



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE GOIÁS

CAMPUS ITUMBIARA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

REIDNER RODRIGUES MEDEIROS

**ESTUDO SOBRE TURBINAS HIDRÁULICAS PELTON
COM EXERCÍCIO DE ANÁLISE EM CORRENTE CONTÍNUA
EM UMA TURBINA DIDÁTICA PELTON**

ITUMBIARA

MARÇO/2025



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Reidner Rodrigues Medeiros

Matrícula: 20132040070178

Título do Trabalho: Estudo sobre turbinas hidráulicas Pelton com exercício de análise em corrente contínua em uma turbina didática Pelton.

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 07/04/2025.

Local

Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

REIDNER RODRIGUES MEDEIROS

**ESTUDO SOBRE TURBINAS HIDRÁULICAS PELTON
COM EXERCÍCIO DE ANÁLISE EM CORRENTE CONTÍNUA
EM UMA TURBINA DIDÁTICA PELTON**

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Elétrica apresentado à coordenação de Engenharias do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli

ITUMBIARA

MARÇO/2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M488 Medeiros, Reidner Rodrigues
 Estudo sobre turbinas hidráulicas pelton com exercício de
 análise em corrente contínua em uma turbina didática Pelton. --
 Itumbiara, 2025.
 62 p. : il.

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia
 Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
 de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2025.

 Orientador: Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli.

 1.Turbinas hidráulicas. 2.Eletricidade. 3.Sistemas de energia
 elétrica. I. Título. II. Medeiros, Reidner Rodrigues. III.
 Bernardeli, Victor Régis. IV. Instituto Federal de Educação,
 Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.4

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Marla de Souza Correia CRB-1/3011



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

Reidner Rodrigues Medeiros

ESTUDO SOBRE TURBINAS HIDRÁULICAS PELTON COM EXERCÍCIO DE ANÁLISE EM CORRENTE CONTÍNUA EM UMA TURBINA DIDÁTICA PELTON

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 13 de Março de 2025, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. DSc. Victor Régis Bernardeli - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. DSc. Jucélio Costa Araújo - Membro interno

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Profa. DSc. Diogo Soares Resende - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Documento assinado eletronicamente por:

- Jucelio Costa de Araujo, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/03/2025 16:39:25.
- Diogo Soares Resende, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/03/2025 16:31:09.
- Victor Regis Bernardeli, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/03/2025 07:36:59.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 13/03/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 626836

Código de Autenticação: 3192f733e6



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

Dedicatória

Dedico esse trabalho aos meus pais, Elenice e Luzimar.

Agradecimentos

Agradeço à Deus, por ter me proporcionado chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais, Luzimar da Silva Medeiros e Elenice Aparecida Rodrigues, por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais que foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço ao Professor Victor Régis Bernardeli, meu orientador que me proporcionou a oportunidade de não apenas adquirir conhecimento, como também me deu todo o suporte necessário para que eu pudesse prosseguir no curso.

Agradeço a todos meus amigos que compartilharam bons momentos e estiveram juntos comigo nesta caminhada da graduação.

Em geral, agradeço a todos os professores com quem tive a oportunidade de aprender e aos servidores do Instituto Federal de Goiás – Câmpus Itumbiara.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charlie Chaplin.

RESUMO

Desempenhando um papel essencial na conversão de energia potencial da água em energia mecânica, as turbinas são amplamente utilizadas na geração de eletricidade em usinas hidrelétricas. Entre os diversos tipos de turbinas hidráulicas, as turbinas Pelton se destacam por serem projetadas especificamente para operar em altas quedas d'água e baixos fluxos. Este trabalho teve como objetivo explorar as características, funcionamento, aplicações e vantagens das turbinas Pelton. A parte teórica do trabalho foi realizada através de pesquisas e análise de documentos, registros e outras fontes e para a parte prática, foi utilizada a turbina didática Pelton disponível no laboratório de fontes renováveis. Portanto, o exercício prático consistiu em traçar a curva de potência por velocidade da turbina didática Pelton e medir os valores de tensão, corrente, e potência fornecidos pela turbina que alimentou as baterias e as cargas também disponíveis no laboratório juntamente com todos os instrumentos necessários para realizar tal análise. Os resultados demonstraram a importância do controle preciso da vazão e da velocidade para otimizar a geração de energia, destacando a aplicabilidade desse tipo de turbina em sistemas de pequeno e grande porte.

Palavras-chave: Turbinas hidráulicas, Turbina didática, Pelton.

ABSTRACT

Playing an essential role in converting water's potential energy into mechanical energy, turbines are widely used in generating electricity in hydroelectric plants. Among the various types of hydraulic turbines, Pelton turbines stand out because they are specifically designed to operate at high water heads and low flows. This work aimed to explore the characteristics, operation, applications and advantages of Pelton turbines, demonstrating their relevance in generating sustainable energy. The theoretical part of the work was carried out through research and analysis of documents, records and other sources, and for the practical part, the Pelton teaching turbine available in the renewable sources laboratory was used. Therefore, the practical exercise consisted of plotting the power-speed curve of the Pelton teaching turbine and measuring the voltage, current and power values provided by the turbine that fed the batteries and loads also available in the laboratory together with all the instruments necessary to perform such analysis. The results demonstrated the importance of precise control of flow and speed to optimize energy generation, highlighting the applicability of this type of turbine in small and large systems.

Keywords: Hydraulic turbines, Pelton, Didactic turbines.

