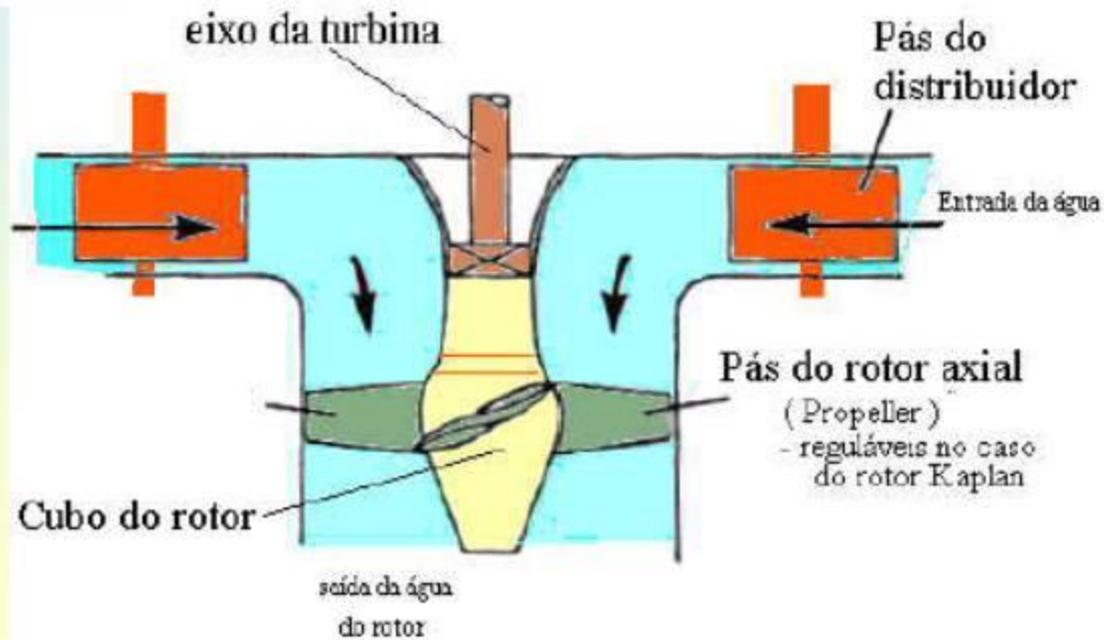
São turbinas apropriadas para uso em grandes volumes de água (vazão elevada) e usualmente utilizada em aproveitamento de baixa altura topográfica.

Tem a vantagem da possibilidade de variar o ângulo de passo das pás quando a demanda varia.

Turbina Kaplan



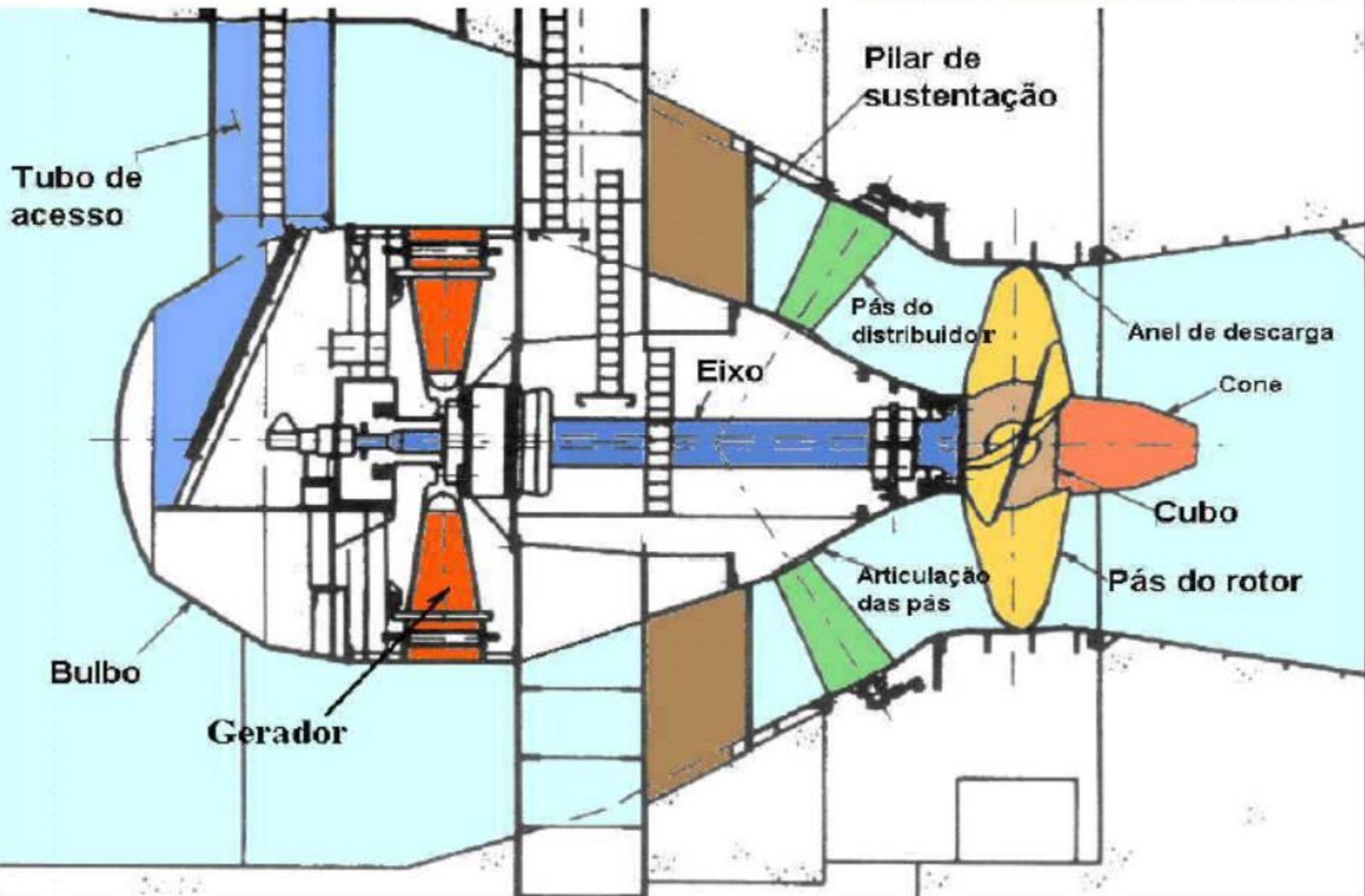
- 1 — Carcaça
- 2 — Rotor da turbina
- 3 — Distribuidor com pás de inclinação regulável



Turbina Kaplan



Turbina Bulbo



VAZÃO FIRME OU VAZÃO INSTACIONAL EM UM APROVEITAMENTO Q

Vazão é a quantidade de fluido por unidade de tempo, que se pode passar pela seção reta de uma tubulação ou canalização.

Denomina-se vazão firme de uma turbina a quantidade de fluido por unidade de tempo, que se pode passar por uma turbina sem que haja alteração da altura relativa do ponto A.

$$Q = \text{Vel} \cdot S$$

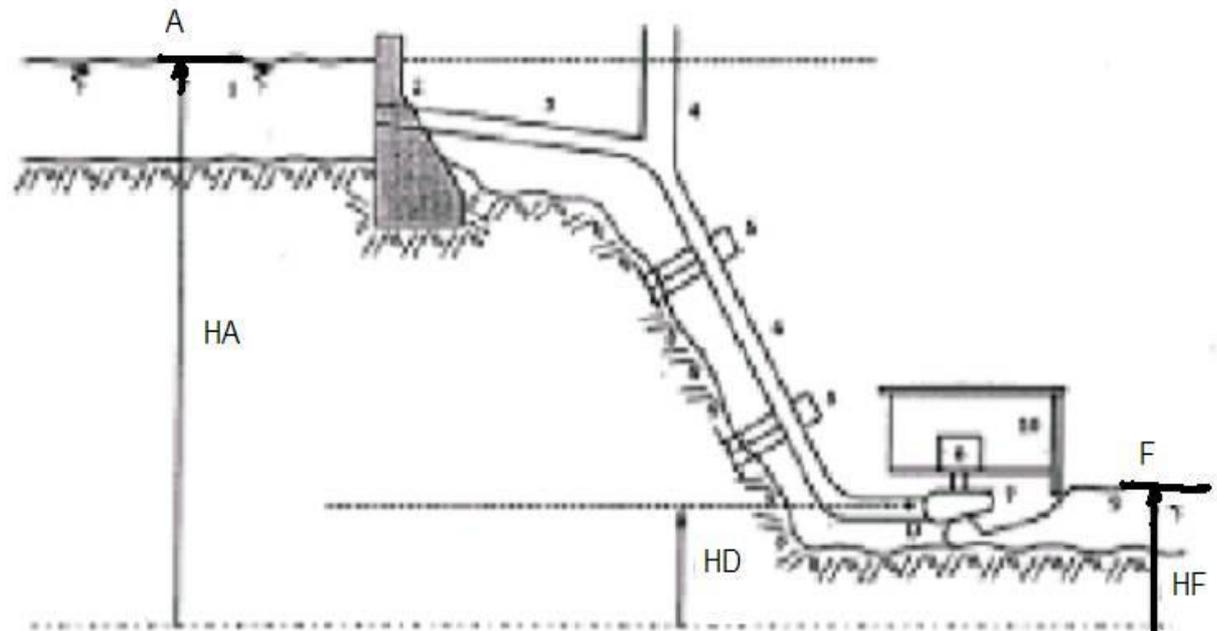
Em que Vel é a velocidade do fluido num ponto P de uma canalização na qual a seção reta é S.

