

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PME-3453

MÁQUINAS DE FLUXO

LABORATÓRIO

PROF. SÉRGIO R. CECCATO

1º SEMESTRE DE 2023

TURBINAS

As máquinas de fluxo podem ser classificadas segundo vários critérios. Citamos dois:

a) Conforme o sentido da transformação de energia.

a1) O fluido cede energia à máquina, que transforma esta energia em trabalho mecânico.

Ex.: turbinas, moinhos de vento, etc

a2) A máquina cede energia ao fluido, resultando um aumento de energia do fluido.

Ex.: bombas, ventiladores, compressores, etc.

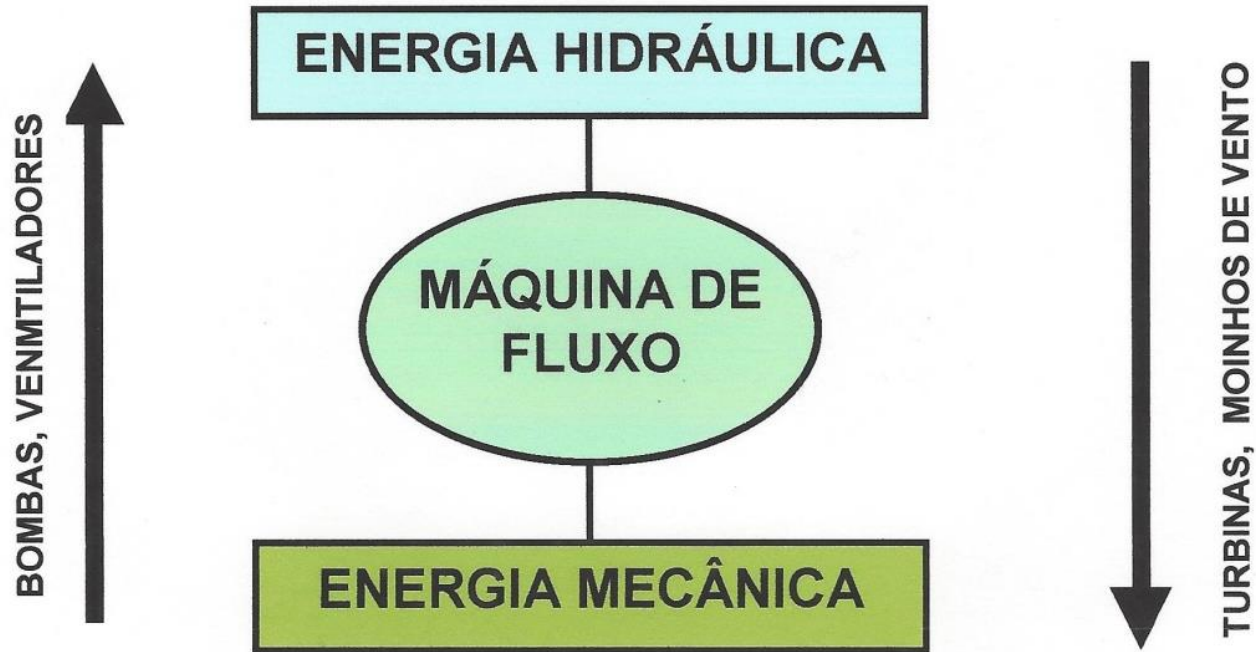
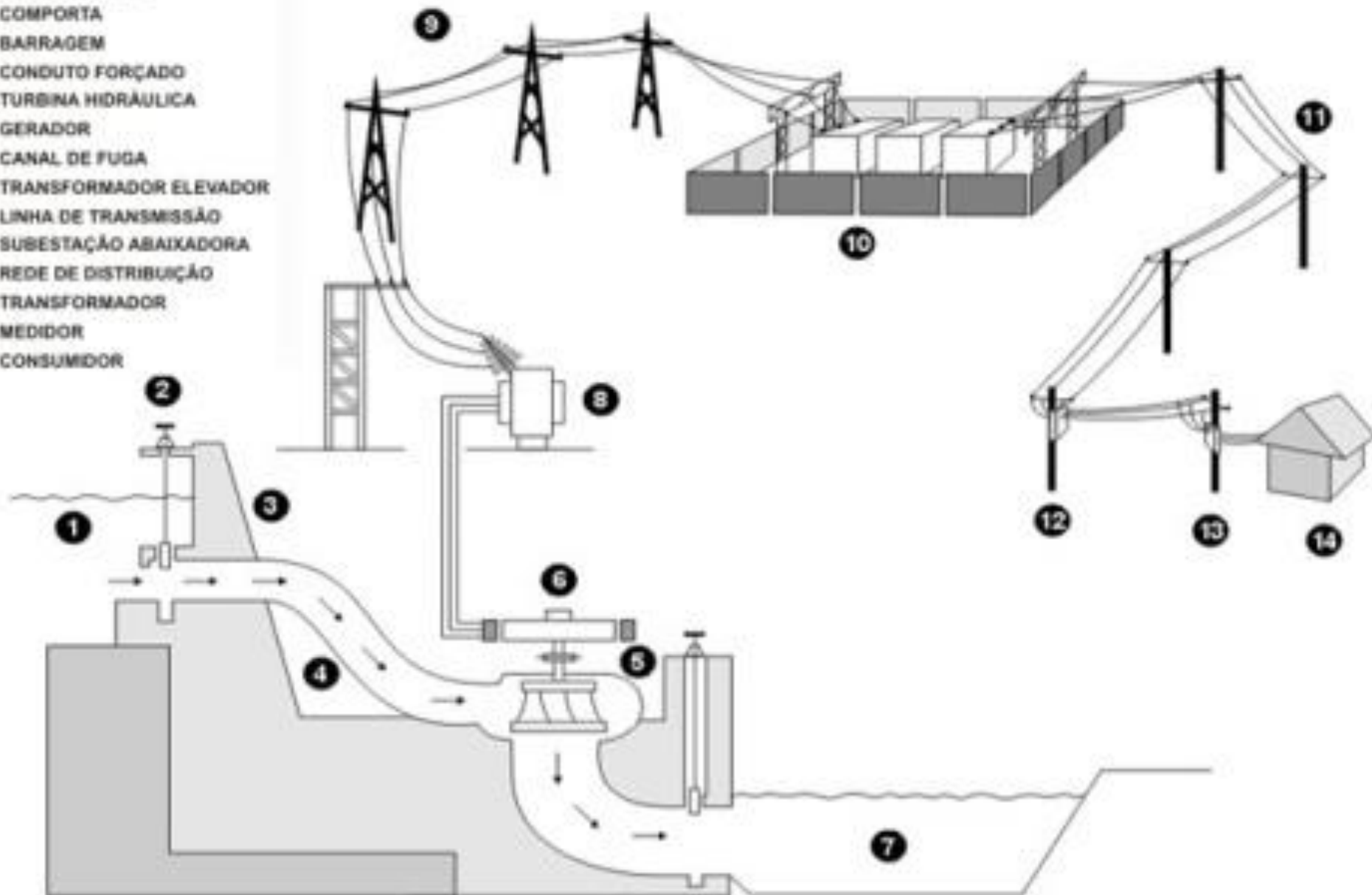


Fig.1- Esquema de operação das máquinas de fluxo, conforme o sentido da transformação da energia.

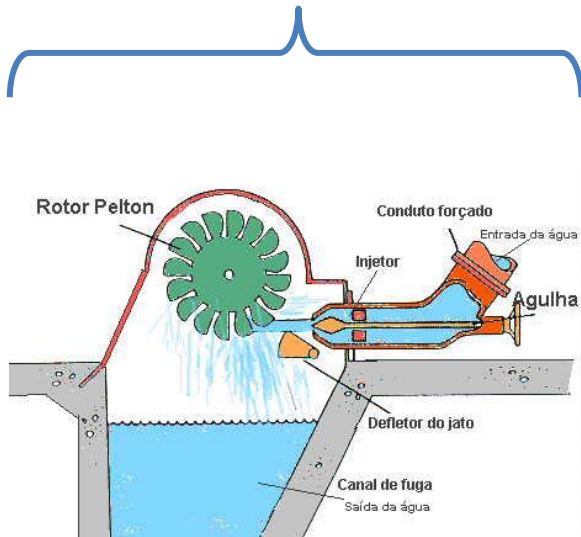
USINA HIDRELÉTRICA

- 1 RESERVATÓRIO
- 2 COMPORTA
- 3 BARRAGEM
- 4 CONDUITO FORÇADO
- 5 TURBINA HIDRÁULICA
- 6 GERADOR
- 7 CANAL DE FUGA
- 8 TRANSFORMADOR ELEVADOR
- 9 LINHA DE TRANSMISSÃO
- 10 SUBESTAÇÃO ABAIXADORA
- 11 REDE DE DISTRIBUIÇÃO
- 12 TRANSFORMADOR
- 13 MEDIDOR
- 14 CONSUMIDOR



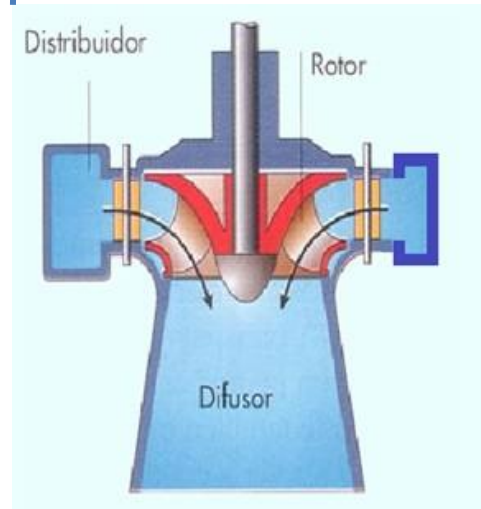
TURBINAS

DE JATO LIVRE
OU DE JATO
(DE AÇÃO)

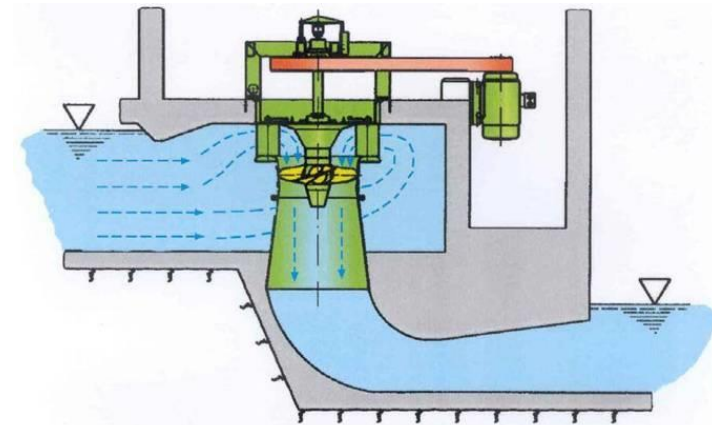


PELTON

DE ESCOAMENTO FORÇADO OU IMERSAS
(DE RAEÇÃO)

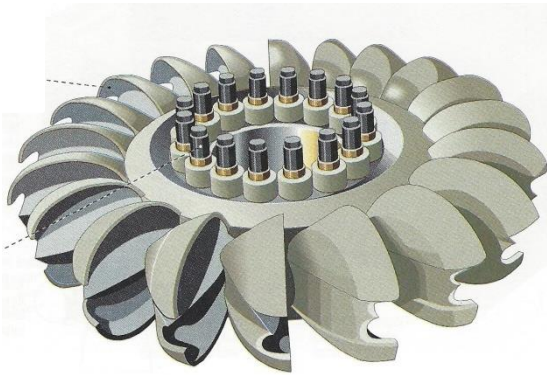


FRANCIS

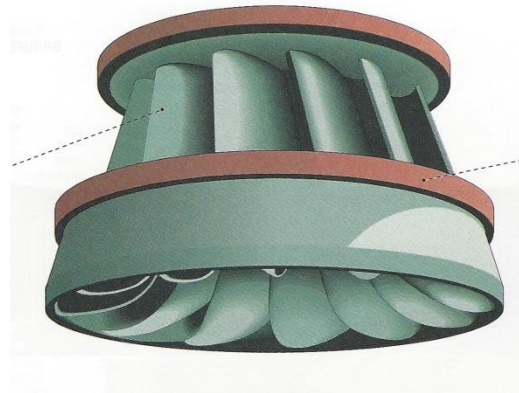


HELICE
(KAPLAN)

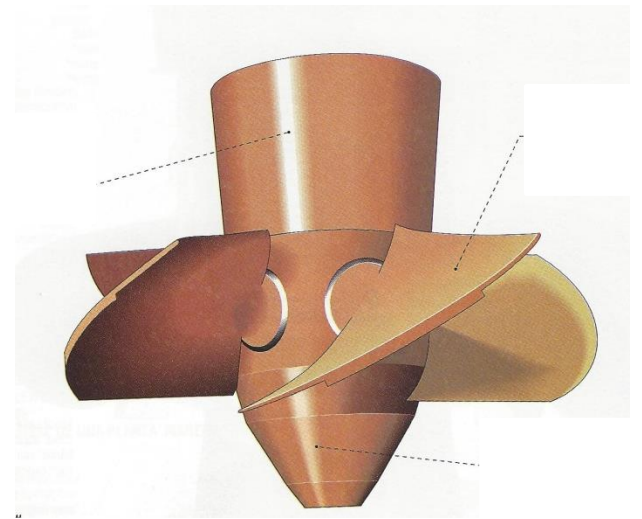
ROTORES



PELTON



FRANCIS



HÉLICE
(KAPLAN)

ROTAÇÃO ESPECÍFICA (REFERIDA À VAZÃO):

$$n_q = n \frac{\sqrt{Q}}{H^{0,75}}$$

N : Rotação do rotor em *rpm*

Q : Vazão em volume em m^3/s

H : Altura de queda em m

NÚMERO TIPO (TENDE A SUBSTITUIR O n_q):

$$K = \frac{2 \pi n \sqrt{Q}}{60 (gH)^{0,75}}$$

(Usa as unidades coerentes do SI para o seu cálculo)

$$K = 1,82 \cdot 10^{-2} nq$$

Ainda temos, porém caminhando para o desuso:

ROTAÇÃO ESPECÍFICA À POTÊNCIA ou NÚMERO DE FORMA ou ainda “SHAPE NUMBER”:

$$n_s = n \frac{\sqrt{W_{ef}}}{H^{5/4}}$$

n : Rotação do rotor em *rpm*

W_{ef} : Potência em *cv*

H : Altura de queda em *m*

$$n_s = \gamma^{0,5} n_q$$

γ : Peso específico do fluido em escoamento pela máquina

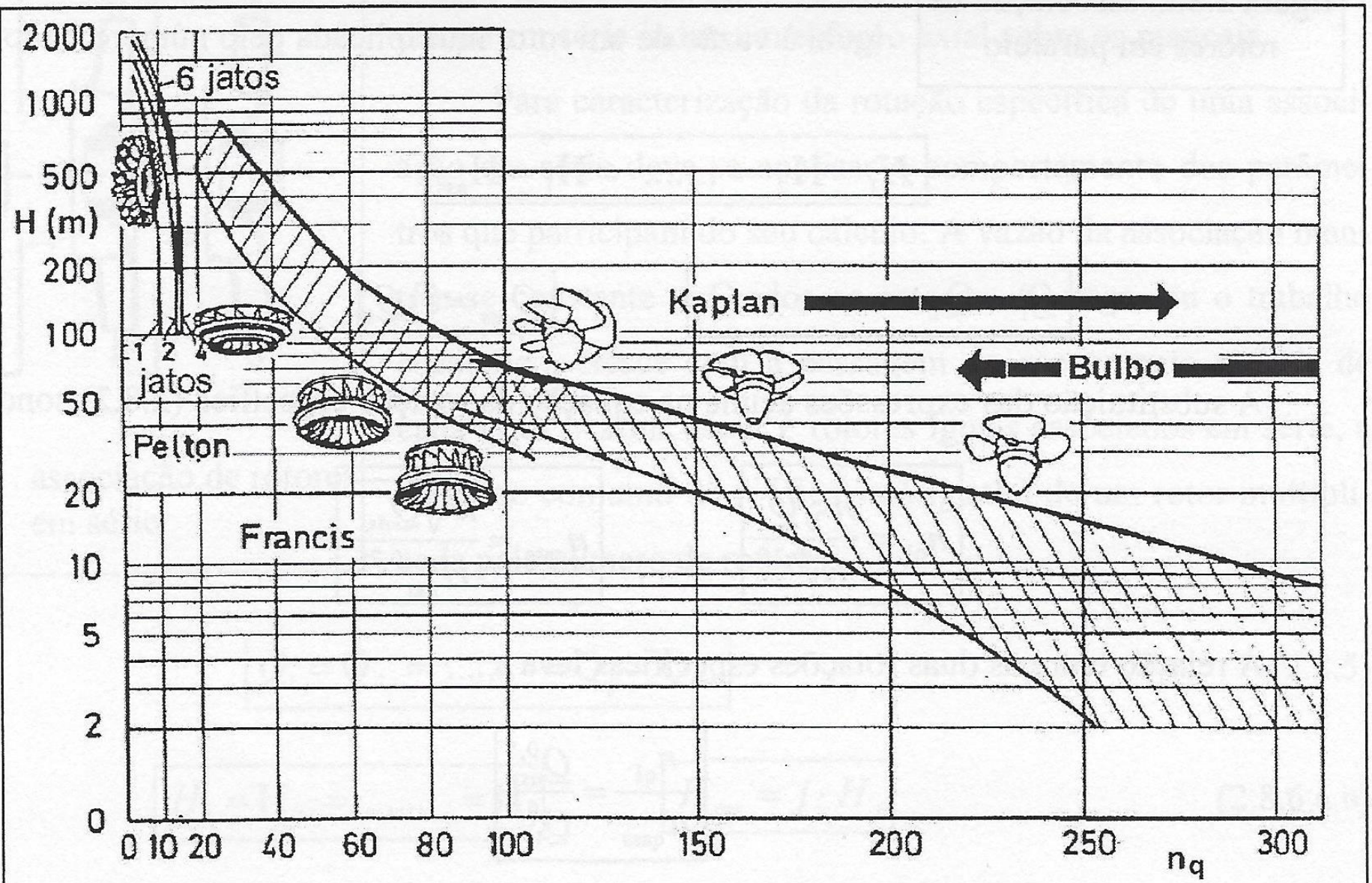


figura 2.8.3. Diagrama $H \times n_q$ para seleção de turbinas

Tabela 7.1 Campo de aplicação dos diversos tipos de turbinas

Tipos de turbinas		n_s (rpm)	$n_q = n_s \div 3,36$ (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
		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

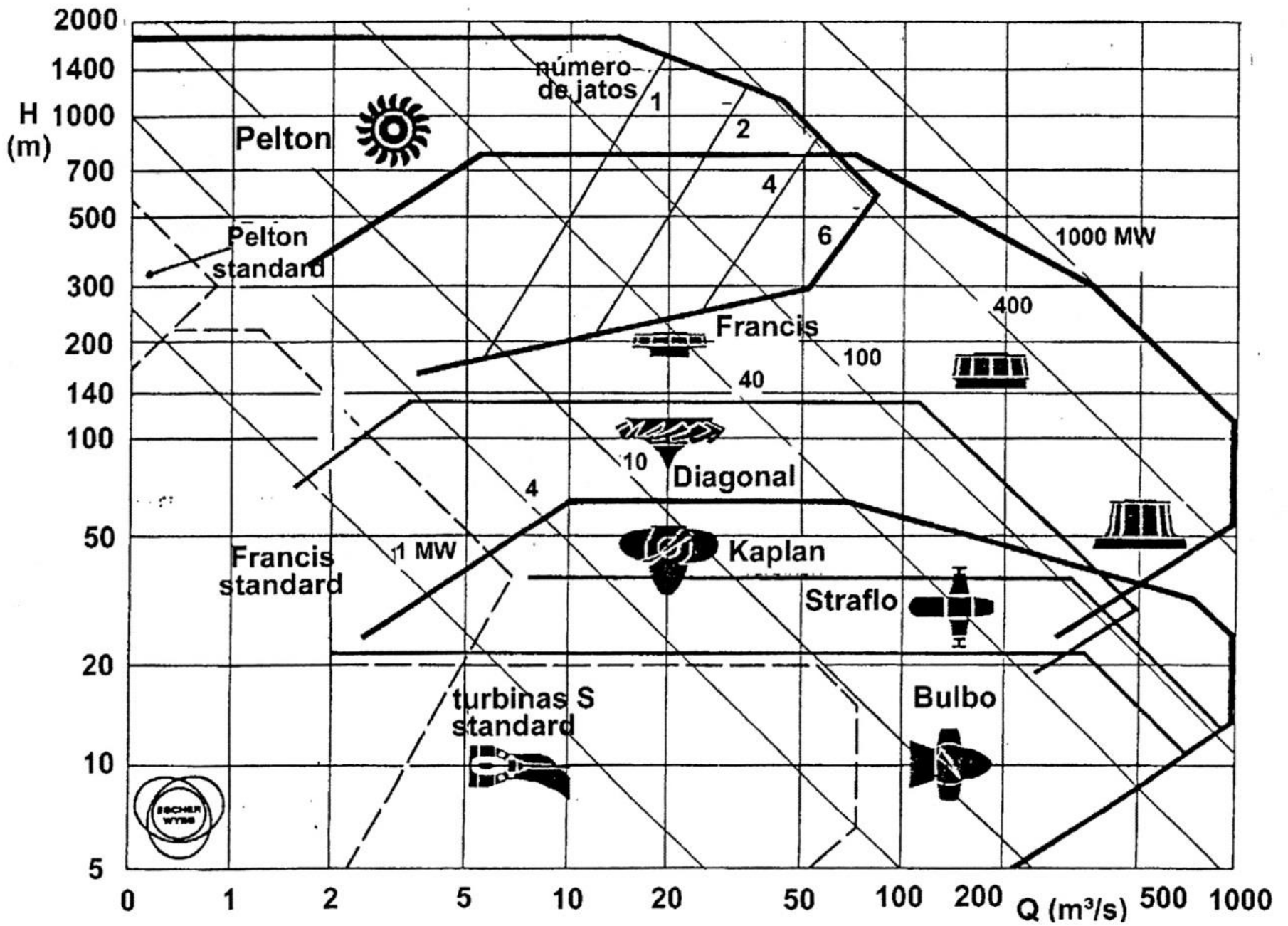


figura 2.8.7. Diagrama H x Q para pré-seleção de turbinas

A figura 4.3.51. mostra oito curvas de rendimento em função da relação entre a vazão e a vazão máxima na turbina. As várias curvas correspondem a:

1. Pelton
2. Kaplan de dupla regulação
3. Diagonal
4. Francis lenta; $n_q = 34$
5. Francis normal; $n_q = 68$
6. Francis ultra rápida; $n_q = 96$
7. Kaplan de regulação única (hélice); $n_q = 136$
8. Kaplan de regulação única (hélice); $n_q = 190$

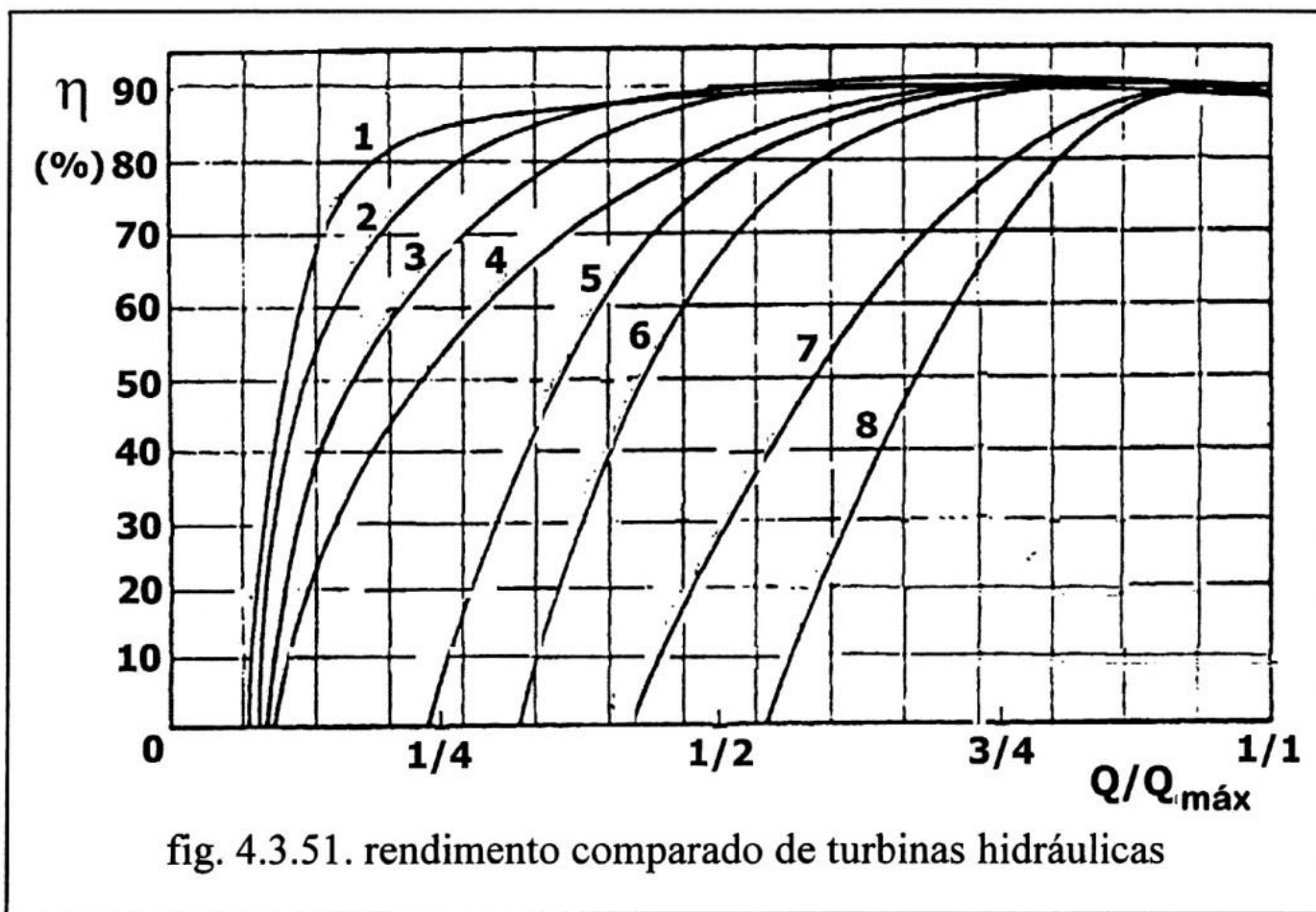


fig. 4.3.51. rendimento comparado de turbinas hidráulicas

TURBINAS PELTON

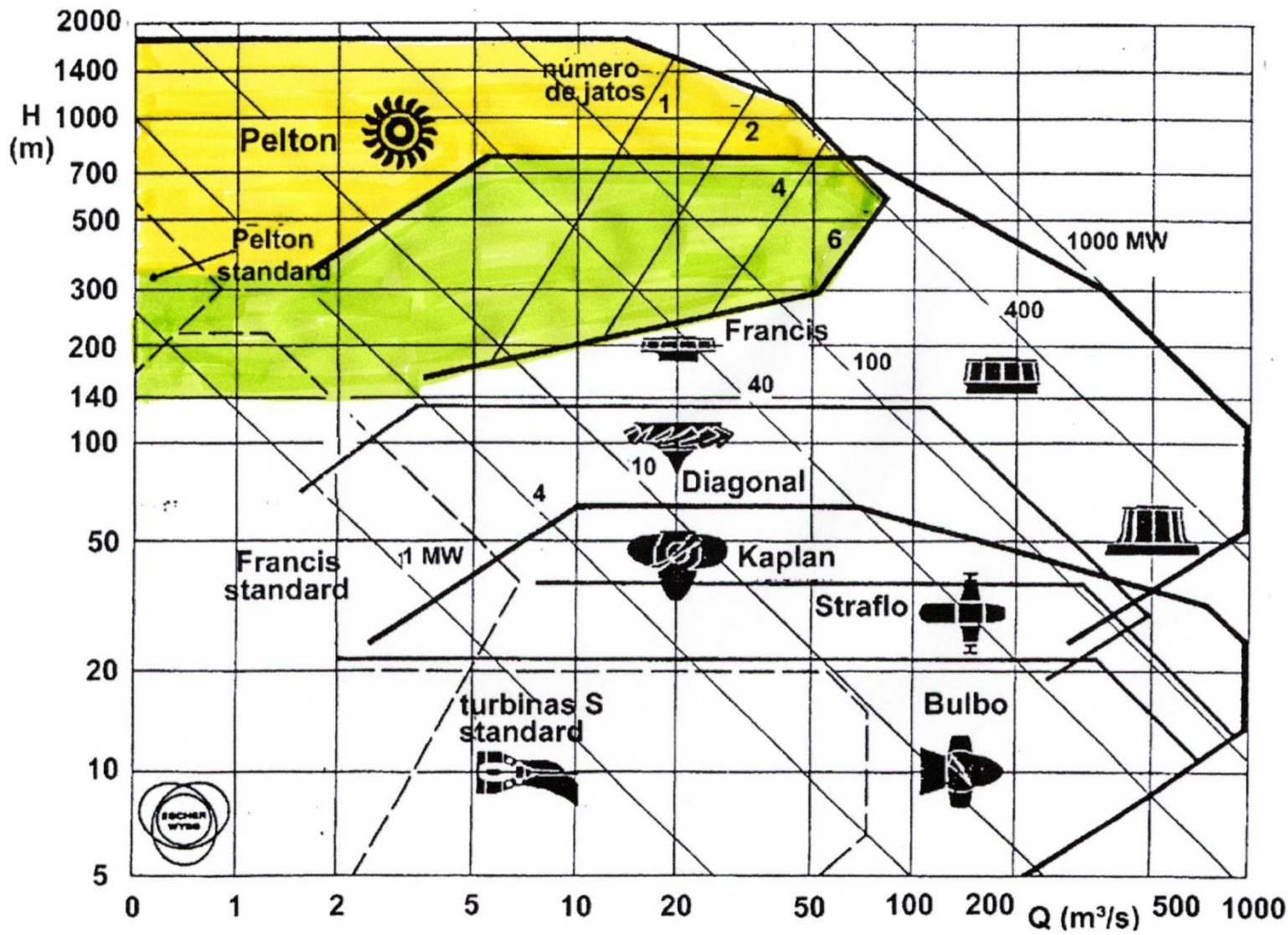


figura 2.8.7. Diagrama H x Q para pré-seleção de turbinas

A figura 4.3.51. mostra oito curvas de rendimento em função da relação entre a vazão e a vazão máxima na turbina. As várias curvas correspondem a:

1. Pelton

2. Kaplan de dupla
regulação

3. Diagonal

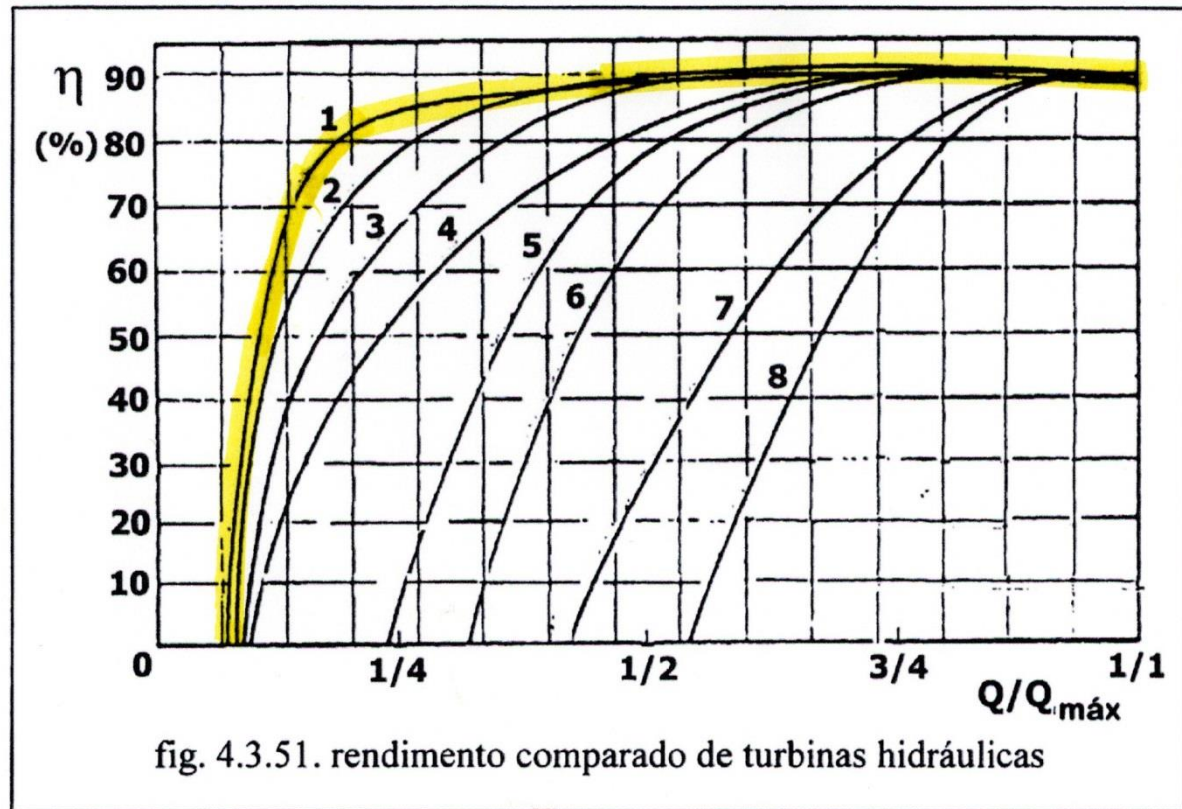
4. Francis lenta; $n_q = 34$

5. Francis normal;
 $n_q = 68$

6. Francis ultra rápida;
 $n_q = 96$

7. Kaplan de regulação
única (hélice); $n_q = 136$

8. Kaplan de regulação
única (hélice); $n_q = 190$



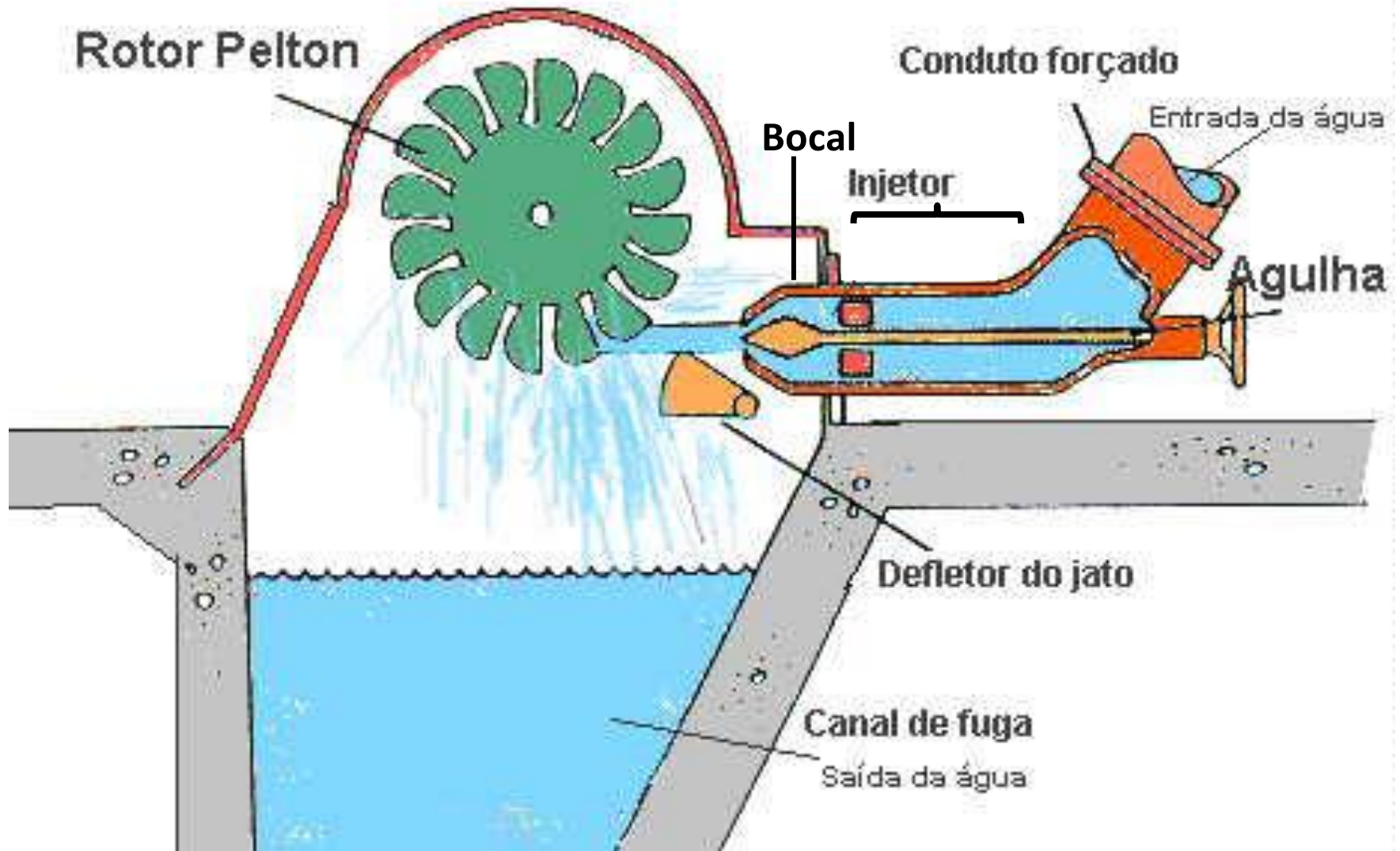
TURBINAS PELTON



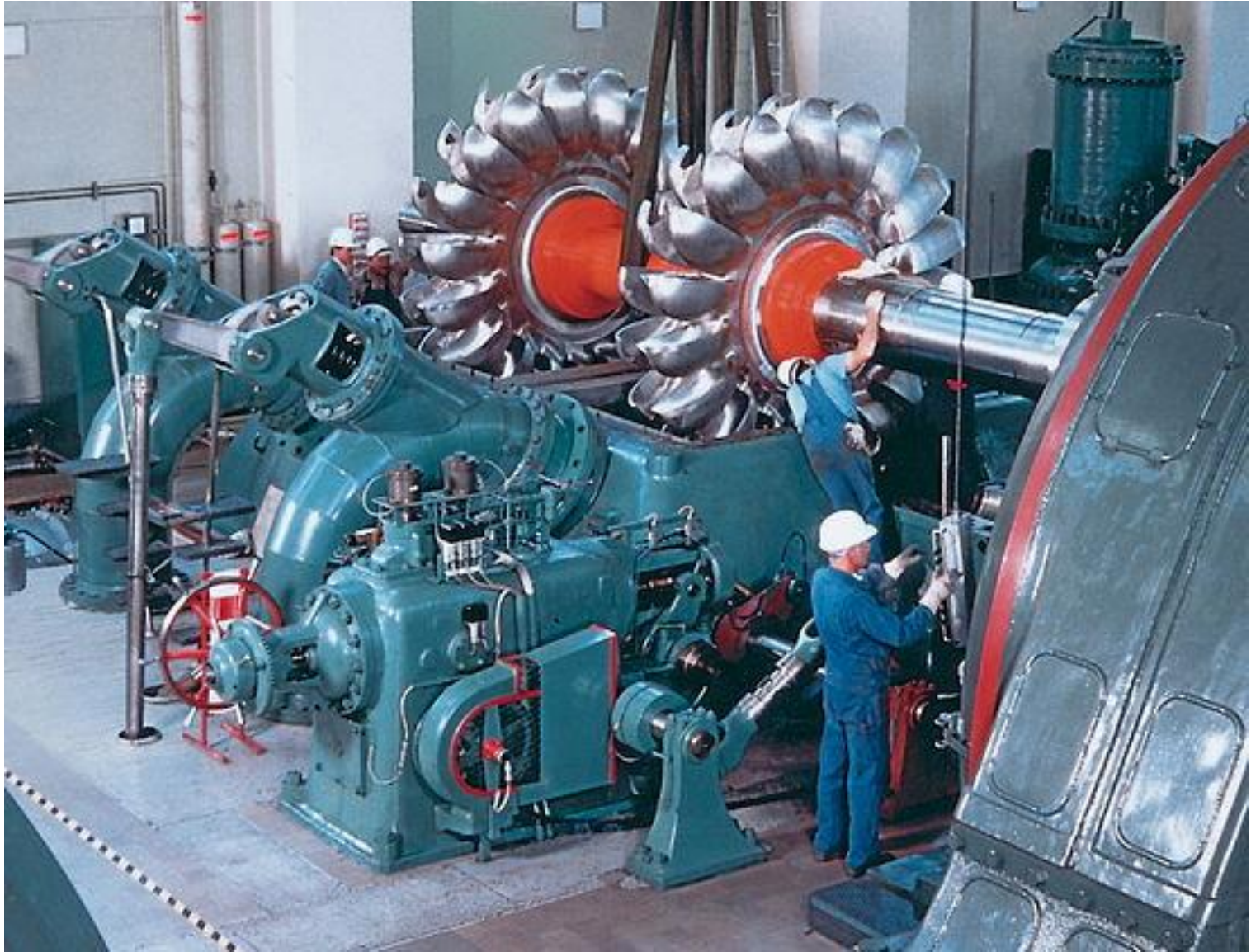
TURBINA PELTON.mp4

<https://www.youtube.com/watch?v=XJmgjQSfRhE>

INSTALAÇÃO PELTON



INSTALAÇÃO PELTON



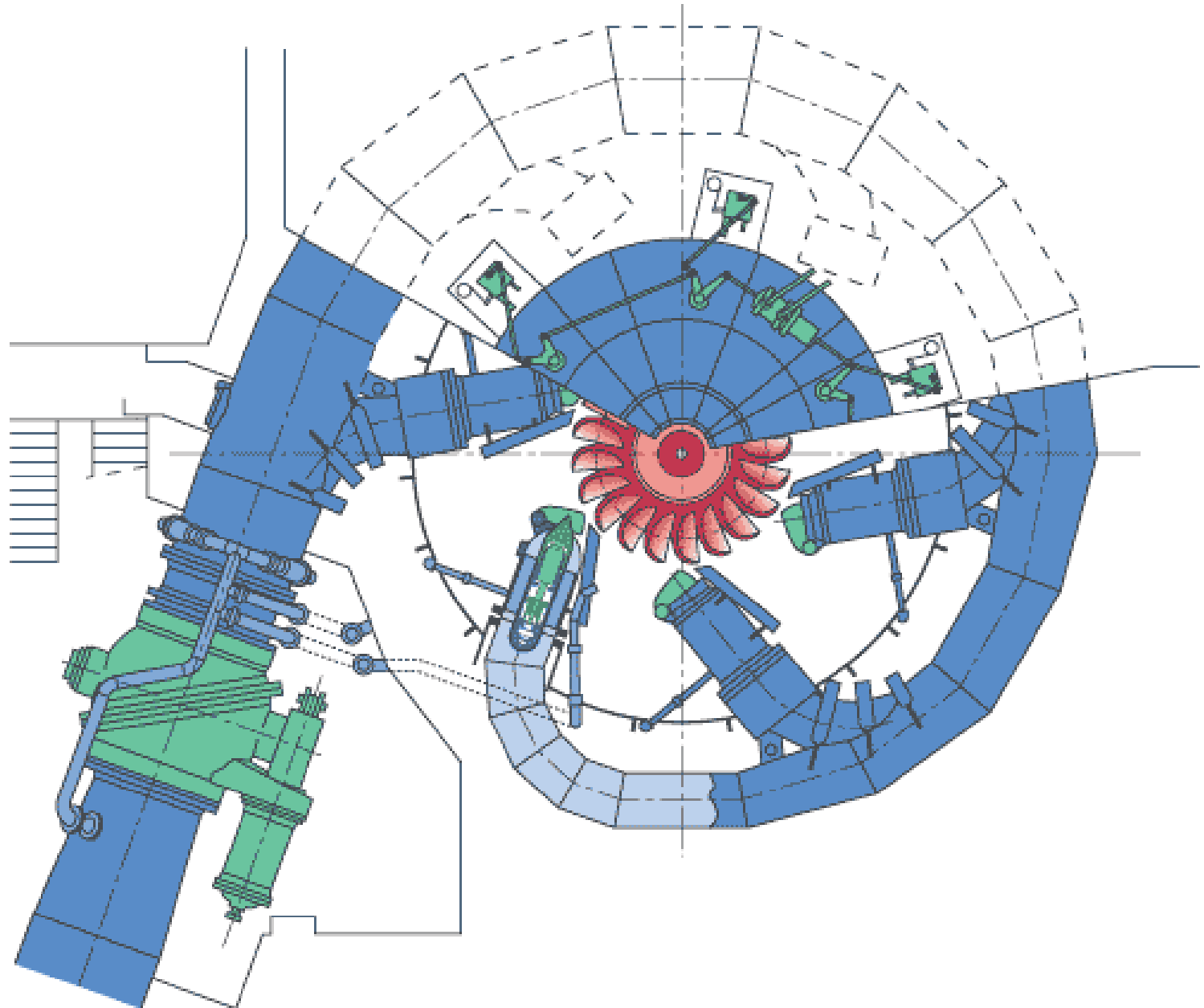
INSTALAÇÃO PELTON



INSTALAÇÃO PELTON



INSTALAÇÃO PELTON



RODA PELTON



**TURBINAS
FRANCIS**

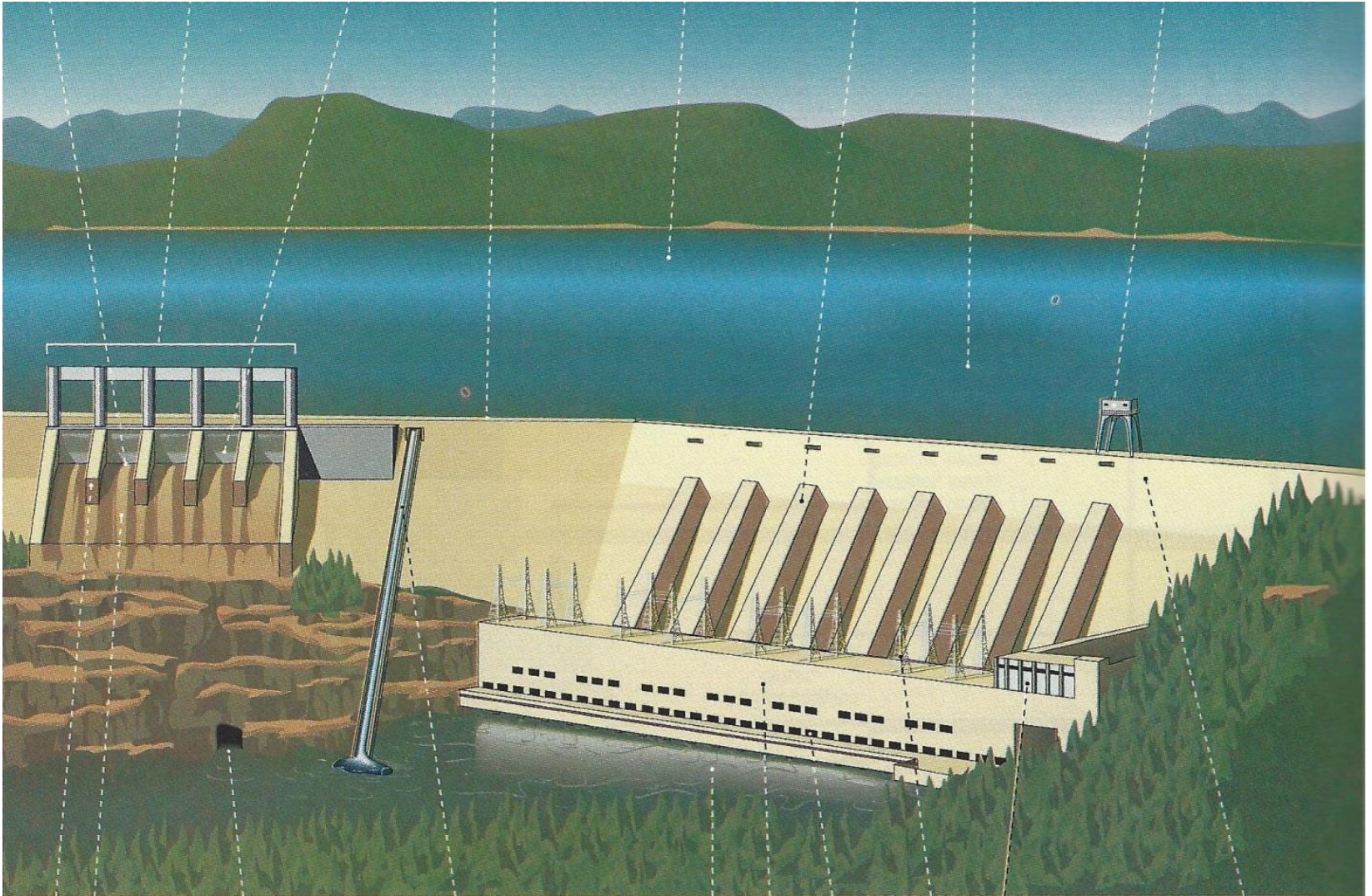
TURBINAS FRANCIS



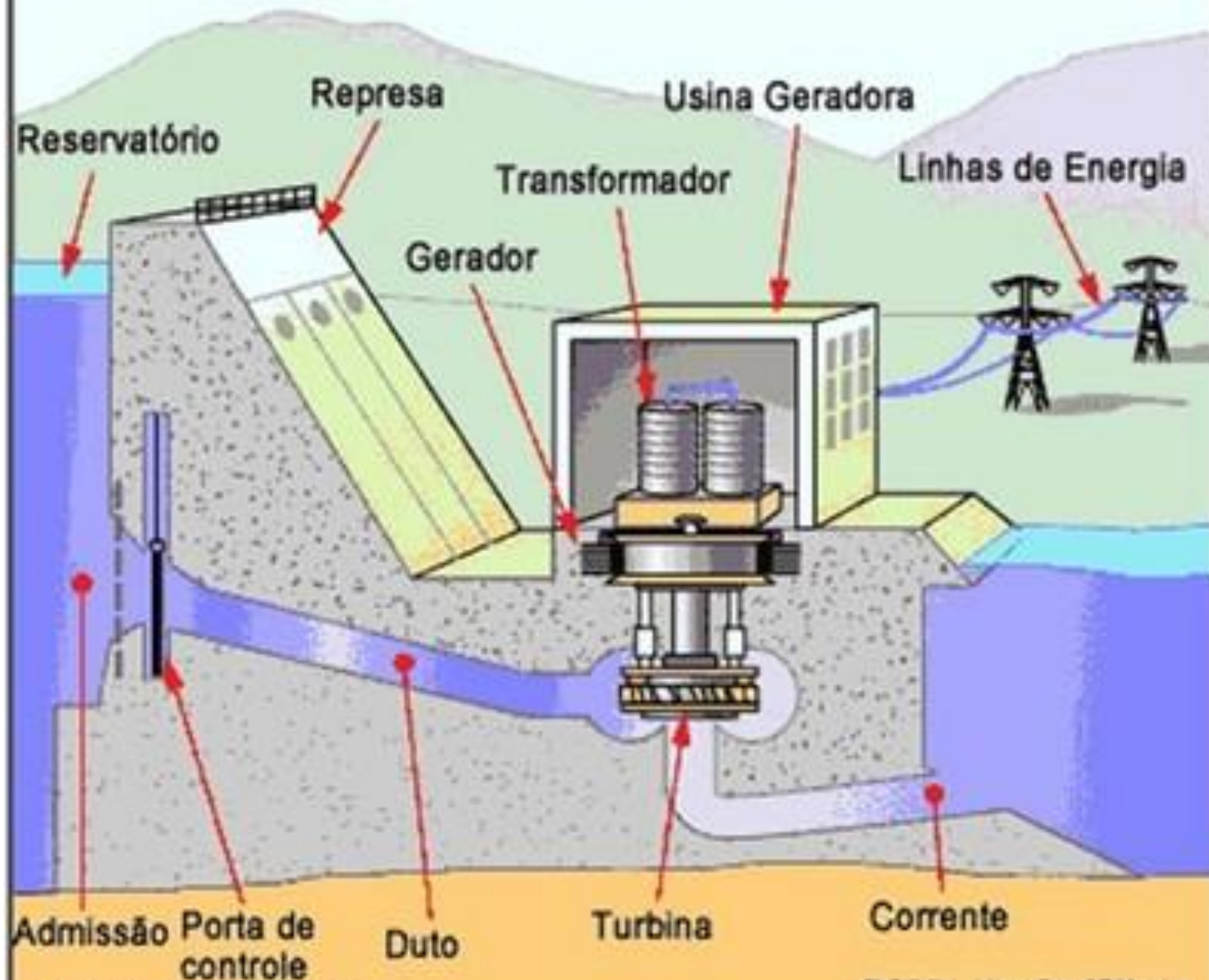
Turbina Francis.mp4

<https://www.youtube.com/watch?v=LdAAG2kK0Jo>

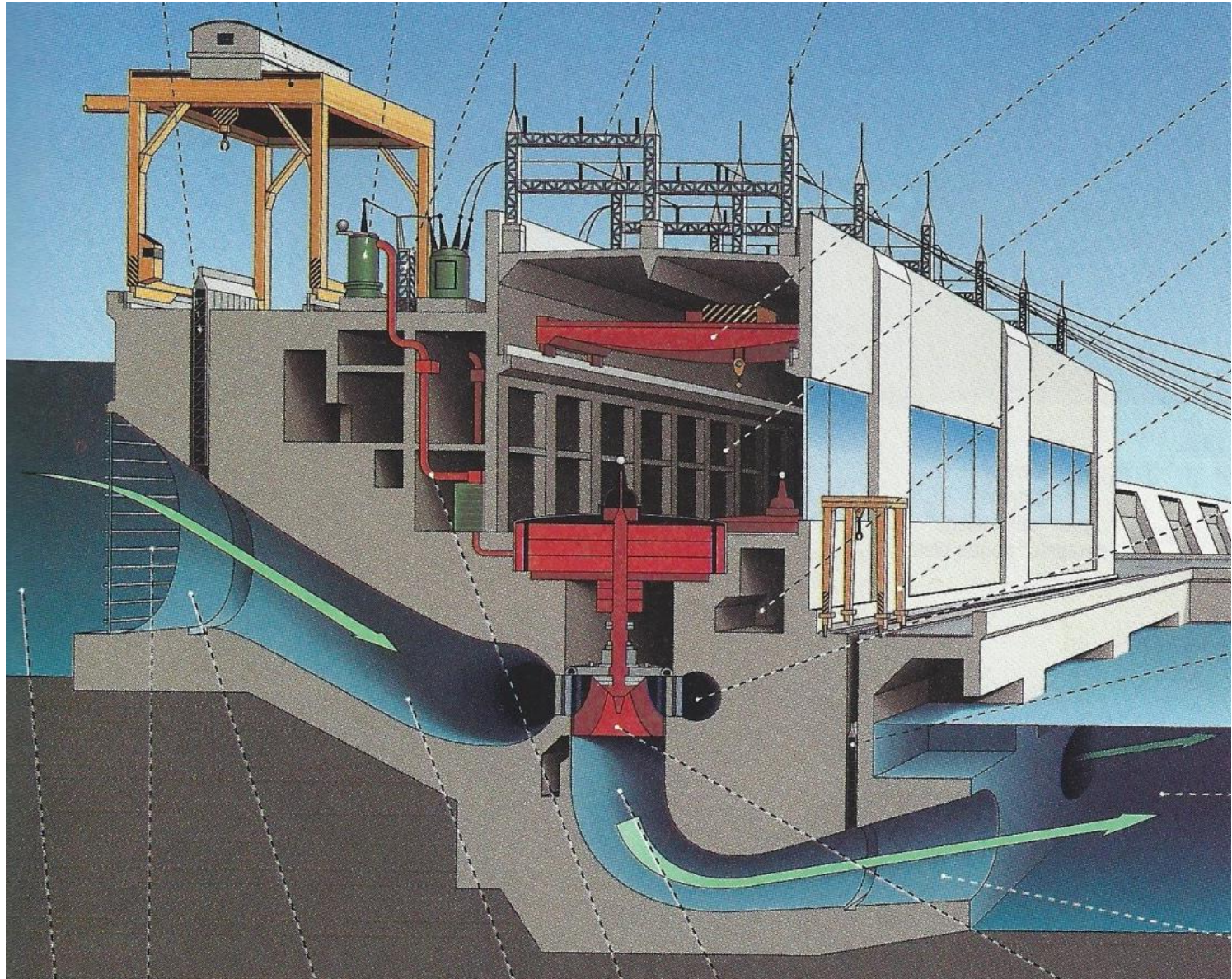
TURBINAS DE ESCOAMENTO FORÇADO OU IMERSAS (DE REAÇÃO)