LISTA DE FIGURAS

Fig.1: Exemplo de curva de demanda diária	21
Fig.2: Funcionamento do distribuidor de uma turbina Francis	27
Fig.3: Corte longitudinal de uma turbina Francis.....	27
Fig.4: Esquema de instalação de uma turbina Kaplan.....	28
Fig.5: Rotor Pelton com bocal injetor	30
Fig.6: Principais componentes de uma turbina Pelton	31
Fig.7: Diagrama das Velocidades na Pá da Turbina de Pelton	31
Fig.8: Turbina Pelton de dois Jatos.....	32
Fig.9: Gráfico número de jatos	33
Fig.10: Pá de turbina Pelton	37
Fig.11: Representação de uma pá de turbina de Pelton.....	38
Fig.12: Bico injetor de uma turbina Pelton	39
Fig.13: Agulha e ponta do bocal de um bico injetor.....	41
Fig.14: Vazão e velocidade	42
Fig.15: Eficiência e velocidade	42
Fig.16: Potência e velocidade	43
Fig.17: Triângulo de velocidades	44
Fig.18: Imagem da barragem de Luzzzone	46
Fig.19: A barragem Grande Dixence, com 285 metros de altura, no oeste da Suíça.....	46
Fig.20: Vista aérea da usina de Henry Borden	47
Fig.21: Controlador de Carga Hídrica – MPPT.....	50
Fig.22: IHM – Interface Homem Máquina.....	51
Fig.23: Bateria 12 Vcc Estacionária	51
Fig.24: Carga AC/DC – 12V/50W	51
Fig.25: Alimentação e proteção.....	52
Fig.26: Fonte de 24Vcc	52
Fig.27: Turbina Pelton.....	53
Fig.28: Conexão entre os módulos de alimentação, fonte 24Vcc e IHM.....	53
Fig.29: Baterias 12Vcc ligadas em paralelo que foram conectadas ao controlador de carga...	54
Fig.30: Turbina didática Pelton conectada ao controlador de carga.....	54
Fig.31: Tela do IHM referente ao sistema hídrico	55
Fig.32: Gráfico de potência por velocidade.....	56

Fig.33: Baterias ligadas em paralelo e carga de 50 Watts que foi conectada ao controlador de carga.....	56
Fig.34: Diagrama das conexões no controlador de carga.....	57
Fig.35: Legenda de cores dos gráficos	57
Fig.36: Gráfico da tensão, corrente e potência do gerador.....	58
Fig.37: Gráfico da tensão, corrente e potência das baterias	59
Fig.38: Gráfico da tensão, corrente e potência da carga.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de turbinas para seleção	23
Tabela 2: Dimensões principais	38
Tabela 3: Diferença de altura	39
Tabela 4: Instalações com turbinas Pelton.....	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 HISTÓRICO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS	16
2.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS	17
2.2.1 Generalidades	19
2.2.2 Potência Média	20
2.2.3 Capacidade instalada, fator de capacidade e curva de demanda	20
2.2.4. Seleção da turbina.....	21
2.2.5 Turbina unidade e velocidade específica	22
2.3 CLASSIFICAÇÃO E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO.....	24
2.3.1 Turbinas de reação	24
2.3.2 Turbinas de Ação	25
2.4. TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS.....	25
2.4.1 Turbinas Francis	25
2.4.2 Turbinas Kaplan.....	28
2.4.3 Turbinas Pelton.....	29
2.4.3.1 Estrutura e construção	30
2.4.3.2 Determinação do número de jatos	32
2.4.3.3 Velocidade do jato	34
2.4.3.4 Diâmetro máximo do jato	34
2.4.3.5 Roda.....	35
2.4.3.6 Velocidade periférica da roda	35
2.4.3.7 Diâmetro da roda	35
2.4.3.8. Número aproximado de pás	36
2.4.3.9 Dimensões da pá.....	36
2.4.3.10 Curvas características das Turbinas Pelton.....	42
2.4.3.11 Cavitação	43
2.4.3.12 Triângulo de velocidades	43
2.4.3.13 Principais exemplos da aplicação de turbinas Pelton	45
2.4.3.13. Principais vantagens da turbina Pelton	47
2.4.3.14 Principais desvantagens da turbina Pelton	47

3 TESTES PRÁTICOS COM A TURBINA DIDÁTICA PELTON.....	50
3.1 Instrumentos utilizados.....	50
3.2 Metodologia e resultados.....	53
4 CONCLUSÃO.....	60
5 REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O estudo sobre turbinas hidráulicas é essencial devido ao papel fundamental que essas máquinas desempenham na geração de energia limpa e renovável. Em um cenário global de crescente demanda energética e necessidade urgente de reduzir as emissões de carbono, a energia hidrelétrica se destaca como uma das fontes mais sustentáveis e eficazes para a produção de eletricidade em larga escala (RAMOS; SILVA, 2009).

As turbinas hidráulicas, ao converterem a energia da água em movimento em energia mecânica e, posteriormente, em eletricidade, viabilizam o funcionamento das usinas hidrelétricas, que fornecem uma parcela significativa da matriz energética de muitos países. A energia hidráulica é uma das fontes mais limpas e renováveis, pois utiliza o ciclo natural da água, sendo uma alternativa fundamental para a redução de emissões de carbono (SOUZA; ZULCY, 1991).

Desempenhando um papel essencial na conversão de energia potencial da água em energia mecânica, as turbinas são amplamente utilizadas na geração de eletricidade em usinas hidrelétricas. Diferentes tipos de turbinas são projetados para operar em diversas condições de queda d'água e vazão, adaptando-se às necessidades específicas de cada sistema (MAIOR, 2014).

Entender o funcionamento, as características e as aplicações específicas de cada tipo de turbina hidráulica, como as turbinas Pelton, Francis e Kaplan, é crucial para otimizar o aproveitamento dos recursos hídricos, reduzir os custos de manutenção e aumentar a eficiência energética. Além disso, o estudo sobre turbinas hidráulicas contribui para o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas, ajudando a minimizar impactos ambientais, como a construção de estruturas que respeitam os ecossistemas locais. Dessa forma, aprofundar o conhecimento em turbinas hidráulicas é fundamental para garantir o uso racional dos recursos naturais e promover a sustentabilidade energética para as próximas gerações (SCHREIBER, 1997).

Existem diversos tipos de turbinas hidráulicas, cada uma adequada a condições específicas de pressão e vazão de água. Entre os tipos mais comuns estão as turbinas Pelton, Francis e Kaplan. As turbinas Pelton, por exemplo, são ideais para locais com quedas d'água elevadas e baixo volume de água, enquanto as turbinas Kaplan se adaptam a grandes volumes de água com baixas quedas. As turbinas Francis são versáteis e usadas em situações intermediárias, com altura e vazão moderadas (RAMOS; SILVA, 2009).

Além de seu papel energético, turbinas hidráulicas representam um avanço na engenharia hidráulica e são parte crucial das infraestruturas de energia de muitos países,

destacando-se pela eficiência, confiabilidade e capacidade de geração contínua (SOUZA; ZULCY, 1991).

