

INSTITUTOS SUPERIORES DE ENSINO DO CENSA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS APLICADAS À ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DIMENSIONAMENTO DO ROTOR DE UMA TURBINA KAPLAN PARA
APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO DE BAIXA QUEDA EM UMA USINA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA

Por

Keterin de Sousa e Sousa

Campos dos Goytacazes – RJ

Julho/2019

INSTITUTOS SUPERIORES DE ENSINO DO CENSA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS APLICADAS À ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DIMENSIONAMENTO DO ROTOR DE UMA TURBINA KAPLAN PARA
APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO DE BAIXA QUEDA EM UMA USINA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA

Por

Keterin de Sousa e Sousa

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado em cumprimento às exigências
para a obtenção do grau no Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica nos
Institutos Superiores de Ensino do CENSA.

Orientador: Laryce Souza da Silva, MSc.

Campos dos Goytacazes – RJ

Julho/2019

Sousa, Keterin de Sousa e

Dimensionamento de uma Turbina Kaplan para Aproveitamento Hidrelétrico de Baixa Queda em uma Usina de Geração de Energia Elétrica / Keterin de Sousa e Sousa - Campos dos Goytacazes (RJ), 2019.

f.: il.

Orientador: MSc. Laryce Souza da Silva
Graduação em (Engenharia de Mecânica) - Institutos Superiores de Ensino do CENSA, 2018.

1. Mecânica dos Fluidos. 2. Turbina Kaplan.
3. Geração de Energia Elétrica. I.Título.

CDD

DIMENSIONAMENTO DO ROTOR DE UMA TURBINA KAPLAN PARA
APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO DE BAIXA QUEDA EM UMA USINA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA

Por

Keterin de Sousa e Sousa

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado em cumprimento às exigências
para a obtenção do grau no Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica os
Institutos Superiores de Ensino do CENSA.

Aprovado em ___ de _____ de _____

BANCA EXAMINADORA

Laryce Souza da Silva, Mestre – ISECENSA (orientadora)

Cláudia Márcia Ribeiro Machado Albernaz, Mestre – ISECENSA

Rafael Delorence Lugon, Mestre – UENF

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus, Àquele que é responsável por cada passo que dou; aos meus pais, José Carlos e Marina, por terem proporcionado meus estudos e me apoiado até aqui, e a minha orientadora Laryce por todo auxílio na elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me ajudado em tudo até aqui.

Aos meus pais: José Carlos e Marina, e ao meu irmão Hudson, por estarem caminhando sempre ao meu lado.

Ao ISECENSA e todos os professores que fizeram parte dessa jornada, em especial à orientadora Laryce Souza, que apesar de não sido minha professora, me recebeu de braços abertos e com toda sua disponibilidade e paciência esteve comigo na construção deste trabalho.

E a todos os meus amigos que estiveram ao meu lado me apoiando, me incentivando, entendendo minha ausência e torcendo por mim.

Muito obrigada!

EPÍGRAFE

“Foi Ela (Maria Auxiliadora) quem
tudo fez!”

Dom Bosco

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
CHG	-	Centrais Geradoras Hidroelétricas
EOL	-	Centrais Geradoras Eólioelétricas
IEPHA	-	Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico
PCH	-	Pequenas Centrais Hidrelétricas
UFV	-	Usinas Fovoltaicas
UHE	-	Usinas Hidrelétricas
UTE	-	Usinas Termelétricas
UTN	-	Usinas Termonucleares

LISTA DE SÍMBOLOS

CV	-	Cavalo Vapor
H	-	Altura
h	-	Hora
Kw	-	Quilowatt
m	-	Metro
m ³	-	Metro Cúbico
Mw	-	Megawatt
N	-	Potência
n	-	Rotação da Turbina
Nqa	-	Rotação Específica Efetiva
Q	-	Vazão
r	-	Raio
rpm	-	Rotação por Minuto
r ω	-	Velocidade Tangencial
s	-	Segundo
V_j	-	Velocidade do Jato
ω	-	Saída de Potência do Eixo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Usina de Marmelos Zero, inserida na margem do Rio Paraibuna.....	16
Figura 2: As redes elétricas.....	18
Figura 3: Apresentação de uma usina hidrelétrica.....	19
Figura 4: Proporcionalidades na geração da matriz elétrica brasileira.....	20
Figura 5: Turbina a reação tipo Francis - Desenho Esquemático.....	23
Figura 6: Arranjo básico de uma unidade geradora Francis.....	26
Figura 7: Injetor e válvula agulha de uma turbina Pelton.....	27
Figura 8: Diagrama representativo de uma turbina do tipo Pelton.....	28
Figura 9: Campo de aplicação de turbinas hidráulicas.....	29
Figura 10: Arranjo básico de uma unidade geradora Kaplan.....	30
Figura 11: Comparação de desempenho das Turbinas Kaplan, Francis e Hélice.....	32
Figura 12: Aplicabilidade dos tipos de turbinas de acordo com a queda e a rotação específica.....	34
Figura 13: Curvas para determinação do coeficiente C_a em função do ângulo α para um dado perfil.....	39
Figura 14: Turbina Kaplan.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estatística de potência instalada no Brasil até 1910.	16
Tabela 2: Classificação quanto à trajetória da água no rotor.	24
Tabela 3: Classificação quanto à forma de transformação de energia.....	24
Tabela 4: Instalações com turbinas Kaplan no Brasil.	31

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Rotação Específica	33
Equação 2: Diâmetro Externo do Rotor.....	343
Equação 3: Diâmetro Interno do Rotor.....	34
Equação 4: Seção livre de Passagem da Água pela Turbina	35
Equação 5: Velocidade Média de Saída	35
Equação 6: Passo entre as Pás	356
Equação 7: Comprimento das Pás.....	37
Equação 8: Fator de Relação entre o comprimento das pás e a rotação.....	37
Equação 9: Velocidade Periférica Média.....	37
Equação 10: Rendimento	37
Equação 11: Velocidade Periférica Absoluta.....	37
Equação 12: Ângulo de Incidência.....	37
Equação 13: Velocidade Relativa.....	38
Equação 14: Coeficiente de Sustentação de Grade.....	38
Equação 15: Componente Periférica da Velocidade Relativa	38
Equação 16: Componente Periférica da Velocidade Absoluta	38
Equação 17: Coeficiente de Sustentação Isolado.....	38
Equação 18: Ângulo de Perfil.....	38

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE EQUAÇÕES	xi
CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
1. INTRODUÇÃO	15
2. USINAS HIDRELÉTRICAS	17
2.1 Tipos de Usinas Hidrelétricas.....	21
3. TURBINAS HIDRÁULICAS	22
3.1 Principais Tipos de Turbinas Hidráulicas.....	22
3.1.1 Turbina Francis	25
3.1.2 Turbina Pelton	26
3.1.3 Turbina Hélice e Kaplan	29
4. SELEÇÃO DE UMA TURBINA.....	33
4.1 Rotação Específica	33
4.2 Verificação da Seleção da Turbina.....	33
5. DIMENSIONAMENTO DO ROTOR DE UMA TURBINA KAPLAN.....	34
5.1 Diâmetros do Rotor	34
5.2 Seção livre de Passagem da Água pela Turbina.....	35
5.3 Velocidade Média de Saída.....	35
5.4 Dimensionamento das Pás.....	35
5.5 Velocidade Periférica Média.....	37
5.6 Rendimento	37
5.7 Velocidade Periférica Absoluta.....	37

5.8 Ângulo de Incidência	37
5.9 Velocidade Relativa.....	38
5.10 Coeficiente de Sustentação.....	38
5.11 Ângulo de Perfil	38
CAPÍTULO II: ARTIGO CIENTÍFICO	40
1.1 Objetivo Geral	42
1.1.1 Objetivos Específicos	42
1.2 Justificativa e Relevância	43
2. METODOLOGIA.....	43
2.3.1 Diâmetros do Rotor	45
2.3.2. Seção Livre de Passagem da água pela turbina	45
2.3.3. Velocidade média de saída	45
2.3.4. Dimensionamento das Pás.....	46
2.3.5. Velocidade Periférica Média.....	47
2.3.6. Rendimento.....	47
2.3.7. Velocidade Periférica Absoluta.....	47
2.3.8. Ângulo de Incidência.....	47
2.3.9. Velocidade Relativa.....	47
2.3.10. Coeficiente de Sustentação.....	48
2.3.11. Ângulo de Perfil	48
3. RESULTADOS	49
3.1. Rotação Específica	49
3.3.1. Diâmetros do Rotor	49
3.3.2. Seção Livre de Passagem da Água pela Turbina	50
3.3.3. Velocidade Média de Saída.....	50
3.3.4. Dimensionamento das Pás.....	50
3.3.5. Velocidade Periférica Média.....	50
3.3.6. Rendimento Hidráulico	51

3.3.7. Velocidade Periférica Absoluta.....	51
3.3.8. Ângulo de Incidência	51
3.3.9. Velocidade Relativa.....	51
3.3.10. Coeficiente de Sustentação.....	51
3.3.11. Ângulo de Perfil	52
5. CONCLUSÃO.....	52
6. REFERÊNCIAS.....	53

CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. INTRODUÇÃO

A eletricidade teve sua produção inicial no Brasil nos últimos anos do século XIX, quase em conjunto ao início de sua utilização na Europa. Algumas pequenas empresas privadas nacionais e empresas de governos municipais de pequenas localidades tiveram participação nessa organização inicial, tendo destaque no cenário nacional (GATTO, 2010).

Atualmente, cerca de 80% da energia consumida no país provém da hidroeletricidade, visto que o relevo em grande parte acidentado que o país apresenta, torna propício grandes quedas d'água, possibilitando uma vasta potência energética que o parque hidrelétrico brasileiro denota (SILVA, 2008).

As hidrelétricas trabalham por meio de construção de barragens artificiais sobre os leitos dos rios. Este movimento teve início no final do século XIX, entretanto seu real progresso aconteceu após a segunda Guerra Mundial com o denominado Estado Novo ou Era Vargas, equiparando a nação as políticas de desenvolvimento norte-americanas (ALMEIDA, 2017).

Os primeiros aproveitamentos hidráulicos em territórios brasileiros decorreram nos estados de Minas Gerais e São Paulo, desde o fim do século XIX. Posteriormente, alguns testes foram realizados no sentido de investimentos na produção de energia hidroelétrica e, de imediato na primeira década do século XX, esse padrão de energia excedeu a produção das usinas termelétricas (MÜLLER, 1995).

Segundo Silva (2008), a primeira usina termoelétrica brasileira teve início por volta de 1883, na cidade de Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro (com potência instalada de 52 Kw/h). E em 1889, inaugurou a primeira hidrelétrica do país em Juiz de Fora, no estado de Minas Gerais, como é possível ver na Figura 1.



Figura 1: Usina de Marmelos Zero, inserida na margem do Rio Paraibuna.

FONTE: IEPHA - Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais, 2006.

Até o ano de 1910, o cenário estatístico de potência instalada era o demonstrado na Tabela 1:

Tabela 1: Estatística de potência instalada no Brasil até 1910.

Ano	Térmica Mw/h	Hidrelétrica Mw/h
1883	52	-
1889	3143	1475
1900	6585	5500
1910	21996	137684

FONTE: Silva, 2008.