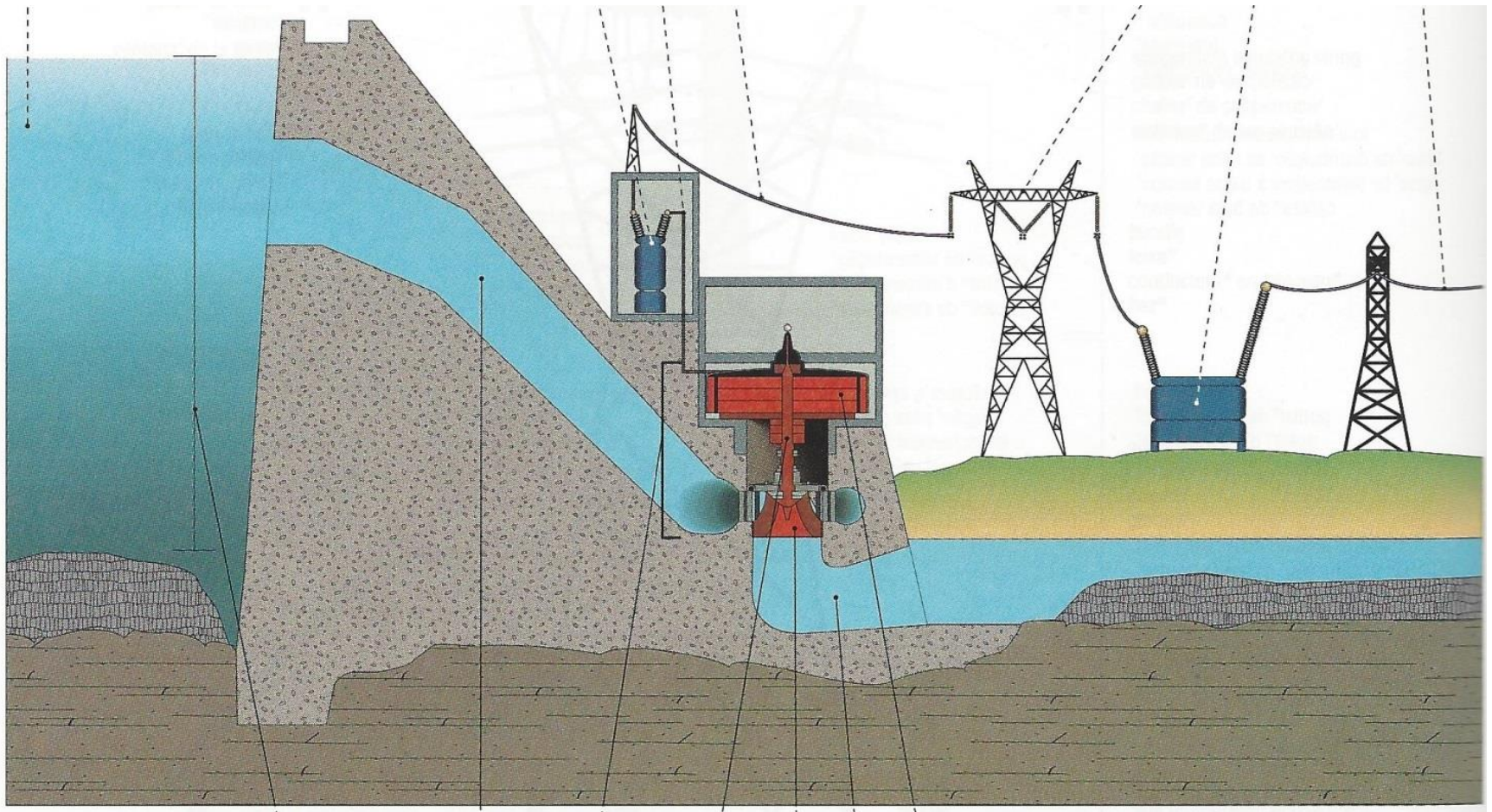
Dentro de uma usina hidrelétrica



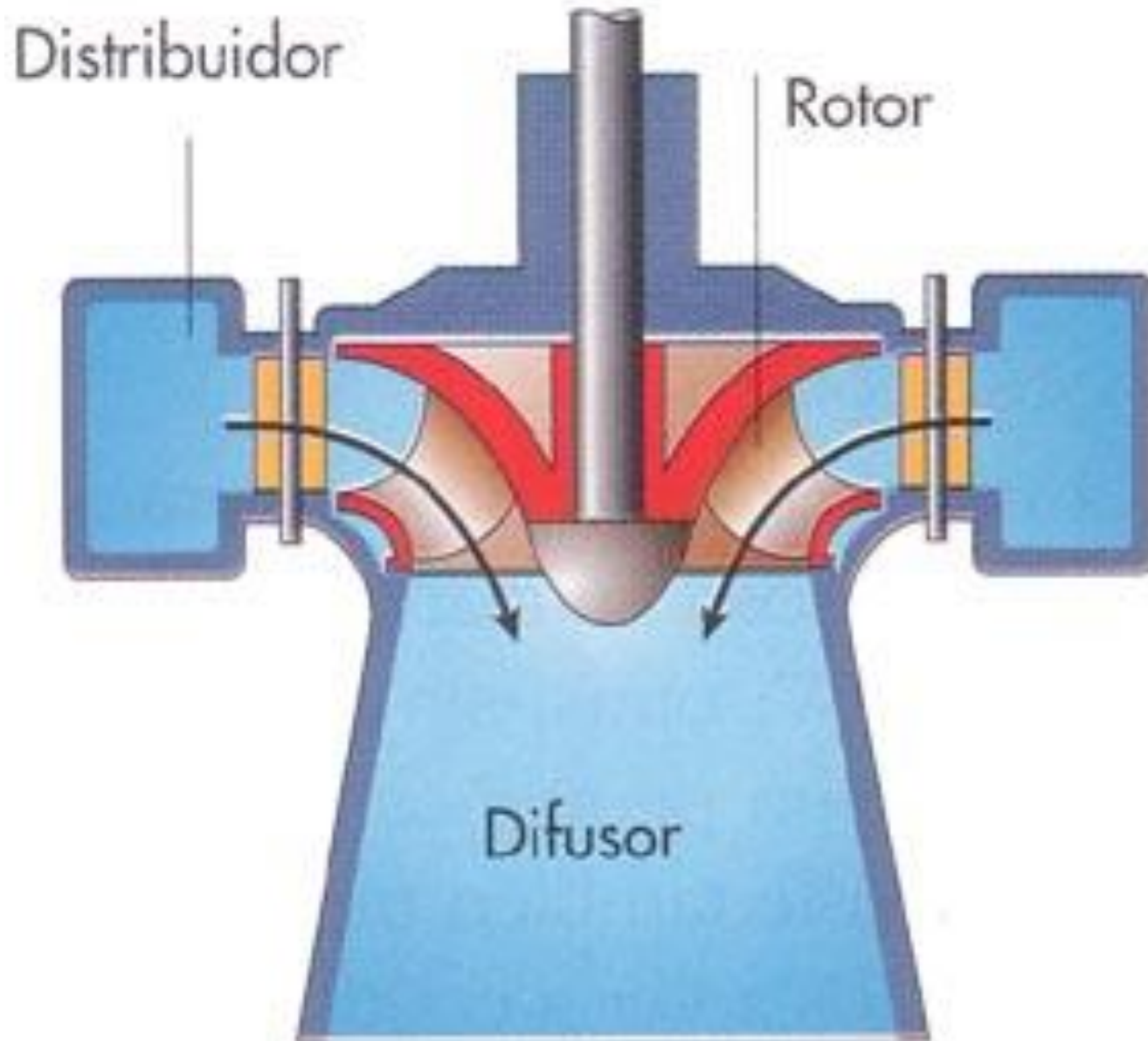
TURBINA FRANCIS



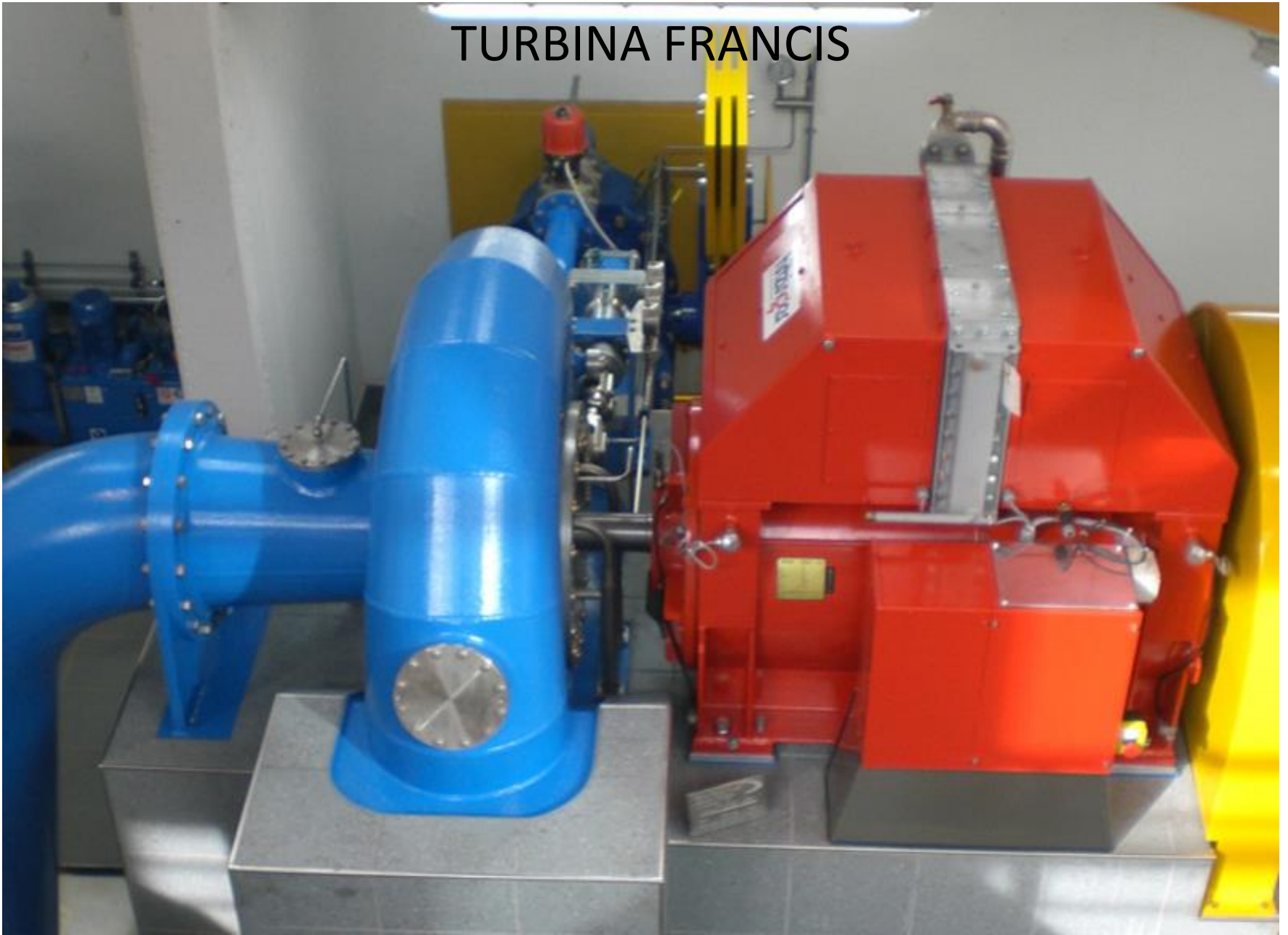
TURBINA FRANCIS



TURBINA FRANCIS



TURBINA FRANCIS



A large, blue-painted Francis turbine is the central focus of the image. It is mounted on a blue metal base and features a prominent, curved discharge pipe on the right side. The turbine's casing is highly detailed with various bolts, flanges, and a pressure gauge on top. To the left, a red control cabinet is visible. The entire setup is in a room with a tiled floor and a metal railing in the background. The text 'TURBINA FRANCIS' is overlaid at the bottom left, and a yellow label with '00 kg' is on the bottom right of the turbine's pipe.

TURBINA FRANCIS

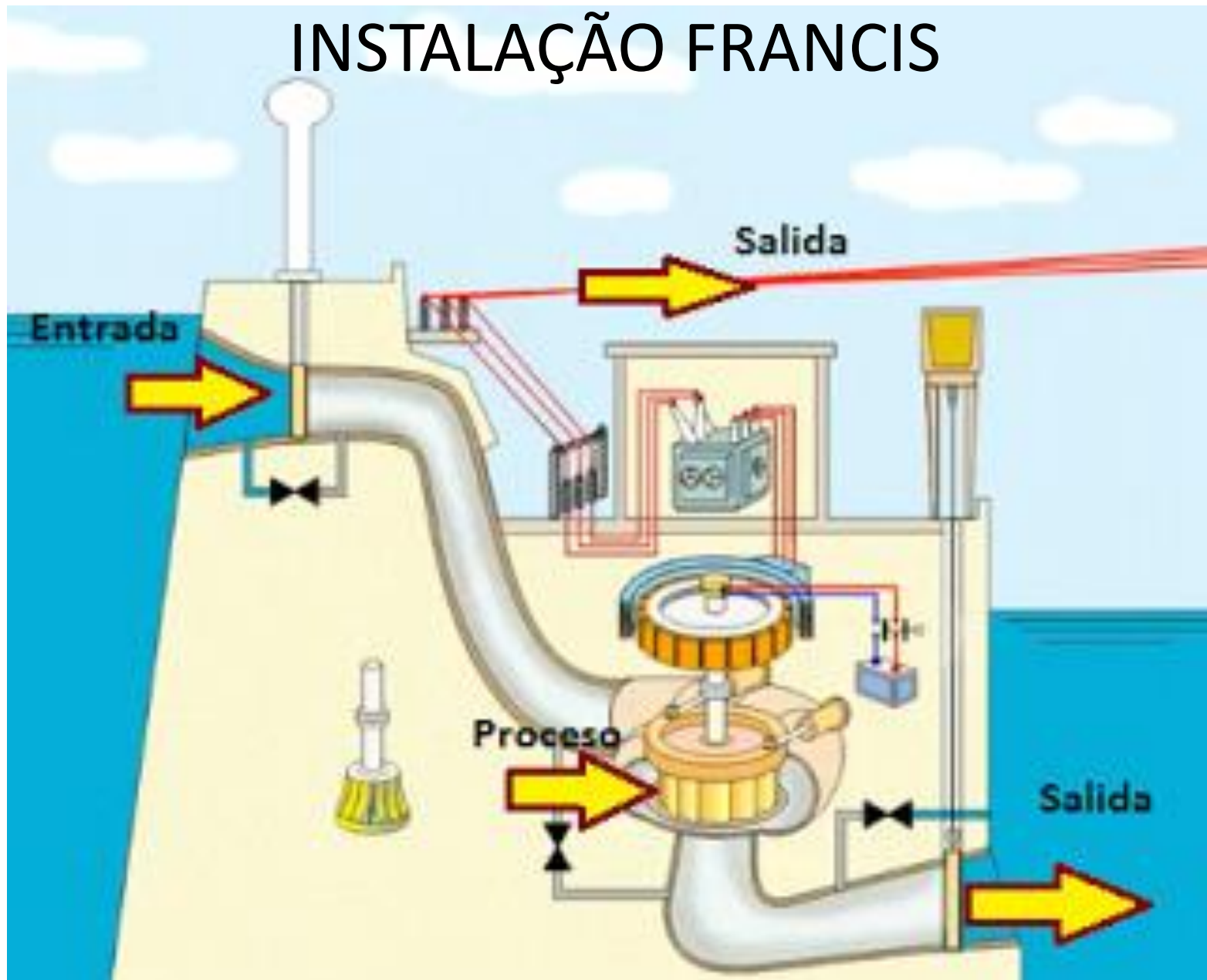
TURBINA FRANCIS



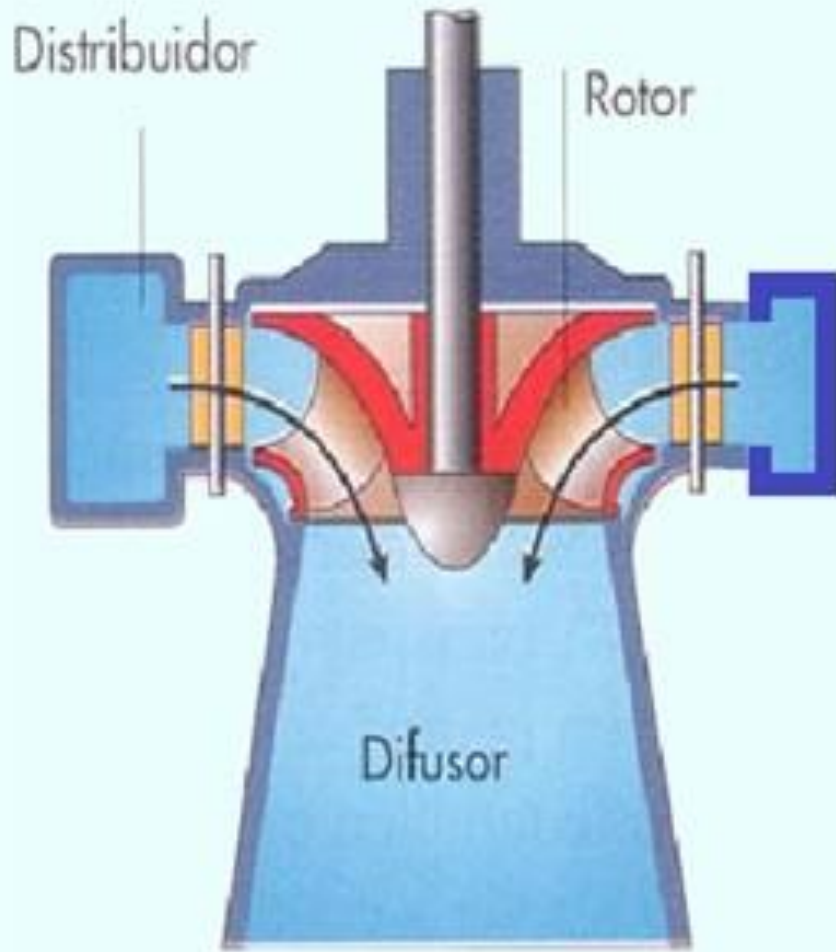
TURBINA FRANCIS



INSTALAÇÃO FRANCIS



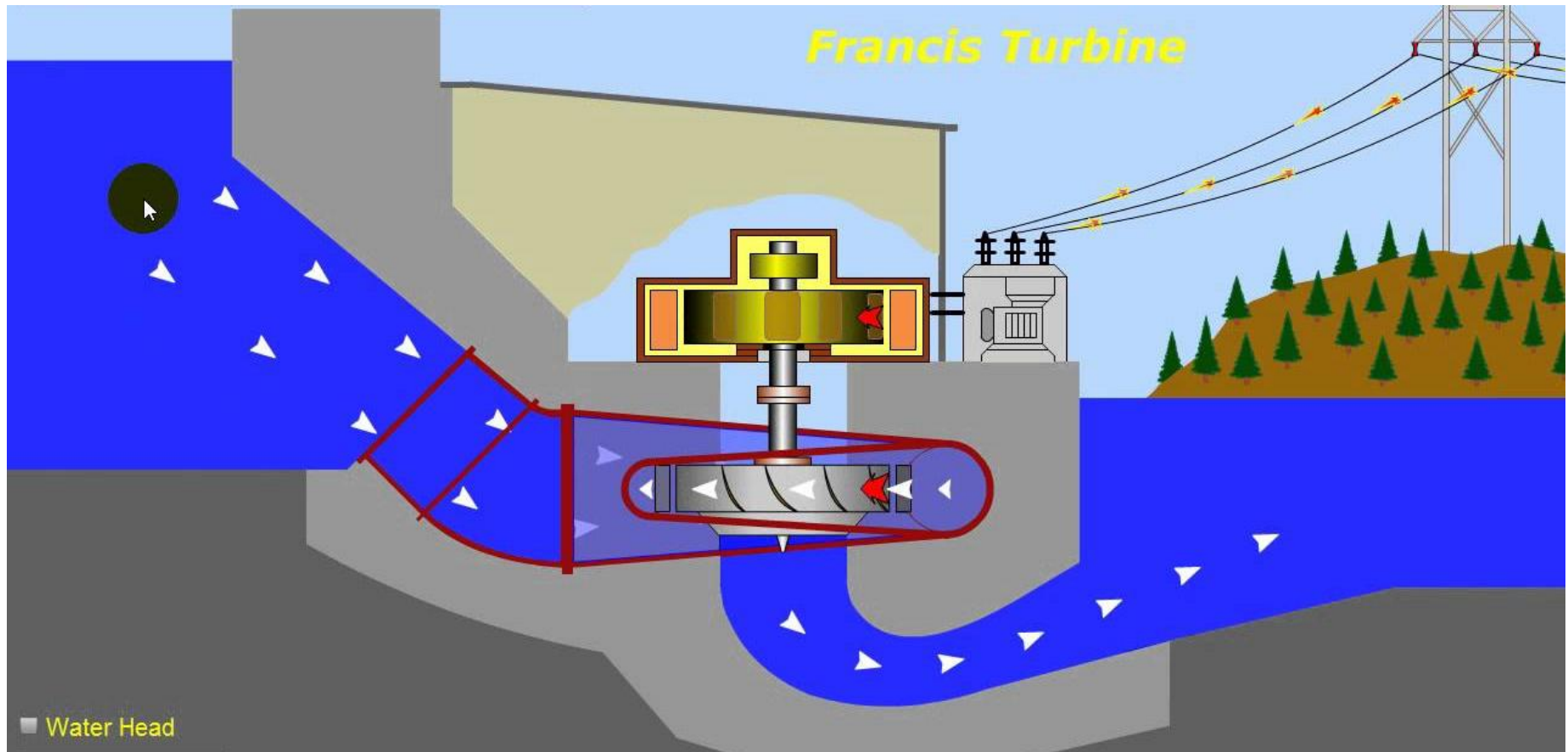
TURBINA FRANCIS



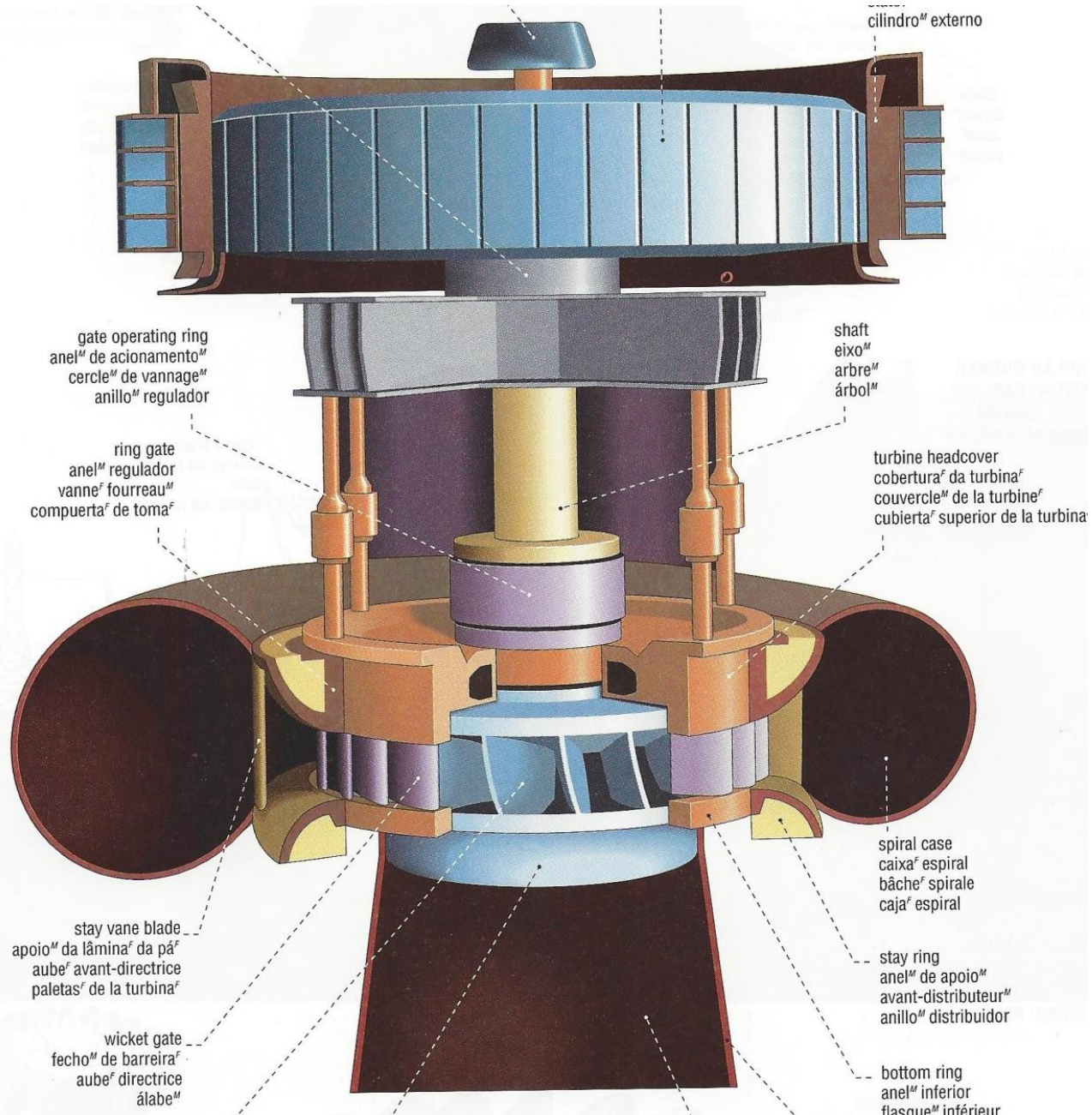
ROTOR FRANCIS



TURBINA FRANCIS



TURBINA FRANCIS



TURBINAS

HÉLICE

(KAPLAN)