ESCOLHA DO TIPO DE TURBINA

Uma turbina é escolhida para atender a determinados valores de queda (H_{Top}) e de descarga (Q), os quais dependem das condições próprias à usina onde a mesma é instalada. Esta escolha depende ainda de outra grandeza, que é o número de rotações por minuto do gerador elétrico (n) que a turbina irá acionar

Algumas definições:

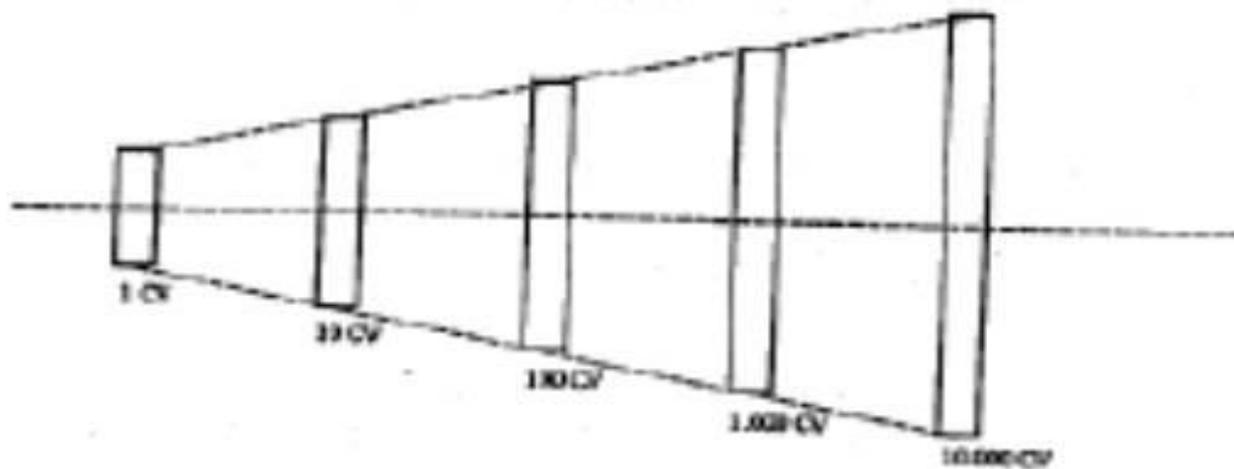
- Turbinas geometricamente semelhantes
- Turbina unidade



* : Aproveitamento Hidrelétrico dotado de uma Turbina de Reação.

TURBINAS GEOMETRICAMENTE SEMELHANTES

São turbinas desenvolvidas sob o mesmo desenho com alteração de suas dimensões e de suas potências, ou ainda, são turbinas cujas dimensões se alteram simultânea e proporcionalmente sem que sejam alteradas suas formas geométricas.



Turbinas Geometricamente Semelhantes

TURBINA UNIDADE

É uma turbina, hipotética, geometricamente semelhante a uma família de turbinas, que operando a uma altura disponível $H=1\text{m}$, fornece uma potência mecânica motriz igual a 1cv , operando em condições semelhantes a todos os outros membros da família.

A turbina unidade é a mesma para todas as turbinas geometricamente semelhantes de uma família e que constituem uma série de turbinas. Quando analisados, todos os membros da família operam com o mesmo rendimento.

Convenção: Todas as vezes que se menciona turbina unidade de uma série, estar-se-á referindo a turbinas semelhantes e em condições normais de funcionamento, isto é, trabalhando com o máximo rendimento.

Velocidade específica de uma turbina ou uma família de turbinas geometricamente semelhantes

É a velocidade real da TURBINA UNIDADE e a velocidade qualificatória de todas as turbinas que lhe sejam geometricamente semelhantes.

Assim, se uma família de turbinas Pelton, tem as mais variadas potências, aquela turbina da família que, sob uma altura disponível de $H = 1\text{m}$, fornecer em seu eixo mecânico uma potência igual a 1cv será a TURBINA UNIDADE da família. A velocidade dessa turbina será numericamente igual à velocidade específica da família.

Todas as demais turbinas dessa família poderão ter outras potências e outras velocidades reais, mas terão a velocidade específica definida pela turbina unidade.

A velocidade específica ns , ou, mais corretamente, o número específico de rotações por minuto, é, portanto, o número de rotações por minuto da turbina unidade e de todas que lhe forem geometricamente semelhantes.

	Velocidade específica	Velocidade real
Turbina unidade	ns	$nt=ns$
Turbina semelhante	ns	$nt \neq ns$

A velocidade específica de uma família geometricamente semelhante de turbinas é um elemento extremamente importante para a sua classificação.

Assim, uma turbina a ser especificada é **classificada** a partir de sua velocidade específica.

Tome-se por exemplo, uma turbina de reação da família **Francis**, que tenha uma **velocidade específica igual a 400rpm**.

Essa informação permite classificar a citada turbina e todas que lhe seja geometricamente semelhantes. Por outro lado, essa turbina referida, real, em face de sua potência nominal, de sua vazão nominal e da queda disponível necessária para uma operação normal, tem uma **velocidade angular nominal de 72 rpm**.

Tipos de turbinas e suas velocidades específicas

MODO DE OPERAR	VELOCIDADE ESPECÍFICA (RPM)	TIPO DE TURBINA	ALTURA DISPONÍVEL DO APROVEITAMENTO
A	Até 18 rpm	Pelton 1 injetor	Até 800 m
A	18 a 25 rpm	Pelton 1 injetor	400 a 800 m
A	26 a 35 rpm	Pelton 1 injetor	100 a 400 m
A	26 a 35 rpm	Pelton 2 injetores	400 a 800 m
A	36 a 50 rpm	Pelton 2 injetores	100 a 400 m
A	51 a 72 rpm	Pelton 4 injetores	100 a 400 m
R	55 a 70 rpm	Francis Lentíssima	200 a 400 m
R	70 a 120 rpm	Francis Lenta	100 a 200 m
R	120 a 200 rpm	Francis Média	50 a 100 m
R	200 a 300 rpm	Francis Veloz	25 a 50 m
R	300 a 450 rpm	Francis Ultraveloz	15 a 25 m
R	400 a 500 rpm	Hélice Veloz	Até 15 m
R	270 a 500 rpm	Kaplan Lenta	15 a 50 m
R	500 a 800 rpm	Kaplan Veloz	05 a 15 m
R	800 a 1100 rpm	Kaplan Velocíssima	Até 05 m



A – turbina de ação

R – turbina de reação

CÁLCULO DA VELOCIDADE ESPECÍFICA DOS DIVERSOS TIPOS DE TURBINAS

Quando se escolhe uma turbina para uma dada instalação, as grandezas conhecidas são a descarga Q (vazão), a queda (H_{Top}) e o número de rotações por minuto (n).

Com esses elementos, e o arbitramento estimativo preliminar dos valores de rendimento η_T e η_H , calcula-se o valor da potência P_{mec} através da seguinte fórmula:

$$P_{mec} = 9,8 \cdot \eta_T \cdot \eta_H \cdot Q \cdot H_{Top} \text{ [kW]}$$

Levando P_m à expressão (rigorosa), vem:

$$n_s = \frac{n \sqrt{P_{mec} (CV)}}{H_{top} \sqrt[4]{H_{top}}}$$

Fornece o valor da velocidade específica

$$n_p = \frac{n \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_{top}^3}}$$

$$n = \frac{60f}{p}$$

$p = n^\circ$ de pares de polos

n_p = Função característica (se relaciona com a rotação nominal sem necessidade de hipóteses quanto ao rendimento).