De acordo com Santander (2014), uma usina hidrelétrica é a instalação em que a barragem, parte da usina, interrompe as águas de um rio originando um reservatório. A energia potencial (relativa à altura) é a energia que existe entre o nível do reservatório que antecede a barragem e nível do rio posterior a barragem, que se converte em energia cinética (relacionada com o movimento), transportada através de tubulações até um motor hidráulico, denominado turbina hidráulica.

Turbinas são máquinas com a capacidade de transformar a atual energia de uma corrente de fluido em trabalho. Suas múltiplas vantagens abrangem a todo o momento a conversão deste trabalho em uma configuração vantajosa de energia para o homem, tal como elétrica ou mecânica (DALTRO; RODRIGUES, 2013).

2. USINAS HIDRELÉTRICAS

Os empreendimentos para utilização dos recursos hídricos, da perspectiva energética, são nomeados centrais hidrelétricas ou usinas hidrelétricas. As usinas hidrelétricas transformam a energia das águas em energia elétrica. A quantidade de energia elétrica produzida é equivalente à quantidade de água que percorre por meio da turbina (SAMWAYS; SUCEK, QUEIROZ; 2004).

De acordo com Silva (2008), as usinas hidrelétricas apresentam como fonte fundamental a energia resultante da queda d'água detida a certa altura. A energia potencial presente na água na parte superior da represa é modificada em energia cinética, realizando o movimento de giro nas pás das turbinas, ativando o eixo do gerador, gerando energia elétrica. Na Figura 2 está uma relação das hidrelétricas de grande porte no Brasil:

Onde:

MW= Megawatt.

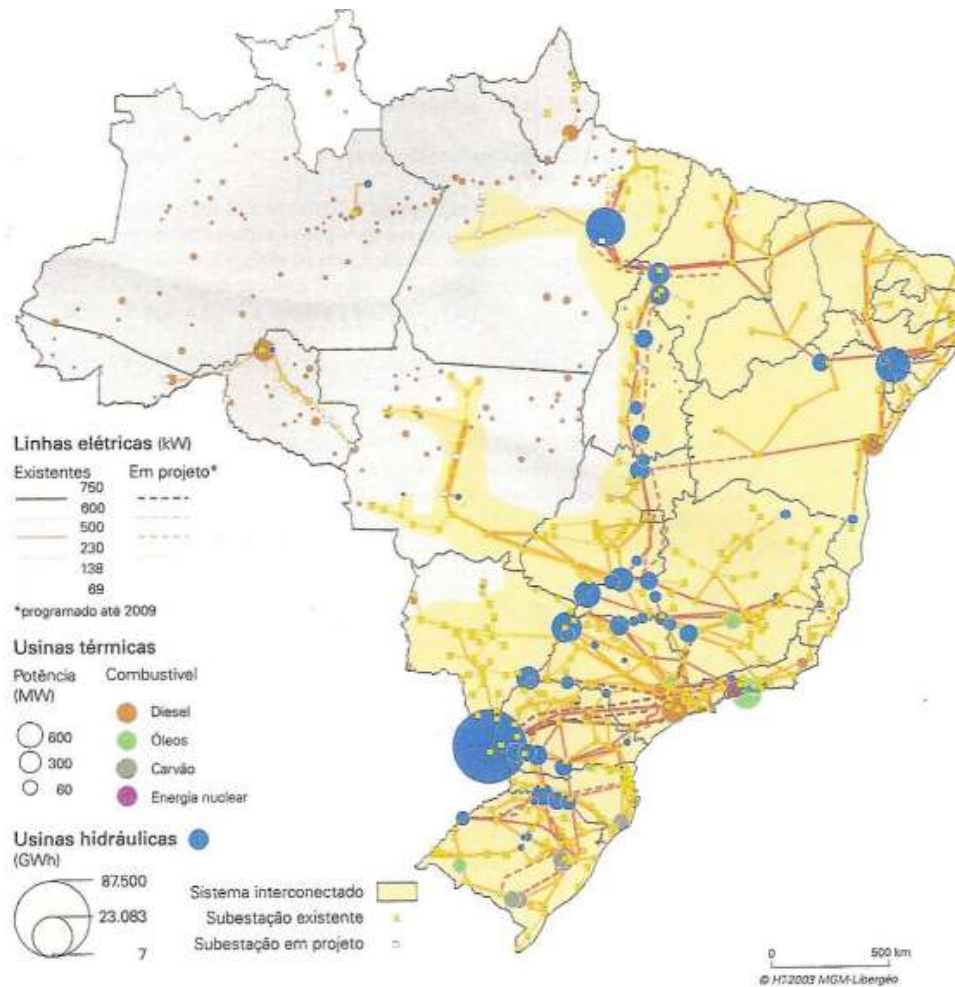


Figura 2: As redes elétricas.

FONTE: ANEEL, Atlas da Energia Elétrica.

Segundo Santander (2014), a usina hidrelétrica é composta por:

- Reservatório: desenvolvido à medida que a água do rio é retida pela barragem.
- Barragem: um suporte edificado no leito de um rio, ocasionando o acúmulo de água do rio, podendo ser desenvolvida com terra ou concreto.
- Vertedouro: possibilita a limitação do nível de água do reservatório, sobretudo nas fases chuvosas, uma vez que tem a finalidade de permitir a saída da água excedente.

- Tomada de água: construção que proporciona o domínio, normalização, desvio e o transporte da água do reservatório para alimentação das turbinas.
- Conduto forçado: é a tubulação que desloca a água, sob pressão, em direção as turbinas. Podem ser externos ou subterrâneos.
- Casa de força: área em que se processa a usina. Neste lugar são centralizadas as máquinas eletromecânicas encarregadas pela conversão de energia.
- Canal de fuga: O canal de fuga, a jusante do canal de sucção entre a casa de força e o rio, é o duto em que a vazão turbinada é devolvida ao rio.
- Subestação: é um composto de dispositivos para transmitir e distribuir, que conserva a energia elétrica formada na usina, além do fato possuir mecanismos de segurança habilitados para identificar os distintos tipos de erros que acontecem no sistema e de isolar os locais em que estas falhas acontecem. É neste lugar que a energia elétrica é convertida em alta tensão, a fim de que possa ser conduzida pelas linhas de transmissão a grandes distâncias.
- Turbina: é um equipamento hidráulico que usufrui a energia da água com o intuito de através de um gerador, transformar a energia mecânica em energia elétrica.
- Gerador: está conectado à turbina. A energia mecânica no eixo da turbina é convertida em energia elétrica pelo gerador.

A Figura 3 retrata os diferentes elementos de uma usina hidrelétrica.

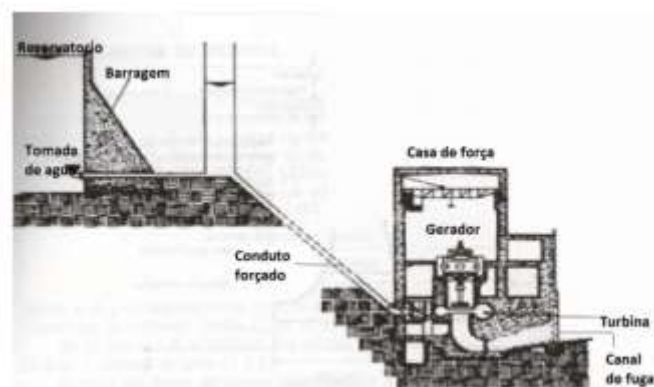


Figura 3: Apresentação de uma usina hidrelétrica.

FONTE: Santander, 2014.

As vantagens de uma usina hidrelétrica assemelham as vantagens energéticas que a construção ocasionará ao sistema em que ela vai se ajustar, avaliados pela elevação econômica do crescimento de Energia Firme, Energia Secundária e Ponta Garantida. Estes rendimentos baseiam-se no desenvolvimento da demanda de energia, da disponibilidade hidrológica, das normas operacionais que apontam o rateio da carga sistêmica entre as distintas usinas, das restrições de intercâmbio, do consumo de combustível das termoelétricas, da valorização do suprimento de ponta, etc. (SILVA FILHO, CARNEIRO; 2004).

A Figura 4 possibilita ter um bom referencial da origem da energia elétrica no país, onde as usinas hidrelétricas regem o campo elétrico do país (TAVARES; 2014).

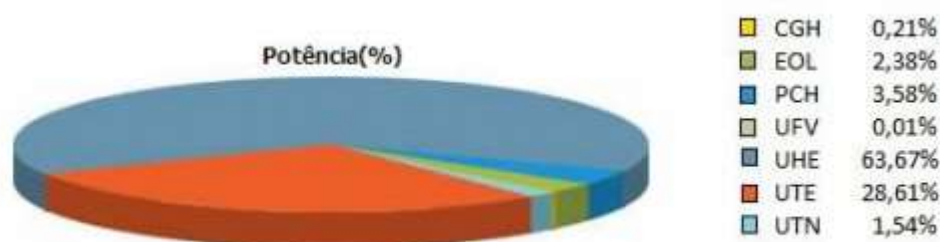


Figura 4: Proporcionalidades na geração da matriz elétrica brasileira.

FONTE: Tavares, 2014.

Onde:

CHG = Centrais Geradoras Hidroelétricas;

EOL = Centrais Geradoras Eólicoelétricas;

PCH = Pequenas Centrais Hidrelétricas;

UFV = Usinas Fotovoltaicas;

UHE = Usinas Hidrelétricas;

UTE = Usinas Termelétricas;

UTN = Usinas Termonucleares.

2.1 Tipos de Usinas Hidrelétricas

As aplicabilidades hidrelétricas têm a capacidade ser identificadas de acordo com a potência acessível em usinas pequenas, médias e grandes, ou até mesmo segundo a queda em usinas de queda baixa, média e alta. Um destaque significativo a respeito das aplicabilidades hidrelétricas tem que apresentar as particularidades da geração de energia elétrica, isto é, os modelos essenciais de usinas hidrelétricas: usinas a fio d'água ou usinas de acumulação (SAMWAYS; SUCEK; QUEIROZ, 2004).

Conforme Wachholz (2012), o desejo de satisfazer a procura de energia elétrica resultante da expansão econômica do Brasil, o governo tem implantado inúmeras usinas hidrelétricas e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) nos rios. Antigamente, a maior parte das usinas fundadas apresentavam reservatórios de acumulação, que operavam para geração de energia, regularização do curso hídrico, e segurança da disponibilidade de água para os reservatórios posicionados a jusante.

Contudo, esses reservatórios indicavam uma extensa região alagada, que retratava impactos sociais e ambientais grandiosos. Esses danos têm decrescido com a instauração de usinas que trabalham no modo fio d'água. As usinas produzidas a fio d'água conserva o armazenamento contínuo, com vazão defluente proporcional à afluenta (SILVA FILHO; CARNEIRO, 2004). É importante destacar que apesar disso acontece o desenvolvimento de um reservatório.

Diferente das usinas a fio d'água, as usinas hidrelétricas com reservatório de acumulação conservam água com o propósito de gerar energia de modo constante, tornando a regulação do reservatório uma condição essencial na hora de determinar de suas dimensões e para o abastecimento de água no período de seca (SAMWAYS; SUCEK; QUEIROZ, 2004).

