

G.T.D. 1

Prof. MSc Jeferson José Gomes

GTD 1

GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

ESQUEMAS, PRINCIPAIS TIPOS E CONFIGURAÇÕES

POTÊNCIA GERADA E ENERGIA PRODUZIDA

As principais variáveis de uma central hidrelétrica que atuam diretamente na potência elétrica possível de ser gerada são a altura de queda d'água e a vazão da água passando pelas turbinas. A análise energética de um aproveitamento hidrelétrico permite verificar que a energia útil será relacionada praticamente apenas com a energia potencial disponível e que a potência elétrica possível de ser obtida é dada por:

$$P = \eta_{TOT} \cdot g \cdot Q \cdot H$$

onde:

η_{TOT} – rendimento total do conjunto

g – aceleração da gravidade (m/s^2)

Q – vazão (m^3/s)

H – queda bruta (m)

P – potência elétrica (kW)

ESQUEMAS, PRINCIPAIS TIPOS E CONFIGURAÇÕES

POTÊNCIA GERADA E ENERGIA PRODUZIDA

O rendimento total η_{TOT} pode ser dado por $\eta_{TOT} = \eta_H \cdot \eta_T \cdot \eta_g$ sendo η_H rendimento do sistema hidráulico, η_T rendimento da turbina e η_g rendimento do gerador.

A energia produzida por essa central, durante um ano, é dada por:

$E = P \cdot FCU \cdot 8.760 \text{ horas}$ em que:

P é a potência máxima fornecida durante o ano (que pode confundir-se com a potência instalada),

FCU é o Fator de Capacidade da Usina, ou seja, a relação entre a potência média no ano e a potência máxima (de pico).

8.760 é o número de horas no ano

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:

$$P_{mec} = 9,8 \cdot \eta_T \cdot \eta_H \cdot Q \cdot H_{Top} \text{ [kW]} \quad n = \frac{60f}{p}$$

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

$$1CV = 736Watts$$

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

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

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)

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

$$n_s = 10^3 \cdot N \cdot \frac{Q^{1/2}}{Y^{3/4}}$$

N – rotação da turbina rps

Q – vazão

Y - trabalho específico

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)

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

ESQUEMAS, PRINCIPAIS TIPOS E CONFIGURAÇÕES

Potência Gerada e Energia Produzida

As **perdas de carga** em tubos e acessórios podem ser calculadas com alguns métodos:

Hazen-Williams¹: é um método empírico muito utilizado, que apresenta resultados razoáveis para tubos com diâmetros de 50 mm a 3000 mm, velocidades inferiores a 3,0 m/s e escoamento com água. O sucesso de sua utilização depende, dentre outros fatores, da correta avaliação do coeficiente “C”.

¹ Relação empírica desenvolvida no início do século XX e ainda bastante utilizada. Atualmente, com as facilidades de uso de planilhas computacionais, calculadoras científicas, e outros, a formulação dada por Darcy-Weisbach para cálculo de perda de carga é uma opção mais apropriada.

ESQUEMAS, PRINCIPAIS TIPOS E CONFIGURAÇÕES

Potência Gerada e Energia Produzida **Perdas - Método de Hazen-Willians**

$$H_{pc} = 10,643.Q^{1,85}.C^{-1,85}.D^{-4,87}.L$$

Onde:

- Q – vazão [m³/s]
- H_{pc} – perda de carga na tubulação forçada [m]
- C – coeficiente de Hazen-Willians
- D – diâmetro interno da tubulação [m]
- L – comprimento da tubulação reta [m]

O coeficiente de Hazen-Willians também pode ser representado por λ

ESQUEMAS, PRINCIPAIS TIPOS E CONFIGURAÇÕES

Potência Gerada e Energia Produzida

Perdas de carga – método Hazen-Willian

Coeficientes de Hazen-Williams

Tipo de Material das Tubulações.	C
Túneis em rocha sem revestimento	44
Aço corrugado	60
Ferro fundido com 30 a 40 anos de uso	80
Ferro fundido com 20 a 30 anos de uso. Aço soldado sem uso. Aço com juntas em uso.	90
Aço rebitado com 15 a 20 anos de uso	95
Ferro fundido com 15 a 20 anos de uso. Alvenaria de tijolos bem executada.	100
Aço soldado novo. Ferro fundido com 10 anos	110
Aço soldado. Ferro fundido com 10 anos de uso.	115
Concreto com acabamento comum. Ferro fundido com 5 anos de uso.	120
Aço galvanizado.	125
Ferro fundido novo. Concreto com argamassa. Aço com juntas novo. Aço soldado revestido.	130
Vidro. Plástico. Cimento. Cobre, latão, bronze.	142