η_T e η_H = rendimentos da Turbina e do circuito hidráulico

P_{mec} = potência mecânica no eixo da Turbina

n = velocidade nominal (RPM), P_{mec} (CV)

1CV = 736Watts

Fórmulas empíricas para obtenção de ns, nos quais aparece apenas o valor da queda Htop (ou H_d).

$$n_s = \frac{2300}{\sqrt{H_{TOP}}} \quad \text{Francis - empírica}$$

$$n_s = \frac{3100}{\sqrt{H_{TOP}}} \quad \text{Kaplan - empírica}$$

$$n_s = \frac{2600}{\sqrt{H_{TOP}}} \quad \text{Hélice - empírica}$$

$$n_s = \sqrt{ro} \frac{510}{\sqrt{H_{top}}} \quad \text{Pelton - empírica}$$

ro= número de injetores

Obs1: Estas fórmulas servem apenas para dar uma indicação da velocidade específica, nas quais aparece apenas o valor da queda e servem para uma primeira estimativa.

Obs2: Quando houver uma estimativa das perdas na adução (tomada d'água e conduto forçado) deve-se utilizar sempre a altura de queda dita "Altura Disponível - H_d".

$$H_d = H_{Top} - H_p$$

$$H_p = \Delta H_{TA} + \Delta H_{CA}$$

H_p=Altura equivalente de perdas hidráulicas
ΔH_{TA}= perda hidráulica na tomada d'água (m)
ΔH_{CA}= perda hidráulica no conduto forçado (m)

Fórmulas empíricas para obtenção de ns, nos quais aparece apenas valor da queda disponível.

Para Turbinas Francis, alguns Autores optam, ao invés de n_s , para definir o campo de aplicação, utilizar a grandeza característica “K”.

$$K = n_s * \sqrt{H_d} \quad \text{Francis - empírica}$$

K = 2600 Paulo Afonso III (410 MW) / Itaipu (715 MW)

K= 2400 Ilha Solteira (165 MW) / Estreito (231 MW)

K = 2200 Marimbondo (178 MW) / São Simão (381 MW)

NÚMERO REAL DE ROTAÇÃO DAS TURBINAS

As turbinas acionam diretamente os geradores de energia elétrica, de modo que, naturalmente, ambos têm o mesmo número de rotações.

Mas, nos alternadores, pela forma como são construídos, existe uma dependência entre as grandezas

p = número de pares de pólos

N = número de rotações por minuto

f = frequência da corrente em hertz

Em Eletrotécnica demonstra-se que $n = 60f/p$, de modo que, podemos organizar, para alguns valores de p e a frequência de 60 Hz, a tabela abaixo.

rotações por minuto síncronos do alternador trifásico em função do número de pares de pólos

p	4	6	8	12	16	18	20	24	30	36	40	45	60
f	900	600	450	300	225	200	180	150	120	100	90	80	60

Curvas características das eficiências

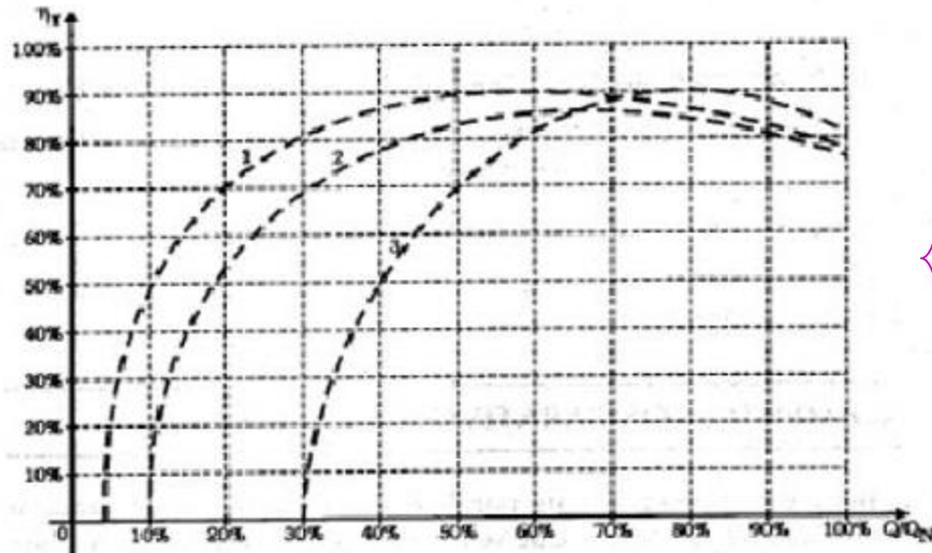


Figura 6.21: Curvas Características para as Turbinas Kaplan (1), Francis (2) e Hélice Fixa (3).

Para a figura 6.21:

1: Turbinas Kaplan.
2: Turbinas Francis.

3: Turbinas Hélice.

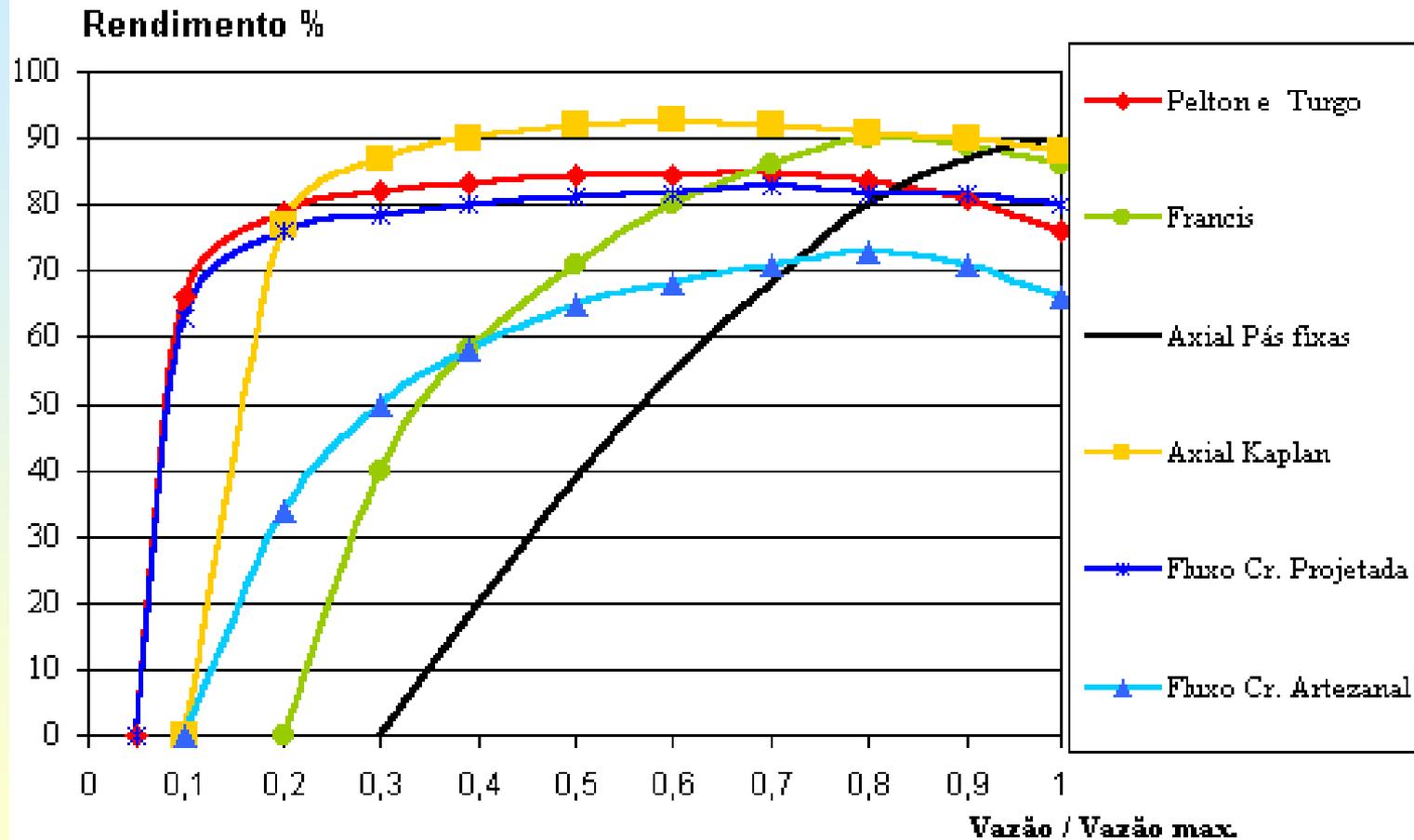
Rendimento de uma turbina é a relação entre a potência mecânica que a turbina coloca a disposição do gerador e a potência que o fluido coloca na entrada do seu rotor.