Além das usinas destacadas pelos autores anteriores, Soares Júnior (2013) acrescenta as usinas reversíveis, que são usinas que possibilitam a produção de

energia elétrica por meio da queda d'água de um reservatório situado a montante para outro a jusante, ou armazenar água em uma superfície mais elevada, mediante o bombeamento da água de um reservatório a jusante para outro a montante. Ocasionalmente, é possível encontrar mais de dois reservatórios e somente uma usina de bombeamento é empregada para elevar a água num sistema de reservatórios.

3. TURBINAS HIDRÁULICAS

As turbinas vêm sendo utilizadas há séculos com o propósito de transformar a energia mecânica acessível de forma livre dos rios e do vento em trabalho mecânico útil, usualmente através de um eixo giratório. Sempre o que o fluido usado for a água, as turbomáquinas são denominadas turbinas hidráulicas (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

O conjunto de pás, lâminas ou conchas conectadas ao eixo da turbina recebe o nome de rotor, roda ou corredor. Nas turbinas hidráulicas o fluido utilizado é a água, de maneira que o escoamento é incompressível (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

A turbina, que está firmada por um eixo a um gerador de energia elétrica, constituído de um rotor, gira dentro de uma bobina ocasionando o surgimento de uma corrente elétrica. No gerador, acontece a conversão de energia cinética, ou energia mecânica, em energia elétrica. Esta energia é conduzida para uma subestação, e de lá é transportada para os centros de consumo (SANTANDER, 2014).

3.1 Principais Tipos de Turbinas Hidráulicas

As turbinas podem ser divididas em dois tipos: turbina de ação e de reação. As turbinas em que toda energia livre do escoamento é convertida em energia cinética a pressão atmosférica, através de um bocal, antes do fluido entrar em contato com as pás móveis são denominadas turbinas de ação. Um modelo

tradicional desse tipo de turbina é a turbina Pelton. E nas turbinas de reação, o fluido utilizado ocupa por inteiro as passagens, uma parte da energia do fluido é convertida em energia cinética no decorrer da passagem por perfis que podem ser ajustados antes da entrada no rotor e a outra parte dessa conversão acontece no próprio rotor. Como exemplo de turbina de reação são encontradas as turbinas Francis e Kaplan (ROCHA, 2015).

Segundo a Figura 5, nas turbinas de reação o escoamento está contido em uma voluta que conduz o fluido para o rotor. As aletas-guias ajustáveis (também conhecidas como pás diretrizes) se encontram a montante do rotor. Como resultado, o fluido deixa a saída da aleta-guia e adentra no rotor, com um momento angular adicionado. Conforme o fluido passa na área do rotor, o momento angular é minimizado e determina um torque ao rotor, que, por conseguinte, ativa o eixo para gerar potência. O escoamento passa do rotor para um difusor, denominado tubo de sucção, que procede para transformar a energia cinética restante no fluido em energia de escoamento (POTTER; WIGGERT; RAMADAM, 2014).

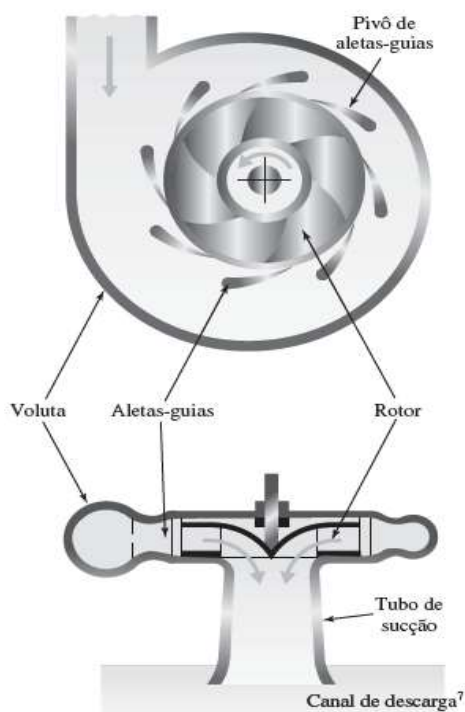


Figura 5: Turbina a reação tipo Francis - Desenho Esquemático

FONTE: Potter; Wiggert; Ramadan, 2014.

As turbinas são maquinários motrizes que convertem energia hidráulica em energia mecânica, que é o torque com o qual o eixo do equipamento realiza do giro. Sua classificação pode variar conforme mostrado na Tabela 2 e na Tabela 3 (TIAGO FILHO, *et al.*, 2008).

Tabela 2: Classificação quanto à trajetória da água no rotor.

Classificação	Trajecória da água	Turbina
Radial	Quando ao fluxo d'água que passa pelas pás do rotor se efetua na direção radial.	Francis
Axial	Quando ao fluxo d'água que passa pelas pás dos rotor toma a direção do eixo da máquina.	Hélice, Kaplan
Tangencial	Quando a água incide nas pás na direção tangencial ao rotor.	Pelton

FONTE: Tiago Filho, *et al.*, 2008.

Tabela 3: Classificação quanto à forma de transformação de energia.

Tipo de Turbina	Nqa Mínimo	Nqa Máximo
Impulso ou de Reação	Quando a turbina aproveita a energia cinética de um jato d'água incidindo sobre as pás e a transformação se dá à pressão constante.	Pelton
Reação	Quando a turbina aproveita a energia cinética de um jato d'água incidindo sobre as pás e a transformação se dá à pressão constante.	Hélice, Kaplan e Francis

FONTE: Tiago Filho, *et al.*, 2008.

Onde:

N_{qa} = Rotação Específica Efetiva.

Ainda que existam distintas variações tais como a tubular, a bulbo, a straflo, a sifão, a Kaplan S, a Propeller e a de fluxo livre, intitulada de hidrocínética, de fato essas turbinas são compostas de um rotor hélice ou Kaplan. É possível também localizar no mercado mais tipos de turbinas de ação como a Michel-Banki e a Turgo (TIAGO FILHO, *et al.*, 2008).

3.1.1 Turbina Francis

Na turbina Francis, o escoamento que chega pelas aletas-guias é radial, com um elemento tangencial de velocidade considerável na abertura das pás do rotor. Conforme o fluido percorre o rotor, a velocidade atinge uma componente axial enquanto ocorre a redução do componente tangencial. No momento em que ele sai do rotor, a velocidade do fluido é sobretudo axial, com pequeno ou nenhum elemento tangencial. A pressão na saída do rotor está inferior a pressão atmosférica (POTTER; WIGGERT; RAMADAN, 2014).

Sendo identificada por um rotor de pás fixas que admite o fluxo, na direção radial, e o orienta na direção axial para o canal de sucção, a turbina Francis converte a energia hidráulica disponível em energia mecânica, constituído pelo torque no eixo.

Sua classificação é de acordo com a relação entre os diâmetros de entrada e saída. Considera-se que o rotor é a categoria:

1. Francis lenta, quando o diâmetro de entrada é maior que o de saída;
2. Francis normal, quando o diâmetro de entrada é igual ao de saída;
3. Francis rápida, quando o diâmetro de entrada é menor que o de saída.

O modelo do rotor difere conforme a relação queda e vazão. Quanto maior for a queda e menor for a vazão, mais lento será o rotor. Em contrapartida, quanto menor for a queda e maior for a vazão, mais rápido será o rotor (SANTANDER, 2014).

A turbina Francis (Figura 6) é planejada para trabalhar usualmente entre quedas de 40 e 400 metros. As usinas hidrelétricas de Itaipú, Tucuruí e Belo Monte são exemplos que trabalham com esse tipo de turbina em uma queda de cerca de 100 metros de coluna d'água (BUENO, 2017).

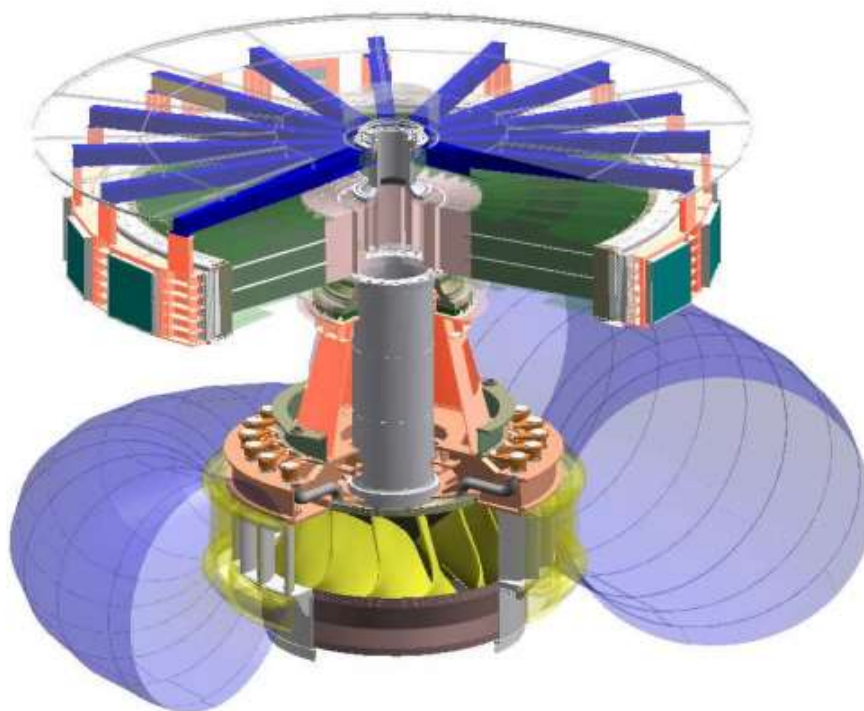


Figura 6: Arranjo básico de uma unidade geradora Francis.

FONTE: Bueno, 2017.

3.1.2 Turbina Pelton

A turbina composta por um rotor onde possui as conchas duplas com aresta diametral fixadas é caracterizada como turbina Pelton. Sobre essas arestas atinge o jato d'água que cria um desvio simétrico na direção axial permitindo o equilíbrio

dinâmico para que seja eliminado os esforços axiais. A utilização de um ou mais injetores que são distribuídos de forma uniforme na periferia do rotor, depende da potência da turbina que será utilizada. Os injetores distribuídos possuem válvulas com agulhas monitoradas pelo regulador de velocidade, segundo a Figura 7, que determina a vazão da água que impulsionará o rotor controlando assim a produção de potência pela turbina com uma menor instabilidade de frequência (TIAGO FILHO, *et al.*; 2008).

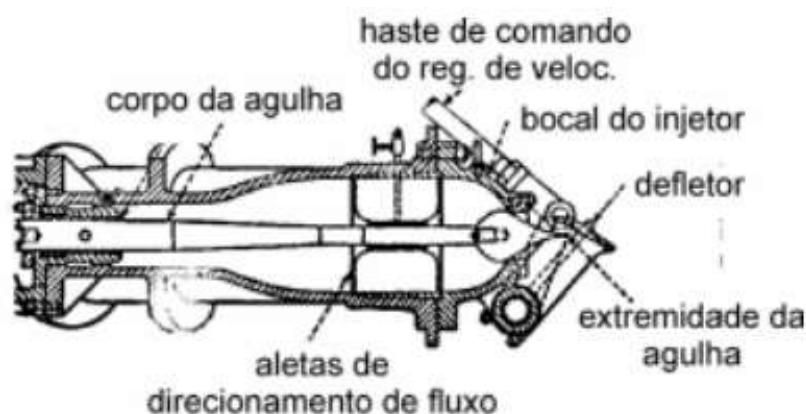


Figura 7: Injetor e válvula agulha de uma turbina Pelton.