Fonte: Souza Fuchs e Santos Centrais Hidro e Termelétricas - 1983

ESQUEMAS, PRINCIPAIS TIPOS E CONFIGURAÇÕES

Potência Gerada e Energia Produzida

Perdas de carga
método
Hazen-Willian

Coeficientes de Hazen-Williams [Fonte: KSB, 2001]

TIPO DE TUBO	IDADE/ANOS	DIÂMETRO (mm)	C	MATERIAL	C
FERRO FUNDIDO PICHADO	NOVO	Até - 100	118	Aço corrugado (chapa ondulada)	060
		100 - 200	120	Aço com juntas "Look-Bar" novas	130
		200 - 400	125	Aço galvanizado novo e em uso	125
		400 - 600	130	Aço rebitado novo	110
	10 ANOS	Até - 100	107	Aço rebitado em uso	085
		100 - 200	110	Aço soldado novo	120
		200 - 400	113	Aço soldado em uso	090
		400 - 600	115	Aço soldado com revestimento esp. novo e em uso	130
	20 ANOS	Até - 100	89	Chumbo	130
		100 - 200	93	Cimento amianto	140
		200 - 400	95	Cobre	130
		400 - 600	100	Concreto bem acabado	130
	30 ANOS	Até - 100	65	Concreto acabamento comum	120
		100 - 200	75	Ferro fundido novo	130
		200 - 400	80	Ferro fundido em uso	090
		400 - 600	85	Ferro fundido revestido de cimento	130
FERRO FUNDIDO CIMENTO AMIANTO	NOVO OU USADO	Até - 100	120	Grés cerâmico vidrado (Manilha)	110
		100 - 200	130	Latão	130
		200 - 400	135	Madeira em aduelas	120
		400 - 600	140	Tijolos condutos bem executados	100
AÇO REVESTIDO INTERNAMENTE	NOVO OU USADO	500 - 1000	135	Vidro	140
		> 1000	140	Plástico	140
PVC	NOVO OU USADO	Até 50	125		
		50 - 100	135		
		100 - 300	140		
TUBO DE CONCRETO ARM. PROTENDIDO CENTRIFUG.	NOVO OU USADO	Até 600	= fe. f. cime.		
		> 600	= aço revest.		
AÇO S/ REVESTIMENTO SOLDADO	NOVO	= Ferro fundido novo pichado			
	USADO	Ferro fundido usado pichado			
AÇO S/ REVESTIMENTO REBITADO	NOVO	= Ferro fundido com 10 anos			
	USADO	no mín. = Ferro f. com 20 anos			

ESQUEMAS, PRINCIPAIS TIPOS E CONFIGURAÇÕES

Potência Gerada e Energia Produzida

Perdas – Método Darcy-Weisbach:

Válida para fluidos incompressíveis. Tem a seguinte forma para cálculos de perdas em trechos retos de tubos.

$$H_{pc} = f \cdot \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Onde:

- f – coeficiente de atrito, que vem do diagrama de Moody-Rouse
- H_{pc} – perda de carga na tubulação [m]
- D – diâmetro interno da tubulação [m]
- L – comprimento da tubulação [m]
- V – velocidade média [m/s]

ESQUEMAS, PRINCIPAIS TIPOS E CONFIGURAÇÕES

Potência Gerada e Energia Produzida

P.de carga – método do comprimento equivalente

Tem como objetivo relacionar perdas de carga localizadas a perdas de tubo reto. Espera-se definir, por exemplo, que comprimento de tubo reto teria a mesma perda de carga que uma válvula (ou outro acessório) de mesmo diâmetro. A este comprimento chama-se “comprimento equivalente” ($L_{\text{equivalente}}$). Ex: um registro de gaveta aberto de 1” tem perda de carga equivalente a 0,2 m de tubo reto de 1” (ver tabela).

ESQUEMAS, PRINCIPAIS TIPOS E CONFIGURAÇÕES

P.de carga – método do comprimento equivalente

Comprimentos equivalentes [Fonte: KSB, 2001]

Comprimentos equivalentes a perdas localizadas. (Expressos em metros de canalização retilínea)*

DIÂMETRO D		COTOVELO 90° RAIO LONGO	COTOVELO 90° RAIO MÉDIO	COTOVELO 90° RAIO CURTO	COTOVELO 45°	CURVA 90° R/D - 1 1/2	CURVA 90° R/D - 1	CURVA 45°	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÊ PASSAGEM DIRETA	TÊ SAÍDA DE LADO	TÊ SAÍDA BILATERAL	VÁLVULA DE PÊ E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO PESADO
mm	pol.																			
13	½	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	¾	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1 ¼	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1 ½	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2 ½	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,3	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

* Os valores indicados para registros de globo, aplicam-se também às torneiras, válvulas para chuveiros e válvulas de descarga.