É função de muitas variáveis:

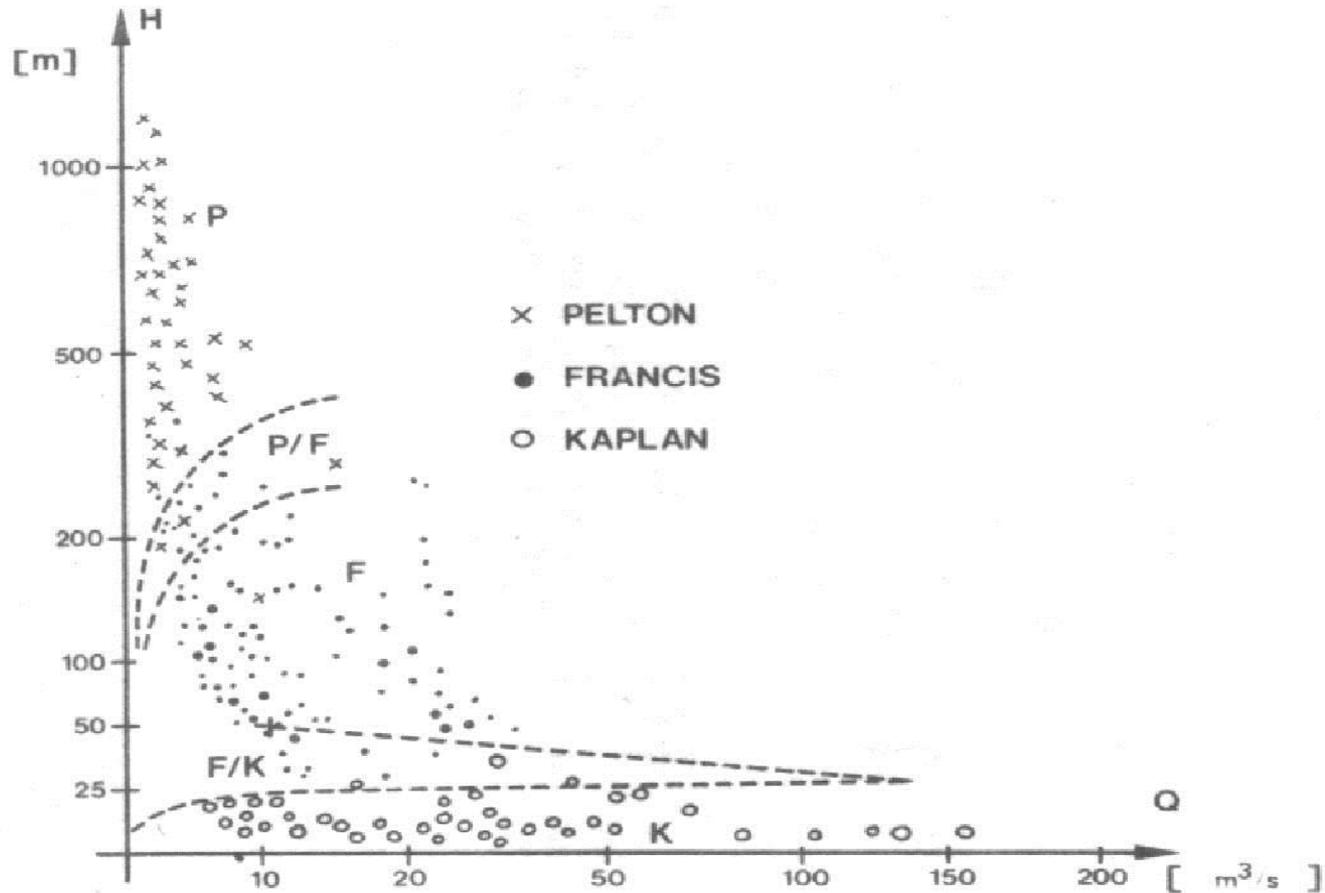
- potência nominal da turbina
- Porcentagem do fluido turbinado
- Tipo de turbina
- Fabricante
- Montagem ou posição física do eixo

Turbinas pelton de grande porte: 93% de rendimento a uma vazão de 70 a 80% da sua vazão nominal