FONTE: Costa, 2003.

Normalmente a turbina Pelton é usada em usinas em que a altura d'água é maior que 250 m, apesar de ser também usada em alturas menores. Existem instalação nos Alpes europeus em que a elevação atinge aproximadamente 1800 m. Essas turbinas são comumente de eixo horizontal e o gerador é instalado ao lado da turbina (COSTA, 2003).

A roda giratória denominada roda Pelton, foi criada por Lester A. Pelton (1829-1908) no ano de 1878, e recebeu esse nome em sua homenagem. As pás dessa roda foram projetadas para fracionar o escoamento ao meio e promover o giro do escoamento a cerca de 180° (relacionada a uma estrutura de referência que movimenta com a pá). Como ilustra a Figura 8, a seção mais externa de cada pá é dividida para que grande parte do jato seja capaz de deslocar-se da pá que não está alinhada ao jato (Pá $n + 1$) para alcançar a pá com maior alinhamento (Pá n).

Sendo assim, a quantidade máxima de momento do jato é aproveitada. O ponto central da pá realiza o movimento à velocidade tangencial $r\omega$. A velocidade do jato é dada por V_j e a rotação do eixo é igual a ω (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

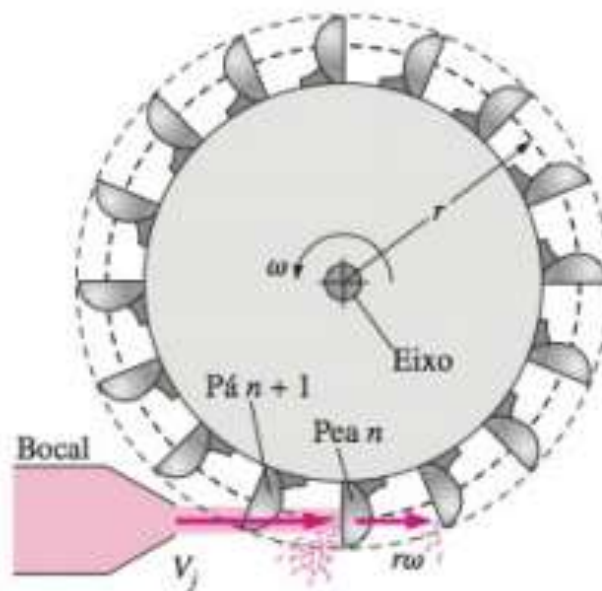


Figura 8: Diagrama representativo de uma turbina do tipo Pelton.

FONTE: Çengel; Cimbala, 2012 .

A Figura 9 demonstra os diferentes modelos de turbinas hidráulicas e sua área de aplicação, levando em consideração a altura de queda, a vazão e a potência de cada tipo, facilitando a escolha de uma turbina para um local que já apresente determinadas características. Entretanto, essa mesma figura apresenta diversos tipos de turbinas que são capazes de serem empregadas no mesmo campo de utilização. Por consequência, algumas outras características devem ser avaliadas na definição da turbina, por exemplo: aspectos econômicos, custos de manutenção, riscos de cavitação, etc (TAVARES; 2014).

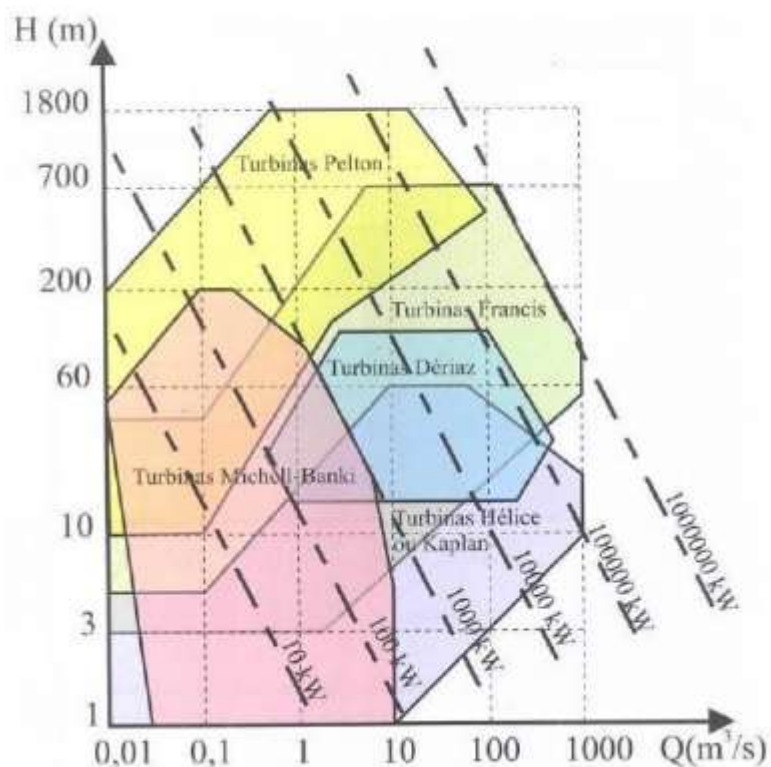


Figura 9: Campo de aplicação de turbinas hidráulicas.

FONTE: Tavares, 2014.

3.1.3 Turbina Hélice e Kaplan

No ano de 1912, a turbina Kaplan (Figura 10) foi projetada pelo engenheiro austríaco Victor Kaplan (1876-1934) e são máquinas de eixo vertical ou horizontal que dispõem de pás móveis das quais possibilitam serem reguladas conforme a vazão. São apropriadas um funcionamento em baixa queda, usualmente entre 15 e 40 metros, entretanto com médias e altas vazões, com potências unitárias de 30 a 250 MW. São turbinas trabalham em uma vasta faixa de vazões. As usinas Kaplan permitem facilitar na acomodação dos reservatórios com dimensões mínimas quando aplicadas em configuração a fio d'água (ROCHA, 2015).

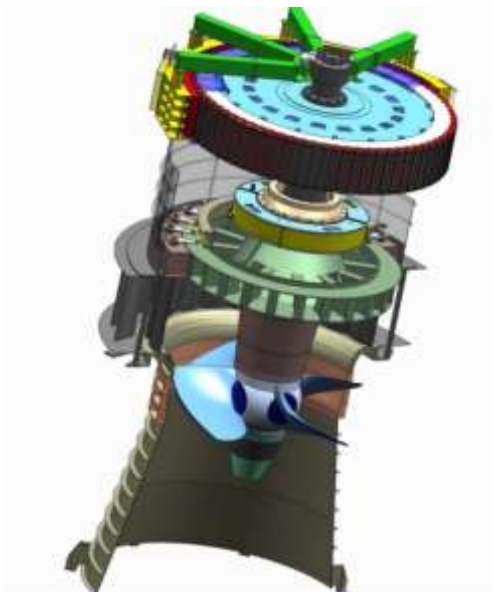


Figura 10: Arranjo básico de uma unidade geradora Kaplan.

FONTE: Bueno, 2017.

É conhecida como uma turbina de reação, em que o fluxo d'água tem direção radial no distribuidor, aproximadamente axial na entrada do rotor, entretanto para a turbina Kaplan as pás têm passo regulável, suportando serem ajustadas em pleno funcionamento, e na turbina Hélice as pás são fixas. No caso das turbinas Kaplan o mecanismo que possibilita alterar o ângulo de inclinação das pás de acordo com a vazão, sem transformação considerável do rendimento, permanece alojado numa peça com formato de ogiva e seu comando é efetuado pelo regulador automático de velocidade. Necessitando de uma tecnologia elevada para a sua construção, esta máquina é recomendada para baixas quedas e grandes vazões (JUSTINO, 2006).

A geometria da turbina é similar a Francis, porém o rotor da Hélice e Kaplan são compostos por um cubo com pás e estas pás podem ser fixadas rigorosamente ao cubo, comportando o rotor axial resultante a intitulação de rotor Hélice. Se porventura, as pás tiverem deslocamento em relação ao cubo, o rotor é denominado Kaplan (SLOMPO, KLOSTERMANN; 2012).

Um dos benefícios da turbina do tipo hélice com pás ajustáveis criada por Kaplan em 1919 é o rendimento elevado sobre um espectro de altura de quedas e aberturas do distribuidor. Assim como a abertura do distribuidor o ângulo das pás tem a possibilidade de sofrer ajustes com a unidade em funcionamento. Com isso é permitido que a eficiência da turbina seja otimizada com uma maior probabilidade de operações (COSTA, 2003).

Uma diferença considerável entre as turbinas Kaplan e Francis é que no rotor Kaplan, a turbina parece um propulsor de um navio. O ângulo de inclinação das pás nas turbinas Kaplan tem a possibilidade de ser inspecionado hidraulicamente no decorrer da operação através de um sistema nomeado cabeçote Kaplan (BUENO, 2017).

Na Tabela 4 são retratadas algumas instalações com turbinas Kaplan no Brasil:

Tabela 4: Instalações com turbinas Kaplan no Brasil.

Instalação	H (m)	Q (m³/s)	N (CV)	n (rpm)
Sobradinho - Rio São Francisco	27,2	715	242.000	75
Jupia - Rio Paraná	23	462	140.000	78
Cachoeira Dourada - Rio Paranaíba	33,5	307	115.490	82
Volta Grande - Rio Grande	26,2	430	140.038	85,7

FONTE: Soares Júnior, 2013.

Onde:

H = Altura;

Q = Vazão;

N = Potência;

n = Rotação da turbina.

A Figura 11 apresenta um comparativo da qualidade de desempenho entre as turbinas Kaplan, Francis e a turbina Hélice sem controle da posição das pás do rotor. Nota-se que as turbinas Kaplan têm chances de sustentar uma eficiência elevada sobre uma faixa extensa de condições de funcionamento que as outras. O diferencial de desempenho é sobretudo evidenciado em relação à turbina de hélice com pás fixas no rotor (COSTA, 2003).

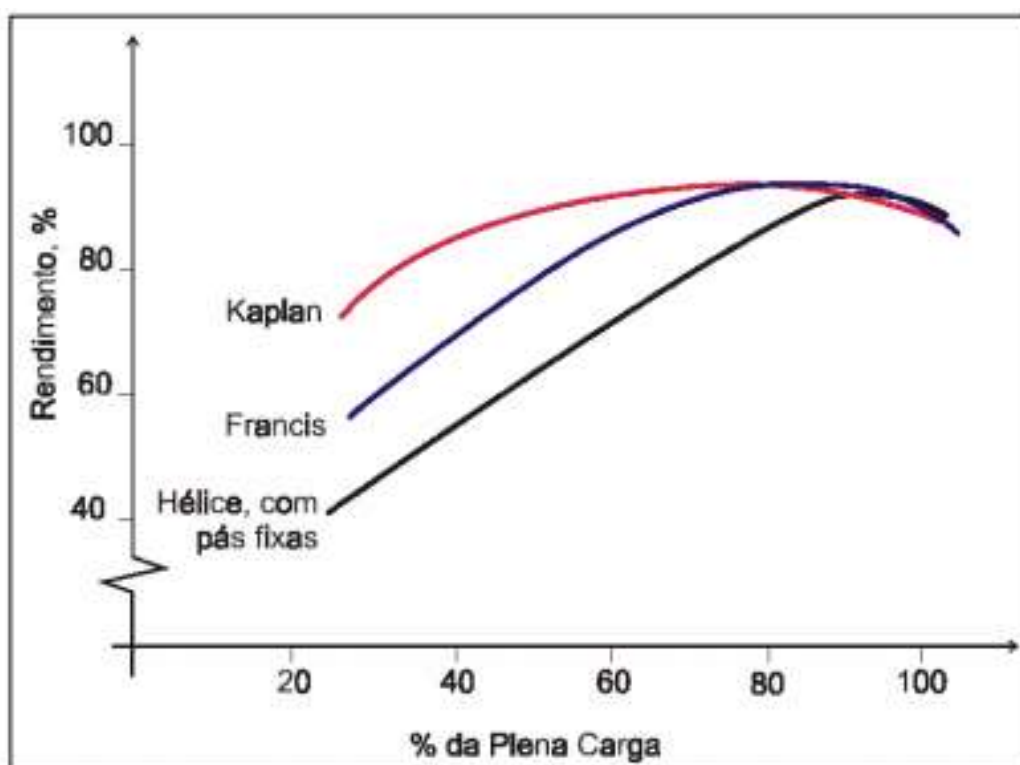


Figura 11: Comparação de desempenho das Turbinas Kaplan, Francis e Hélice.