QUANDO AS PÁS SÃO DE PASSO VARIÁVEL

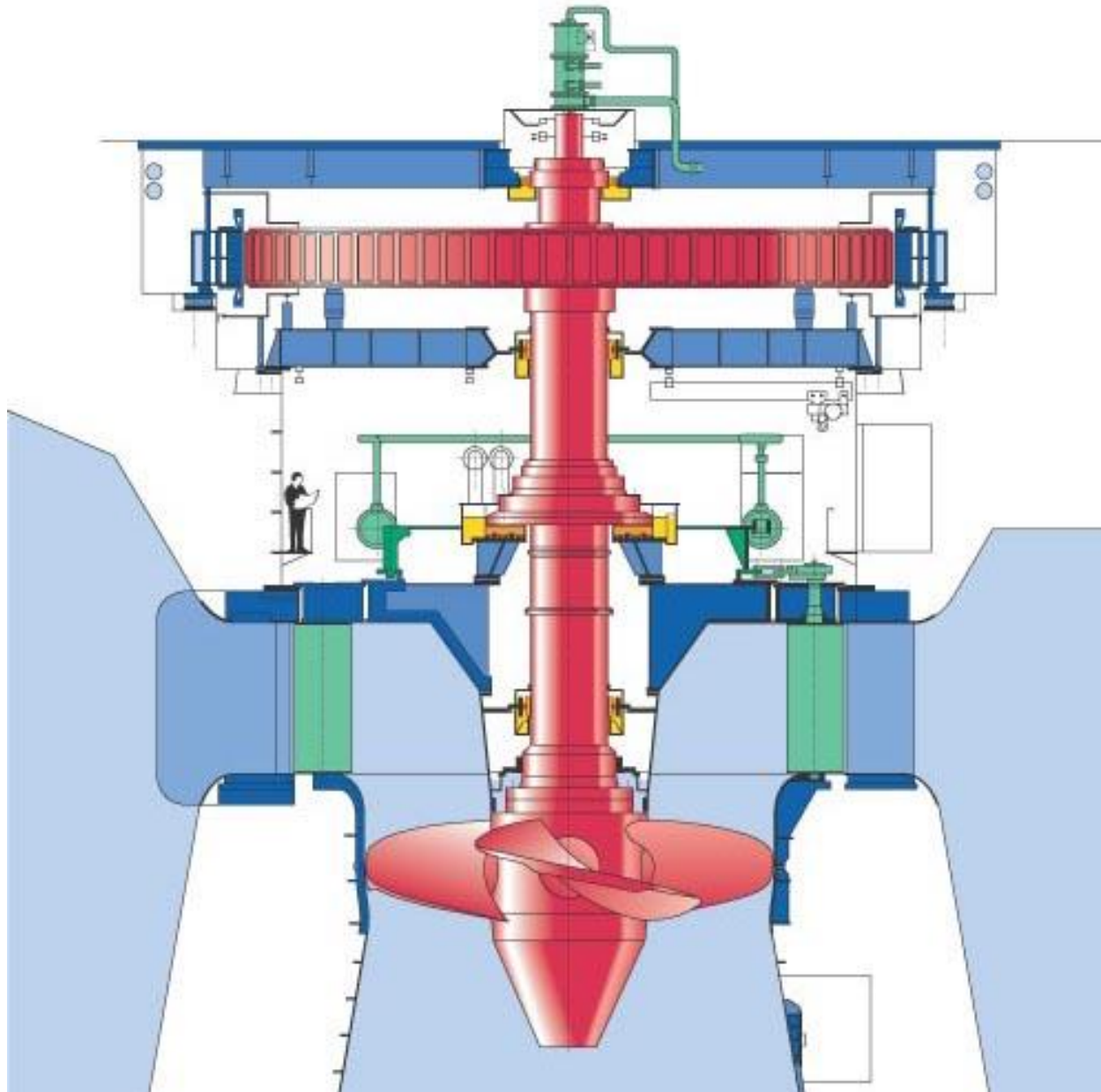
TURBINAS HÉLICE / KAPLAN



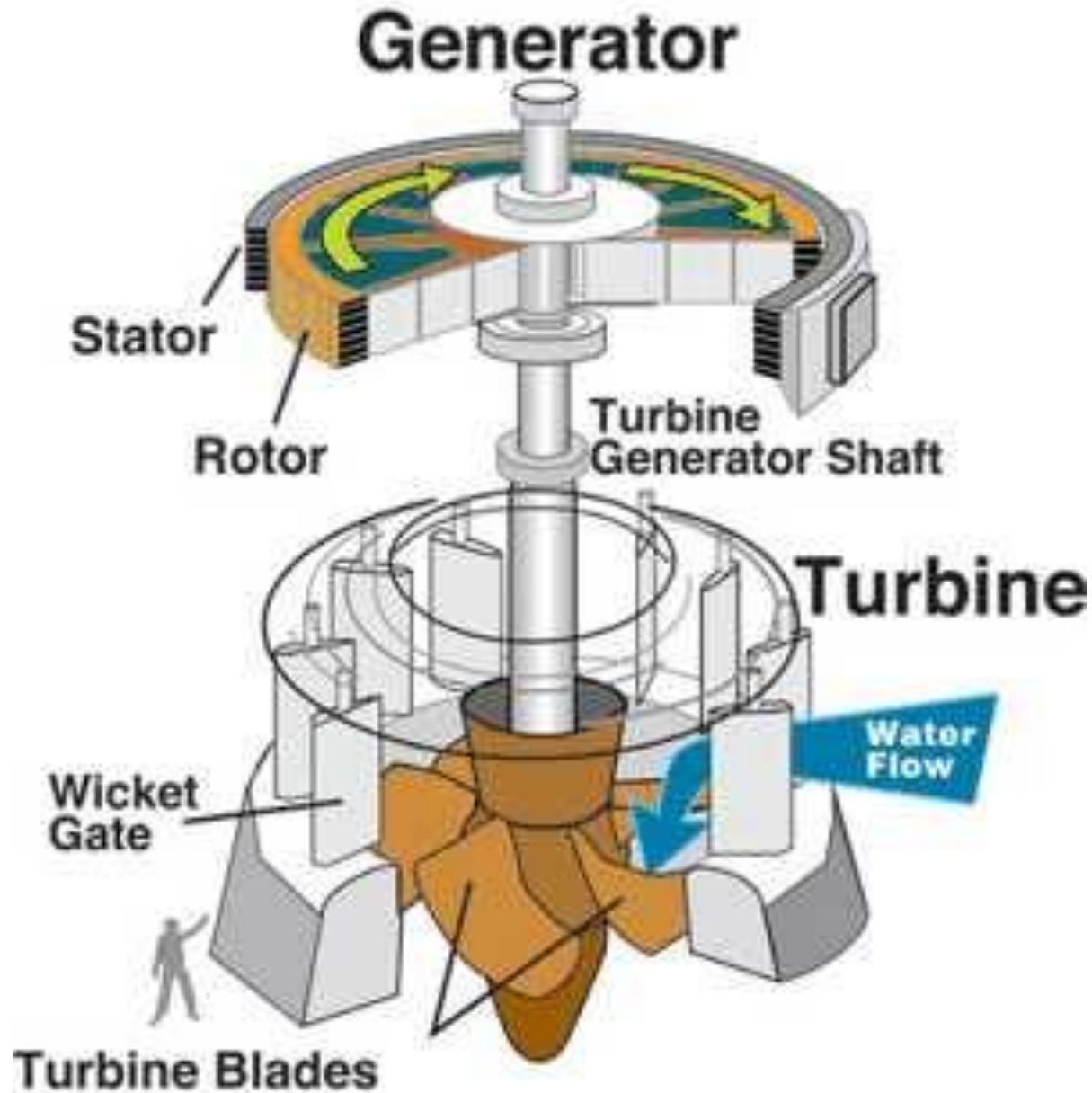
Kaplan turbines.mp4

<https://www.youtube.com/watch?v=pbliwh4-R2I>

TURBINA KAPLAN

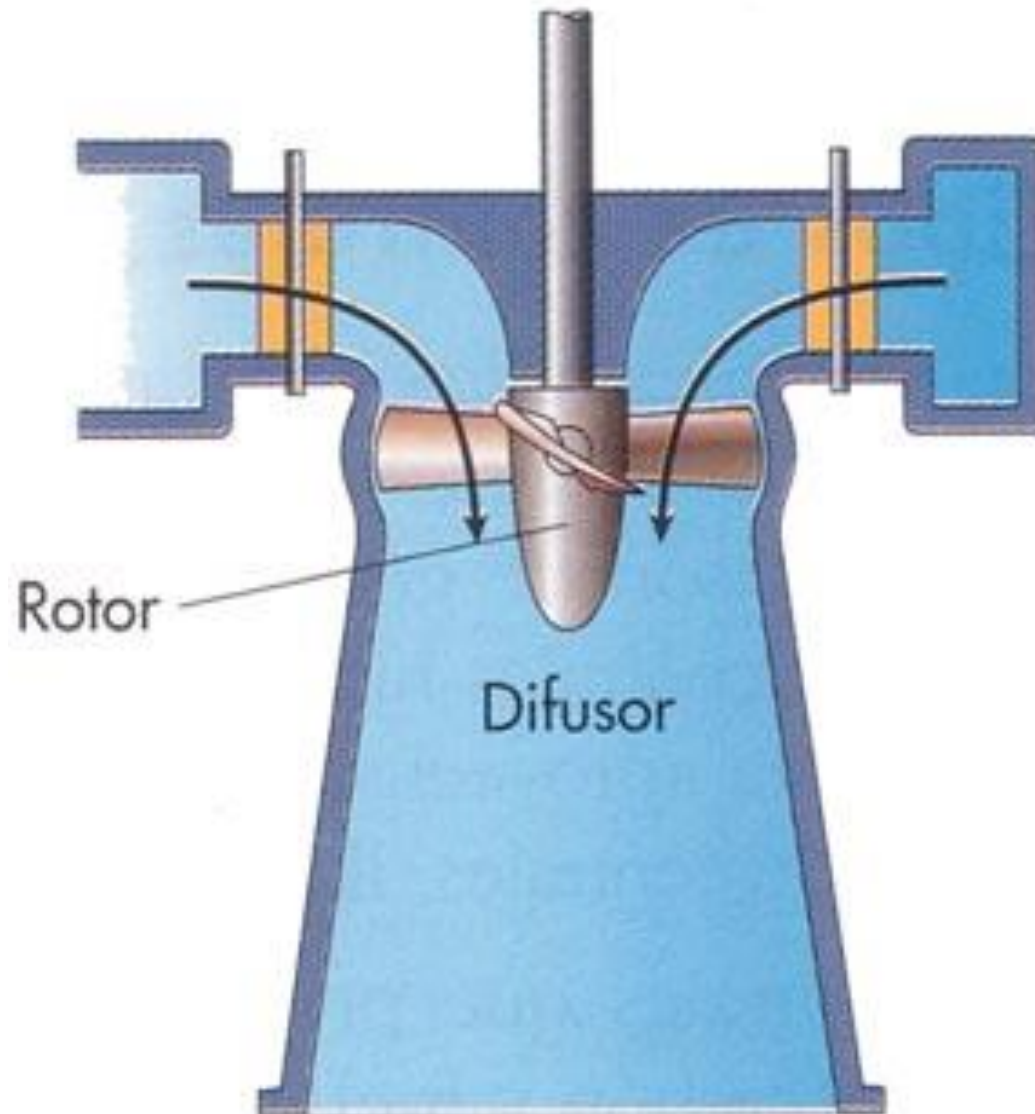


TURBINA KAPLAN

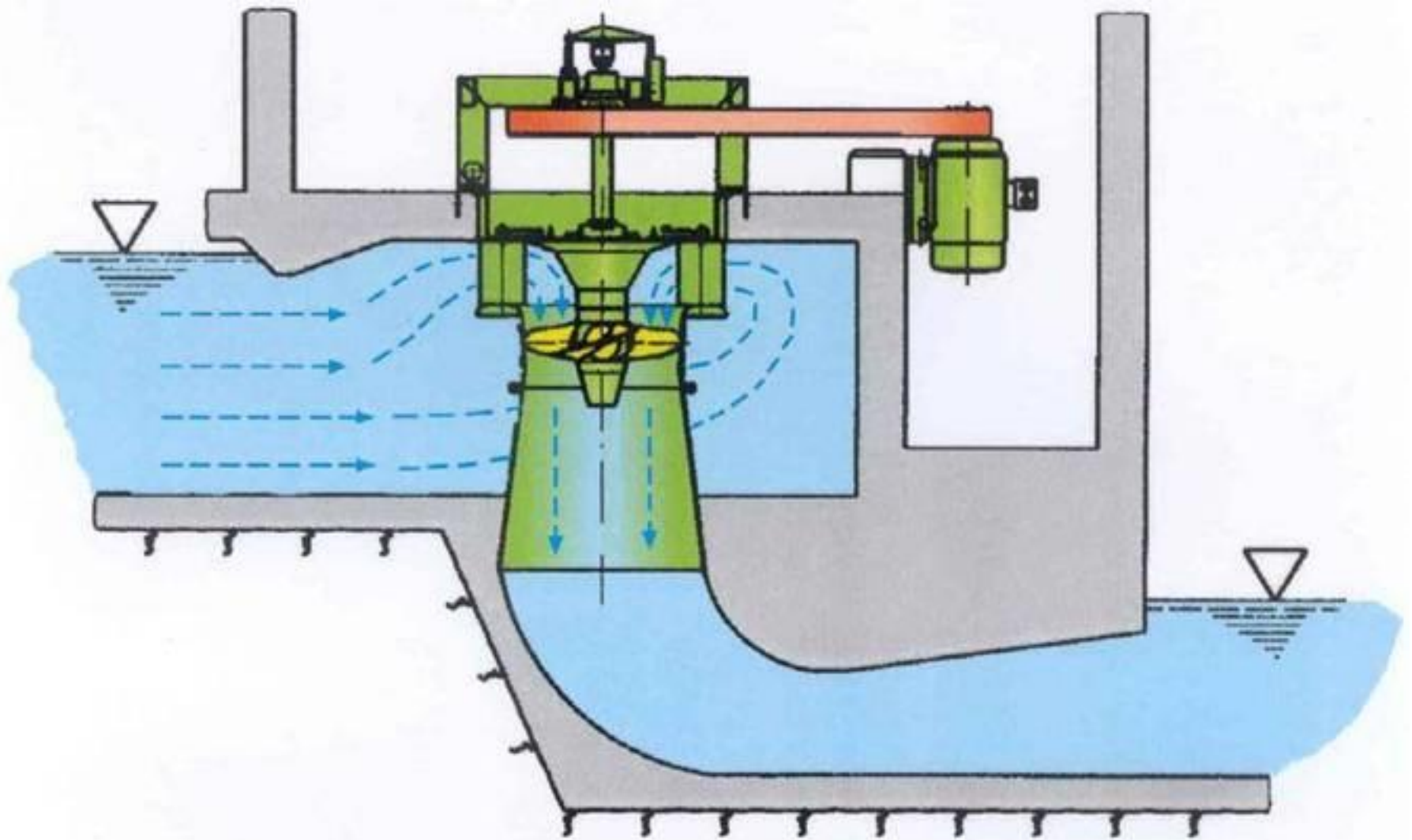


TURBINA KAPLAN

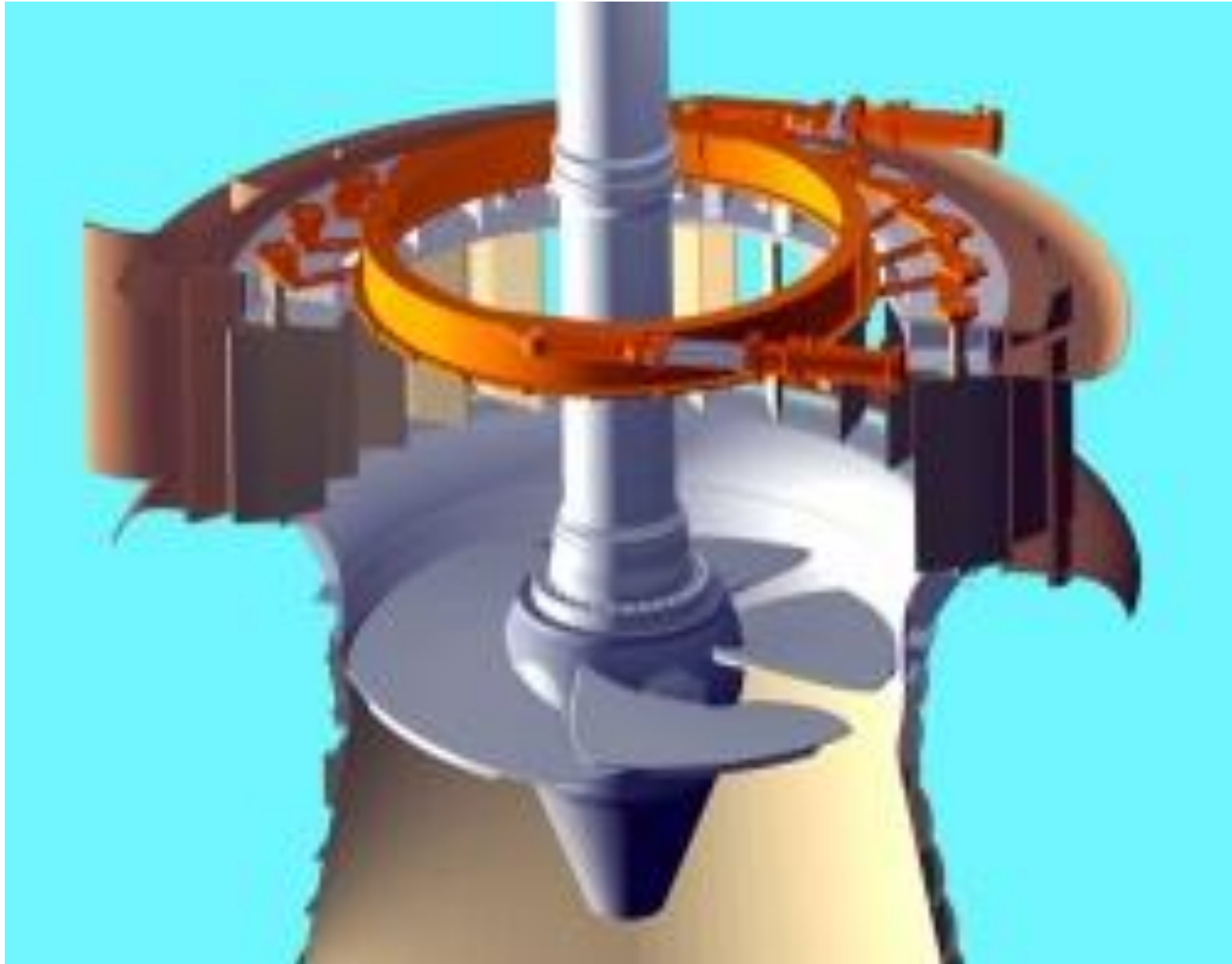
Distribuidor



TURBINA KAPLAN

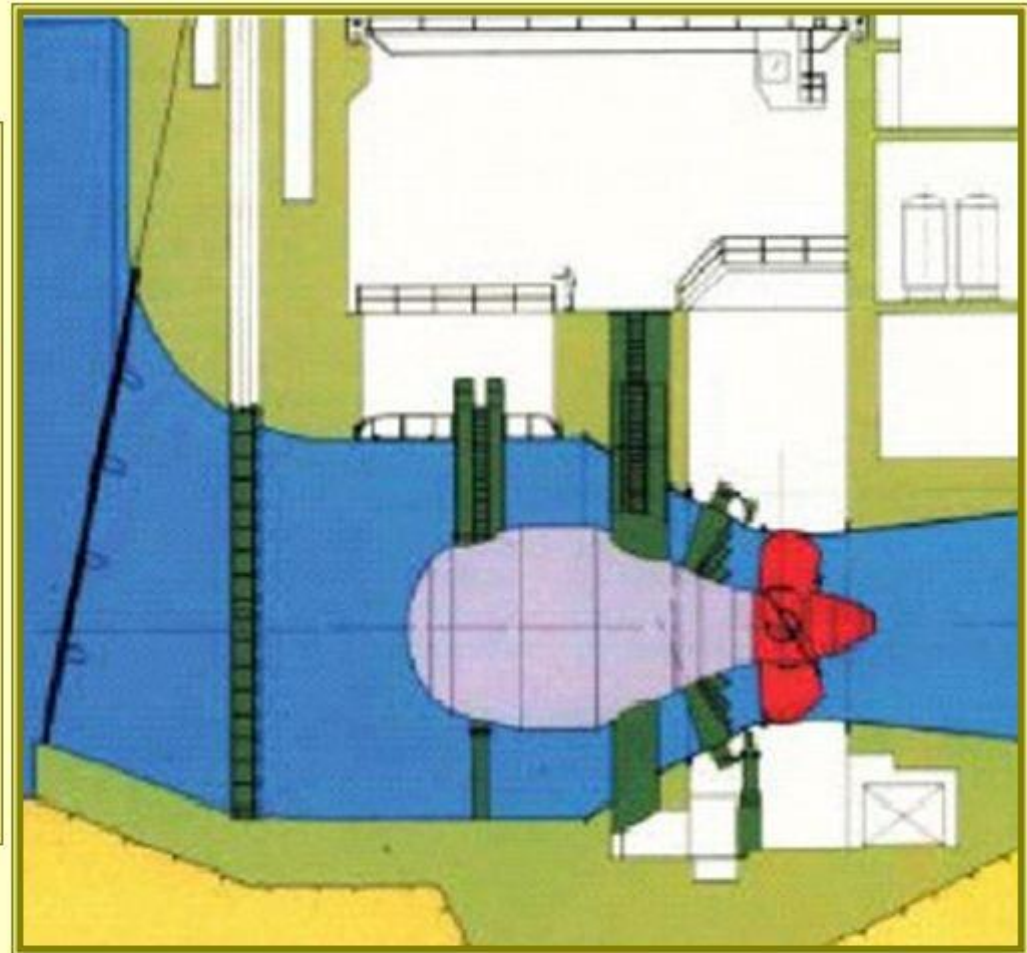
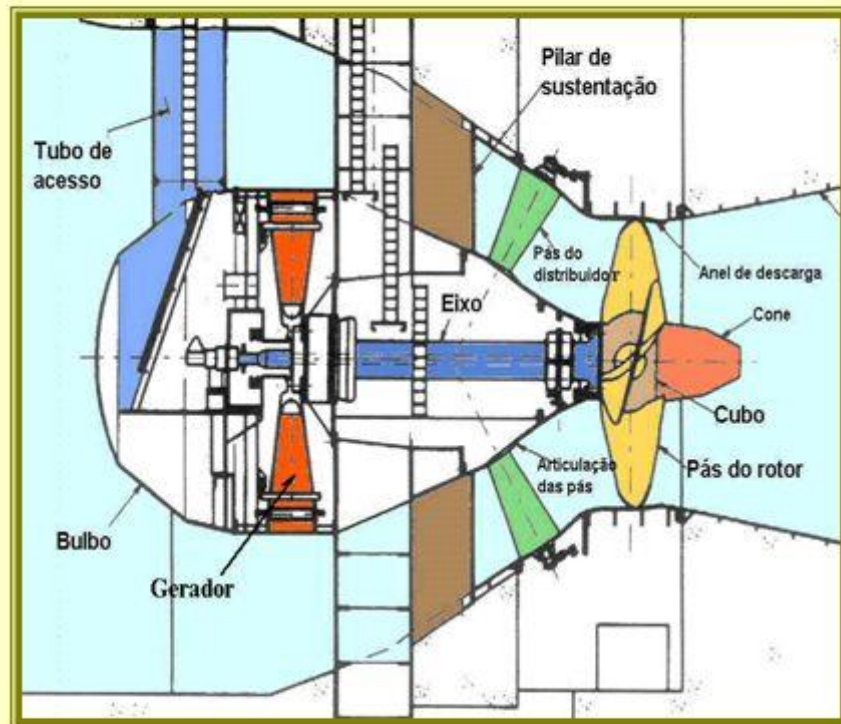


INSTALAÇÃO KAPLAN

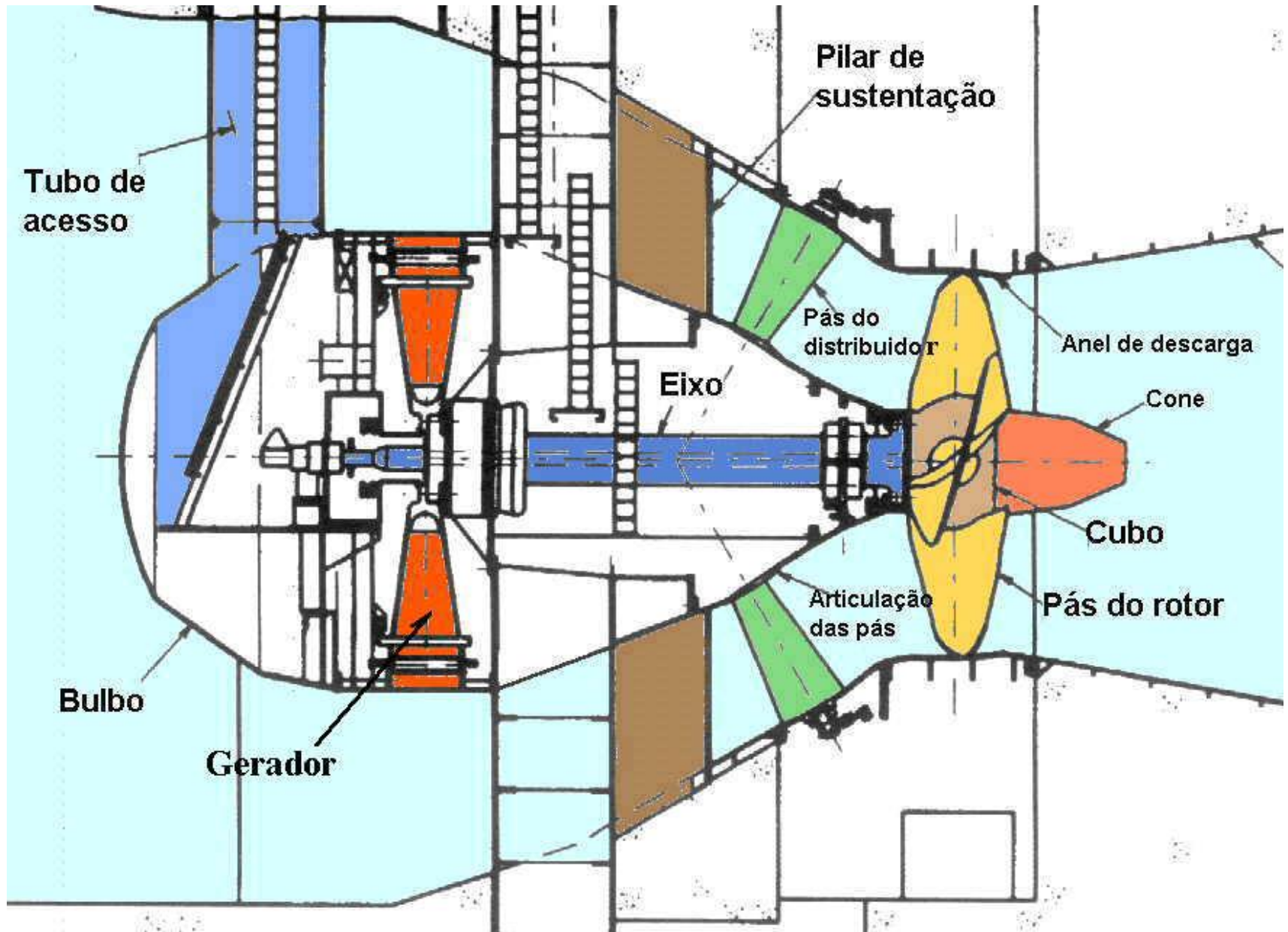


Tipos de turbinas de geração de energia elétrica

Turbina Bulbo.



TURBINA BULBO - KAPLAN



TURBINAS PELTON

TURBINAS

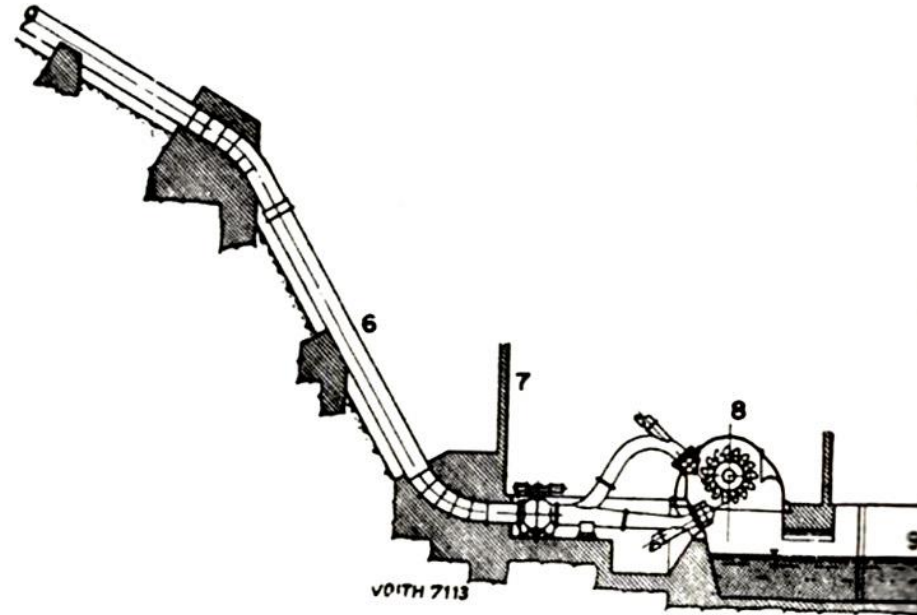
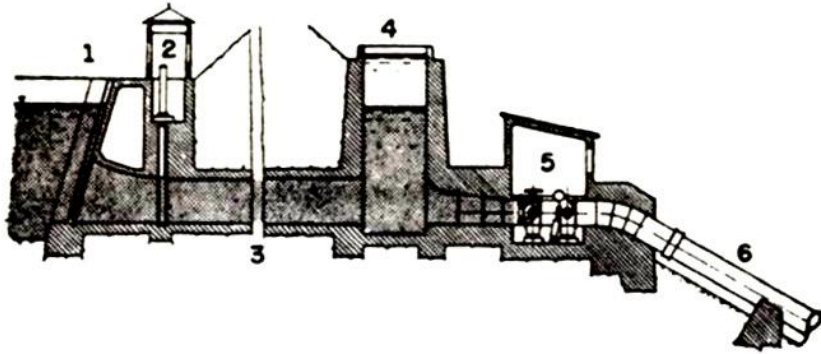
EXPERIÊNCIA Nº 5

LEVANTAMENTO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UMA TURBINA PELTON

PROF. SÉRGIO ROBERTO CECCATO
2022

TURBINAS PELTON

ELEMENTOS PRINCIPAIS DE UMA INSTALAÇÃO



Usina de derivação típica, com turbina Pelton de dois jatos. 1 — tomada d'água com grade, 2 — comporta e comando, 3 — tubulação de baixa pressão, 4 — *stand-pipe*, 5 — válvula, 6 — tubulação forçada, *penstock*, 7 — válvula anterior à turbina, 8 — turbina Pelton com dois jatos, 9 — canal de fuga.

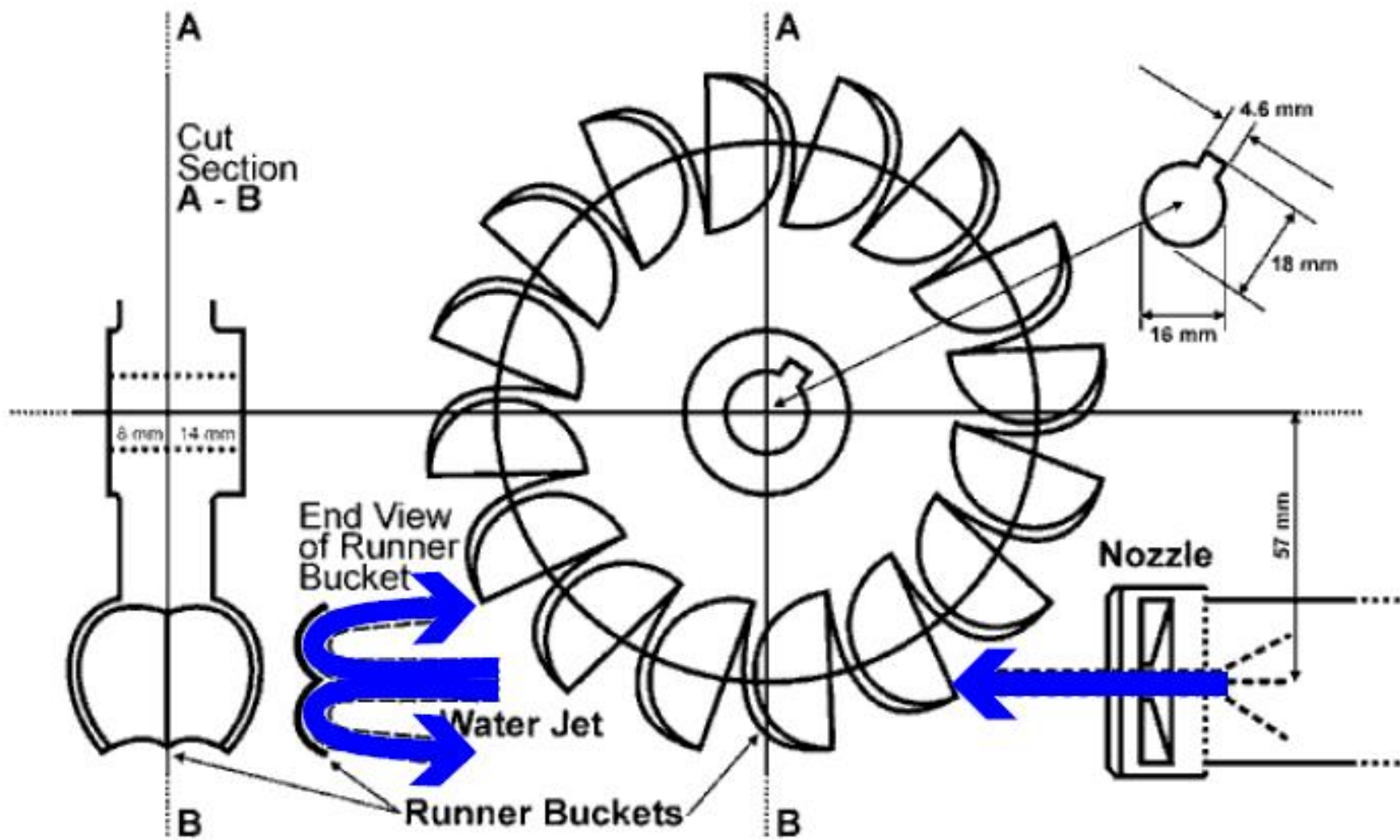
Número real de rpm das turbinas

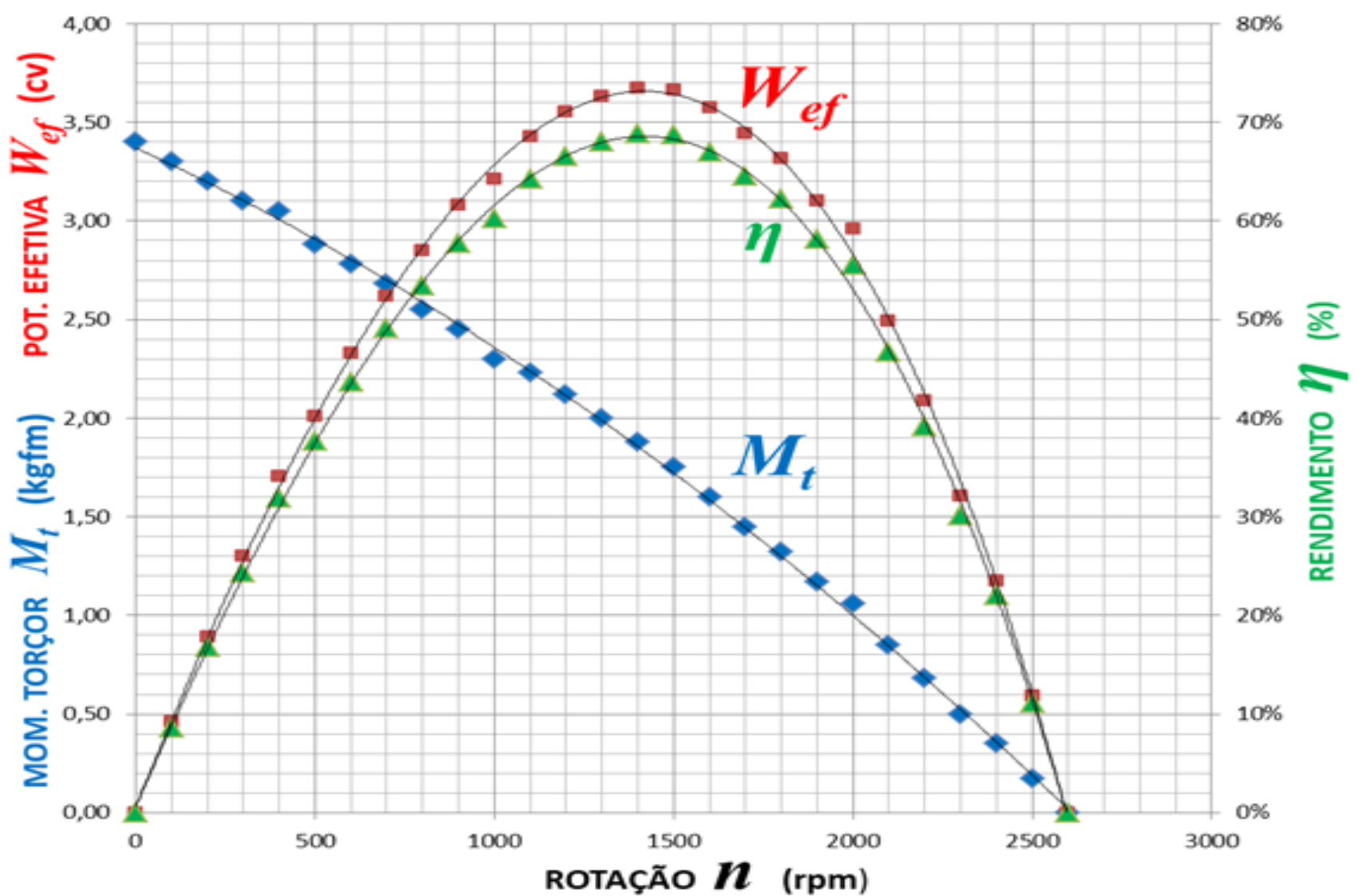
Propeller, Kaplan, Bulbo
Francis
Pelton

50 a 150 rpm
80 a 300 rpm
200 a 750 rpm

Com relação às alturas de queda, podem-se dividir as usinas em:

- usinas de muito baixa queda 2 a 10 m
- usinas de baixa queda: $10 \text{ m} < H < 30 \text{ m}$
- usinas de média queda: $30 \text{ m} < H < 200 \text{ m}$
- usinas de alta queda: $H > 200 \text{ m}$





◆ MOMENTO TORÇOR M_t ■ POTÊNCIA EFETIVA W_{ef} ▲ RENDIMENTO η (%)

LEVANTAMENTO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UMA TURBINA PELTON
 LABORATÓRIO DE MÁQUINAS DE FLUXO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
 PME-3453-MÁQUINAS DE FLUXO – LABORATÓRIO – 1º SEMESTRE DE 2022

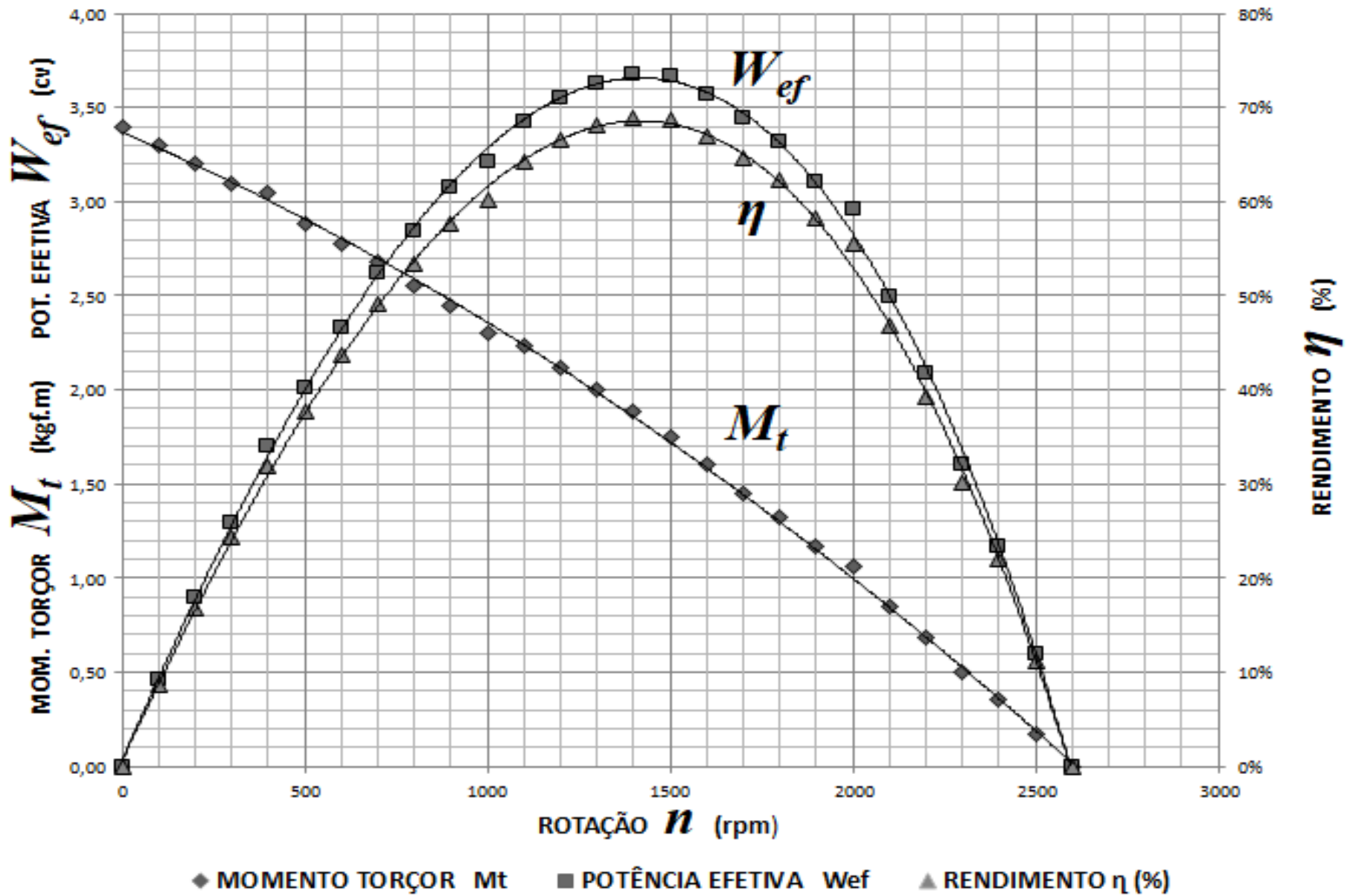
Observe que para a produção do gráfico com as curvas características, ou de desempenho, de uma Turbina Pelton temos que levar em conta que o mesmo também poderá ser impresso em preto e branco.