Rendimento das Turbinas

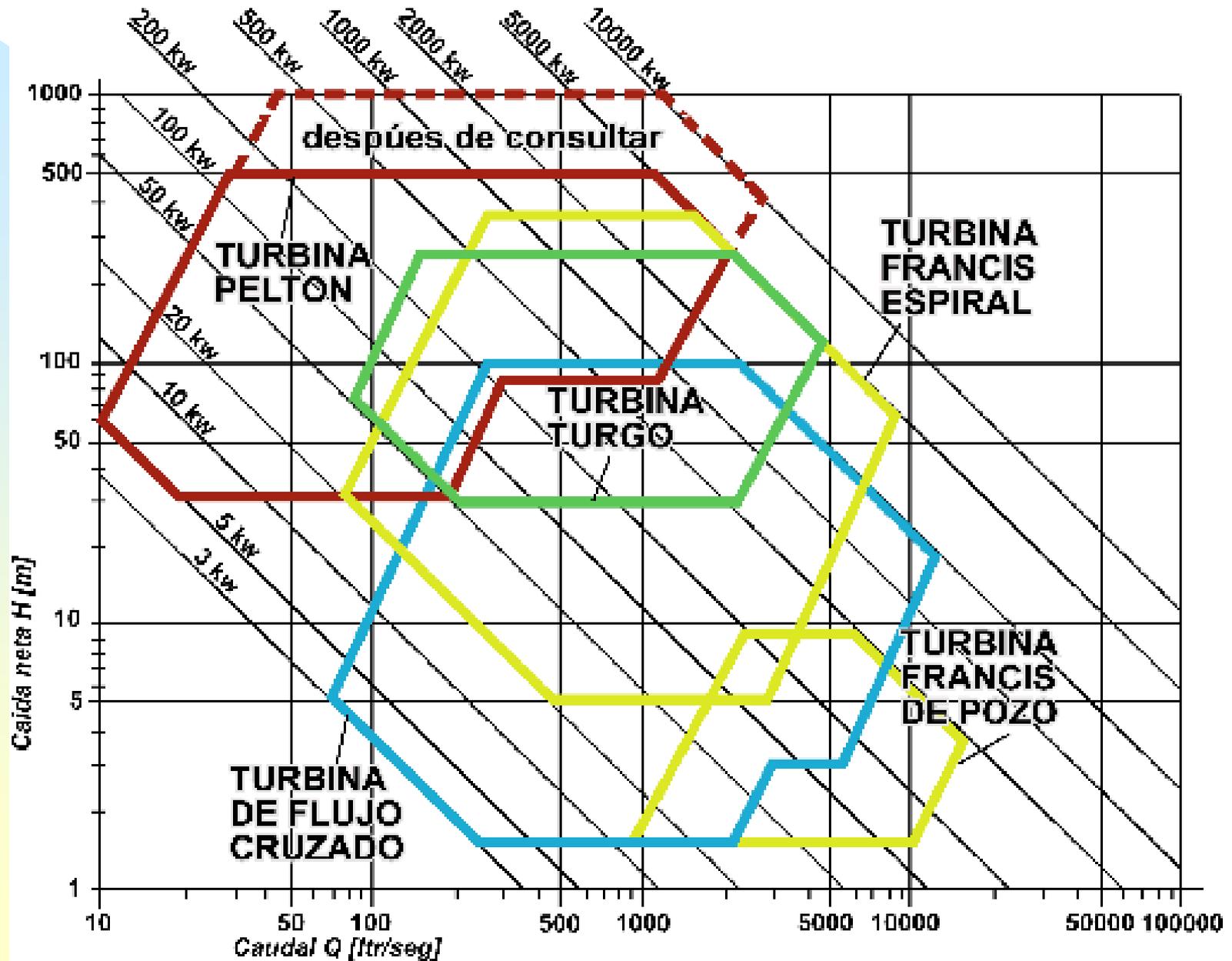


Escolha das Turbinas



— Zonas de aplicação (H e Q) das turbinas Pelton, Francis e Kaplan

Escolha das Turbinas

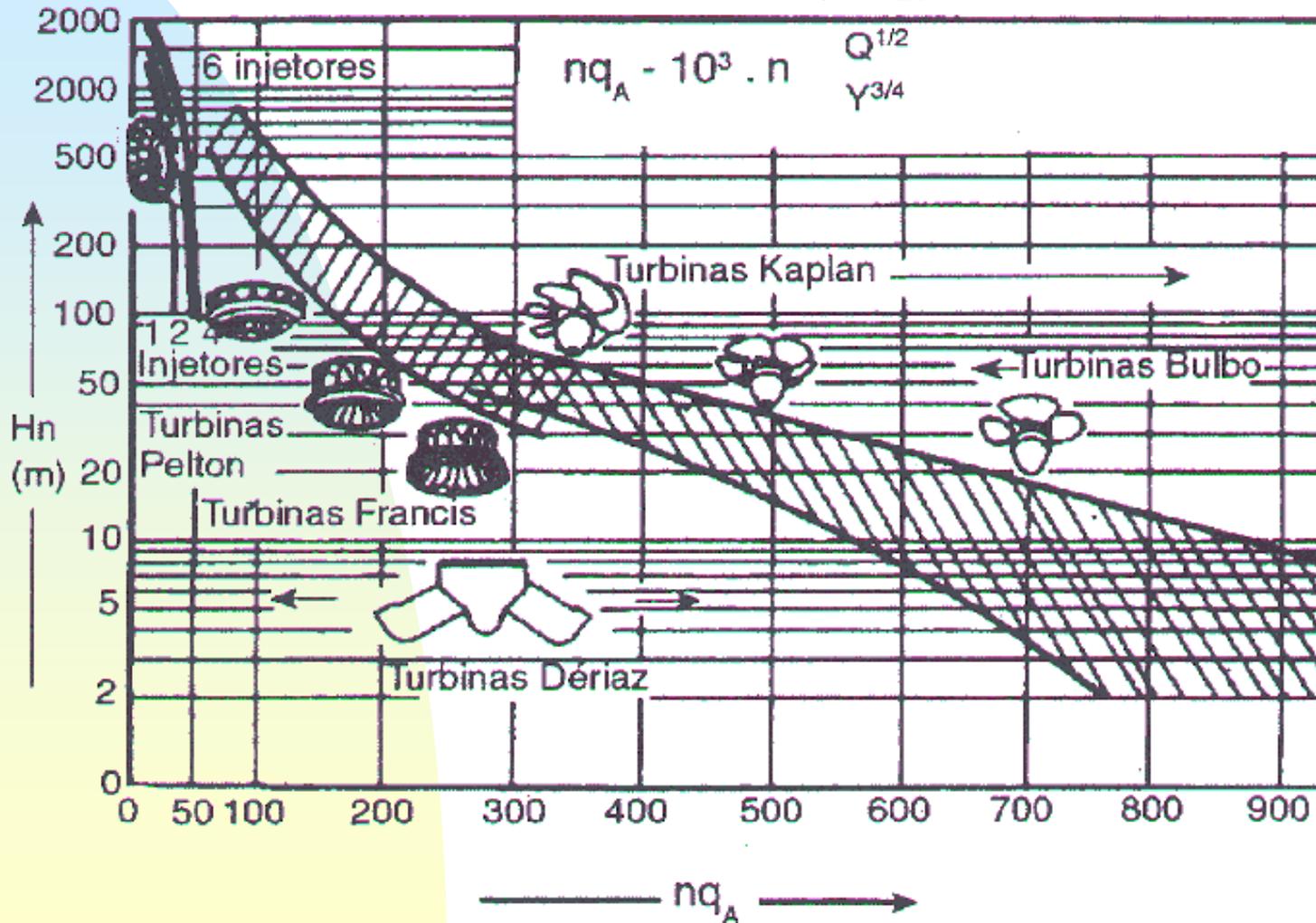


Escolha das Turbinas

n (rps)

Q (m³/s)

$Y - 9,81 \cdot H$ (J/Kg)



Tipos de turbinas e suas velocidades específicas

MODO DE OPERAR	VELOCIDADE ESPECÍFICA (RPM)	TIPO DE TURBINA	ALTURA DISPONÍVEL DO APROVEITAMENTO
A	Até 18 rpm	Pelton 1 injetor	Até 800 m
A	18 a 25 rpm	Pelton 1 injetor	400 a 800 m
A	26 a 35 rpm	Pelton 1 injetor	100 a 400 m
A	26 a 35 rpm	Pelton 2 injetores	400 a 800 m
A	36 a 50 rpm	Pelton 2 injetores	100 a 400 m
A	51 a 72 rpm	Pelton 4 injetores	100 a 400 m
R	55 a 70 rpm	Francis Lentíssima	200 a 400 m
R	70 a 120 rpm	Francis Lenta	100 a 200 m
R	120 a 200 rpm	Francis Média	50 a 100 m
R	200 a 300 rpm	Francis Veloz	25 a 50 m
R	300 a 450 rpm	Francis Ultraveloz	15 a 25 m
R	400 a 500 rpm	Hélice Veloz	Até 15 m
R	270 a 500 rpm	Kaplan Lenta	15 a 50 m
R	500 a 800 rpm	Kaplan Veloz	05 a 15 m
R	800 a 1100 rpm	Kaplan Velocíssima	Até 05 m

A – turbina de ação

R – turbina de reação

CATEGORIA DO ROTOR	VELOCIDADE ESPECÍFICA (RPM)
Francis Lentíssimo	$N_s \cong 60 \text{ rpm}$
Francis Lento	$N_s \cong 100 \text{ rpm}$
Francis Médio	$N_s \cong 160 \text{ rpm}$
Francis Veloz	$N_s \cong 250 \text{ rpm}$
Francis Ultraveloz	$N_s \cong 380 \text{ rpm}$
Francis Velocíssimo	$N_s \cong 460 \text{ rpm}$

Lenta

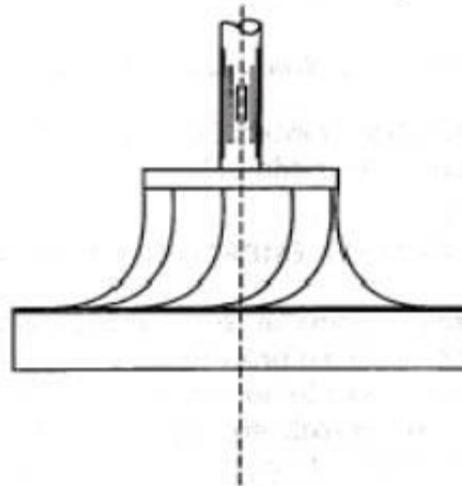


Figura 6.11: Rotor Francis Ultraveloz.

Para a figura 6.11:

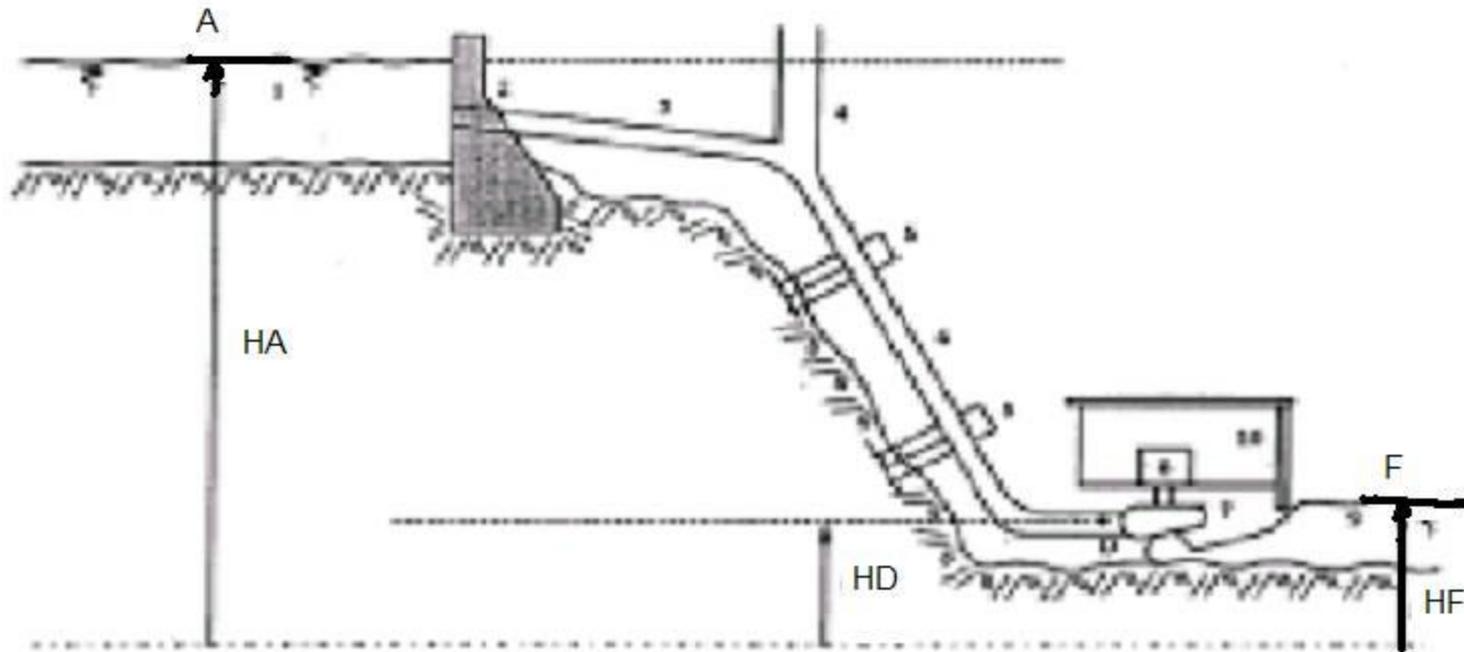
- 1: Rotor Francis Ultraveloz.
- 2: Eixo Motriz da Turbina.
- 3: Aleta do Rotor.

- 4: Cubo Hidrodinâmico.
- 5: Coroa D_1 .
- 6: Coroa D_2 .

Tabela 7.1 Campo de aplicação dos diversos tipos de turbinas

Tipos de turbinas		n_s (rpm)	$n_q = n_s / 3,38$ (rpm)	H (m)
Pelton	1 jato	18	5,3	800
	1 jato	18-25	5,3-7,4	800-400
	1 jato	26-35	7,7-10,4	400-100
	2 jatos	26-35	7,7-10,4	800-400
	2 jatos	36-50	10,7-14,9	400-100
	4 jatos	40-50	11,9-14,9	400-100
	5 jatos	51-71	15,1-21,0	500-200
	6 jatos	72-90	21,4-26,8	400-100
Francis	muito lenta	55-70	16,4-20,8	600-200
	lenta	71-120	21,1-35,7	200-100
	normal	121-200	36,0-59,5	100-70
	rápida (ou Deriaz)	201-300	59,8-89,2	70-25
	extra-rápida	301-450	89,6-133,9	25-15
Propeller, Kaplan, Bulbo, Tubulares, "Straflo"	8 pás	250-320	74,4-95,2	70-50
	7 pás	321-430	95,5-128,0	50-40
	6 pás	431-530	128,3-157,7	40-30
	5 pás	534-620	158,0-184,5	30-20
	4 pás	624 em diante	185 em diante	30

Fundamentos



* : Aproveitamento Hidrelétrico dotado de uma Turbina de Reação.

1- RESERVATÓRIO SUPERIOR	6- TUBULAÇÃO FORÇADA
2- BARRAGEM	7- TURBINA DE REAÇÃO
3- TUBULAÇÃO DE PRESSÃO	8- GERADOR
4- CHAMINÉ DE EQUÍLBRIO	9- CANAL DE FUGA
5- BLOCOS DE ANCORAGEM	10- CASA DE MÁQUINAS

CÁLCULO DA VELOCIDADE ESPECÍFICA DOS DIVERSOS TIPOS DE TURBINAS

Quando se escolhe uma turbina para uma dada instalação, as grandezas conhecidas são a descarga Q (vazão), a queda (H_{Top}) e o número de rotações por minuto (n).

“Slide Replay”

Com esses elementos, e o arbitramento estimativo preliminar dos valores de rendimento η_T e η_H , calcula-se o valor da potência P_{mec} através da seguinte fórmula:

$$P_{mec} = 9,8 \cdot \eta_T \cdot \eta_H \cdot Q \cdot H_{Top} \text{ [kW]}$$

$$n_p = \frac{n \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_{top}^3}}$$

Levando P_m à expressão (rigorosa), vem:

$$n = \frac{60f}{p}$$

$$n_s = \frac{n \sqrt{P_{mec}(CV)}}{H_{top} \sqrt[4]{H_{top}}}$$

Fornece o valor da velocidade específica

$p = n^\circ$ de pares de polos

n_p = Função característica (se relaciona com a rotação nominal sem necessidade de hipóteses quanto ao rendimento).

η_T e η_H = rendimentos da Turbina e do circuito hidráulico

P_{mec} = potência mecânica no eixo da Turbina

n = velocidade nominal (RPM), P_{mec} (CV)

1CV = 736Watts

Fórmulas empíricas para obtenção de ns, nos quais aparece apenas o valor da queda Htop (ou H_d).

“Slide Replay”

$$n_s = \frac{2300}{\sqrt{H_{TOP}}}$$

Francis - empírica

$$n_s = \frac{3100}{\sqrt{H_{TOP}}}$$

Kaplan - empírica

$$n_s = \frac{2600}{\sqrt{H_{TOP}}}$$

Hélice - empírica

$$n_s = \sqrt{ro} \frac{510}{\sqrt{H_{top}}}$$

Pelton - empírica

ro= número de injetores

Obs1: Estas fórmulas servem apenas para dar uma indicação da velocidade específica, nas quais aparece apenas o valor da queda e servem para uma primeira estimativa.

Obs2: Quando houver uma estimativa das perdas na adução (tomada d'água e conduto forçado) deve-se utilizar sempre a altura de queda dita “Altura Disponível - H_d”.

$$H_d = H_{Top} - H_p$$

$$H_p = \Delta H_{TA} + \Delta H_{CA}$$

H_p=Altura equivalente de perdas hidráulicas
ΔH_{TA}= perda hidráulica na tomada d'água (m)
ΔH_{CA}= perda hidráulica no conduto forçado (m)

ALTURA TOPOGRÁFICA (com base na figura anterior)

$$H_{TOP_A} = H_A - H_D \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Turbinas de ação de eixo horizontal} \\ \text{Na saída do injetor} \end{array}$$

$$H_{TOP_R} = H_A - H_F \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Turbinas de reação} \\ \text{Colocado no canal de fuga} \end{array}$$

Altura disponível de um aproveitamento (H_d)

$$H_d = H_{TOP} - \Delta H_{TA} - \Delta H_{CA} \quad \text{onde}$$

$$\Delta H_{TA} \longrightarrow \text{Perdas energéticas inseridas pela tomada d'água}$$

$$\Delta H_{CA} \longrightarrow \text{Perdas na tubulação (conduto forçado)}$$

H_d se relaciona com a Potência Mecânica na entrada da Turbina

Rendimento de uma canalização ou tubulação

$$\eta_c = \frac{H_d}{(H_d + \Delta H_{CA})} \quad \text{ou} \quad \eta_c = \frac{H_d}{(H_{TOP} - \Delta H_{TA})}$$

Com a altura disponível calcula-se:

Potência Mecânico – Hidráulica = Potência na entrada da Turbina

$$P_H = \gamma \times Q \times H_d \quad (\text{Watts}) \quad \text{ou} \quad P_H = 9,8 \times Q \times H_d \quad (\text{kWatts})$$

$$P_H = \frac{1000}{75} \times Q \times H_d \quad (\text{CV})$$

$$P_{MU} = P_{MT}$$

Potência Mecânica Útil no eixo do Gerador

$$P_{MU} = \frac{1000}{75} \times Q \times H_d \times \eta_T$$

$$\eta_T = \frac{P_U}{P_H}$$

P_{MT} – Potência Mecânica na saída da Turbina = Potência Mecânica Útil no Eixo do Gerador

Sendo γ = peso específico da água = $(1000 \cdot 9.81)\text{N/m}^3$

Velocidade do eixo motriz de uma turbina hidráulica

A velocidade angular do eixo motriz de uma turbina hidráulica está relacionada a elementos da turbina e a elementos do aproveitamento hidroelétrico em que está colocada.