FONTE: Costa, 2003.

Segundo Ramos e Silva (2009), de acordo com o número de pás as turbinas Kaplan podem ser de:

- 4 pás (para $10 < H < 20\text{m}$);
- 5 pás (para $12 < H < 23\text{m}$);
- 6 pás (para $15 < H < 35\text{m}$);
- 8 pás (para $H > 35\text{m}$).

Ainda conforme os autores, são aplicadas em rotações específicas a partir de 350 rpm. Viabilizando uma ampla oscilação da descarga e da potência sem uma variação notável do rendimento total.

4. SELEÇÃO DE UMA TURBINA

4.1 Rotação Específica

Os geradores de energia elétrica são acionados diretamente pelas turbinas, uma vez que, os dois são acoplados, possuem o mesmo número de rotações. Segundo MACINTYRE (1983), turbinas de grande potência têm baixa rotação real para poder reduzir a complexidade dos problemas de estabilidade mecânica, momento nos mancais e também, para melhorar as condições para a regularização do movimento.

A rotação específica é dada pela seguinte Equação 1:

$$n_s = \frac{n\sqrt{N}}{H^4\sqrt{H}} \quad (1)$$

Onde:

n_s = Rotação específica;

n = Rotação da Turbina;

N = Potência;

H = Altura.

4.2 Verificação da Seleção da Turbina

As grandezas conhecidas para a seleção de uma turbina para uma dada instalação são a descarga Q , a queda H e o número de rotações por minuto n . Com a rotação específica n_s calculada junto ao gráfico da Figura 16 que indica o campo de aplicação dos tipos de turbinas de acordo com a queda e a rotação específica e os dados da tabela, será indicada qual o tipo mais adequado de turbina a ser utilizado na usina.

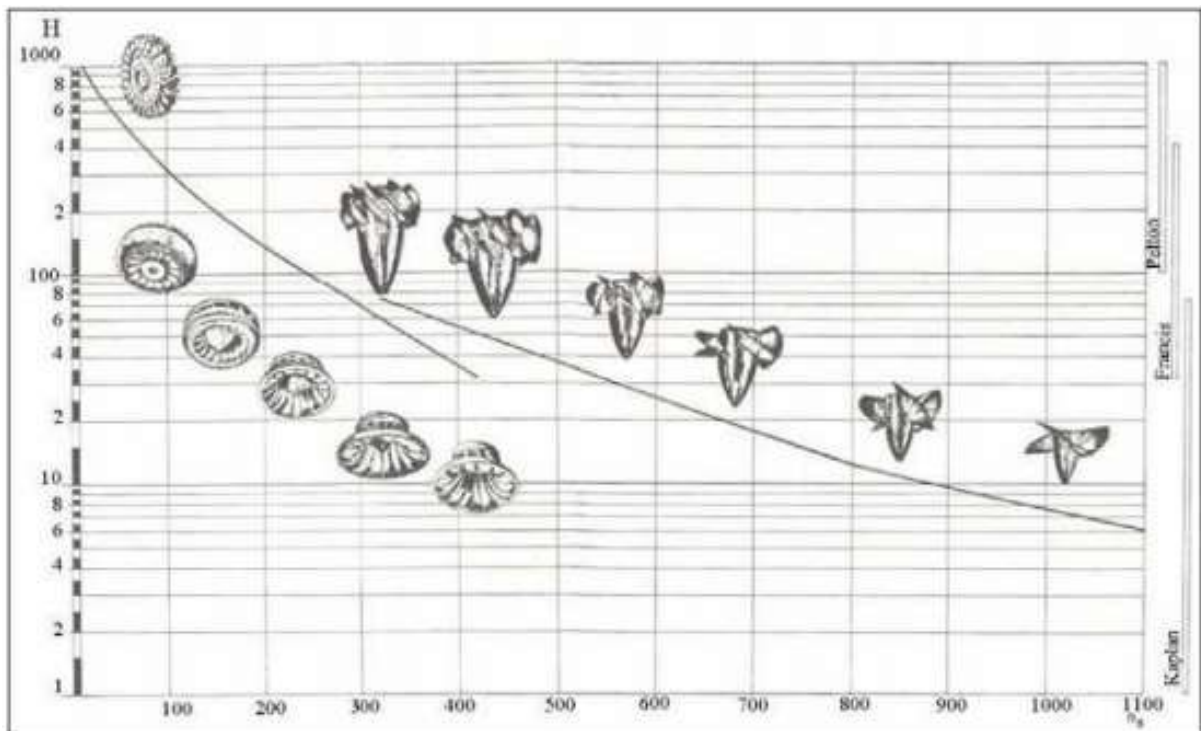


Figura 12: Aplicabilidade dos tipos de turbinas de acordo com a queda e a rotação específica.

Fonte: Macyntire, 1983.

5. DIMENSIONAMENTO DO ROTOR DE UMA TURBINA KAPLAN

5.1 Diâmetros do Rotor

O diâmetro externo do rotor (D_o) será obtido através da Equação 2:

$$D_o = 5,3 \sqrt[3]{\frac{Q}{n}} \quad (2)$$

Onde:

Q = Vazão;

n = Rotação da Turbina.

O diâmetro interno do rotor (D_i) será obtido através da Equação 3:

$$D_i = 0,5D_o \quad (3)$$

5.2 Seção livre de Passagem da Água pela Turbina

A seção livre de passagem da água pela turbina (A) será obtida através da Equação 4:

$$A = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} \quad (4)$$

5.3 Velocidade Média de Saída

A velocidade média de saída (v_m) será obtida através da Equação 5:

$$v_m = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

5.4 Dimensionamento das Pás

- Número de Pás: o número de pás é obtido a partir do valor da altura de queda do projeto. O Quadro 2 apresenta essa relação.

Quadro 2: Relação para obter o número de pás.

Tipos de Turbinas		n_s (rpm)	H (m)
Pelton	1 jato	18	800
	1 jato	18-25	800-400
	1 jato	26-35	400-100
	2 jatos	26-35	800-400
	2 jatos	36-50	400-100
	4 jatos	40-50	400-100
	4 jatos	51-71	500-200
	6 jatos	72-90	400-100
Francis	Muito lenta	55-70	600-200
	Lenta	71-120	200-100
	Normal	121-200	100-70
	Rápida	201-300	70-25
	Extra rápida	301-450	25-15
Kaplan, Bulbo, Straflo, Propeller	8 pás	250-320	70-50
	7 pás	321-430	50-40
	6 pás	431-530	40-30
	5 pás	534-620	30-20
	4 pás	624 em diante	30

FONTE: Macyntire, 1983

- Passo entre as pás (t), medido no raio médio é obtido através da Equação 6:

$$t = \frac{\pi(D_O + D_I)}{z} \quad (6)$$

Onde:

z = número de pás

- Comprimento das pás obtido através da Equação 7:

$$l = \lambda t \quad (7)$$

Em que λ corresponde ao fator de relação entre a rotação específica e o comprimento obtido através da Equação 8:

$$\lambda = \frac{78}{n_s^{2/3}} \quad (8)$$

5.5 Velocidade Periférica Média

A velocidade periférica média (u) é obtida através da Equação 9:

$$u = \frac{\pi D_m n}{60} \quad (9)$$

Onde:

D_m = Diâmetro médio.

5.6 Rendimento

Sendo o rendimento nominal (η_T) obtido pela Equação 10:

$$\eta_T = \frac{75N}{1000QH} \quad (10)$$

5.7 Velocidade Periférica Absoluta

A velocidade periférica absoluta (v_{u1}) é obtida através da Equação 11:

$$v_{u1} = \frac{\eta_T g H}{u} \quad (11)$$

5.8 Ângulo de Incidência

O ângulo de incidência ($\tan\beta$) é obtido através da Equação 12:

$$\tan\beta = \frac{v_m}{u \left(\frac{v_{u1}}{2} \right)} \quad (12)$$

5.9 Velocidade Relativa

A velocidade relativa (ω_{∞}) é obtida através da Equação 13:

$$\omega_{\infty} = \sqrt{\left(u - \frac{v_{u1}}{2}\right)^2 + v_m^2} \quad (13)$$

5.10 Coeficiente de Sustentação

- Grade:

O coeficiente de sustentação grade (Ca_{grade}) é obtido através da Equação 14:

$$Ca_{\text{grade}} = \frac{2gt\varepsilon}{lu_1\omega_{1\infty}\left(1 - \frac{0,05}{\tan\beta_{\infty}}\right)} \quad (14)$$

Em que u_1 é obtido através da Equação 15:

$$u_1 = \frac{u}{\sqrt{H}} \quad (15)$$

E $\omega_{1\infty}$ é obtido através da Equação 16:

$$\omega_{1\infty} = \frac{\omega_{\infty}}{H} \quad (16)$$

- Isolada

O coeficiente de sustentação isolado (Ca_{isolado}) é obtido através da Equação 17:

$$Ca_{\text{isolado}} = \frac{Ca_{\text{grade}}}{1,2} \quad (17)$$

5.11 Ângulo de Perfil

O ângulo de perfil (β_p) é calculado de acordo com a Equação 18:

$$\beta_p = \alpha_i + \beta_{\infty} \quad (18)$$

Onde:

α_i = ângulo de ataque.

O ângulo de ataque é obtido através do coeficiente de sustentação isolado e a curva de perda de sustentação conforme gráfico da Figura 17.