Entre os diversos tipos de turbinas hidráulicas, as turbinas Pelton se destacam por serem projetadas especificamente para operar em altas quedas d'água e baixos fluxos. Inventadas no século XIX, essas turbinas representam um marco na evolução da tecnologia hidrelétrica, sendo amplamente utilizadas em usinas onde o desnível topográfico é acentuado (SOUZA; ZULCY, 1991).

Este trabalho tem como objetivo explorar as características, funcionamento, aplicações e vantagens das turbinas Pelton, demonstrando sua relevância na geração de energia sustentável.

A parte teórica do trabalho será realizada através de pesquisas e análise de documentos, registros e outras fontes relevantes que abordam o assunto turbinas hidráulicas, como por exemplo, livros, artigos acadêmicos, teses, trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado, etc. Todos os dados coletados através da pesquisa serão filtrados e dissertados no corpo do trabalho de maneira que sejam relevantes para a área de estudo das turbinas Pelton.

Quanto à parte prática, será utilizada a turbina didática Pelton disponível no laboratório de fontes renováveis do IFG Câmpus Itumbiara. Portanto o exercício prático irá consistir em traçar a curva de potência por velocidade da turbina didática Pelton e medir os valores de tensão, corrente, e potência fornecidos pela turbina que alimentará as baterias e as cargas também disponíveis no laboratório juntamente com todos os instrumentos necessários para realizar tal análise.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS

As turbinas hidráulicas desempenharam um papel crucial no desenvolvimento energético mundial, sendo uma das principais tecnologias para a conversão de energia hidráulica em energia mecânica e elétrica. Os primeiros usos da energia hidráulica foram na antiguidade, antes das turbinas, a energia hidráulica era utilizada em rodas d'água para moer grãos, serrar madeira e bombear água. Exemplos incluem o uso na Mesopotâmia, China e Império Romano. (REYNOLDS, 1983).

Na Idade Média rodas d'água tornaram-se comuns na Europa, especialmente em moinhos e forjas, aproveitando a energia de rios e córregos. No século XVIII durante a Revolução Industrial, a necessidade de melhorar a eficiência energética incentivou o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas e em 1750, Bernard Forest de Bélidor, um engenheiro francês, introduziu conceitos de design de turbinas em seu tratado *Architecture Hydraulique*. (BÉLIDOR, 2015).

No século XIX, mais precisamente em 1827 Benoît Fourneyron, também francês, projetou uma das primeiras turbinas hidráulicas de alta eficiência, com um design que permitia aproveitamento mais eficaz da energia da água (ROUSE & INCE, 2011). E somente em 1849, o engenheiro britânico-americano James B. Francis desenvolveu a turbina Francis, uma turbina de reação que permanece amplamente utilizada até hoje.

A expansão da hidrelétrica como fonte de energia ganhou força com a invenção do gerador elétrico por Michael Faraday e as contribuições de cientistas como Thomas Edison e Nikola Tesla, as turbinas hidráulicas começaram a ser usadas para gerar eletricidade (HUGHES, 2006).

Em 1882, foi inaugurada a primeira usina hidrelétrica do mundo, em Appleton, Wisconsin (EUA), utilizando turbinas para gerar eletricidade para iluminação pública. No início do século XX grandes barragens começaram a ser construídas em várias partes do mundo, como a Hoover Dam (EUA) na década de 1930, integrando turbinas hidráulicas de alta capacidade. No período pós-guerra e onde a industrialização voltava a se expandir, países em desenvolvimento começaram a investir em infraestrutura hidrelétrica, aproveitando rios e grandes bacias hidrográficas. As turbinas Kaplan (projetadas em 1913 por Viktor Kaplan), ideais para fluxos de água com baixa queda, contribuíram para diversificar o uso da energia hidráulica. E na Segunda metade do século XX, projetos massivos em países como Brasil,

China e Canadá consolidaram a energia hidrelétrica como uma das principais fontes renováveis (SMIL, 2017).

Quanto ao que se refere as turbinas Pelton, elas foram desenvolvidas por Lester Allan Pelton em 1879, na Califórnia, Estados Unidos. Sua invenção surgiu como uma solução para melhorar a eficiência na conversão de energia hidráulica em locais com grandes desníveis, onde as turbinas convencionais enfrentavam dificuldades. O diferencial dessa tecnologia foi o projeto do rotor em forma de concha bipartida, que permitia uma captação mais eficiente da energia contida nos jatos de água. Com o passar dos anos, o projeto original foi aprimorado, consolidando a turbina Pelton como uma das mais confiáveis e eficientes para quedas d'água elevadas. Sua aplicação ajudou a expandir a geração de energia hidrelétrica em regiões montanhosas ao redor do mundo (HUGHES, 2006).

O estado da arte das turbinas Pelton abrange inovações recentes e avanços tecnológicos para melhorar a eficiência, durabilidade e desempenho dessas turbinas em aplicações hidroelétricas. As turbinas Pelton continuam a ser uma escolha preferida para usinas hidrelétricas em regiões montanhosas ou em locais com grandes quedas d'água e fluxos moderados (HUGHES, 2006).

2.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS

As turbinas hidráulicas desempenham um papel essencial na conversão de energia potencial da água em energia mecânica, sendo amplamente utilizadas na geração de eletricidade em usinas hidroelétricas. Diferentes tipos de turbinas são projetados para operar em diversas condições de queda d'água e vazão, adaptando-se às necessidades específicas de cada sistema (REIS, 2013).

As turbinas hidráulicas são dispositivos fundamentais na geração de energia elétrica em usinas hidrelétricas. Elas transformam a energia potencial da água armazenada em reservatórios ou quedas naturais em energia mecânica, posteriormente convertida em energia elétrica por meio de geradores. Existem diversos tipos de turbinas hidráulicas, cada uma projetada para operar em condições específicas de queda d'água e vazão, otimizando a eficiência do sistema (GUTIERREZ; MASTACHE, 2013).