ESQUEMAS, PRINCIPAIS TIPOS E CONFIGURAÇÕES

Potência Gerada e Energia Produzida

P.de carga – método do comprimento equivalente

Isto assume que uma tubulação que possui ao longo de sua extensão uma série de singularidades (perdas localizadas) é equivalente a uma tubulação reta de comprimento maior (sem singularidades).

Com base neste conceito o que se faz é adicionar ao comprimento de tubo reto “reto” (L_{reto}) da tubulação os comprimentos equivalentes ($L_{\text{equivalente}}$) dos acessórios. Nas fórmulas de Hazen-Williams e de Darcy Weisbach o termo “L” corresponde a tubo reto, então o que se faz neste caso é considerar: $L = L_{\text{reto}} + L_{\text{equivalente}}$

Fórmulas

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

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

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

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

$$P_b = \rho \cdot Q \cdot Y \quad \text{Potência Bruta [W]} \quad \rho = \text{densidade da água} = 1000 [\text{kg} / \text{m}^3]$$

$$P_d = \rho \cdot Q \cdot Y_d \quad \text{Potência Disponível [W]} \quad P_d = 9,81 \cdot Q \cdot H_d [\text{kW}]$$

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

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

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

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

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

Exemplo

Em um aproveitamento hidrelétrico, o nível de montante encontra-se na cota de 890 m e o de jusante na de 750 m. Sabendo-se que a vazão é de $60 \text{ m}^3/\text{s}$, o comprimento equivalente do encanamento de adução de 4,5 m de diâmetro é de 1.000 m; o rendimento total da turbina, 0,92; e do alternador, 0,94, determine:

- a) a queda e os trabalhos específicos bruto e disponível;
- b) as potências bruta e disponível, no eixo e elétrica;
- c) os rendimentos do sistema de admissão e total do aproveitamento.

Assumir adução com encanamento de aço soldado, com $\lambda = 115$.

Resolução

Dados montante 890 m e jusante na de 750 m. $\lambda = 115$.

$Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$, $D = 4,5 \text{ m}$, $L = 1.000 \text{ m}$; $\eta_T = 0,92$; $\eta_g = 0,94$

a queda e os trabalhos específicos bruto e disponível

A queda bruta $H = 890 - 750 = 140 \text{ m}$

Trabalho específico

Bruto: $Y = g \times H = 9,81 \times 140 = 1.373,4 \text{ J/ kg}$

Disponível: $Y_d = g \times H_d =$

$$H_p = 10,643 \times \left(\frac{Q}{\lambda} \right)^{1,85} \times D^{-4,87} \times L =$$

$$= 10,643 \times \left(\frac{60}{115} \right)^{1,85} \times 4,5^{-4,87} \times 1000 = 2,1$$

Disponível: $Y_d = g \times H_d = g \times (140 - 2,1) = 1.352,8 \text{ J/kg}$

resolução

as potências bruta e disponível, no eixo e elétrica

Potência Bruta:

$$P_b = \rho QY = \frac{1.000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times 60 \text{ m}^3/\text{s} \times 1.373,4 \text{ J/kg} = 82.404 \text{ kW}$$

$$\text{Potência disponível: } P_d = \rho QY_d = 81.168 \text{ kW}$$

$$\text{Potência no eixo: } P_{\text{eixo}} = P_{\text{disponível}} \times \eta_{\text{Turb}} = P_{\text{disp}} \times 0,92 = 74.675 \text{ kW}$$

$$\text{Potência elétrica: } P_{\text{el}} = P_{\text{eixo}} \times \eta_{\text{geração}} = P_{\text{eixo}} \times 0,94 = 70.195 \text{ kW}$$

os rendimentos

$$\text{Do sistema de admissão: } \eta_{\text{admissão}} = 137,9 / 140 = 0,985$$

Do sistema total:

$$\eta_{\text{total}} = 0,985 \times 0,92 \times 0,94 = \frac{\text{Pot. elétrica}}{\text{Pot. bruta}} = \frac{70.195}{82.404} = 0,852$$

Exercícios

1. As turbinas da hidrelétrica de São Simão, no Rio Paranaíba, possuem as seguintes características:
 - Queda nominal : 72 m (Queda Disponível)
 - Vazão nominal : $420 \text{ m}^3/\text{s}$
 - Potência nominal = 370 491 cv
 - Pares de pólos : 38
- 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 item a). Assuma a aceleração da gravidade de $9,81 \text{ m/s}^2$.

2. 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

3. 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 $\Delta H_{TA} = 0$