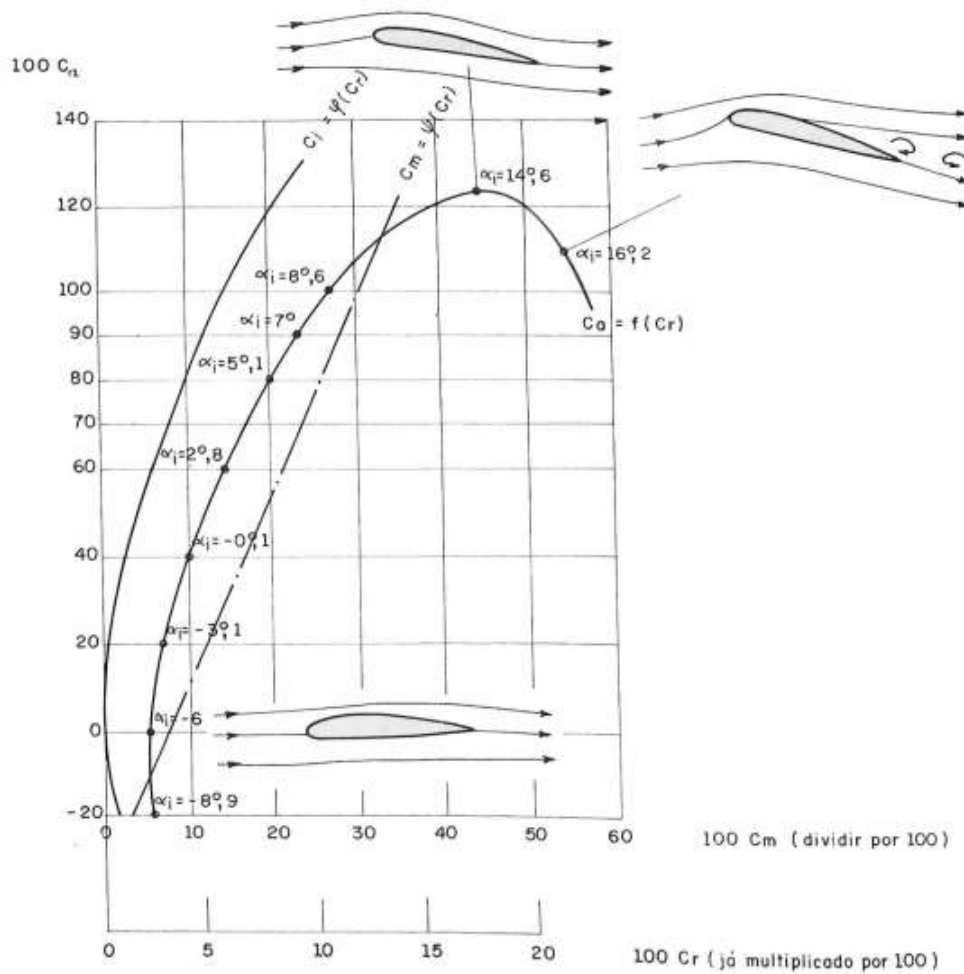


Figura 13: Curvas para determinação do coeficiente C_a em função do ângulo α para um dado perfil.

FONTE: Macyntire, 1983.

CAPÍTULO II: ARTIGO CIENTÍFICO

DIMENSIONAMENTO DO ROTOR UMA TURBINA KAPLAN PARA APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO DE BAIXA QUEDA EM UMA USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Keterin de Sousa e Sousa^{1}, Laryce Souza da Silva²*

RESUMO

Usina hidrelétrica é uma instalação em que a barragem, parte da usina, interrompe as águas de um rio originando um reservatório. A energia potencial é a energia que existe entre o nível do reservatório que antecede a barragem e nível do rio posterior a barragem, que se converte em energia cinética, transportada através de tubulações até um motor hidráulico, denominado turbina hidráulica. Em instalações de baixa queda, a casa de força é integrada às obras de tomada d'água ou localizada a uma pequena distância. No Brasil, um exemplo típico de aproveitamento hidrelétrico de baixa queda é o da Usina Hidrelétrica de Jupuíá, localizada no

Rio Paraná, Município de Três Lagoas - SP. Com reservatório de 330 km², a usina possui 14 turbinas Kaplan. O presente trabalho teve como objetivo estabelecer um projeto conceitual da turbina Kaplan, utilizada em Jupuíá, verificando e seleção da turbina dimensionamento do rotor da mesma com o objetivo de otimizar a geração de energia elétrica por meio de dados característicos de projeto já existentes. Os resultados obtidos foram satisfatórios. Logo, a seleção da turbina e o dimensionamento do rotor foram feitos com êxito uma vez que condizem com características reais da usina hidrelétrica de Jupuíá.

Palavras-chave: Usina Hidrelétrica; Turbina Kaplan; Rotor.

ABSTRACT

Hydroelectric plant is an installation where the dam, part of the plant, interrupts the waters of a river originating a reservoir. The potential energy is the energy that exists between the level of the reservoir that precedes the dam and the level of the river after the dam, which converts to kinetic energy, transported through pipes to a hydraulic motor, called a hydraulic turbine. In low-fall installations, the powerhouse is integrated with waterworks or located within a short distance. In Brazil, a typical example of a low-fall hydroelectric plant is the Jupuíá Hydroelectric Power Plant, located on the Paraná River, in the

municipality of Três Lagoas - SP. With a reservoir of 330 km², the plant has 14 Kaplan turbines. The present work had as objective to establish a conceptual project of the Kaplan turbine, used in Jupuíá, verifying and selecting the turbine rotor dimensioning of the same one with the objective of optimizing the electric power generation through existing characteristic data of design. The results were satisfactory. Therefore, the turbine selection and rotor design have been successfully completed since they match the actual characteristics of the Jupuíá hydroelectric power plant.

Keywords: Hydroelectric plant; Kaplan Turbine; Rotor.

¹Institutos Superiores de Ensino do CENSA – ISECENSA – Rua Salvador Correa, 139, Centro, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28035-310, Brasil;

²Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF - Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28013-602, Brasil.

(*)e-mail: keterinsousa@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica por meio dos recursos hídricos é o meio mais utilizado no cenário brasileiro, suas condições naturais com grandes e numerosas bacias hidrográficas, beneficiam a inserção de usinas hidrelétricas e estudos mostram que nos próximos anos esse quadro terá poucas mudanças. Sendo assim, é essencial o aprendizado de aproveitamento hidrelétrico para o conhecimento, a qualificação e instrução de especialistas nesse ramo.

As aplicabilidades hidrelétricas de baixa potência constituem um meio de satisfazer ao aumento da demanda no Brasil por energia elétrica. Contribui também sendo suporte em comunidades isoladas do país, que não possuem atendimento pelas concessionárias. Apesar de não emitirem carbono, tais como outros aproveitamentos hidrelétricos; até então apontam um impacto ambiental mínimo, em relação às instalações de grande dimensão, meramente em virtude das suas medidas (TAKATSUKA, 2016).

Para gerar a energia hidrelétrica é fundamental integrar a vazão do rio, a dimensão hídrica acessível num ciclo de tempo estipulado e as depressões do relevo, sendo de forma natural, tais como as quedas d'água, ou criados artificialmente. Os fatores fundamentais usados na especificação de uma usina hidrelétrica são: altura da queda d'água, vazão, capacidade ou potência instalada, perfil da turbina utilizada, localização, modelo de barragem e reservatório. Esses elementos dependem mutuamente um do outro. Dessa forma, a altura da queda d'água e a vazão consistem no local de construção, que irão determinar qual será a capacidade instalada - que, por sua vez, indica o tipo de turbina, barragem e reservatório (ANEEL).

Sendo turbinas de reação e utilizadas em vazões elevadas, as turbinas Kaplan são também utilizadas em baixas quedas. Na maioria dos casos, têm eixo vertical, são compostas por um distribuidor, por uma roda com quatro ou cinco pás na forma de hélice e por uma câmara que pode ser fechada ou aberta. As pás são móveis, possibilitando a variação do ângulo de ataque através de um mecanismo de orientação que o regulador da turbina tem o papel de controlar (GOMES, 2010).

Dentro do contexto de produção e aplicabilidade da energia no Brasil e perante o desempenho complexo das turbinas hidráulicas, buscam-se por recursos que capacitem, progressivamente, os próximos engenheiros que adentrarão no mercado de trabalho, tornando-os habilitados a fazer projetos, dimensionamentos e análises desses equipamentos de fluxo (ROCHA, 2015).

1.1 Objetivo Geral

Estabelecer um projeto conceitual da turbina Kaplan, utilizada em uma usina de baixa queda, verificando e seleção da turbina dimensionamento do rotor da mesma com o objetivo de otimizar a geração de energia elétrica por meio de dados característicos de projeto já existentes.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Verificar a seleção da turbina utilizada em uma usina hidrelétrica de baixa queda;
- Dimensionar o rotor calculando os principais parâmetros para o seu funcionamento adequado.

1.2 Justificativa e Relevância

A energia hidráulica possui uma representação significativa na matriz energética mundial e possui tecnologias consolidadas e ainda, não polui o meio ambiente com a emissão de gases poluentes durante todo o processo. No entanto causam grande impacto ambiental devido à área alagada represada pela barragem, causando também a perda de solos agricultáveis, florestas, fauna e a retirada de populações ribeirinhas. A participação da energia hidráulica na matriz energética nacional é da ordem de 42%, gerando cerca de 90% de toda a energia produzida.

Apesar de haver uma tendência no aumento de outras fontes não-convencionais, devido a restrições socioeconômicas e ambientais de projetos hidrelétricos e os avanços tecnológicos no aproveitamento de fontes não renováveis, indicam que a energia hidráulica continuará sendo ainda por muito tempo a principal fonte geradora de energia elétrica no Brasil. O potencial técnico de aproveitamento da energia hidráulica do Brasil está entre os cinco maiores do mundo.

Uma turbina hidráulica possui componentes como o rotor, que é responsável realizar a conversão da potência hidráulica em potência mecânica no eixo da turbina. Uma correta seleção da turbina e dimensionamento adequado do rotor, é de grande relevância quando trata-se de aproveitamento energético.

2. METODOLOGIA

Em instalações de baixa queda, a casa de força é integrada às obras de tomada d'água ou localizada a uma pequena distância. As turbinas são do tipo Kaplan ou Hélice, com baixa velocidade (entre 70 e 350 rpm). As obras civis podem ser reduzidas pelo uso de grupos axiais do tipo bulbo e o custo dos geradores também pode ser reduzido, com o uso de multiplicadores de velocidade.

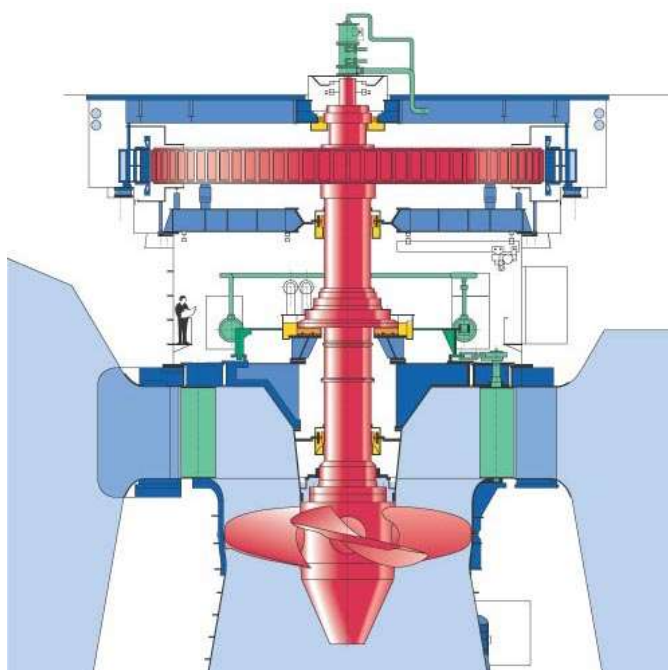


Figura 14: Turbina Kaplan.
FONTE: Energia Solar, 2018.