As turbinas podem ser classificadas em dois tipos principais: turbinas de ação e turbinas de reação. As turbinas de ação, como a Pelton, utilizam a velocidade do jato d'água para impulsionar pás ou côncavos montados em um rotor, convertendo a energia cinética da

água em energia mecânica. Esse tipo de turbina é ideal para locais com grandes desníveis e vazões reduzidas. Já as turbinas de reação, como a Francis e a Kaplan, utilizam tanto a pressão quanto a velocidade da água para gerar rotação no rotor. Elas são mais adequadas para quedas menores e grandes vazões, sendo amplamente utilizadas em usinas de grande porte (CLEMENTINO, 2015).

As turbinas hidráulicas instaladas numa central hidroelétrica permitem a conversão da energia do escoamento em energia mecânica de rotação, a qual irá ser convertida, num gerador, em energia elétrica (BARBOSA, 2013).

A conversão energética nas turbinas é baseada nos princípios da conservação da energia e da quantidade de movimento angular. Há a transferência da quantidade de movimento da água para o rotor sob a forma de binário e velocidade de rotação, sendo que as pás do rotor possuem perfil hidráulico que potencializa a transferência de energia (LOPES, 2011).

De acordo com Gonçalves (2007), em todos os tipos de turbo-geradores há princípios de funcionamento comuns. No início do processo de conversão de energia hidráulica em mecânica a água entra pela tomada de água, a montante da central hidroelétrica que se encontra num nível mais elevado. Em seguida a água é levada através de um conduto forçado até à entrada da turbina.

Na entrada da turbina a água passa por um sistema de palhetas que controla o caudal volumétrico fornecido à turbina, regulando assim a potência disponível para realizar trabalho no eixo da turbina. É de salientar que nas turbinas Pelton não há um sistema de palhetas, mas sim um bico injetor com uma agulha que controla o caudal que chega ao rotor. Em seguida, a água chega ao rotor da turbina e por transferência de quantidade de movimento parte da energia potencial do fluido é transferida para o rotor sob a forma de binário e velocidade de rotação. Mais uma vez, nas turbinas Pelton há uma diferença já que a maior parte da energia de pressão é convertida em energia cinética no bico injetor enquanto uma pequena percentagem desta energia é perdida sob a forma de atrito, calor e ruído (BARBOSA, 2013).

A energia elétrica numa central hidroelétrica é gerada pelo produto do binário com a velocidade de rotação do eixo da turbina. Acoplado a este, um gerador síncrono de polos salientes cria um campo eletromagnético e consequentemente, energia elétrica, que depois é disponibilizada na rede elétrica (LOPES, 2011). Após passar pelo rotor, a água é conduzida pelo tubo de descarga até à parte a jusante do rio que se encontra no nível mais baixo.

Conforme Junior (2013) e Gonçalves (2007) existe uma série de características transversais a todos os tipos de turbinas hidráulicas, como por exemplo:

- A água é proveniente de um reservatório num nível mais alto e flui para a turbina que se encontra num nível mais baixo;
- A água é conduzida por um conduto fechado até um conjunto de palhetas ou injetores que transferem a energia mecânica (energia de pressão e cinética) do escoamento de água em potência ao eixo;
- A pressão e a velocidade da água na saída são inferiores aos respetivos valores na entrada da turbina;
- As principais causas da diminuição do rendimento são as perdas mecânicas e hidráulicas (JÚNIOR; GONÇALVES, 2013, p.53).

Apesar das respetivas diferenças entre os diversos tipos de turbinas hidráulicas existentes, existem alguns componentes essenciais comuns, tais como:

- Distribuidor – direciona o escoamento de água ao rotor segundo a direção que não só otimiza a energia transmitida como também minimiza as perdas de carga;
- Rotor – é um órgão móvel que gira em torno do seu eixo onde estão acopladas as pás que convertem a energia hidráulica em mecânica;
- Tubo de sucção – recupera a energia cinética residual na saída do rotor e a energia potencial entre a saída do rotor e o nível do canal de fuga;
- Carcaça – conduz a água do conduto fechado até o distribuidor (JÚNIOR; GONÇALVES, 2013, p.53).

Atualmente, as turbinas hidráulicas desempenham um papel fundamental na matriz energética mundial, fornecendo energia limpa e renovável. O aproveitamento hidrelétrico é considerado uma das fontes mais sustentáveis de energia, pois não emite gases de efeito estufa e possui baixa necessidade de manutenção quando comparado a outras formas de geração. No entanto, desafios como impactos ambientais, deslocamento de populações e variações no regime hídrico exigem planejamento adequado para garantir a sustentabilidade desse tipo de geração (CLEMENTINO, 2015).

2.2.1 Generalidades

O estudo sobre turbinas hidráulicas para geração de energia depende de características, como altura de queda d'água e vazão do aproveitamento hidrelétrico onde a turbina hidráulica será instalada. Essas características são importantes, pois com elas é possível selecionar corretamente a turbina mais apropriada para utilização. Para o dimensionamento e seleção do tipo mais adequado de turbina é necessário seguir algumas etapas de estudo inicial.

Os estudos iniciais para o dimensionamento adequado de uma turbina, dizem respeito ao histórico hidrológico do lugar o qual será instalada a turbina. Segundo Gutiérrez (2013), estes estudos iniciais são chamados de fator de planta, e os seus principais resultados são Capacidade útil mais conveniente; Geração média anual esperada; Nível mais frequente do

reservatório; Volume médio anual de precipitações; Evaporação média anual; fluxo médio aproveitado.

2.2.2 Potência Média

Segundo Gutiérrez (2013), a potência média de uma central elétrica é a razão da geração média anual pelo número de horas do ano. Dessa maneira temos:

$$P_{media\ anual} = \frac{G_{media}}{\frac{h}{ano}} \quad (1)$$

Em que:

$P_{media\ anual}$: potência média anual em quilowatts por hora (kW/h);

G_{media} : geração anual média em quilowatts (kW);

h/ano : número de horas do ano, usar 8760 horas.

Em hidráulica, a potência média pode ser expressa em função das características hidro energéticas do aproveitamento, segundo a Equação (2), onde ocorre um ajuste na equação para a potência resultar em kW/h (GUTIERREZ, 2013).

$$P_{media} = \eta \times \gamma \times Q \times H_n \times \left(\frac{9,81}{1000} \right) \quad (2)$$

Em que:

P_{media} : potência média em quilowatts por hora (kW/h);

γ : densidade volumétrica da água em quilograma por metro cúbico (kg/m³);

Q : vazão metros cúbicos por segundo (m³/s);

H_n : queda d'água bruta (m);

η : rendimento do conjunto turbo gerador, $\eta = \eta_t + \eta_g$ em %;

η_t : rendimento da turbina em %;

η_g : rendimento do gerador em %.