Para tanto é recomendável que os pontos a serem plotados, que irão gerar as curvas que representam os comportamentos dos fenômenos analisados experimentalmente, devam ter geometrias diferenciadas para cada uma das grandezas em questão.

Este recurso é muito conveniente para que venha a facilitar o reconhecimento rápido de cada uma das grandezas apresentadas.

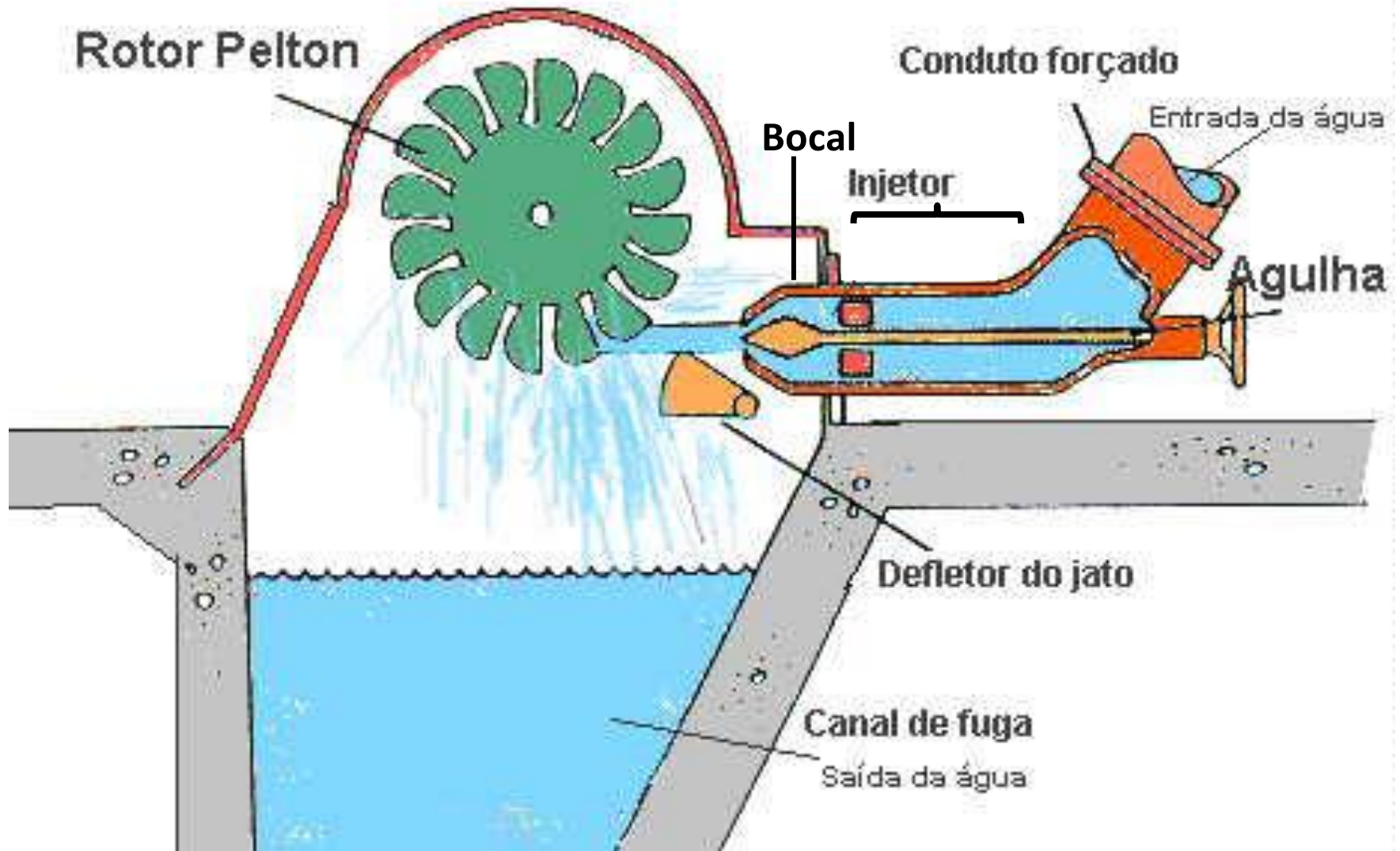
É recomendável também que cada uma das curvas, das grandezas plotadas, sejam identificadas com os seus símbolos próximos às mesmas.

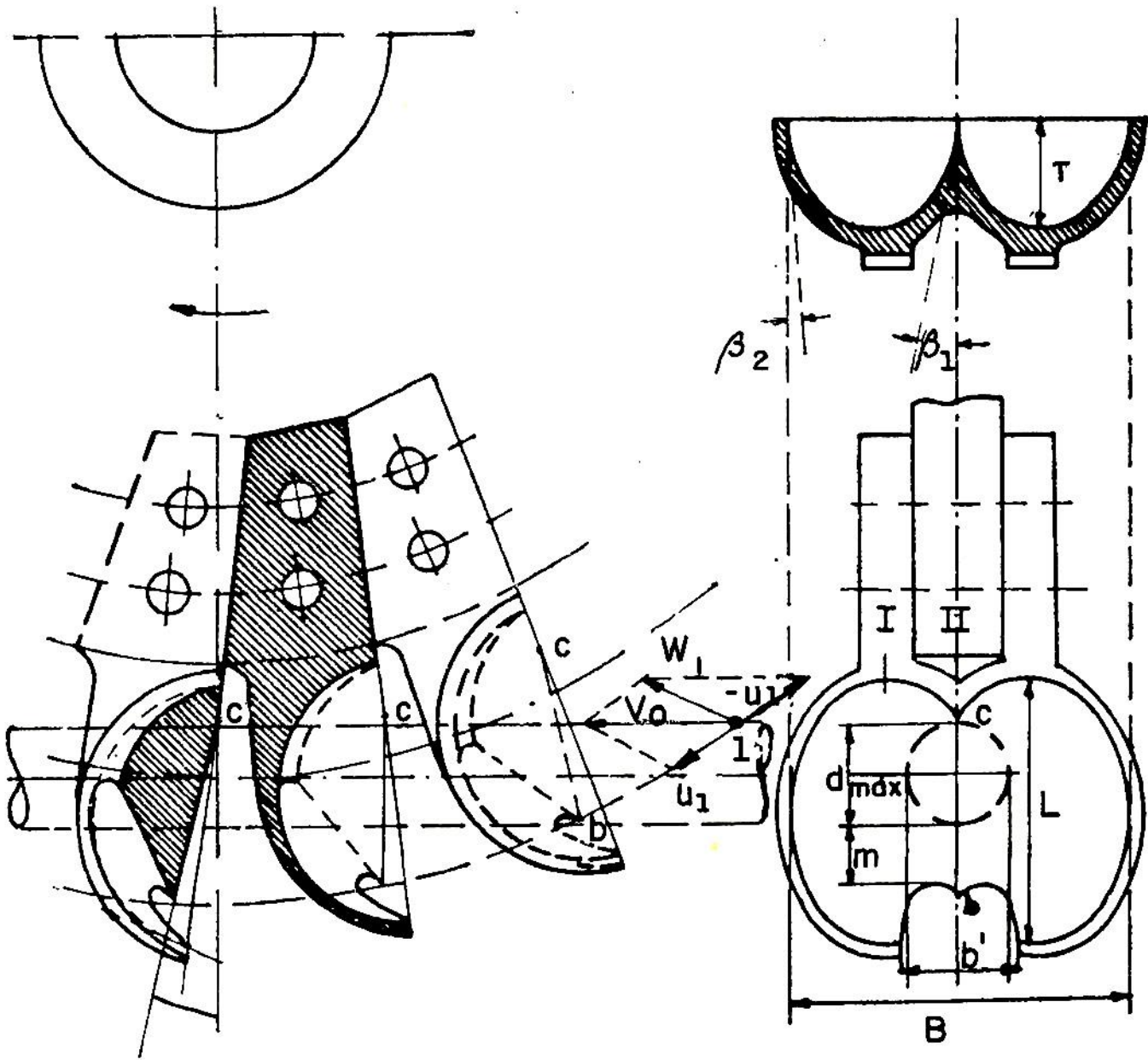
É recomendável também que o gráfico tenha uma legenda indicando cada grandeza plotada com as geometrias dos seus postos identificadas.



LEVANTAMENTO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UMA TURBINA PELTON
 LABORATÓRIO DE MÁQUINAS DE FLUXO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
 PME-3453-MÁQUINAS DE FLUXO – LABORATÓRIO – 1º SEMESTRE DE 2022

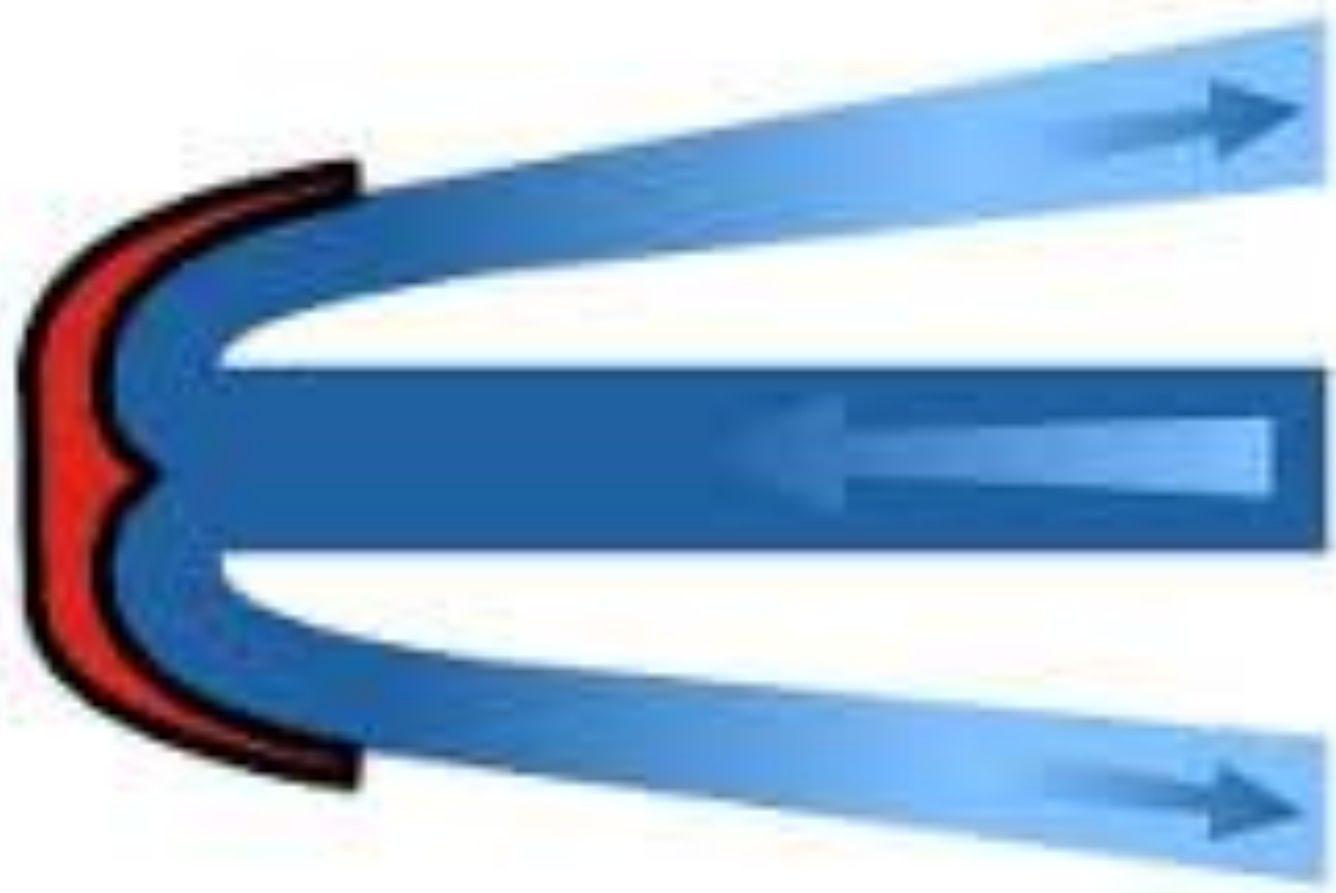
INSTALAÇÃO PELTON

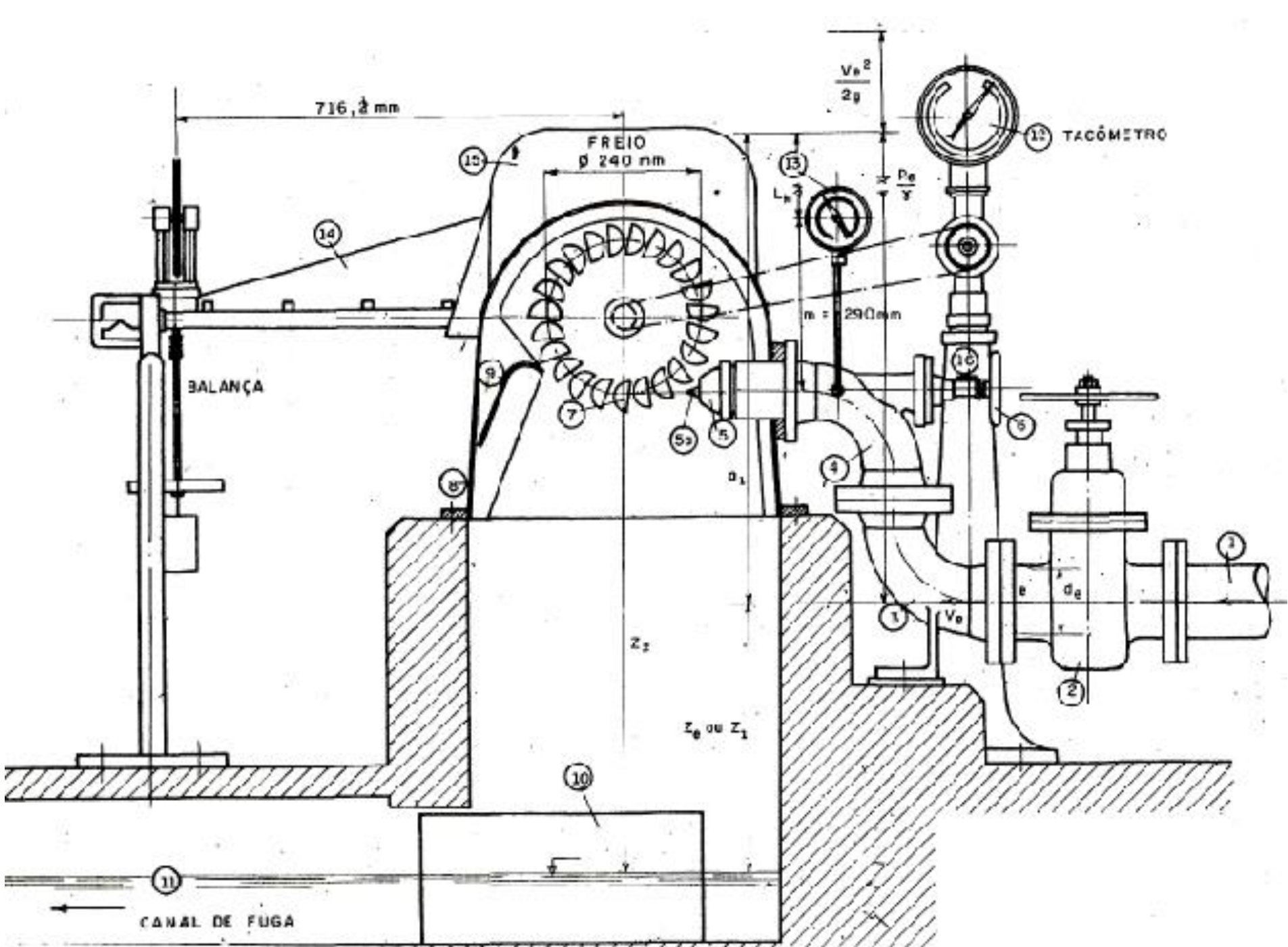


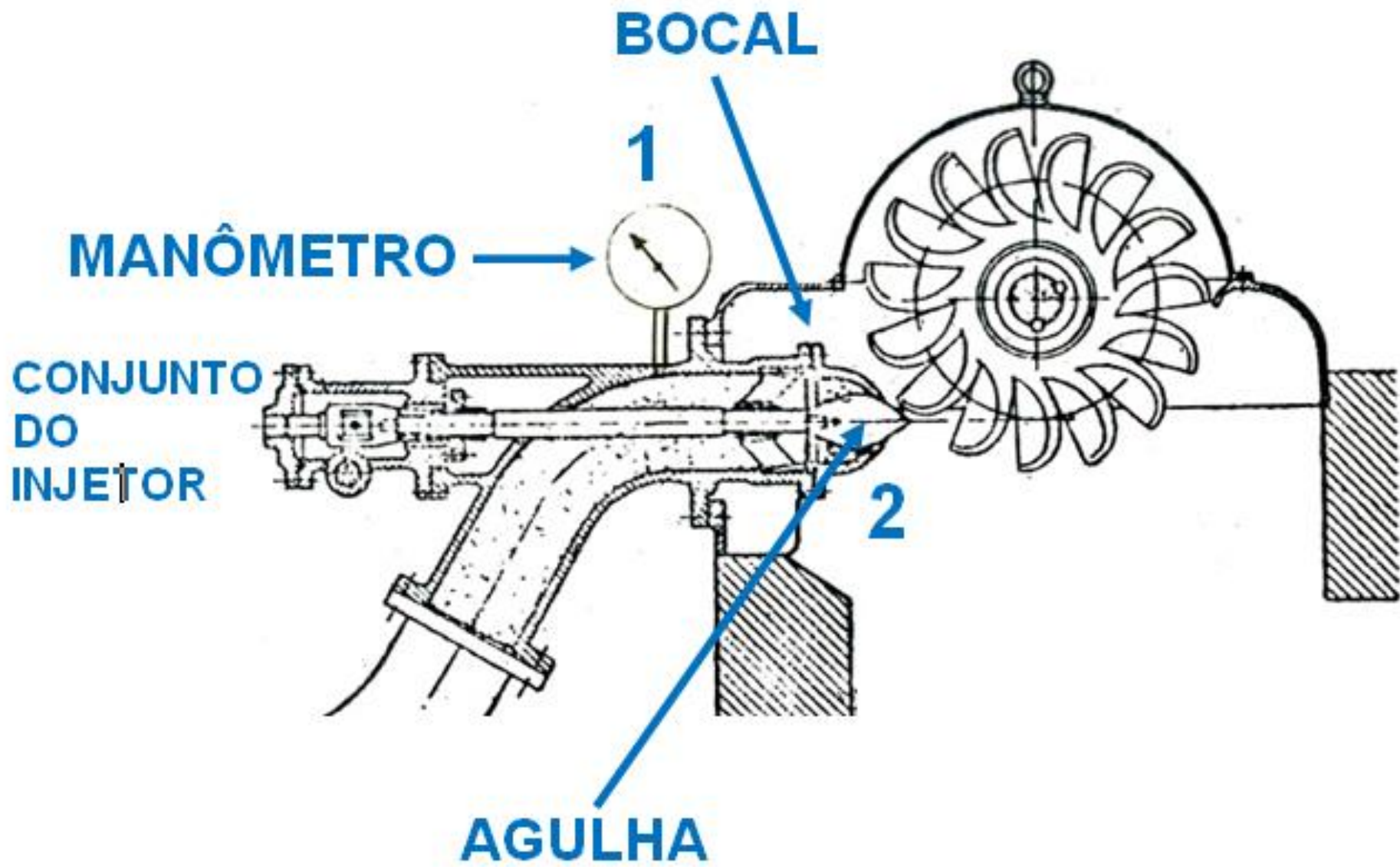


Pá de turbina Pelton.



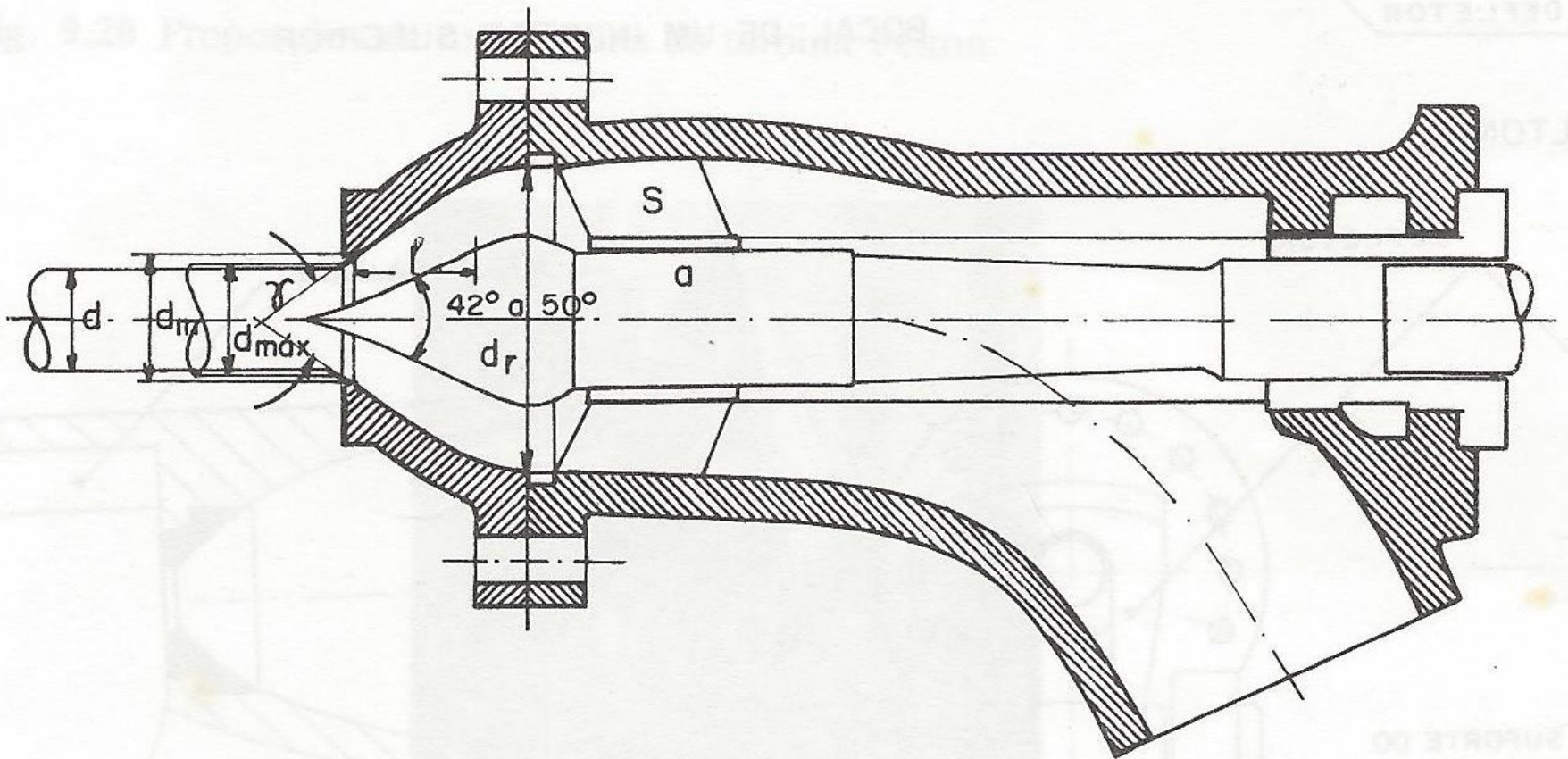






INJETOR DE UMA TURBINA PELTON

Bocal e agulha



1. Introdução

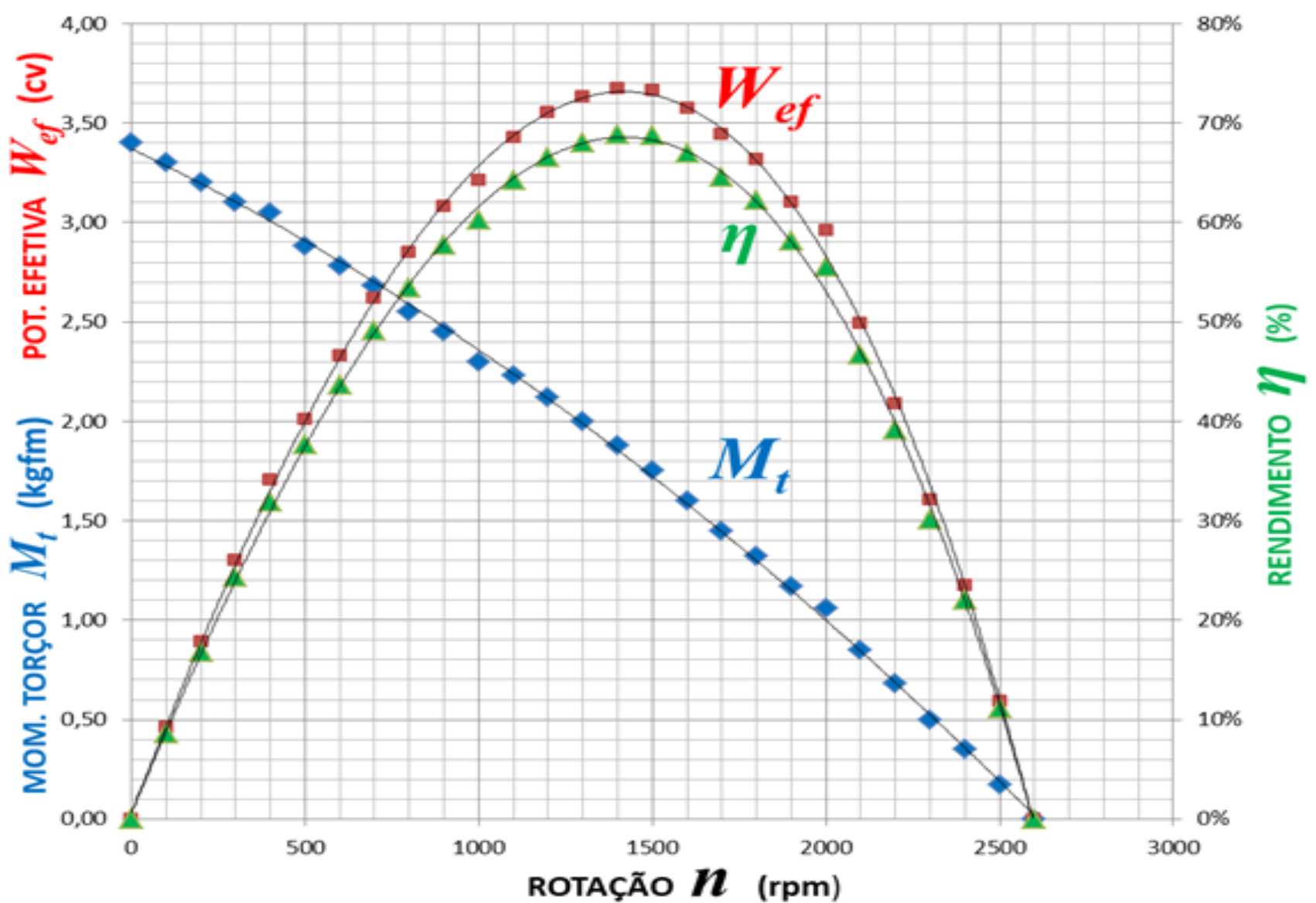
O objetivo da presente experiência é o levantamento das curvas características de uma Turbina Pelton

As curvas características de uma Turbina Pelton são representadas pelas seguintes grandezas em função da rotação (n):

$M_t = f(n)$ Momento torçor no eixo da turbina

$W_{ef} = f(n)$ Potência efetiva fornecida pela turbina

$\eta = f(n)$ Rendimento da turbina



◆ MOMENTO TORÇOR M_t ■ POTÊNCIA EFETIVA W_{ef} ▲ RENDIMENTO η (%)

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UMA TURBINA PELTON

2. Resumo teórico

2.1. (M_t) Momento torçor

$$M_t = F \cdot b \text{ (kgf} \cdot \text{m)}$$

F = Força líquida na **BALANÇA (1)** do Freio de Prony (kgf)

b = braço do Freio de Prony (kgf)

$$F = P_{B1} - T \text{ (kgf)}$$

P_{B1} = Carga total na **BALANÇA (1)** (kgf)

T = Tara da balança (kgf)

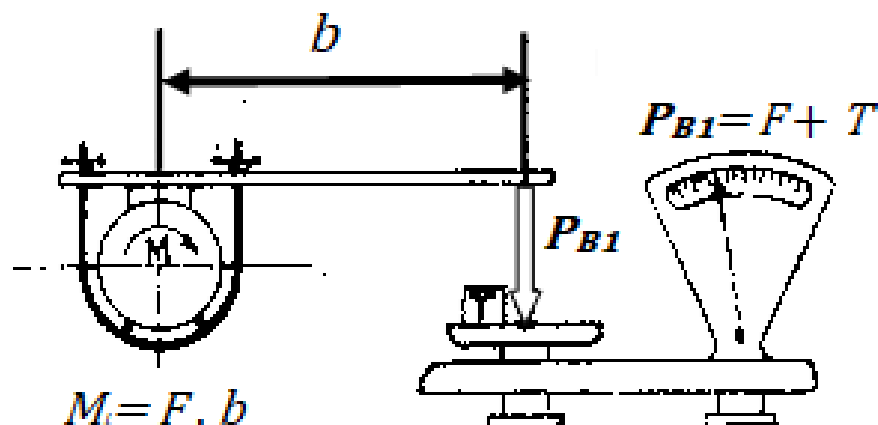


Figura 2.1. Detalhe do Freio de Prony e a **BALANÇA (1)**

2.2. (W_{ef}) Potência efetiva (fornecida pela turbina)

$$W_{ef} = M_t \cdot \omega \left(\frac{kgf \cdot m}{s} \cdot \frac{1}{75} \right) (cv)$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} (rd/s)$$