O dimensionamento rotor de uma turbina geradora de energia será de uma turbina do tipo Kaplan de eixo vertical para a usina de aproveitamento hidrelétrico de baixa queda Jupia. Os principais dados de projeto são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3: Dados de projeto da turbina Kaplan de eixo vertical.

Turbina de Eixo Vertical	
Potência nominal unitária (N) mn	103.000 kW = 140.000 CV
Queda de referência (H)	23 m
Vazão (Q)	462 m ³ /s
Rotação (n)	78 rpm

FONTE: Companhia Energética de São Paulo – CESP.

2.1 Rotação Específica

Os geradores de energia elétrica são acionados diretamente pelas turbinas, uma vez que, os dois são acoplados, possuem o mesmo número de rotações. Segundo Macintyre (1983), turbinas de grande potência têm baixa rotação real para poder reduzir a complexidade dos problemas de estabilidade mecânica, momento nos mancais e também, para melhorar as condições para a regularização do movimento.

A rotação específica é dada pela Equação 1

$$n_s = \frac{n\sqrt{N}}{H^{\frac{4}{3}}\sqrt{H}} \quad (1)$$

2.2 Verificação da Seleção da Turbina

As grandezas conhecidas para a seleção de uma turbina para uma dada instalação são a descarga Q, a queda H e o número de rotações por minuto n. Com a rotação específica n_s calculada junto ao gráfico da Figura 16 que indica o campo de aplicação dos tipos de turbinas de acordo com a queda e a rotação específica e os dados da tabela, será indicada qual o tipo mais adequado de turbina a ser utilizado na usina.

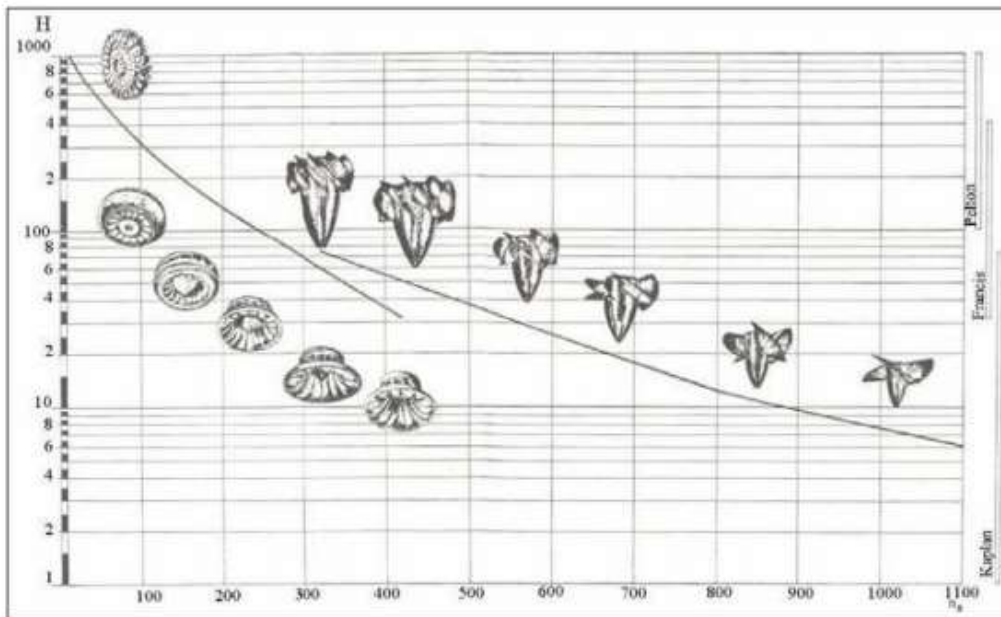


Figura 16: Aplicabilidade dos tipos de turbinas de acordo com a queda e a rotação específica. Fonte: Macyntire, 1983

2.3 Dimensionamento do Rotor da Turbina

2.3.1 Diâmetros do Rotor

O diâmetro externo do rotor (D_o) será obtido através da Equação 2:

$$D_o = 5,3 \sqrt[3]{\frac{Q}{n}} \quad (2)$$

O diâmetro interno do rotor (D_i) será obtido através da Equação 3:

$$D_i = 0,5 D_o \quad (3)$$

2.3.2. Seção Livre de Passagem da água pela turbina

A seção livre de passagem da água pela turbina (A) será obtida através da Equação 4:

$$A = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} \quad (4)$$

2.3.3. Velocidade média de saída

A velocidade média de saída (v_m) será obtida através da Equação 5:

$$v_m = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

2.3.4. Dimensionamento das Pás

- Número de Pás: o número de pás é obtido a partir do valor da altura de queda do projeto. O Quadro 2 apresenta essa relação.

Quadro 2: Relação para obter o número de pás.

Tipos de Turbinas		n_s (rpm)	H (m)
Pelton	1 jato	18	800
	1 jato	18-25	800-400
	1 jato	26-35	400-100
	2 jatos	26-35	800-400
	2 jatos	36-50	400-100
	4 jatos	40-50	400-100
	4 jatos	51-71	500-200
	6 jatos	72-90	400-100
Francis	Muito lenta	55-70	600-200
	Lenta	71-120	200-100
	Normal	121-200	100-70
	Rápida	201-300	70-25
	Extra rápida	301-450	25-15
Kaplan, Bulbo, Straflo, Propeller	8 pás	250-320	70-50
	7 pás	321-430	50-40
	6 pás	431-530	40-30
	5 pás	534-620	30-20
	4 pás	624 em diante	30

FONTE: Macyntire, 1983

- Passo entre as pás medida no Raio Médio:

$$t = \frac{\frac{\pi(D_0 + D_I)}{2}}{z}$$

- Comprimento das Pás

$$l = \lambda t \quad (7)$$

Em que λ corresponde ao fator de relação entre a rotação específica e o comprimento obtida através da Equação 8

$$\lambda = \frac{78}{n_s^{2/3}} \quad (8)$$

2.3.5. Velocidade Periférica Média

$$u = \frac{\pi D_m n}{60} \quad (9)$$

2.3.6. Rendimento

Sendo o rendimento nominal obtido pela Equação

$$\eta_T = \frac{75N}{1000QH} \quad (10)$$

2.3.7. Velocidade Periférica Absoluta

$$v_{u1} = \frac{\eta_T g H}{u} \quad (11)$$

2.3.8. Ângulo de Incidência

$$\tan \beta = \frac{v_m}{u \left(\frac{v_{u1}}{2} \right)} \quad (12)$$

2.3.9. Velocidade Relativa

$$\omega_\infty = \sqrt{\left(u - \frac{v_{u1}}{2} \right)^2 + v_m^2} \quad (13)$$

2.3.10. Coeficiente de Sustentação

- Grade

$$C a_{\text{grade}} = \frac{2gt\varepsilon}{lu_1\omega_{1\infty}\left(1 - \frac{0,05}{\tan\beta_{\infty}}\right)} \quad (14)$$

Em que u_1 é obtido através da Equação 15

$$u_1 = \frac{u}{\sqrt{H}} \quad (15)$$

E $\omega_{1\infty}$ é obtido através da Equação 16:

$$\omega_{1\infty} = \frac{\omega_{\infty}}{\sqrt{H}} \quad (16)$$

- Isolada

$$C a_{\text{isolada}} = \frac{C a_{\text{grade}}}{1,2} \quad (17)$$

2.3.11. Ângulo de Perfil

O ângulo de perfil é calculado de acordo com a Equação 18:

$$\beta_p = \alpha_i + \beta_{\infty} \quad (18)$$

Onde:

α_i = ângulo de ataque.

O ângulo de ataque é obtido através do coeficiente de sustentação isolado e a curva de perda de sustentação conforme gráfico da Figura 17

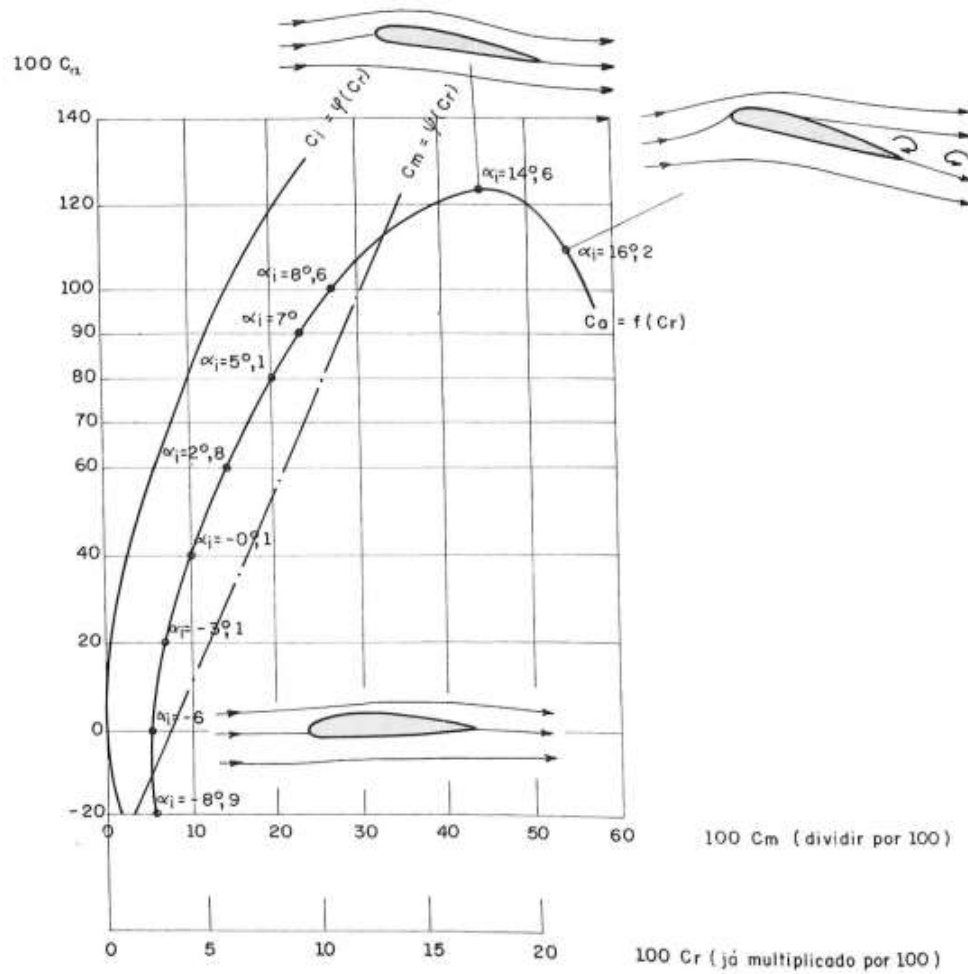


Figura 17: Curvas para determinação do ângulo de ataque.