2.2.3 Capacidade instalada, fator de capacidade e curva de demanda.

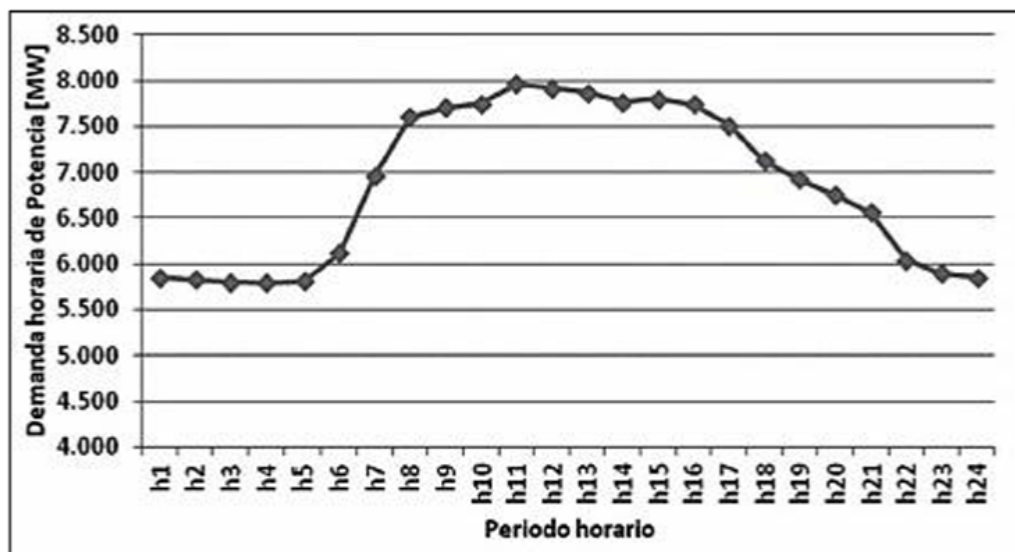
A capacidade instalada de uma usina hidrelétrica é a potência total dos geradores, operando em condições da máxima potência fornecida pelo fabricante (GUTIÉRREZ, 2013).

Define-se como fator de planta (ou de capacidade) a razão entre potência média e a capacidade instalada (GUTIÉRREZ,2013).

$$\text{Fator de capacidade} = \left(\frac{\text{potência média}}{\text{capacidade instalada}} \right) \quad (3)$$

A capacidade instalada deve ser maior do que a potência média de um sistema, pois o sistema deve ser dotado de capacidade de reserva para quando o sistema elétrico solicitar demanda maior, é utilizada a margem de capacidade para poder suprir o sistema. Essas variações que ocorrem durante o dia, com picos de maior consumo de energia elétrica e com horário de consumo menor é denominado curva de demanda. Assim, a curva de demanda pode ser entendida como a variação no consumo de energia elétrica durante o período de 24 horas do dia. Um exemplo de curva de carga está mostrado na Figura 1.

Fig. 1: Exemplo de curva de demanda diária.



Fonte: Dados da Zona Franca de Bogotá, Colômbia (JANEIRO, 2011).

2.2.4. Seleção da turbina

Uma vez que tenha determinado a capacidade instalada em um aproveitamento hidráulico e conhecendo-se o número de unidades convenientes, conforme análise de custos e estrutura do empreendimento, é necessário então calcular a potência da turbina, levando em consideração a altura da queda d'água disponível e a vazão, para assim poder calcular a potência da turbina através da Equação (4). (BÉRGAMO, 2018)

$$P_t = \frac{\text{capacidade instalada} \times K}{\text{número de unidades} \times \eta_g} \quad (4)$$

m que:

P_t : potência da turbina em quilowatts por hora (kW/h);

K : fator que depende das características de armazenamento e operação das unidades, valor entre 0,85 e 1,30;

η_g : rendimento do gerador, geralmente aproximado de 98%.

Outra forma de calcular a potência da turbina é através da Equação (5).

$$P_t = Q \times \eta_t \times \gamma \times H_d \times \left(\frac{9,81}{1000} \right) \quad (5)$$

Em que:

P_t : potência da turbina em quilowatts por hora (kW/h);

Q : vazão em metros cúbicos por segundo (m³/s);

η_t : rendimento da turbina em %;

γ : densidade volumétrica da água em quilograma por metro cúbico (kg/m³);

H_d : altura da queda d'água disponível em metro (m).

Como é possível observar na Equação (5) a vazão e a altura da queda d'água são fatores que atuam diretamente sobre a potência da turbina (BÉRGAMO, 2018).

2.2.5 Turbina unidade e velocidade específica

A turbina “unidade” de uma dada turbina, é geometricamente semelhante a essa, que sob uma queda d'água de 1 metro fornece uma potência de 1 CV funcionando em condições análogas (JÚNIOR, 2013). Logo, todas as turbinas geometricamente semelhantes e que constituem uma série de turbinas tem, portanto, a mesma turbina unidade. A série de turbinas é caracterizada pela forma de suas unidades e pelas grandezas que caracterizam o funcionamento de suas turbinas unidade as quais, essas últimas são chamadas de grandezas específicas (JÚNIOR, 2013). Se alterarmos o grau de admissão de uma turbina unidade ela perde a sua característica, ou seja, deixa de fornecer 1 CV.

Define-se então velocidade específica (N_s) como sendo um índice adimensional de projeto, que identifica a semelhança geométrica de turbinas (e 32 também de bombas). É usada para classificar os rotores de acordo com seus tipos e proporções. Turbinas de mesmo N_s , mas de tamanhos diferentes, são consideradas geometricamente semelhantes, mesmo sendo uma

turbina com tamanho múltiplo da outra. A velocidade específica é calculada no ponto de melhor eficiência da turbina com rotor de diâmetro máximo (OMEL, 2018). Ela é expressa matematicamente pela seguinte equação:

$$N_s = N \times (P_t)^{0,5} \times (H_d)^{-1,25} \quad 6$$

Em que:

N_s : velocidade específica (rpm);

N : velocidade angular de rotação (rpm);

P_t : potência da turbina em quilowatts por hora (kW/h);

H_d : altura da queda d'água disponível em metros (m).