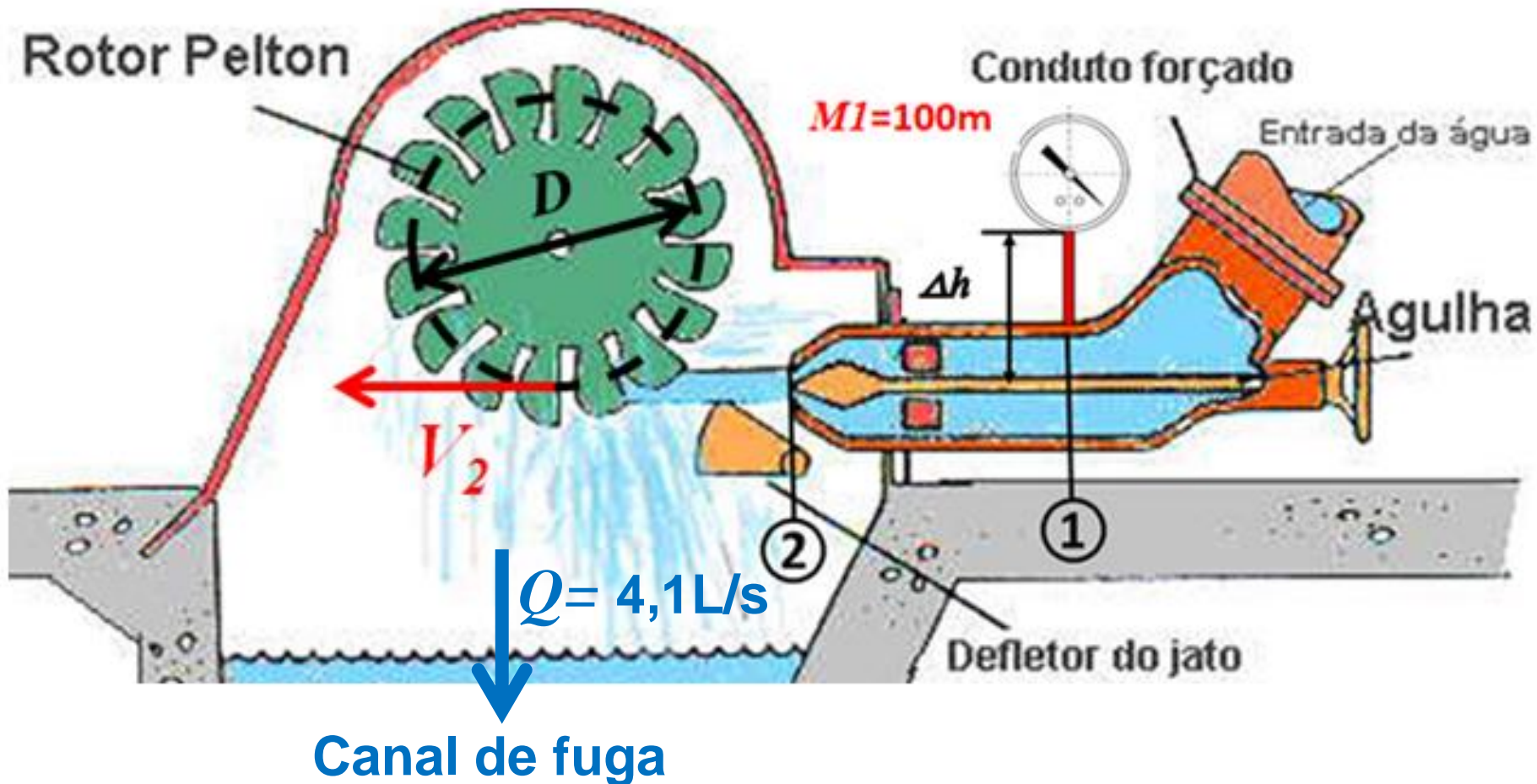
2.3. (W_d) Potência disponível (fornecida pelo fluido para a turbina)

$$W_d = \gamma \cdot Q \cdot H_d \left(\frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \text{m} \cdot \frac{1}{75} \right) \quad (\text{CV})$$

γ = Peso específico da água $\left(\frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \right)$

Q = Vazão do fluido pela turbina $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$

H_d = Carga disponível na secção ① do injetor da Turbina por intermédio de Bombas associadas em série simulando uma altura de queda de aprox. 100m



Vai para o canal e para a **BALANÇA (2)** para pesagem a qual será igualada ao volume considerando, para a presente experiência, a densidade da água = 1 g/cm^3

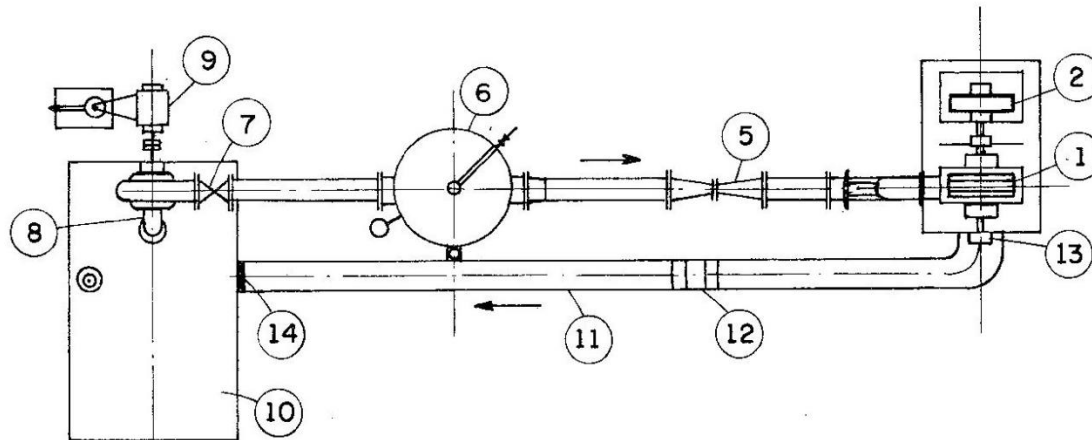
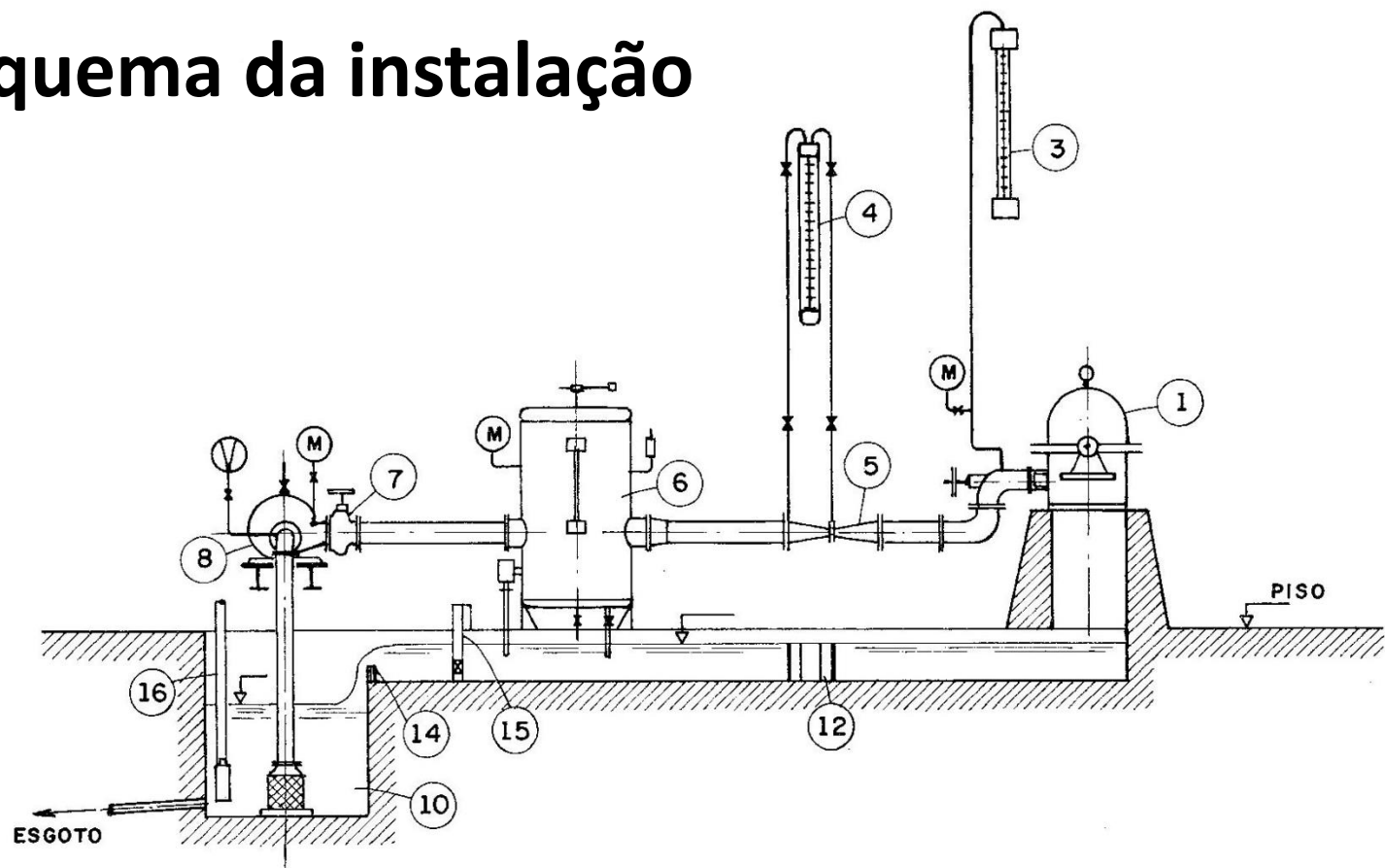
2.4. (Q) Vazão fornecida pela bomba (L/s), Ver item 5.2.

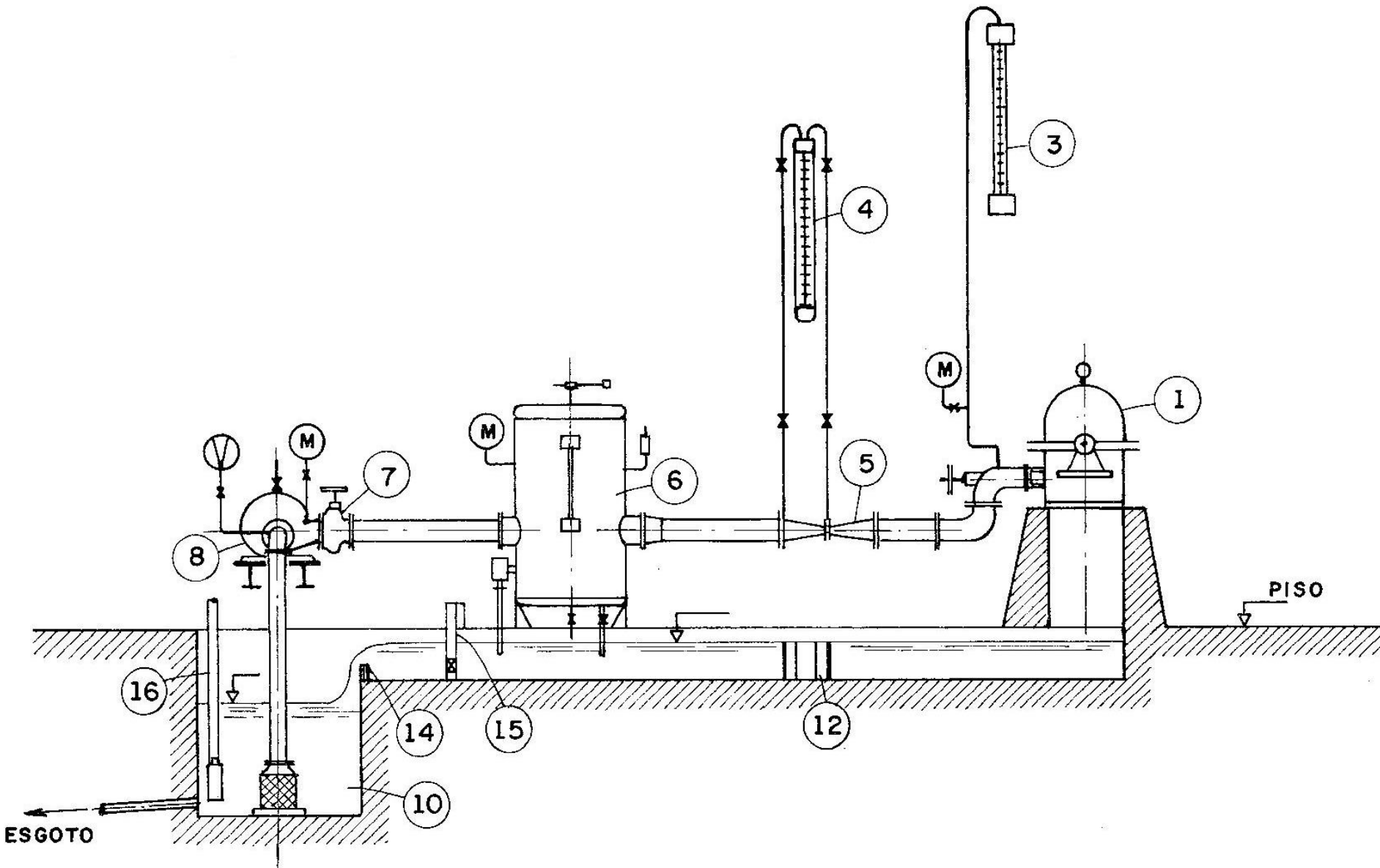
$$Q = \frac{\textit{Volume}}{\textit{tempo}}$$

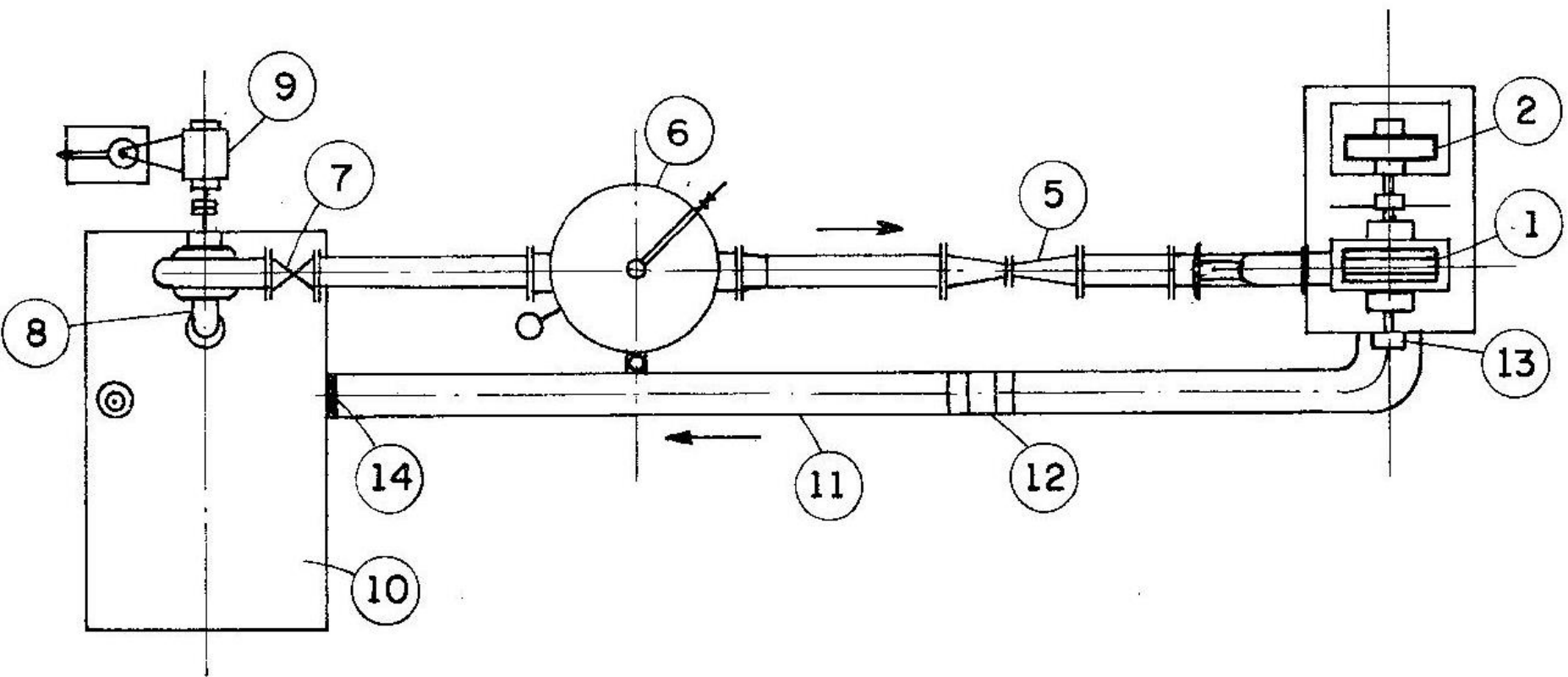
2.5. (η) Rendimento da turbina (%), Ver item 5.1.

$$\eta = \frac{W_{ef}}{W_d}$$

3 Esquema da instalação









TANQUE DE PRESSÃO COM COLCHÃO DE AR REPRESADO PARA SUAVIDAR A ALIMENTAÇÃO DO INJETOR DA TURBINA PELTON

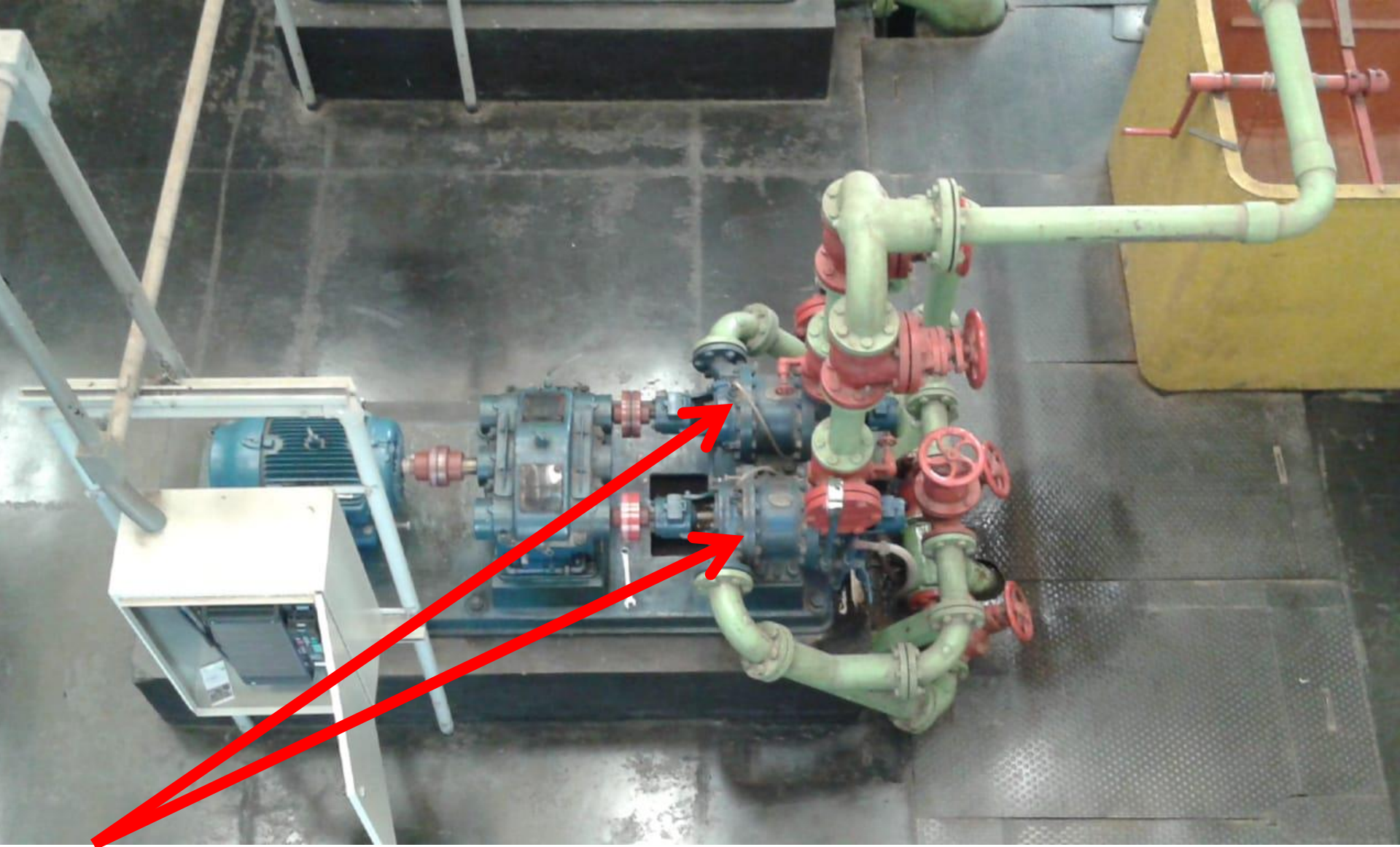
CONJUNTO DE DUAS BOMBAS, ASSOCIADAS EM SÉRIE, PARA A ALIMENTAÇÃO DO TANQUE.

AS BOMBAS IRÃO SIMULAR UM DESNÍVEL DE EM TORNO DE 100 m DE CARGA NO INJETOR DA TURBINA



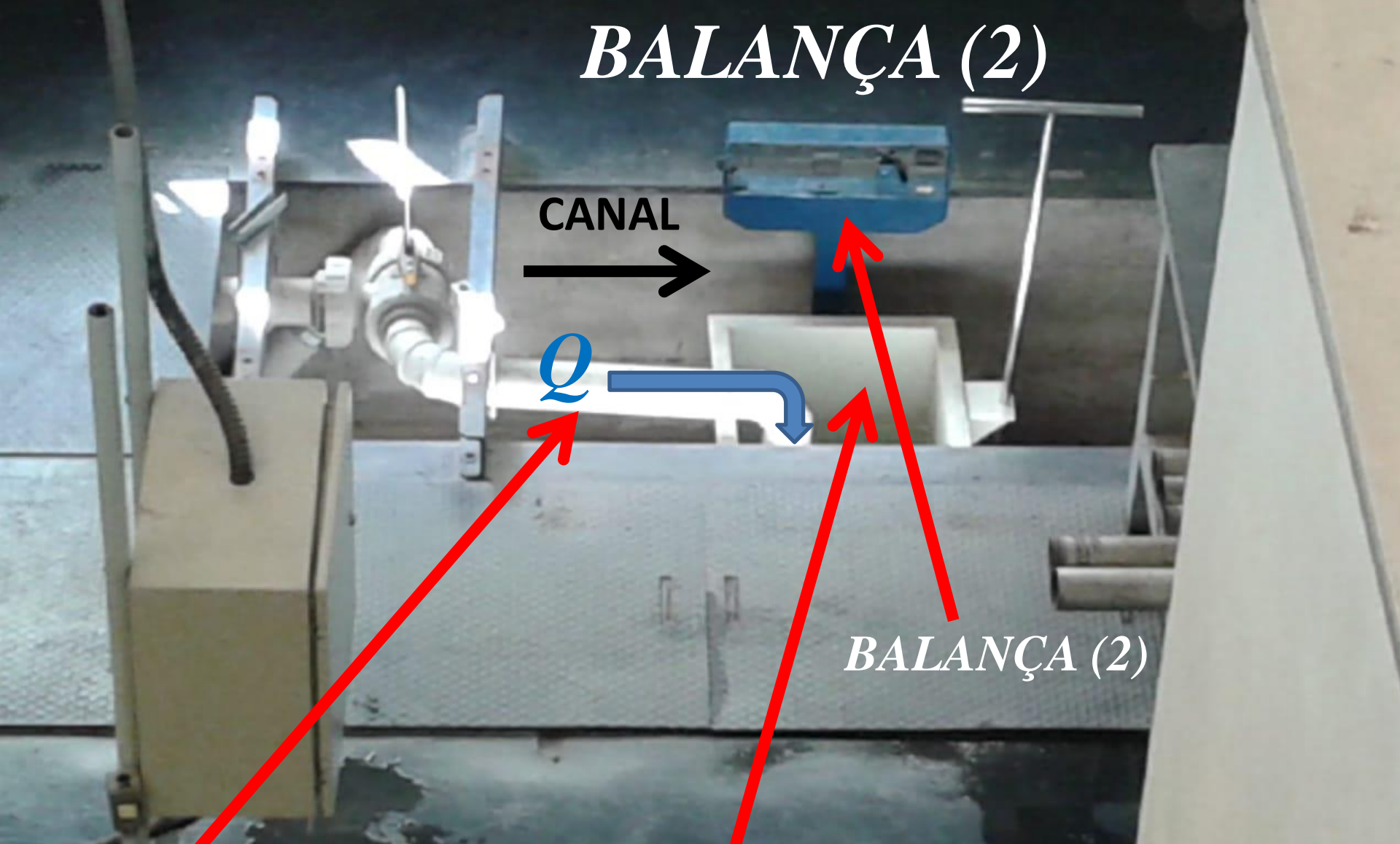
***BALANÇA (1), COM O
BRAÇO DO FREIO DE PRONY
APOIADO SOBRE O PRATO
DA BALANÇA (1)***





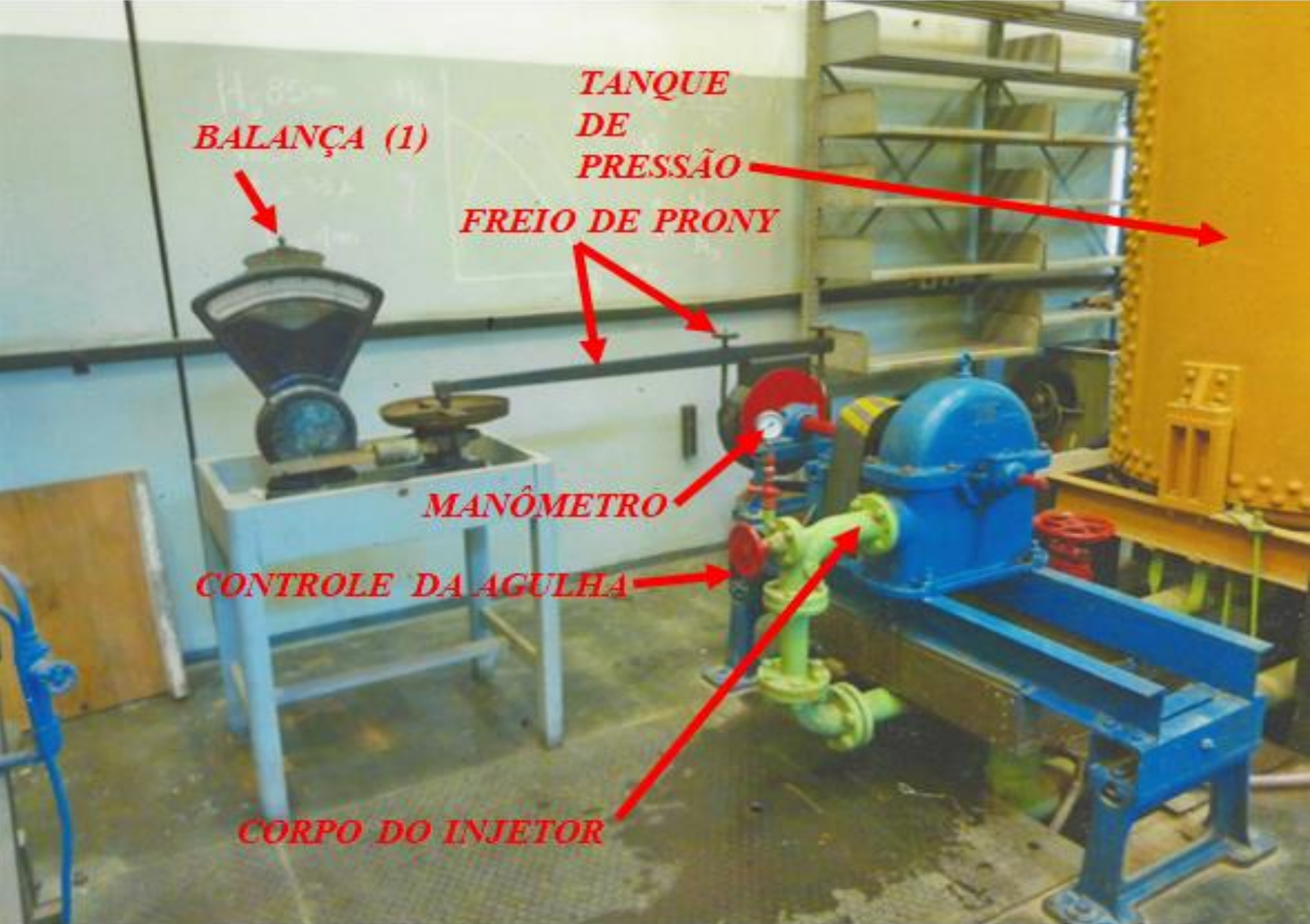
CONJUNTO DE DUAS BOMBAS, ASSOCIADAS EM SÉRIE, PARA A ALIMENTAÇÃO DO TANQUE DE PRESSÃO. AS BOMBAS SIMULARÃO UMA QUEDA DE ~ 100 m NO INJETOR.