Fonte: Macyntire, 1983

3. RESULTADOS

3.1. Rotação Específica

$$n_s = \frac{100\sqrt{140.000}}{29^4\sqrt{29}} = 579,43 \text{ rpm} \quad (12)$$

3.3.1. Diâmetros do Rotor

Diâmetro externo do rotor (D_o):

$$D_o = 5,3^3 \sqrt{\frac{462}{10780}} = 9,59 \text{ m} \quad (13)$$

Diâmetro interno do rotor (D_I):

$$D_I = 0,5 \times 9,59 = 4,79\text{m} \quad (14)$$

3.3.2. Seção Livre de Passagem da Água pela Turbina

$$A = \frac{\pi(9,59^2 - 4,79^2)}{4} = 54,21\text{m}^2 \quad (15)$$

3.3.3. Velocidade Média de Saída

$$v_m = v_e = \frac{462}{54,21} = 8,52\text{m/s} \quad (16)$$

3.3.4. Dimensionamento das Pás

- Número de Pás

$H = 23\text{m}$, logo $z = 5$ pás

- Passo entre as pás medida no raio médio t :

$$t = \frac{\left(\frac{\pi(9,59+4,79)}{2}\right)}{5} = 4,52\text{m} \quad (17)$$

- Comprimento das pás (corda):

$$l = 1,2 \cdot 4,52 = 5,07\text{m} \quad (18)$$

Onde λ é o ao fator de relação entre a rotação específica e o comprimento

$$\lambda = \frac{78}{579,432^{2/3}} = 1,12 \quad (19)$$

3.3.5. Velocidade Periférica Média

$$u = \frac{\pi \cdot 7,19 \cdot 78}{60} = 29,36\text{m/s} \quad (20)$$

3.3.6. Rendimento Hidráulico

$$\eta_T = \frac{75 \cdot 140000}{1000 \cdot 462 \cdot 23} = 0,99 \quad (21)$$

3.3.7. Velocidade Periférica Absoluta

$$v_{u1} = \frac{0,99 \cdot 9,81 \cdot 23}{29,36} = 7,59 \text{m/s} \quad (22)$$

3.3.8. Ângulo de Incidência

$$\tan\beta = \frac{8,52}{29,36 \left(\frac{7,59}{2}\right)} = 0,076 \text{ rad} = 4,37^\circ \quad (23)$$

3.3.9. Velocidade Relativa

$$\omega_\infty = \sqrt{\left(29,36 - \frac{7,59}{2}\right)^2 + 8,52^2} = 29,95 \text{m/s} \quad (24)$$

3.3.10. Coeficiente de Sustentação

- Grade

$$Ca_{\text{grade}} = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 4,52 \cdot 0,99}{5,07 \cdot 6,12 \cdot 6,24 \left(1 - \frac{0,05}{0,076}\right)} = 1,33 \quad (25)$$

Em que u_1 é

$$u_1 = \frac{29,36}{\sqrt{23}} = 6,12 \text{m/s} \quad (26)$$

E $\omega_{1\infty}$ é

$$\omega_{1\infty} = \frac{29,95}{\sqrt{23}} = 6,24 \text{m/s} \quad (27)$$

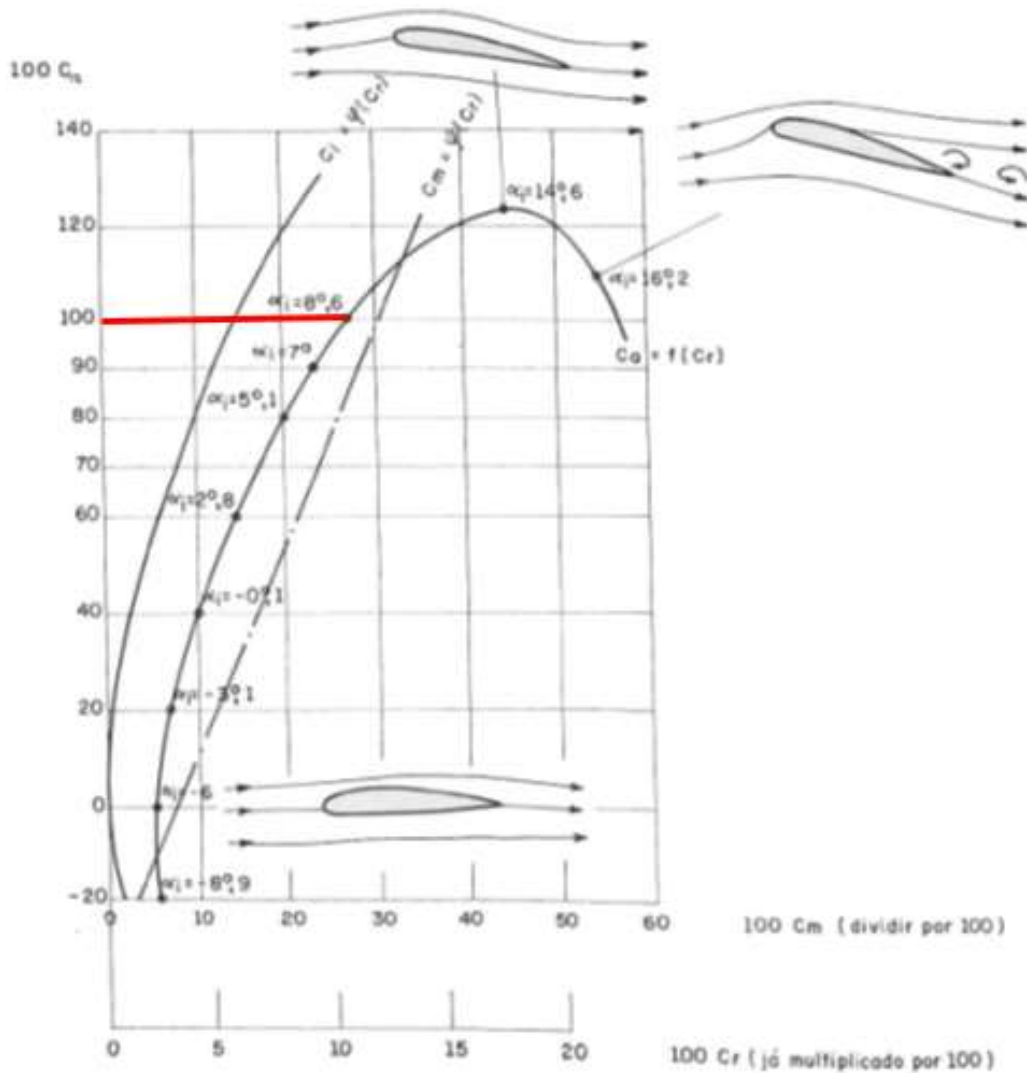
- Isolada

$$Ca_{\text{isolada}} = \frac{1,33}{1,2} = 1,10 \quad (28)$$

3.3.11. Ângulo de Perfil

O ângulo de perfil é

$$\beta_p = 8,6 + 4,37 = 12,97^\circ \quad (29)$$



5. CONCLUSÃO

O presente estudo apresentou os dados de projeto característicos da usina hidrelétrica de Jupia como vazão, altura de queda, potência e rotação da turbina. A seleção da turbina foi feita com base em gráfico que relaciona a altura de queda com a rotação específica, determinado assim que a turbina mais apropriada para a usina é a Kaplan, o que condiz exatamente com tipo de turbina utilizada em Jupia. O rotor da turbina foi

dimensionado, analisando os parâmetros calculados visando a maior eficiência para a turbina.

O estudo do comportamento da turbina teve por objetivo a análise do desempenho de velocidade, potência e rendimento. Os resultados obtidos são extremamente satisfatórios uma vez que condizem simultaneamente com a literatura e a realidade. Por fim, concluí-se que a escolha da turbina e o dimensionamento do rotor foram feitos com êxito uma vez que condizem com características reais da usina hidrelétrica de Jupia.

6. REFERÊNCIAS

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). <<http://www.aneel.gov.br/>>, Acesso em: 19 de Maio de 2019.

GOMES, Carla da Gama S. Noções de geração de energia utilizando algumas fontes de baixo impacto ambiental. 2010. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MACINTYRE, A. J., Máquinas Motrizes Hidráulicas. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1983.

ROCHA, Gislaine Barbosa. Construção de uma Bancada de Teste de Turbina Kaplan no Laboratório de Termociências de FGA. 2015. 27p. Monografia (Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

TAKATSUKA, Jessica Pereira. Projeto de Acoplamento de um Gerador Síncrono em Turbinas Hidráulicas. 2016. 55p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

CAPÍTULO III: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUENO, Alexandre. **Estudo do Comportamento de Materiais e Efeitos de Parâmetros de Processo para Aumento de Vida Útil de Turbinas Hidráulicas Tipo Francis**. 2017. 140p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade São Paulo, São Paulo, 2017.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. 2.ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

COSTA, A. S. **Turbinas Hidráulicas e Conduitos Forçados**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

DALTRO, Alexandre Brandão Veras; RODRIGUES, Alexandre Navarro Costa. **Simulação do procedimento de partida de uma turbina a gás operando em ciclo simples**. 2013. 76p. Monografia (Curso de Engenharia de Controle e Automação) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

GATTO, Bruno Batista. **Panorama do Setor Elétrico Brasileiro e Maior Inserção de Formas Renováveis de Geração de Energia no País**. 2010. 34p. Monografia (Engenharia Elétrica – com ênfase em Sistema de Energia e Automação) Escola de engenharia de São Paulo, da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

JUSTINO, Lucimary Aparecida. **Estudo de Procedimentos de Ensaios de Campo em Turbinas Hidráulicas para PCH**. 2006. 158p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2006.

MÜLLER, A. C. **Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C.; RAMADAN, B. H.; **Mecânica dos Fluidos**. 4.ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

ROCHA, Gislaine Barbosa. Construção de uma Bancada de Teste de Turbina Kaplan no Laboratório de Termociências de FGA. 2015. 27p. Monografia (Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SAWMAYS, Carlos Alberto; SUCEK, Elton Massaneiro, QUEIROZ, Mauro Henrique Brito. Estudo de Implantação de uma Central Hidrelétrica de Pequeno Porte na Área Urbana de Ponta Grossa/ PR. 2004. 117p. Monografia (Engenharia Industrial Elétrica – com ênfase em Eletrotécnica) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2004.

SILVA FILHO, D.; CARNEIRO, A. A. F. M. Dimensionamento Evolutivo de Usinas Hidroelétricas. Sba: Controle & Automação. Campinas, v.15, n.4, dez.2004.

SILVA, Ellyson Barros.; Estudo da Evolução do Sistema Elétrico Nacional a partir do Crescimento Urbano no Brasil, os Sistemas Alternativos de Energia e seus Impactos Ambientais, um caso Especial: Londrina. 2008. 74p. Monografia (Geografia) – Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 2008.

SLOMPO, Caio César Vieira; KLOSTERMANN, Reinaldo Zanello. Estudo de Parâmetros Operacionais par Otimização da Operação Energética de PCHs. 2012. 76p. Monografia (Engenharia Industrial Elétrica – com ênfase em Eletrotécnica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SOARES JUNIOR, Ricardo Luiz. Projeto Conceitual de uma Turbina Hidráulica Externa de Henry Borden. 2013. 63p. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

TAVARES, Ina Tayane Barbosa. A Influência de Difusor na Eficiência de uma Turbina Hidráulica. 2014. 45p. Monografia (Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

TIAGO FILHO, G. L., et al. Pequenos Aproveitamentos Hidrelétricos – Soluções Energéticas para a Amazônia. 1.ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

WACHHOLZ, F. Alterações Espectrais nas Imagens de Satélite nos Reservatórios das Usinas Hidrelétricas Caçu e Barra dos Coqueiros – GO. **Revista GEONORTE, edição especial.** Goiás, v.2, n.4, p.1170-1179, 2012.