A tabela a seguir mostra a relação entre a velocidade específica e a altura da queda d'água entre os principais tipos de turbinas hidráulicas.

Tabela 1: Tipos de turbinas para seleção

Tipo de turbinas		n_s (rpm)	H_d (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	Lenta	71-120	200-100
	Normal	121-200	100-70
	Rápida	201-300	70-25
	Super-rápida	301-450	25-15
Kaplan	8 pás	250-320	70-50
	7 pás	321-430	50-40
	6 pás	431-530	40-30
	5pás	531-620	30-20
	4 pás	621 em diante	30

Fonte: Clementino (2015)

2.3 CLASSIFICAÇÃO E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

As turbinas hidráulicas são classificadas em dois tipos principais: turbinas de ação e turbinas de reação, cada uma projetada para condições específicas.

2.3.1 Turbinas de reação

Nas turbinas de reação, a energia hidráulica da água é convertida parcialmente em pressão e parcialmente em velocidade enquanto passa pelo rotor submerso. A pressão da água age diretamente sobre as pás, gerando movimento. Esse tipo de turbina é ideal para quedas médias ou baixas e fluxos de água elevados (NOGUEIRA, 2013).

Nas turbinas de reação o rotor é completamente submerso na água. Com o escoamento da água, ocorre uma variação de pressão e de velocidade no escoamento, entre a entrada e a saída do rotor. Uma importante característica dessas turbinas, é o uso do tubo de sucção, esse tubo permite a recuperação de parte da energia cinética da água que deixa o rotor. A soma da energia cinética mais a energia de pressão na saída da turbina é menor quando há o tubo de sucção instalado. São classificadas com turbinas de reação, as turbinas Francis, Hélice e Kaplan, com suas variantes (NOGUEIRA, 2013, p.164).

Ou seja, nas turbinas de reação, a água tem a pressão variando desde a entrada da turbina até a saída, havendo a seguinte conversão de energia:

Energia mecânica $\Leftrightarrow$ Energia cinética $\Leftrightarrow$ Energia pressão.

As turbinas de reação ainda podem ser classificadas como:

- **Axial:** Quando o fluxo da água é paralelo ao eixo do motor
- **Mista ou Radial:** quando o fluxo na entrada do rotor é radial e após interagir com ele, sofre um desvio e passa a ser axial na saída.

As turbinas de ação são geralmente inadequadas para locais de baixa queda, porque tem baixas velocidades específicas, mas a manutenção é mais fácil. As turbinas de reação, por outro lado, podem girar mais rápido, dadas as mesmas condições de queda e fluxo, porém geralmente precisam de mais manutenção (NOGUEIRA, 2013).

Exemplo: Turbinas Francis e Kaplan. As turbinas Francis são usadas em quedas médias, enquanto as Kaplan, com pás ajustáveis, são mais adequadas para quedas baixas e altas vazões.

Alguns exemplos de usinas hidrelétricas que utilizam a turbina Francis são: Usina Hidrelétrica de Itumbiara, Usina Hidrelétrica de Itaipu assim como a Usina Hidrelétrica de Belo Monte, Usina hidrelétrica de Tucuruí, Usina Hidrelétrica de Furnas, Usina Hidrelétrica de Foz do Areia, AHE de Salto Pilão, Usina Xavantes e outras no Brasil funcionam com turbinas tipo Francis, com cerca de 100 m de queda de água.

Paralelamente, alguns exemplos de hidrelétricas que utilizam as turbinas Kaplan são: Usina Hidrelétrica de Três Marias, Usina Hidrelétrica Engenheiro Sergio Motta, Usina Hidrelétrica de Sinop, Usina Hidrelétrica de São Manoel, Usina Hidrelétrica Baixo Iguaçu, dentre outras.

2.3.2 Turbinas de Ação

Nas turbinas de ação, a conversão da energia da água ocorre completamente antes de atingir o rotor. A energia cinética do jato d'água é direcionada para as pás do rotor, que convertem essa energia em movimento rotacional. Esse tipo de turbina é ideal para quedas d'água altas e fluxos de água reduzidos. Exemplo: turbinas Pelton, que utilizam um jato de água de alta velocidade direcionado para conchas no rotor. Essas turbinas são amplamente utilizadas em usinas hidrelétricas localizadas em áreas montanhosas (NOGUEIRA, 2013).

2.4. TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS

2.4.1 Turbinas Francis

Em 1847, o inglês James Bicheno Francis (1815-1892), atuando nos EUA, aperfeiçoou uma máquina de escoamento centrípeta criada em 1838 por Samuel Dowd (1804-1879), resultando na denominação dessas máquinas como turbinas Francis (PINTO, 2019).

As turbinas Francis são do tipo reação, de fluxo radial e possuem tubo de sucção. Elas são construídas para apresentarem o máximo rendimento possível e dessa maneira elas apresentam quatro modelos de rotores, as lentas, as normais, as rápidas e as super-rápidas. São ideais para médias vazões e quedas. O controle da vazão é realizado no distribuidor ou sistema de pás móveis. Rigorosamente centrípetas, essas turbinas permitem o uso de tudo de sucção e

podem alcançar altos rendimentos, da ordem de 85 a 93%, sendo uma das mais utilizadas. Elas podem estar inseridas em uma caixa espiral, ou em instalações de menor porte, sem caixa espiral, em caixas cilíndricas ou em um poço de caixa aberta (PINTO, 2019).

A função do tubo de sucção é garantir a continuidade do fluxo de líquido, desde a saída do receptor até o nível da água no poço de escapamento, evitando a queda livre do líquido do receptor. Dessa forma, há um aumento da queda hidráulica e, através da conversão da energia cinética da água ao sair do receptor em energia de pressão, há um incremento na potência da turbina. Assim, o tubo de sucção cria uma depressão na saída do rotor, permitindo a recuperação não apenas da maior parte da energia cinética da água que sai do tubo, mas também a obtenção do desnível topográfico entre a saída do rotor e o nível de água no poço (SOUZA; ZULCY, 1991).