A equação abaixo permite calcular a velocidade angular no eixo motriz de uma turbina a partir da velocidade específica.

$$n_s = n \times \frac{PMT_{(CV)}^{0,5}}{(H_d)^{1,25}}$$

Fórmula “Rigorosa”

Onde:

n_s → Velocidade específica da família geometricamente semelhante em RPM

n → Velocidade angular do eixo motriz da turbina em RPM

$PMT_{(CV)}$ → Potência mecânico-motriz da turbina em CV

H_d → Altura disponível do aproveitamento em metros

Fórmulas empíricas para resolução do exercício

$$n_s = \frac{2300}{\sqrt{H_{top}}} \quad \text{Francis - empírica}$$

$$n_s = \frac{3100}{\sqrt{H_{top}}} \quad \text{Kaplan - empírica}$$

$$n_s = \frac{2600}{\sqrt{H_{top}}} \quad \text{Hélice - empírica}$$

Obs.: lembrar que quando houver disponibilidade de estimar ou calcular a Queda Disponível, essa deve ser utilizada em lugar da Queda Topográfica nas equações acima !!

EXERCÍCIO 1 (resolvido)

As turbinas da hidrelétrica de São Simão, no Rio Paranaíba, possuem as seguintes características:

- Queda nominal : 72 m (Queda Disponível)
- Vazão nominal : 420 m³/s
- Potência nominal = 370 491 cv
- Pares de pólos : 38

PEDE-SE:

- a) Calcular o rendimento do conjunto (turbina+circuito hidráulico) da usina (%) e a rotação nominal das máquinas.
- b) Calcular a velocidade específica das turbinas (rpm) utilizando a fórmula mais rigorosa e comparar com o resultado da fórmula empírica.
- c) Analisando as fórmulas empíricas para a rotação específica e considerando o resultado do item anterior, determinar o tipo de turbina utilizada em São Simão.
- d) Calcular a potência elétrica de cada máquina de São Simão a partir da vazão e da altura de queda adotando um rendimento de 95% para o gerador e o rendimento mecânico calculado no ítem a). Assuma a aceleração da gravidade de 9,81 m/s².

EXERCÍCIO 2 (resolvido)

Um parque gerador trabalha com turbinas kaplan. Sabe-se que a velocidade angular nominal das turbinas é de 67rpm, e a altura topográfica do aproveitamento é de 19,2 m. A partir da equação empírica adequada, determine a velocidade específica dessa família de turbinas e, com a ajuda da tabela, determine dentre as turbinas kaplan disponíveis, qual a subclasse que foi empregada no referido aproveitamento.

MODO DE OPERAR	VELOCIDADE ESPECÍFICA (RPM)	TIPO DE TURBINA	ALTURA DISPONÍVEL DO APROVEITAMENTO
A	Até 18 rpm	Pelton 1 injetor	Até 800 m
A	18 a 25 rpm	Pelton 1 injetor	400 a 800 m
A	26 a 35 rpm	Pelton 1 injetor	100 a 400 m
A	26 a 35 rpm	Pelton 2 injetores	400 a 800 m
A	36 a 50 rpm	Pelton 2 injetores	100 a 400 m
A	51 a 72 rpm	Pelton 4 injetores	100 a 400 m
R	55 a 70 rpm	Francis Lentíssima	200 a 400 m
R	70 a 120 rpm	Francis Lenta	100 a 200 m
R	120 a 200 rpm	Francis Média	50 a 100 m
R	200 a 300 rpm	Francis Veloz	25 a 50 m
R	300 a 450 rpm	Francis Ultraveloz	15 a 25 m
R	400 a 500 rpm	Hélice Veloz	Até 15 m
R	270 a 500 rpm	Kaplan Lenta	15 a 50 m
R	500 a 800 rpm	Kaplan Veloz	05 a 15 m
R	800 a 1100 rpm	Kaplan Velocíssima	Até 05 m

Exercício 3 (resolvido)

O gerador de uma turbina de um parque gerador é síncrono e trabalha com uma corrente de 155A na tensão de 4160Volts e um fator de potência de 85%. Sabe-se que a velocidade angular nominal desse gerador é de 600 RPM, que a turbina adotada é uma Francis de eixo horizontal e que a altura topográfica do aproveitamento é de 85 metros. Determine a vazão firme dessa turbina.

Com base na tabela dada, qual o tipo de turbinas Francis utilizada?

Dados:

$$\eta_C = 89\% \text{ (rendimento na canalização / conduto forçado)}$$

$$\eta_G = 95\% \text{ (rendimento do gerador elétrico)}$$

$$\eta_T = 90\% \text{ (rendimento da turbina)}$$

Considere as perdas na tomada d'água nulas $\Delta H_{TA} = 0$

Exercício 4 (resolvido)

Um aproveitamento de reação trabalha com uma turbina Francis. **Determine para esse aproveitamento:**

- 1) Perdas na tomada d'água
- 2) Perdas na tubulação de adução
- 3) Altura líquida disponível
- 4) Potência mecânico-hidráulico em CV

Dados:

$$\eta_C = 78\% \quad H_{TOP_R} = 132\text{m} \quad \Delta H_{TA} = 3\% H_{TOP_R}$$

$$Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$$

Exercício 5 (resolvido)

O aproveitamento de reação do exercício anterior trabalha com uma turbina Francis. **Determine, para esse aproveitamento:**

- 1) Velocidade específica da turbina a ser empregada.
- 2) Velocidade angular do eixo da referida turbina.
- 3) Número de pólos do gerador que será acionado pela mencionada turbina.

Dados adicionais (ao exercício anterior):

$$\eta_T = 85\%$$

Exemplo

■ UHE:

- ◆ nível de montante - 890 m
- ◆ nível de jusante - 750 m
- ◆ vazão - 60 m³/s
- ◆ Diâmetro da tubulação - 4,5 m
- ◆ Comprimento equivalente da tubulação - 1.000 m
- ◆ λ = Coeficiente de Hazen – Willians

(Adotar $\lambda = 115$ – Aço soldado / Ferro fundido com 10 anos de uso)

- ◆ rendimento da turbina - 92%
- ◆ rendimento do gerador - 94%

■ Determinar:

- ◆ a) as quedas e os trabalhos específicos bruto e disponível
- ◆ b) As potências bruta, disponível, no eixo e elétrica
- ◆ c) Os rendimentos do sistema de admissão e total do aproveitamento

Fórmulas

$$H_p = 10,643 \cdot \left(\frac{Q}{\lambda} \right)^{1,85} \cdot D^{-4,87} \cdot L \quad \text{Perda na tubulação}$$