BALANÇA (2)



TUBULAÇÃO DE COLETA
DA ÁGUA DE DESCARTE DA
TURBINA PARA PESAGEM

TANQUE DE PESAGEM
PARA A MEDIÇÃO DA
VAZÃO FIXA Q



BALANÇA (1)

*TANQUE
DE
PRESSÃO*

FREIO DE PRONY

MANÔMETRO

CONTROLE DA AGULHA

CORPO DO INJETOR

Figura 3.2. Conjunto para ensaio de uma Turbina Pelton



Figura 3.3. Detalhe do Rotor da Turbina Pelton. $D = 316 \text{ mm}$ (Atuação do jato)

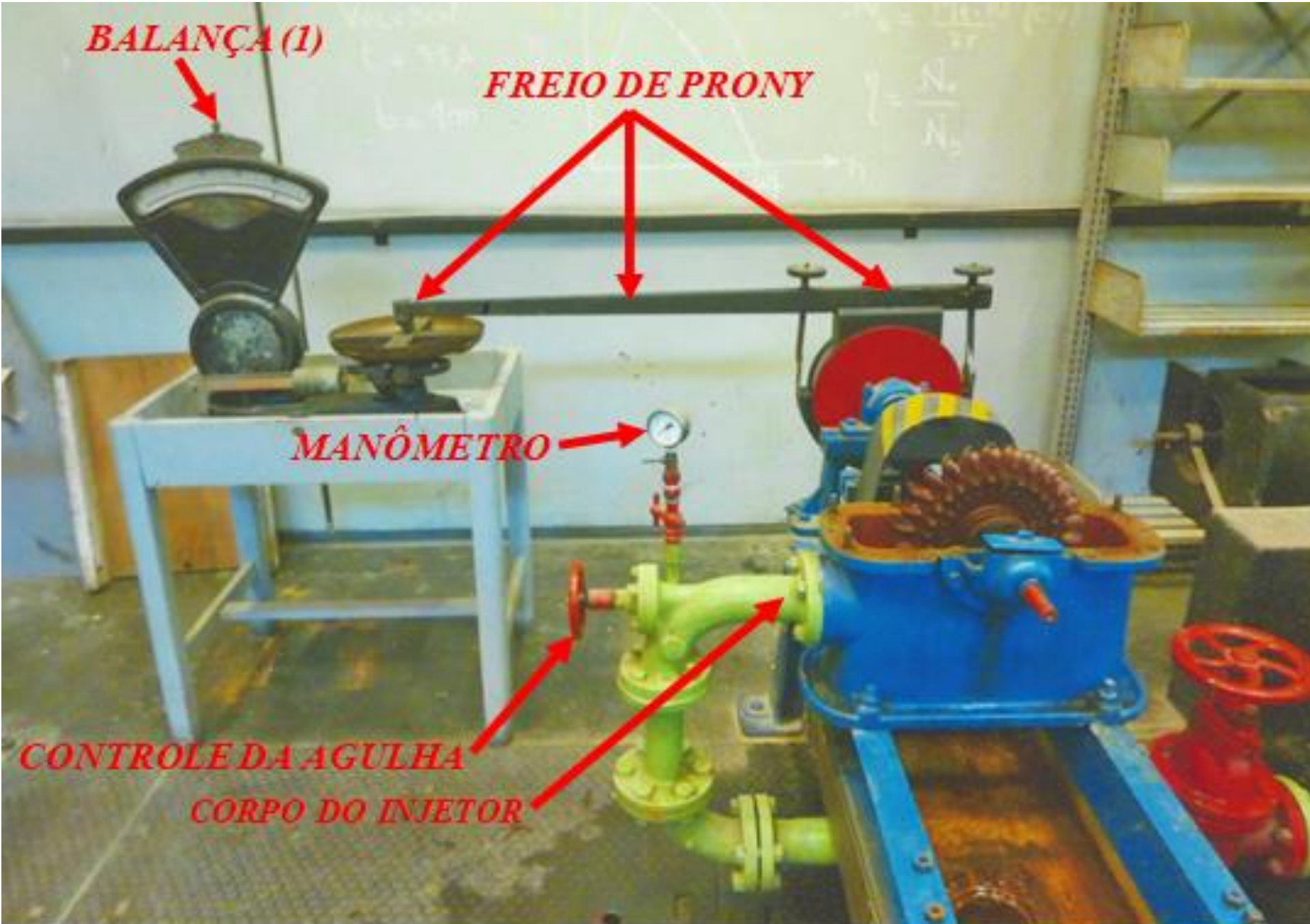


Figura 3.4. Turbina Pelton com Freio de Prony

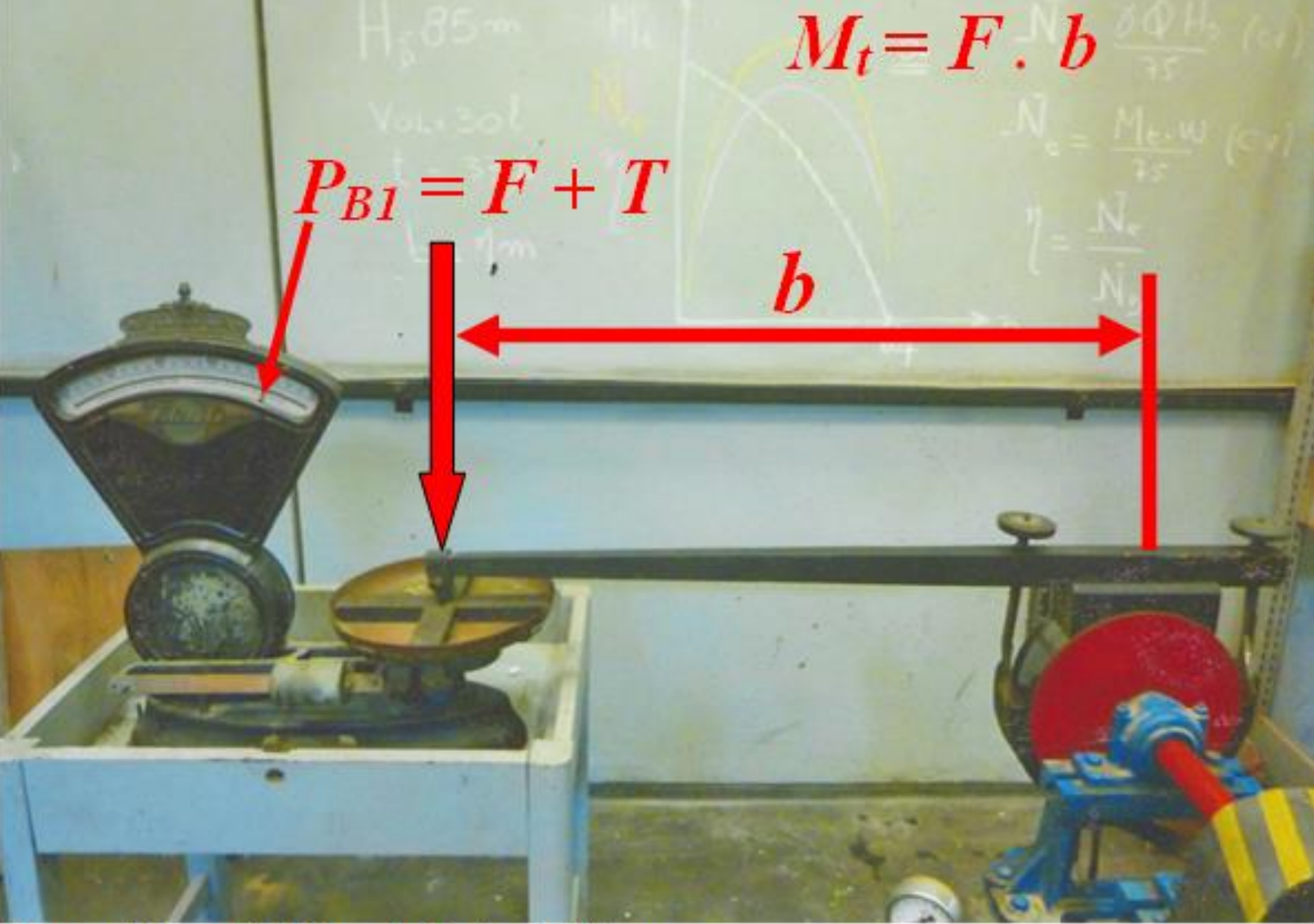


Figura 3.5. Detalhe do Freio de Prony

4 Procedimento experimental

a) O Laboratório dispõe da seguinte instalação:



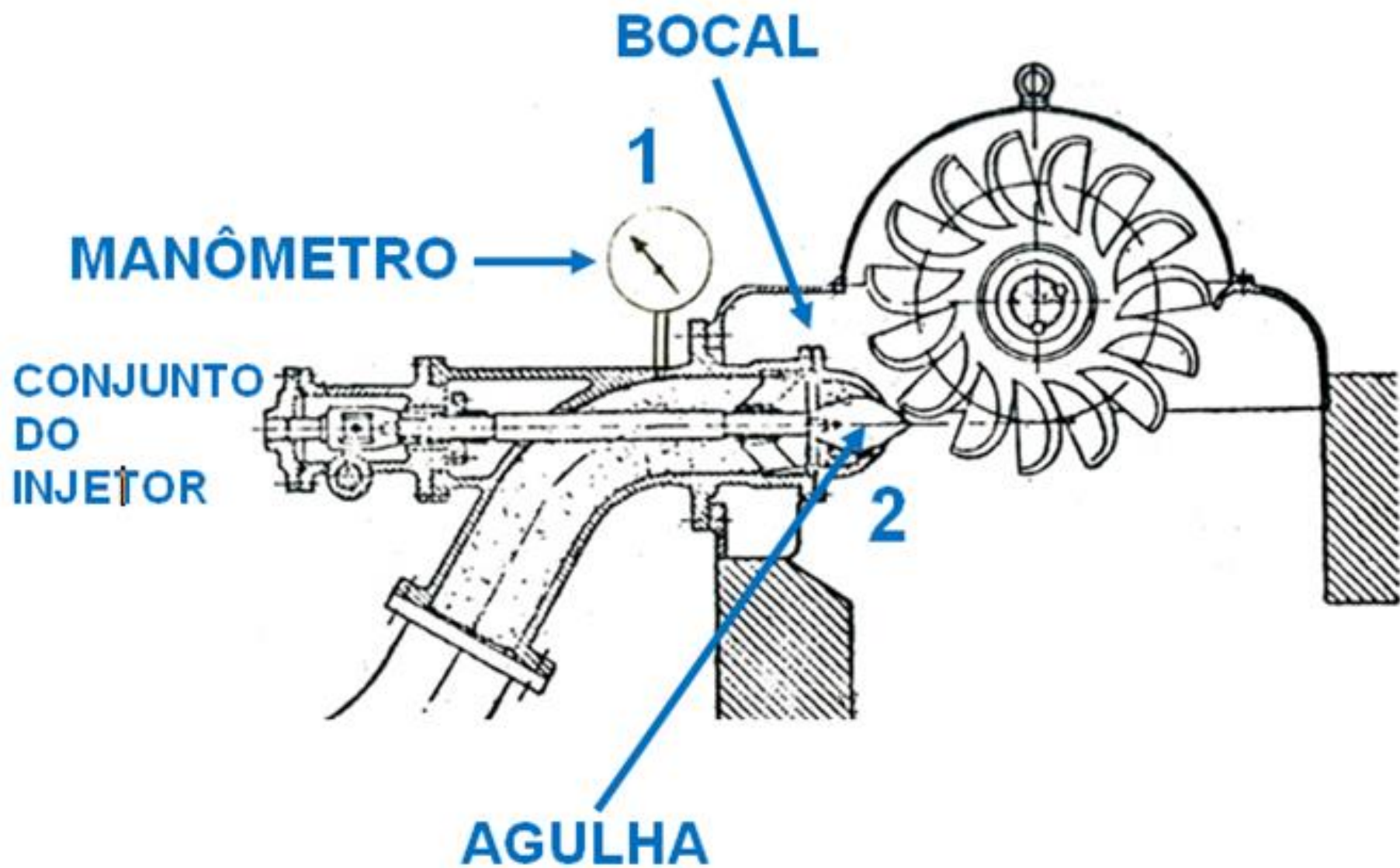
TANQUE DE PRESSÃO COM COLCHÃO DE AR REPRESADO PARA SUAVISAR A ALIMENTAÇÃO DO INJETOR DA TURBINA PELTON

CONJUNTO DE DUAS BOMBAS, ASSOCIADAS EM SÉRIE, PARA A ALIMENTAÇÃO DO TANQUE.

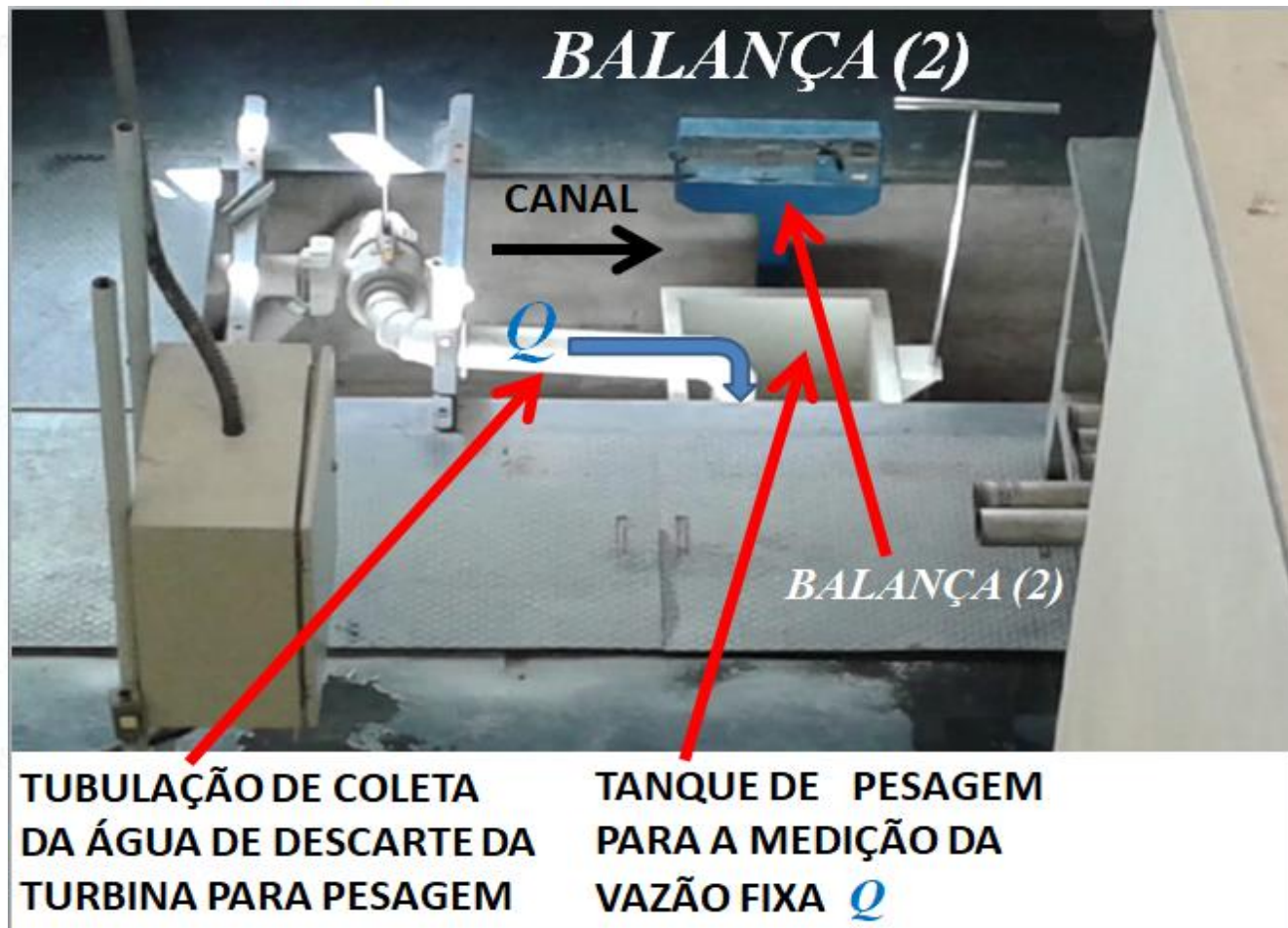
AS BOMBAS IRÃO SIMULAR UM DESNÍVEL DE EM TORNO DE 100 m DE CARGA NO INJETOR DA TURBINA

b) Para esta experiência será utilizada a instalação de bombeamento, conforme acima indicada, com duas bombas associadas em série, para que seja gerada uma altura de queda disponível H_d , simulada no injetor da Turbina Pelton. Este valor será monitorado por intermédio de um manômetro M_1 instalado no injetor do jato da Turbina Pelton;

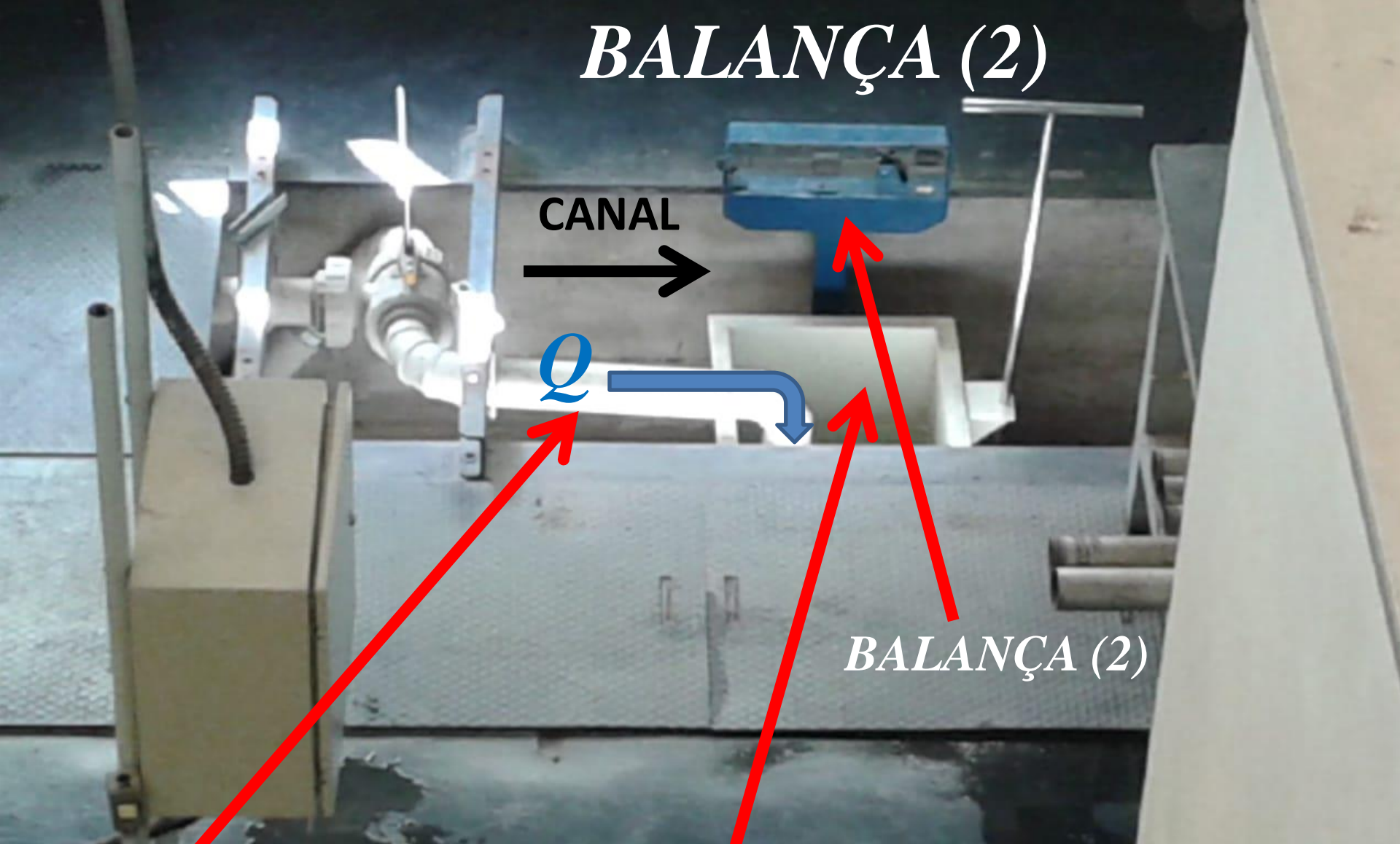




- c) Vamos admitir, nesta experiência, que para a água temos a densidade de 1g/cm^3 . Portanto, será estabelecida uma vazão (Q), constante, e sua medida será por pesagem, em um tanque apoiado em uma **BALANÇA (2)** ambos colocados no canal de saída da Turbina Pelton. Serão feitas cinco medidas de vazão para ser possível estabelecer uma vazão média mais precisa;



BALANÇA (2)



TUBULAÇÃO DE COLETA
DA ÁGUA DE DESCARTE DA
TURBINA PARA PESAGEM

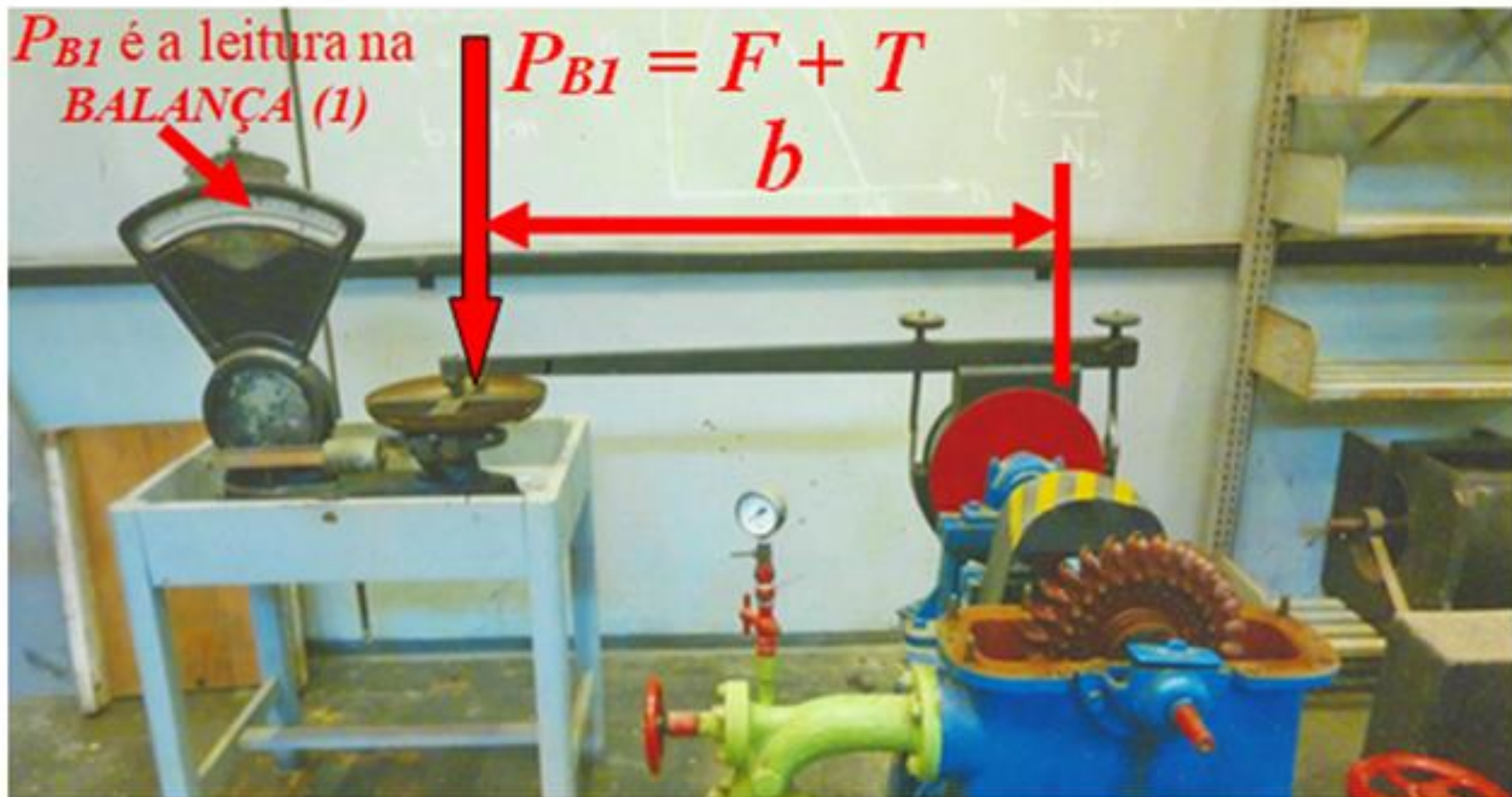
TANQUE DE PESAGEM
PARA A MEDIÇÃO DA
VAZÃO FIXA Q

- d) Com a turbina rodando em sua velocidade de fuga, com o “Freio de Prony” (Figura 2.1) sem atuação, e com a vazão Q constante (medida conforme no item **5.2** a seguir), serão feitas as diversas medidas das cargas P_{BI} originárias da atuação do braço “ b ” no prato da *BALANÇA (1)*. Os valores de P_{BI} serão medidos de maneira progressiva, partindo da velocidade de fuga (Freio de Prony descarregado) e indo até a rotação zero.
- Isto é possível por intermédio da atuação progressiva do “Freio de Prony”, onde as medidas das rotações serão calibradas em ordem decrescente de rotação, ou seja, de *100 em 100 rpm*, até a rotação zero (Momento M_t máximo);

P_{B1} é a leitura na
BALANÇA (1)

$$P_{B1} = F + T$$

b



e) Medir o braço " b " do Freio de Prony;

f) Medir a tara " T " da *BALANÇA (1)*;

5.1. Planilha dos valores para as rotações decrescentes

	n (rpm)	P_{B1} (kgf)	$F = P_{B1} - T$ (kgf)	$M_t = F \cdot b$ (kgf.m)	ω (rd/s)	W_{ef} (cv)	η (%)
1							
2							
3							
4							
...							
...							

n = rpm Rotação do Rotor da Turbina

P_{B1} = Carga total na **BALANÇA (1)**, inclui F e a tara T (kgf)

$F = P_{B1} - T$ = Força líquida do braço do freio de Prony sobre o prato da **BALANÇA (1)** (kgf)

b = _____ m (braço do Freio de Prony)

T = _____ kgf (Tara da **BALANÇA (1)**)

$M_t = F \cdot b$ = Momento torçor no eixo da Turbina (kgf.m)

W_{ef} = Potência efetiva fornecida pela turbina (*cv*)

$$W_{ef} = M_t \omega \left(\frac{kgf \cdot m}{s} \cdot \frac{1}{75} \right) (cv)$$

ω = Rotação do rotor da Turbina em (rd/s)

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} (rd/s)$$

Como já vimos no item **2.3.**, a Potência disponível (W_d) fornecida pelo fluido para a turbina, é dada por:

$$W_d = \gamma \cdot Q \cdot H_d \left(\frac{kgf}{m^3} \cdot \frac{m^3}{s} \cdot m \cdot \frac{1}{75} \right) (cv)$$

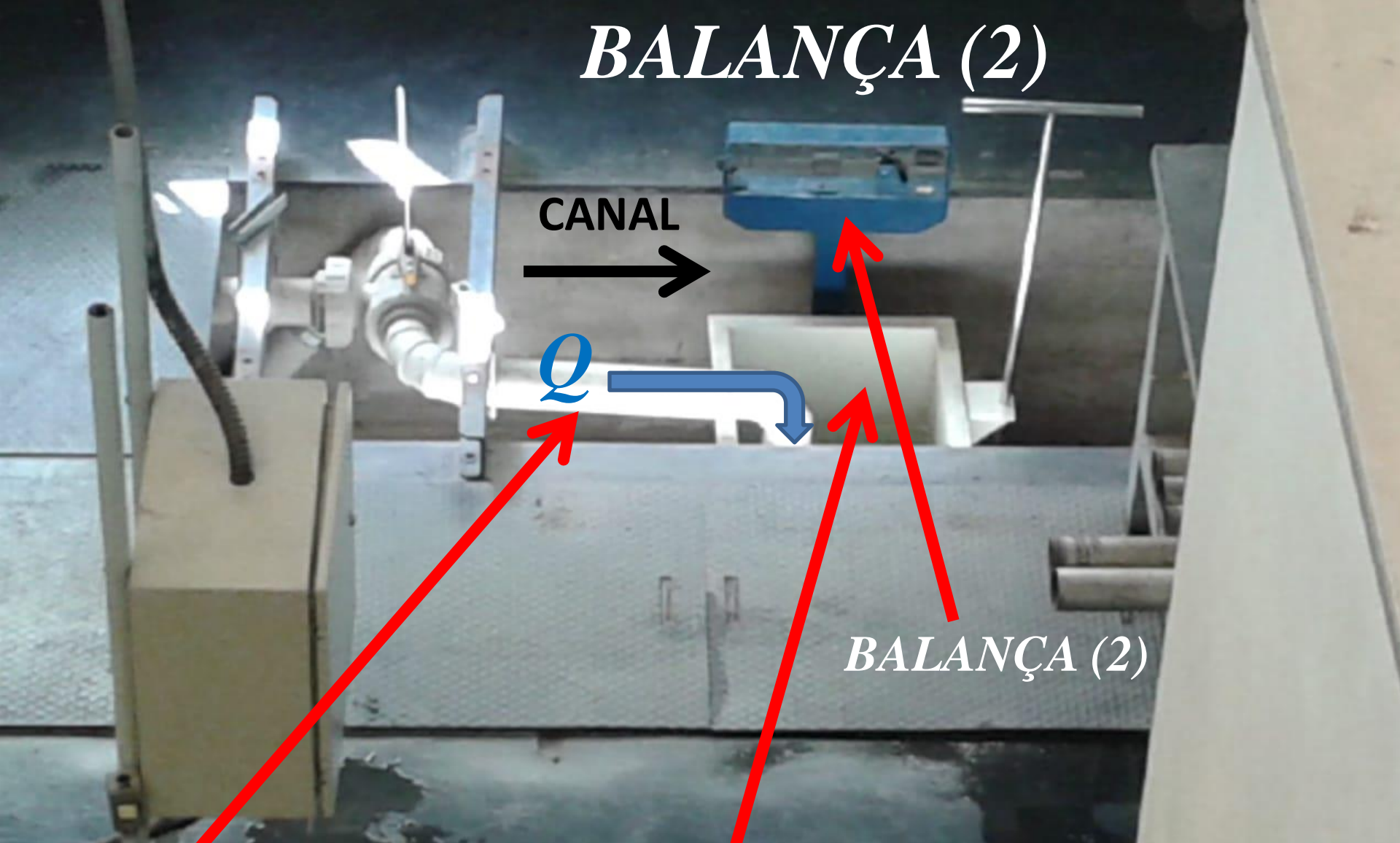
Logo o rendimento η da Turbina Pelton é dado por:

$$\eta = \frac{W_{ef}}{W_d}$$

5.2. Planilha para o cálculo da Vazão Q , a qual aciona a Turbina Pelton

MEDIDAS	$P_{\text{água}}$ (kgf) BALANÇA (2)	V_{volume} (L)	t (s)	Q_{medidas} (Vazões medidas) (L/s)
1				
2				
3				
4				
5				

BALANÇA (2)



TUBULAÇÃO DE COLETA
DA ÁGUA DE DESCARTE DA
TURBINA PARA PESAGEM

TANQUE DE PESAGEM
PARA A MEDIÇÃO DA
VAZÃO FIXA Q

$P_{\text{água}} (kgf) = 50 \text{ kgf}$ de água na **BALANÇA (2)** colocada no canal de saída da água da Turbina.

$V_{\text{volume}} (L) =$ Vamos considerar a densidade da água igual a $1g/cm^3$ logo

$$P_{\text{água}} = V_{\text{volume}}$$

$Q_{\text{medidas}} (L/s) =$ Vazões das medidas em cinco tomadas

$Q (L/s) =$ Vazão média calculada das cinco medidas a qual irá ser utilizada para acionar a Turbina (calcular).

$W_d (cv) =$ Potência disponível (fornecida pelo fluido para a turbina)

$$W_d = \gamma \cdot Q \cdot H_d \left(\frac{kgf}{m^3} \cdot \frac{m^3}{s} \cdot m \cdot \frac{1}{75} \right) (cv)$$

$\gamma =$ Peso específico da água $\left(\frac{kgf}{m^3} \right)$

$Q =$ Vazão do fluido pela turbina $\left(\frac{m^3}{s} \right)$

$H_d =$ Altura de queda, disponível (m)

7 Observações e considerações finais

- Procurar organizar o relatório. Como sugestão dividi-lo em etapas:
 - Introdução ou Objetivo;
 - Resumo Teórico;
 - Descrever sucintamente o ensaio e o seu procedimento experimental apresentando os modelos matemáticos utilizados na experiência;
 - Esquema da Instalação;
 - Desenhos ou Esquemas feitos pelo próprio aluno. Não será aceito cópia de Desenhos ou Esquemas de outros autores;
 - Parâmetros Informados, Coletados e Calculados
 - Em uma Planilha;
 - Gráficos (É a parte mais importante do relatório);
 - Conclusões;
- Procurar redigir o relatório sem muita redundância ou sintético demais;

- Procurar dispor os gráficos ao longo de toda a área de plotagem do sistema cartesiano;
- Caso não haja indicação contrária, plotar os gráficos iniciando as escalas no $(0,0)$ do sistema cartesiano;
- Buscar escalas adequadas nos eixos não usando valores “quebrados”;
- Colocar o título do gráfico;
- Colocar os títulos nos eixos com as respectivas unidades;
- Plotar os pontos com cores diferentes e formatos diferentes entre as grandezas (caso o relatório esteja em preto e branco);

**DADOS
LEVANTADOS
NO
LABORATÓRIO**

Folha de anotações, com os dados coletados no laboratório;

PONTOS	n (rpm)	P (kgf)	$F = P \cdot T$ (kgf)	$M_t = F \cdot b$ (kgf . m)	ω (rd/s)	W_{ef} (cv)	η (%)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							

n = (TABELA ACIMA) Rotação da Turbina (rpm);

P = (TABELA ACIMA) Peso total na balança (kgf);

T = ____ (kgf) Tara da balança;

b = ____ (m) Braço do Freio de Prony;

H_d = (CALCULAR) (m) Altura de queda disponível, simulada pelas bombas do laboratório, associadas em série;

W_d = (CALCULAR) = $\gamma \cdot Q \cdot H_d \left(\frac{kgf}{m^3} \cdot \frac{m^3}{s} \cdot m \cdot \frac{1}{75} \right)$ (cv);

γ = Peso específico da água $\left(\frac{kgf}{m^3} \right)$

Q = Vazão do fluido pela turbina $\left(\frac{m^3}{s} \right)$

Sugestão para uma planilha organizada:

MEDIÇÃO	ROTAÇÃO (rpm)	CARGA NA BALANÇA P (kgf)	TARA NA BALANÇA T (kgf) (CONSTANTE)	CARGA LÍQUIDA F=P-T (kgf)	MOMENTO TORÇOR $M_t = F \cdot b$ (kgf.m)	ROTAÇÃO (rd/s)	POTÊNCIA EFETIVA Wef (cv)	POTÊNCIA DISPONÍVEL Wd (cv) (CONSTANTE)	RENDIMENTO (%) η
1	2600	0,90	0,90						
2	2500	1,07	0,90						
3	2400	1,25	0,90						
4	2300	1,40	0,90						
5	2200	1,58	0,90						
6	2100	1,75	0,90						
7	2000	1,96	0,90						
8	1900	2,07	0,90						
9	1800	2,22	0,90						
10	1700	2,35	0,90						
11	1600	2,50	0,90						
12	1500	2,65	0,90						
13	1400	2,78	0,90						
14	1300	2,90	0,90						
15	1200	3,02	0,90						
16	1100	3,13	0,90						
17	1000	3,23	0,90						
18	900	3,33	0,90						
19	800	3,45	0,90						
20	700	3,58	0,90						
21	600	3,68	0,90						
22	500	3,78	0,90						
23	400	3,95	0,90						
24	300	4,00	0,90						
25	200	4,10	0,90						
26	100	4,20	0,90						
27	0	4,30	0,90						

DADOS SIMULADOS

Folha de anotações dos dados, para o cálculo das cinco Vazões ($Q_{medidas}$).