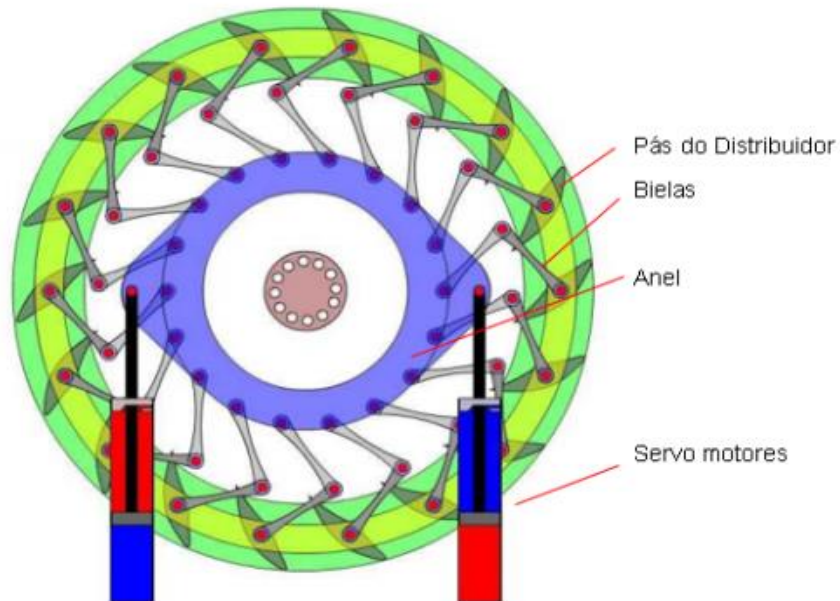
Durante seu funcionamento, uma fração da queda de pressão é registrada no sistema diretor, enquanto a outra se manifesta diretamente nas pás. A água preenche integralmente a cavidade do rotor, possibilitando a conversão de energia hidráulica em elétrica durante o fluxo do fluido (REIS, 2013).

Há um distribuidor nas turbinas Francis composto por um conjunto de pás dispostas em torno do receptor, as quais podem ser orientadas por meio de um comando especial, de modo a proporcionar, para cada valor de descarga, o ângulo mais adequado de entrada da água no receptor, ou seja, um escoamento com mínimas perdas hidráulicas (SOUZA; ZULCY, 1991).

O distribuidor das turbinas tipo Francis é constituído de um conjunto de pás dispostas em volta do receptor, e que podem ser orientadas por meio de um comando especial de modo a darem, para cada valor da descarga, o escoamento com um mínimo de perdas hidráulicas. Todas as pás possuem um eixo de rotação paralelo ao eixo da turbina e, graças a um mecanismo, chamado anel de Fink, constituído por um anel concêntrico ao distribuidor e ligado a elas por bielas, podem girar simultaneamente de um mesmo ângulo, fazendo a secção de escoamento variar de um máximo até o fechamento total (HACKER, 2012, p.71)

Em instalações com vazões maiores, costuma-se duplicar o rotor em rotores gêmeos, que operam num mesmo eixo, cada um de um lado de uma caixa cilíndrica ou em caixas espirais separadas ou unidas pela face anterior, inseridos em uma única caixa espiral. A esse tipo de arranjo, denomina-se turbina Francis gêmea (HACKER, 2012).

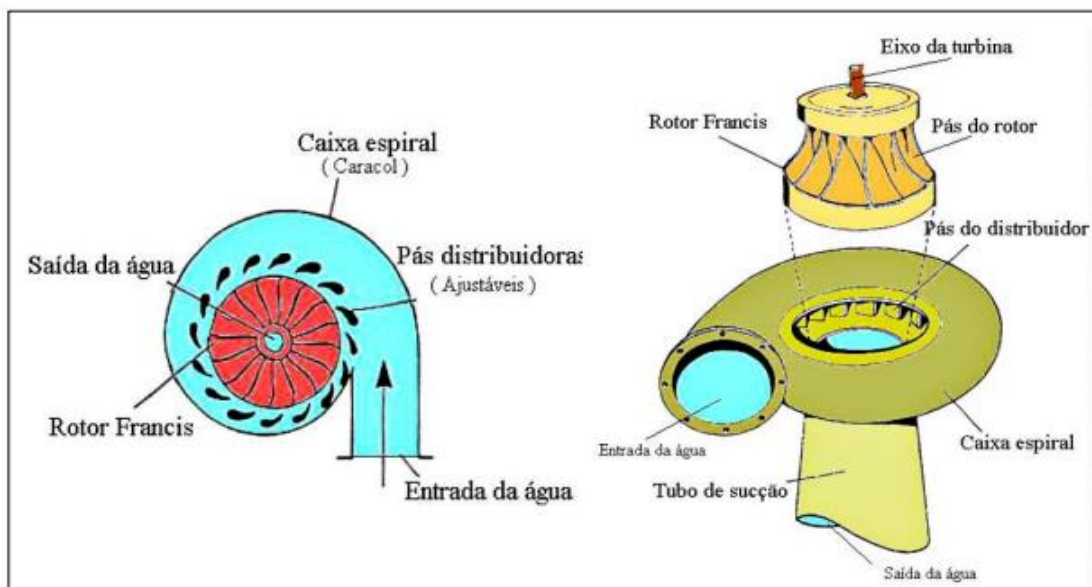
Fig. 2: Funcionamento do distribuidor de uma turbina Francis



Fonte: mhfpreditiva (2025)

A Figura 2 apresenta o funcionamento do distribuidor de uma turbina Francis, enquanto a figura 3 representa um corte longitudinal de uma turbina Francis, destacando seus principais componentes. As partes essenciais incluem: uma caixa, geralmente com formato de caracol fechado, ilustrado na Figura 3 que é substituída por uma câmara ou poço de adução no tipo aberto (MELLO JÚNIOR, 2000).

Fig.3: Corte longitudinal de uma turbina Francis



Fonte: Mello Júnior (2000).