$$Y = g \cdot H_{Top} \quad \text{Trabalho específico bruto [J/kg]}$$

$$Y_d = g \cdot H_d \quad \text{Trabalho específico disponível [J/kg]}$$

$$H_d = H_{Top} - H_p \quad \text{Altura Líquida}$$

$$P_b = \rho \cdot Q \cdot Y \quad \text{Potência Bruta [W]}$$

$$\rho = \text{densidade da água} = 1000 [\text{kg} / \text{m}^3]$$

$$P_d = \rho \cdot Q \cdot Y_d \quad \text{Potência Disponível [W]}$$

$$P_d = 9,81 \cdot Q \cdot H_d [\text{kW}]$$

$$P_{eixo} = \eta_{turb} \cdot P_d \quad \text{Potência no eixo [kW]}$$

$$P_d = 13,33 \cdot Q \cdot H_d [\text{cv}]$$

$$P_{el} = \eta_{ger} \cdot P_{eixo} \quad \text{Potência elétrica [kW]}$$

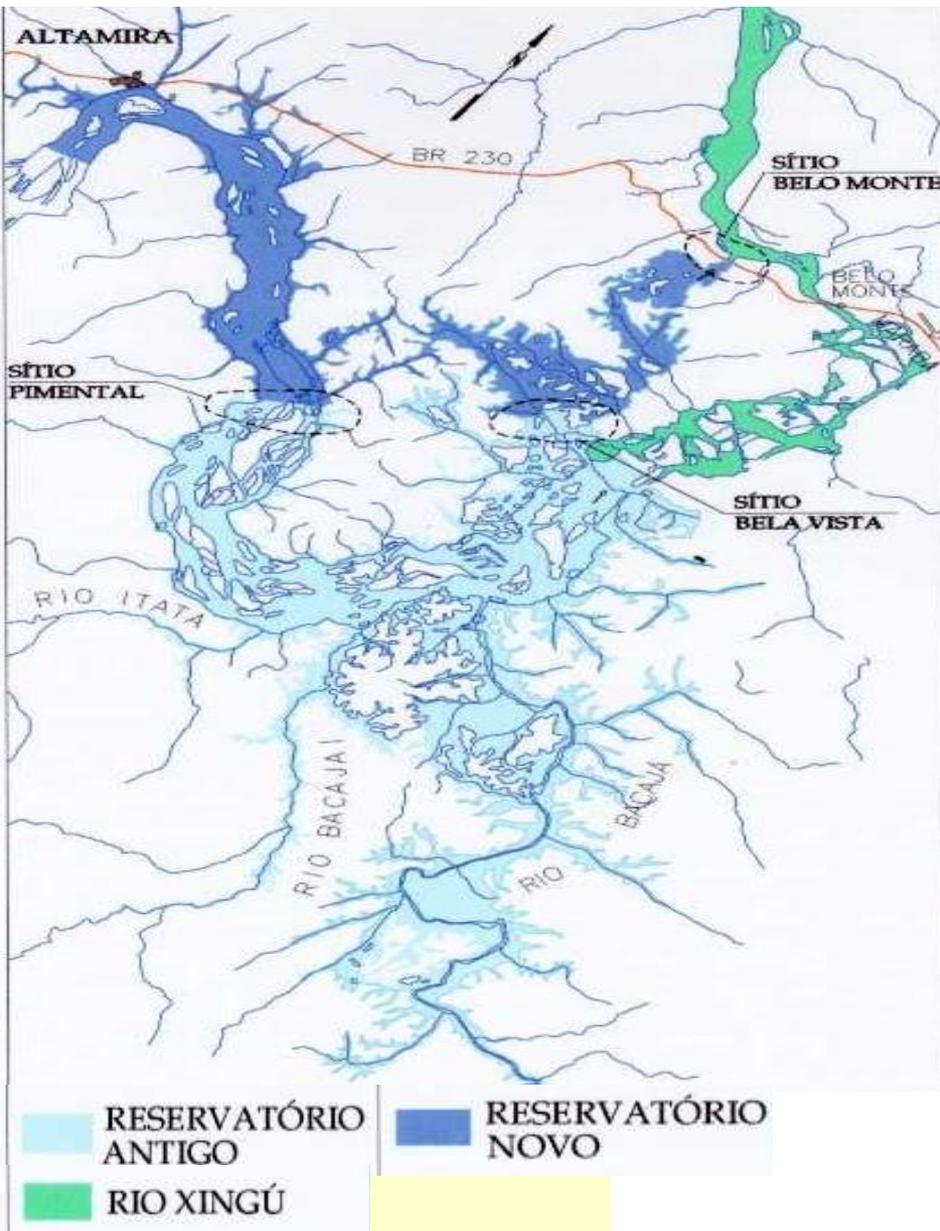
$$\eta_{admissão} = \frac{H_d}{H_{Top}} \quad \text{Rendimento da admissão [%]}$$

$$\eta_{total} = \eta_{admissão} \cdot \eta_{turb} \cdot \eta_{eixo} \cdot \frac{P_{el}}{P_b} \quad \text{Rendimento total [%]}$$

Impactos Sociais

- ❑ Deslocamento de populações
- ❑ Destruição de áreas de subsistência
- ❑ Construção de novas cidades
- ❑ Inserção regional
- ❑ Viabilização sócio-política
- ❑ Negociação com a população local
- ❑ Exemplo: Sobradinho X RS

Impactos Ambientais



- ❑ Destruição do meio ambiente e da biodiversidade em áreas submersas.
- ❑ Emissão de gás metano - aquecimento global.
- ❑ Mudanças da fauna e flora ribeirinha.
- ❑ Comissão Mundial de Barragens.
- ❑ Via natural da ictiofauna e embarcações interrompidas.

Aspectos Econômicos

Custo de Geração:

$$C_g = C_{inv} + C_{O\&M} + C_{comb} + C_{cnx} + C_{ust}$$

Custo de implantação elevado: de 700 a 3000 US\$/kW instalado

Grandes riscos: ambientais
geológicos
cambial
financeiros
JDC

Onde:

C_{inv} = Custo de Investimento

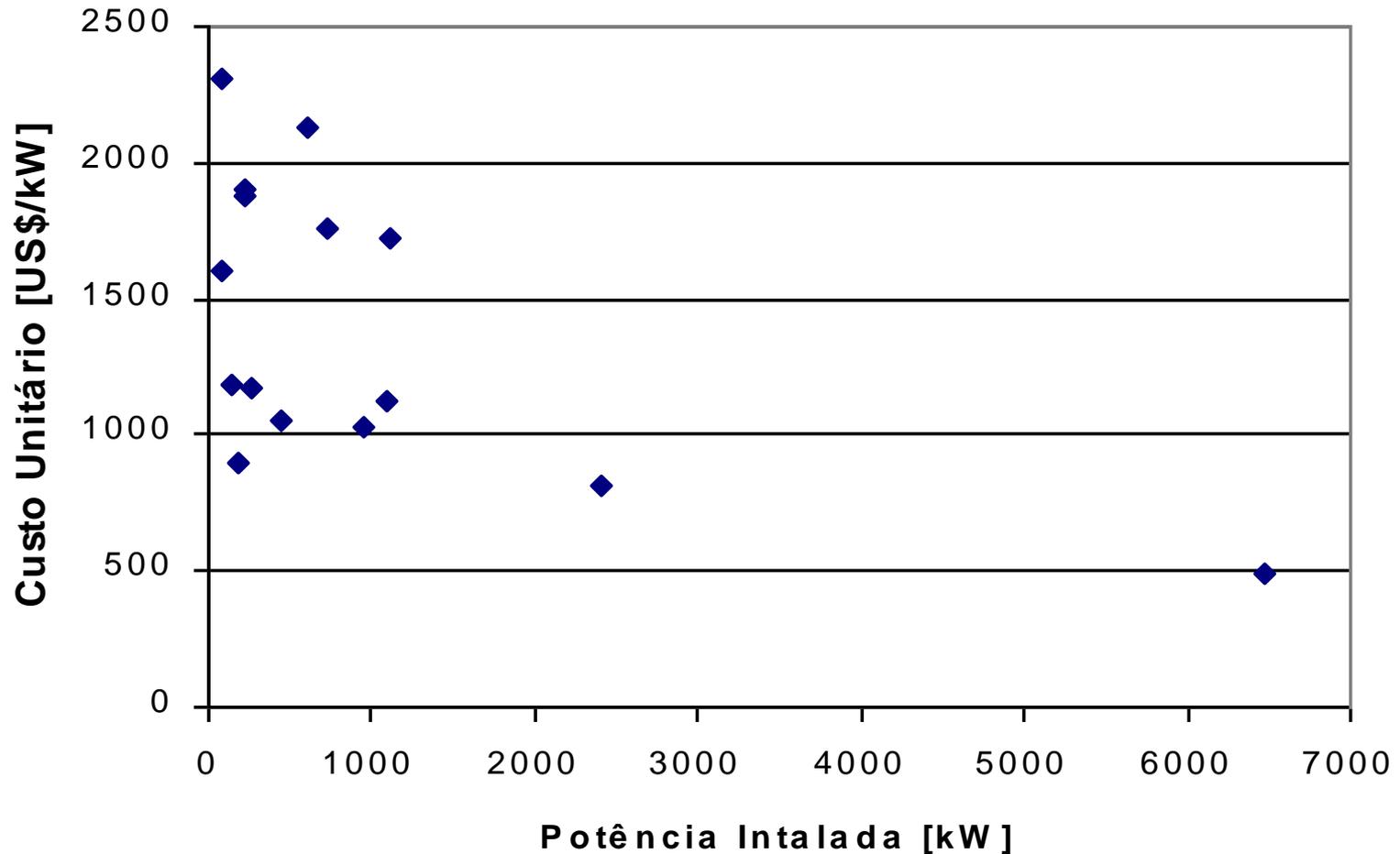
$C_{O\&M}$ = Custo de Operação e Manutenção

C_{comb} = Custo de Combustível

C_{cnx} = Custo de Conexão

C_{ust} = Custo de Uso da Rede de Transmissão
(TUST)

Custos de PCH (Fabricantes Nacionais)



Exercício

Qual a Motorização da Central?

- Queda Bruta: 50 metros
- Rendimento Global: 82%
- Determinar a energia média, a energia firme e a energia não garantida.