(*) Considerar a densidade da água igual a 1 g/cm^3

Calcular a vazão média Q a qual aciona a turbina Pelton;.

MEDIDAS	$(*)P_{\text{água}}$ (<i>kgf</i>)	$(*)V_{\text{volume}}$ (<i>L</i>)	t (<i>s</i>)	$Q_{medidas}$ (Vazões medidas) (<i>L/s</i>)
1	50	50		
2	50	50		
3	50	50		
4	50	50		
5	50	50		

$P_{\text{água}}(kgf)$ = Peso de 50 kgf de água na **BALANÇA (2)**, colocada no canal de saída da Turbina. Cronometrar para 5 pesagens (**t**).

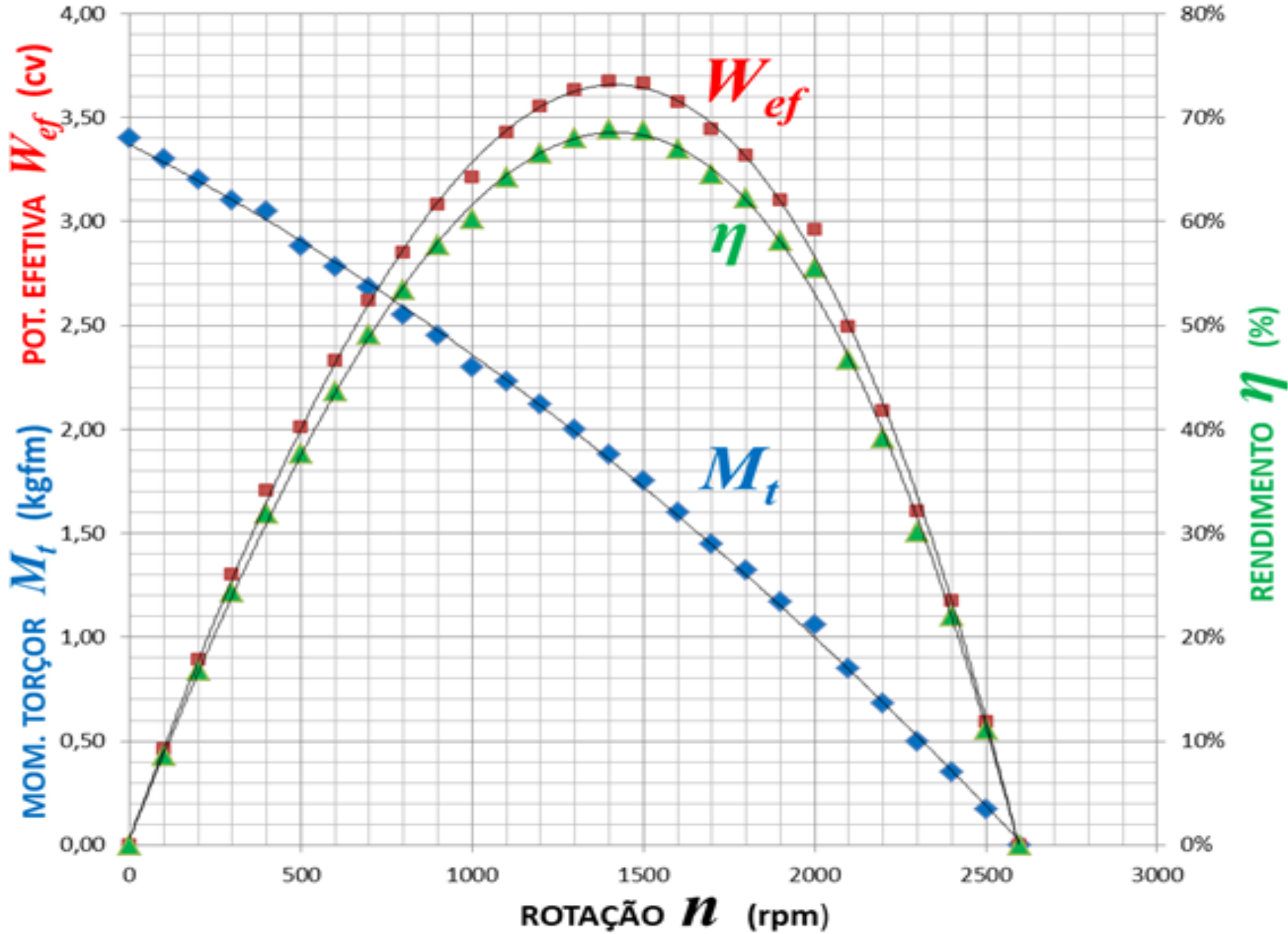
$V_{\text{volume}}(L)$ = Vamos considerar a densidade da água igual a $1g/cm^3$ logo

$$P_{\text{água}} \sim V_{\text{volume}} = \mathbf{50 L}$$

$t(s)$ = Medida do tempo para cada tomada

$Q_{\text{medidas}}(L/s)$ = Vazões medidas em cinco tomadas

$Q(L/s)$ = Vazão a ser considerada, a qual é a média dos cinco valores
(calcular)



◆ MOMENTO TORÇOR M_t ■ POTÊNCIA EFETIVA W_{ef} ▲ RENDIMENTO η (%)

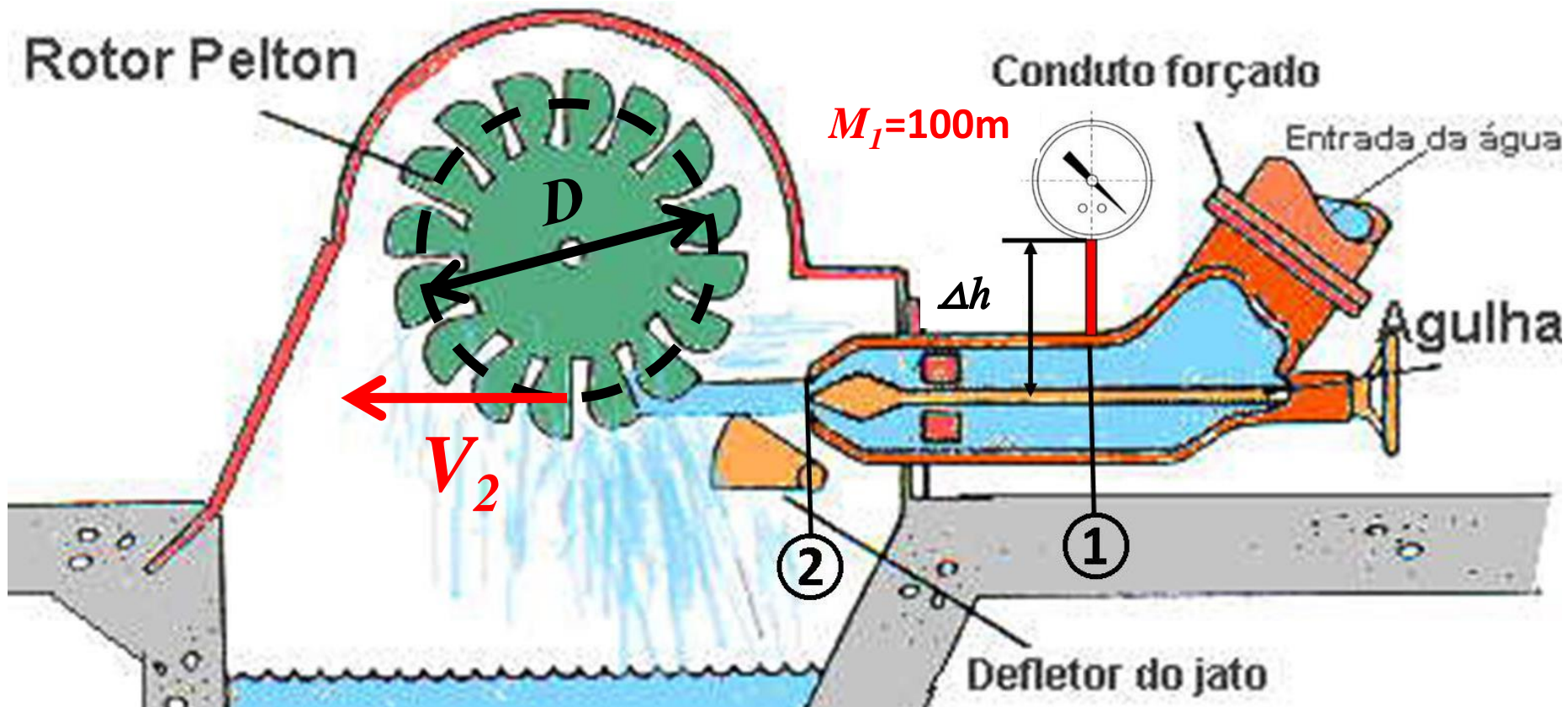
CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UMA TURBINA PELTON

OBSERVAÇÕES

ADICIONAIS

$D =$ Diâmetro Primitivo da ação da linha de centro do jato sobre as pás

$$D = 316 \text{ mm} \quad \therefore R = 158 \text{ mm}$$



$$Q = 4,1 \text{ L/s}$$

$$P_1/\gamma = M_1 + \Delta h$$

$$M_1 = 100\text{m}$$

$$\Delta h = 0,42\text{m}$$

Entrada

A_2
 P_{atm2}
 D_2

Δh

A_1

Z_2

V_2

V_1

D_1

Z_1

$$A_2 = \sim 0,95 \text{ cm}^2$$

$$D_2 = \sim 1,1 \text{ cm}$$

$$V_2 = \sim 43 \text{ m/s}$$

$$Z_1 = Z_2$$

$$A_1 = 14,5 \text{ cm}^2$$

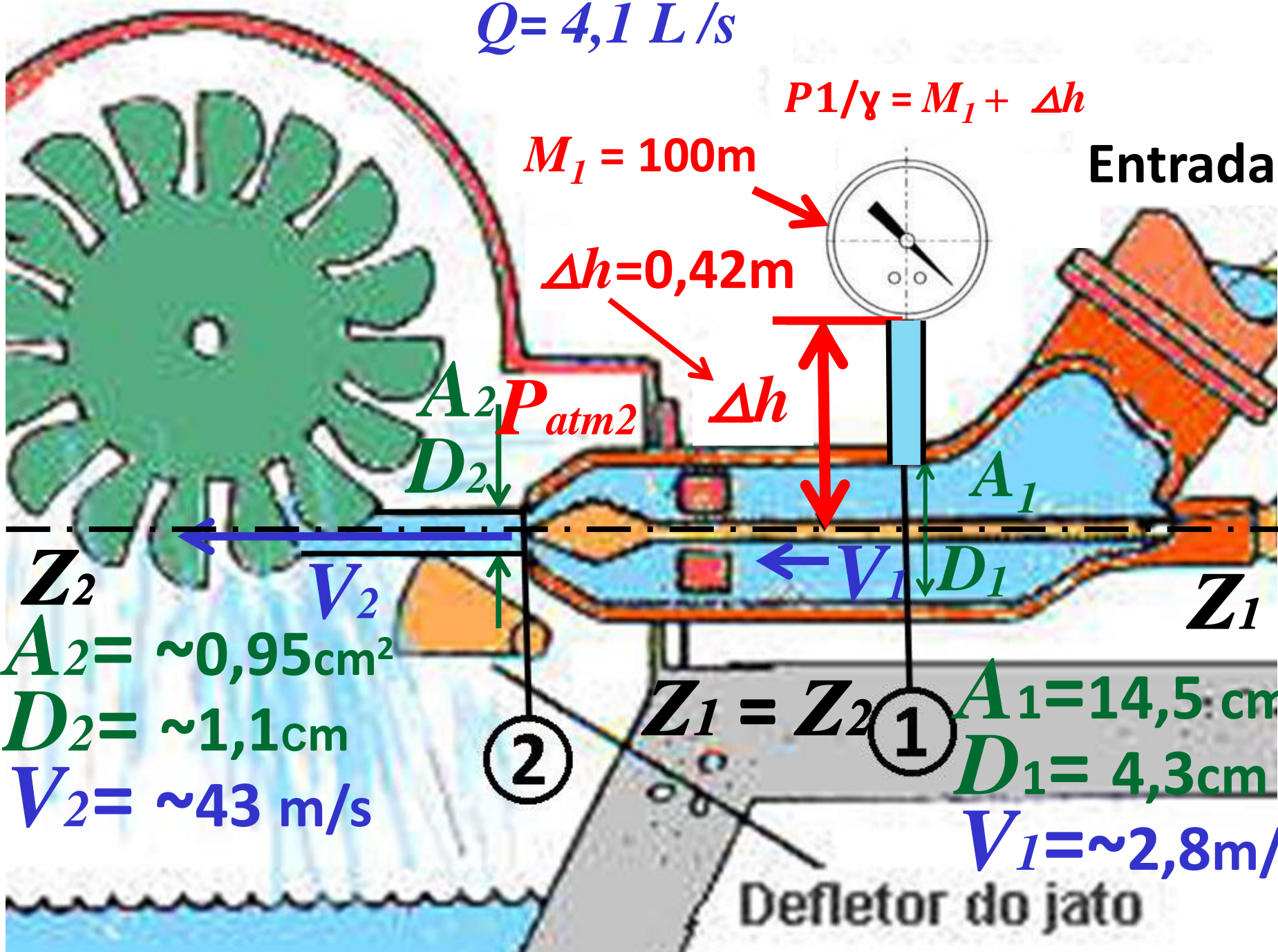
$$D_1 = 4,3 \text{ cm}$$

$$V_1 = \sim 2,8 \text{ m/s}$$

2

1

Defletor do jato



Do balanço de cargas, temos:

$$\begin{aligned} \text{CARGA EM 2} &= \text{CARGA EM 1} - \text{PERDAS}_{1 \Rightarrow 2} \\ \underbrace{H_2}_{P_2/\gamma + V_2^2/2g + Z_2} &= \underbrace{H_1}_{P_1/\gamma + V_1^2/2g + Z_1} - \text{PERDAS}_{1 \Rightarrow 2} \end{aligned}$$

$$Z_2 = Z_1$$

$$P_2/\gamma = 0 \text{ (Pressão atm. Relativa=0)}$$

$$V_2^2/2g = 43^2/2g = 94,3 \text{ m}$$

$$\Delta h = 0,42 \text{ m}$$

$$P_1/\gamma = M_1 + \Delta h = 100 + 0,42 = 100,42 \text{ m}$$

$$V_1^2/2g = 0,4 \text{ m}$$

Substituindo os valores, em:

$$\underbrace{H_2}_{P_2/\gamma + V_2^2/2g + Z_2} = \underbrace{H_1}_{P_1/\gamma + V_1^2/2g + Z_1} - \text{PERDAS}_{1 \Rightarrow 2}$$
$$P_2/\gamma + V_2^2/2g + Z_2 = P_1/\gamma + V_1^2/2g + Z_1 - \text{PERDAS}_{1 \Rightarrow 2}$$

$$\underbrace{H_2}_{0 + 94,3 + 0} = \underbrace{H_1}_{100,42 + 0,4 + 0} - \text{PERDAS}_{1 \Rightarrow 2}$$
$$0 + 94,3 + 0 = 100,42 + 0,4 + 0 - \text{PERDAS}_{1 \Rightarrow 2}$$

$$\text{PERDAS}_{1 \Rightarrow 2} = 100,82 - 93,3$$

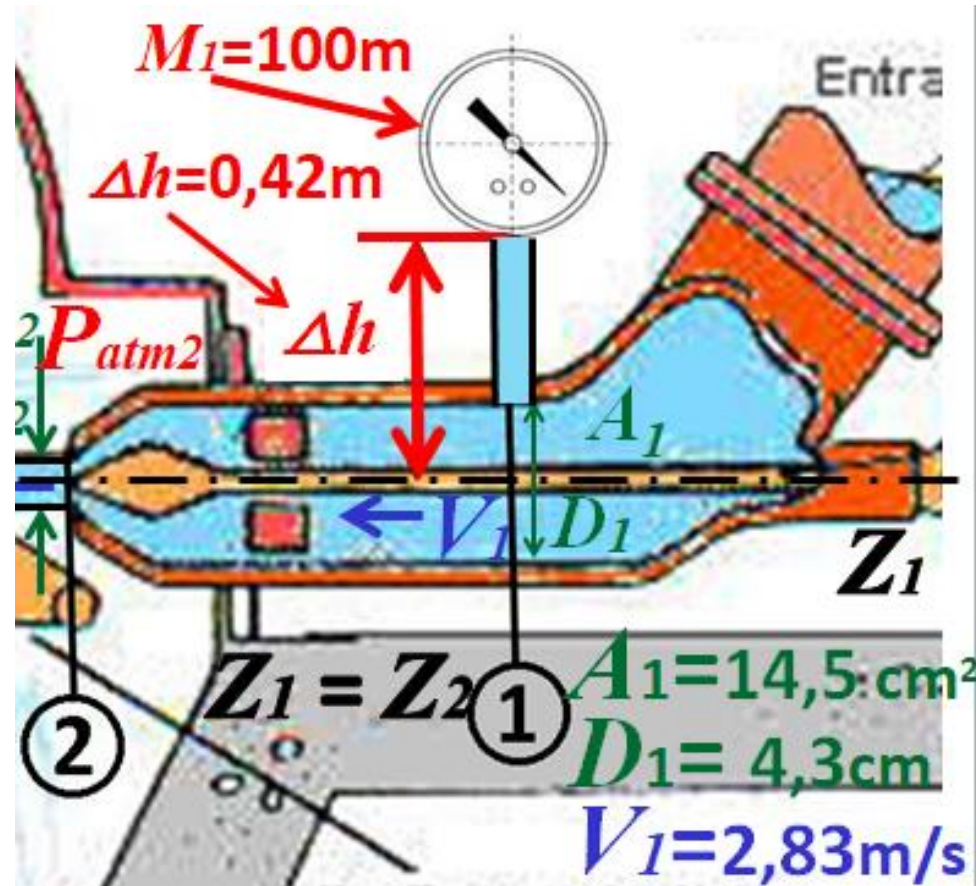
$$\text{PERDAS}_{1 \Rightarrow 2} = \sim 7,5m$$

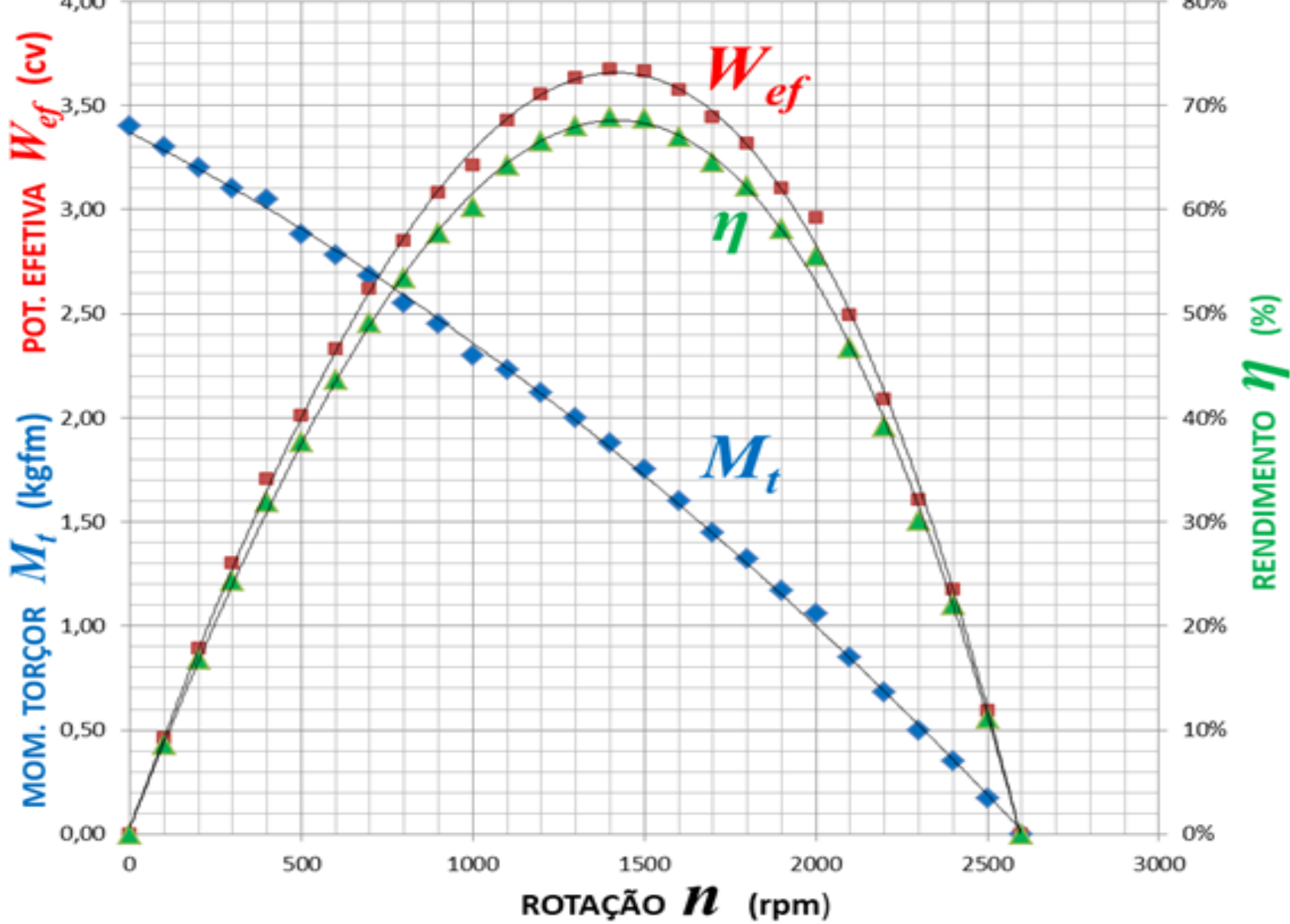
H_d = Altura manométrica, ou de queda, disponível (m)
(ou Carga em ① H_1)

$$H_d = M_1 + \Delta h + V_1^2/2g$$

$$H_d = 100 + 0,42 + 0,4$$

$$H_d = \sim 100,82 \text{ m}$$





◆ MOMENTO TORÇOR M_t ■ POTÊNCIA EFETIVA W_{ef} ▲ RENDIMENTO η (%)

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UMA TURBINA PELTON

Eficiência do Bocal (μ)

$$\text{Sabemos que : } V_2 = \omega_f \cdot R = 272,27 \cdot 0,158$$

Temos:

$$V_2 = 43,0 \text{ m/s}$$

Onde :

ω_f : é a Velocidade de fuga, com a Turbina disparada e sem Carga (no ensaio $\omega_f = 2.600 \text{ rpm} = 272,27 \text{ rd/s}$)

R : é o Raio do Círculo de ação do jato do ejetor sobre as pás

$$D = 316 \text{ mm} \quad \therefore R = 0,158 \text{ m}$$

Por outro lado sabemos que teoricamente a altura ou energia potencial ou carga disponível (H_d) se transforma, no transcurso do injetor da turbina, em energia cinética, ou seja:

$$H_d = \frac{V_{2t}^2}{2g}$$

Logo:

$$V_{2t} = \sqrt{2gH_d}$$

Substituindo, temos:

$$V_{2t} = \sqrt{2gH_d} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 100,82}$$

Logo:

$$V_{2t} = 44,4 \text{ m/s}$$

Define-se a Eficiência do Bocal (μ) como sendo:

$$\mu = \frac{V_2}{V_{2t}} = \frac{43,0}{44,4}$$

Logo:

$$\mu = \sim 0,97$$

μ está geralmente na faixa entre **0,96 a 0,98**

9.14 ALGUMAS INSTALAÇÕES DE TURBINAS PELTON NO BRASIL

1. Cubatão 1 (Henry Borden externa) — São Paulo — 336 MW
 - 3 Charmilles $H = 719,5 \text{ m}$ $N = 61.878 \text{ cv}$ $n = 360$ $Q = 9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 - 3 Voith A.G. $H = 719,5 \text{ m}$ $N = 92.274$ $n = 360$ $Q = 12,0$
 - 3 Allis Chalmers $H = 719,5 \text{ m}$ $N = 92.274$ $n = 360$ $Q = 12,0$
2. Cubatão 2 (Henry Borden subterrânea) — 4 jatos (vertical)
 - 4 Dominion $H = 684$ $N = 89.232$ $n = 450$ $Q = 12,7$
 - 2 Charmilles $H = 684$ $N = 89.232$ $n = 450$ $Q = 12,7$
3. Parigot de Souza (rio Capivari — Cachoeira) — Paraná — 246,9 MW
 - 4 Charmilles $H = 714,3 \text{ m}$ $N = 87.200$ $n = 514$ $Q = 10$
4. Guaricana — Rio Arraial — 38,9 MW
 - 3 Allis Chalmers $H = 313,6 \text{ m}$ $N = 10.500$ $n = 514$
 - 1 Hitachi $H = 313,6 \text{ m}$ $N = 23.600$ $n = 450$

Descida da Tubulação de água da Represa Billings para alimentar a Usina Henry Borden Externa – Cubatão 1



Usina Henry Borden: Cubatão 1 & Cubatão 2



Roda Pelton da Usina Henry Borden, doada pela EMAE ao Museu Catavento - SP

$D \sim 2,8 \text{ m}$



TURBINA PELTON

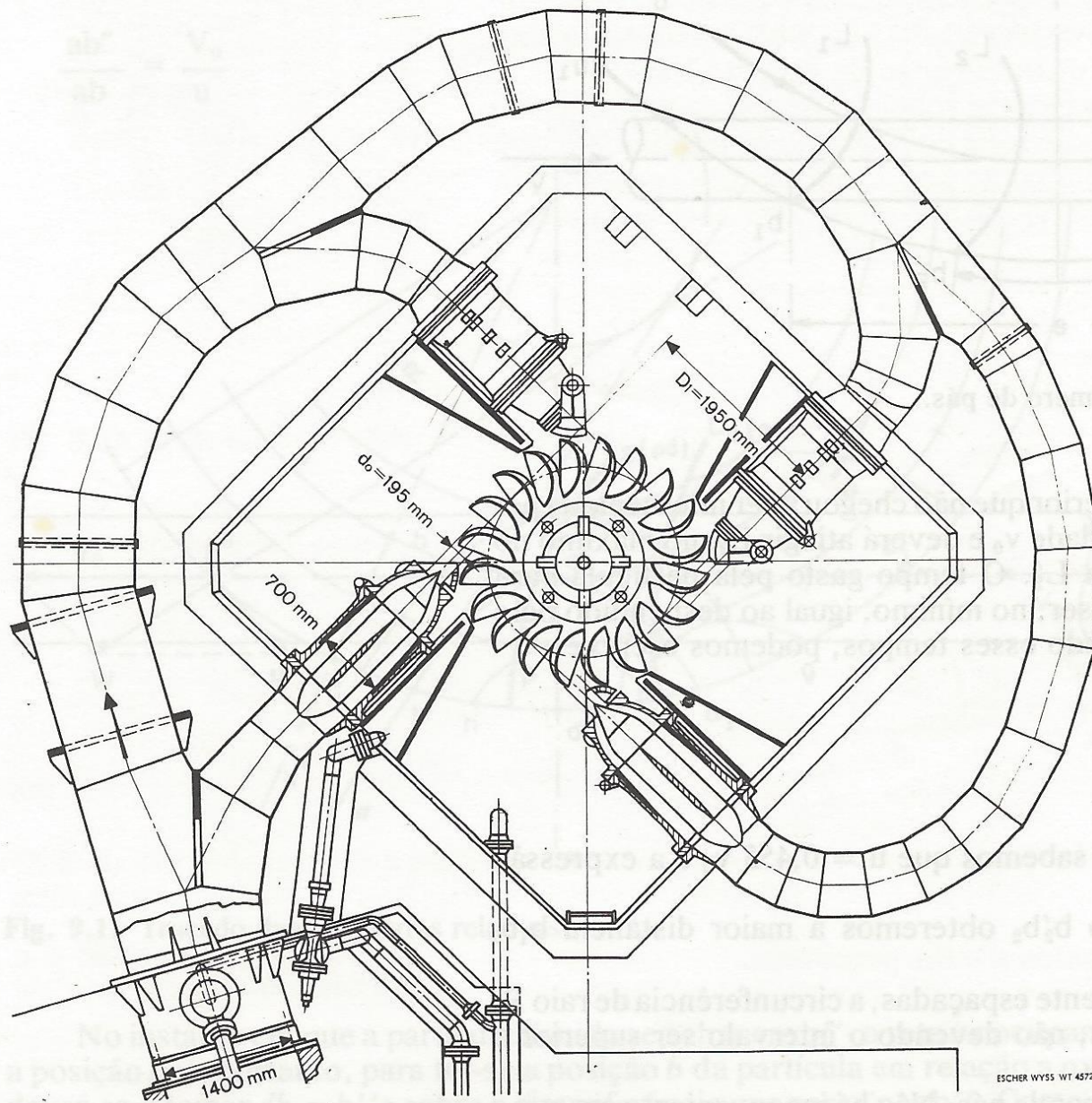
Turbina hidráulica usada em usina elétrica com pouco volume de água e grande altura.

A água move a turbina, que move o gerador elétrico.

Essa turbina funcionou entre 1926 e 1975 na usina Henry Borden de Cubatão, SP.

Este equipamento foi importante para transformar São Paulo no coração industrial do Brasil.

11:36 1/NOV/2015



ESCHER WYSS WT 4572

Fig. 9.9 Turbina Pelton de quatro jatos da Escher Wyss.