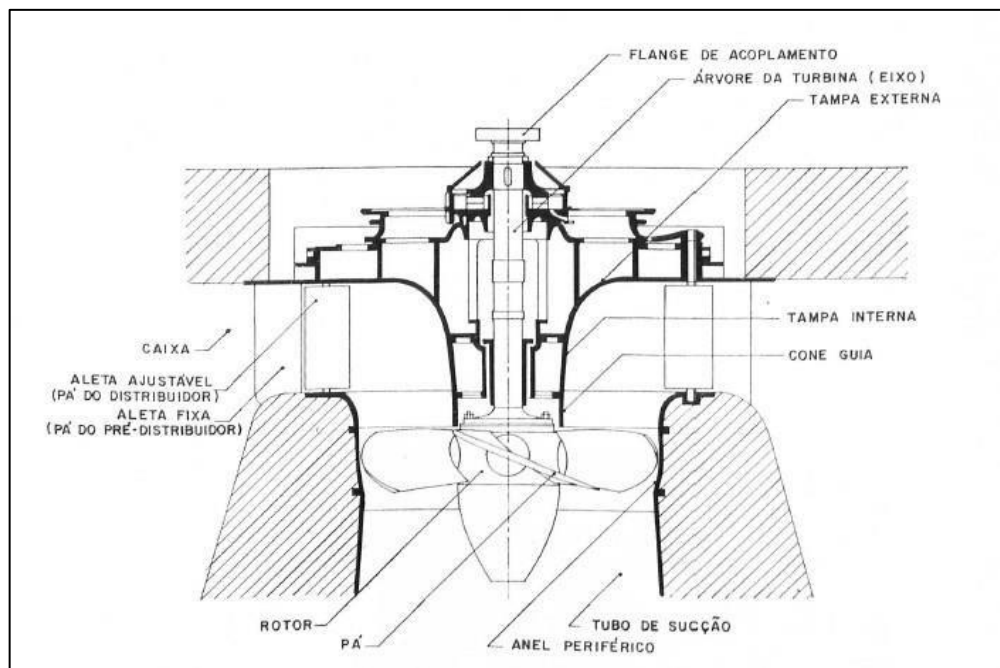
2.4.2 Turbinas Kaplan

As turbinas Kaplan foram desenvolvidas pelo engenheiro austríaco Victor Kaplan (1876-1934), que, por meio de estudos teóricos e experimentais, criou um novo modelo de turbina a partir das turbinas de hélice, com a inovação de permitir a variação do passo das pás. Assim, surgiu uma turbina de hélices com pás ajustáveis. O mecanismo que possibilita a regulação do ângulo de inclinação da pá de acordo com a descarga, sem causar uma variação significativa na eficiência, está alojado em uma peça com formato de ogiva e é controlado por um regulador automático de velocidade (MACYNTIRE, 1983).

Os principais componentes de uma turbina Kaplan são: o distribuidor, suas aletas-guias (pás) que são chamadas de diretrizes, rotor, tubo de sucção e caixa espiral. As turbinas Kaplan são adequadas para operar em baixa altura de queda e com grandes e médias vazões. As principais características das turbinas Kaplan são: pás ajustáveis, compatibilidade com grandes vazões, design axial e alta eficiência (MACYNTIRE, 1983).

As turbinas Kaplan são utilizadas principalmente em usinas hidrelétricas de rios com baixa altura de queda e grandes volumes de água, como rios de planícies. Nos exemplos de instalações estão incluídas as barragens e estações hidrelétricas em regiões de topografia plana (MACYNTIRE, 1983).

Fig. 4: Esquema de instalação de uma turbina Kaplan.



Fonte: Macyntire (1983).

2.4.3 Turbinas Pelton

Como já foi mencionado, a turbina Pelton foi desenvolvida pelo americano Allan Lester Pelton. Em 1878, ele começou a realizar experimentos relacionados a rodas d'água, o que o levou à criação de um novo tipo de roda d'água conhecido como "splitter". Assim como todas as turbinas, a Pelton é composta por um distribuidor e um rotor. O distribuidor tem um design semelhante a um bocal injetor, que direciona o fluxo de água, gerando um jato cilíndrico que atinge as pás do rotor. O rotor possui um número específico de pás, que apresentam um formato de concha, e estão fixadas na borda de um disco que gira em torno de um eixo (SANTOS, 2013).

As turbinas Pelton são classificadas como turbinas de ação, pois utilizam apenas a energia cinética da água para gerar movimento. A água, proveniente de reservatórios ou rios com grandes desníveis, é conduzida sob alta pressão por meio de condutos forçados até os injetores da turbina. Os injetores transformam a pressão da água em um jato de alta velocidade que é direcionado para as conchas (ou pás) do rotor. A forma das conchas bipartidas permite que o jato de água transfira sua energia de forma eficiente, minimizando o desperdício e revertendo o fluxo em aproximadamente 180 graus. Isso maximiza o torque no eixo da turbina, que está acoplado ao gerador elétrico.

Funcionam sob pressão atmosférica e são empregadas para aproveitamentos hidroelétricos com quedas elevadas, geralmente superiores a 200 metros e podendo chegar a aproximadamente 1200 metros, sendo, por essa razão, muito mais frequentes em nações montanhosas. Este tipo de turbina trabalha com velocidades de rotação superiores às demais, e o rotor possui características bem diferentes (GONÇALVES, 2007).

A turbina Pelton é aplicada geralmente em usina hidrelétrica com altura de queda elevada para a qual a vazão é reduzida. Este tipo de turbina é de fácil fabricação, instalação e regulação relativamente simples. A geração de energia a partir do acionamento do rotor, no caso do equipamento considerado, se dá a partir de injetores, que atuam no direcionamento dos fluxos de fluido sobre as pás do rotor (ROUSE; INCE, 2011).

Enquanto componente responsável pela distribuição do fluido, os injetores oferecem controle da velocidade da turbina através de válvulas agulha que, caracterizadas pela presença de um obturador de espessura reduzida e formato cônico, são recomendadas para situações onde se requer um controle de fluxo com maior precisão (MOSSONYI, 2011), permitindo a variação na abertura do injetor.

Contudo, é importante observar que o sistema de distribuição, constituído por esses elementos, não possibilita grandes variações de vazão, uma vez que, se isso ocorresse, o equipamento estaria suscetível ao fenômeno conhecido como “Golpe de Aríete”, caracterizado por uma onda de fluido com alta pressão que, ao colidir com as paredes dos componentes do sistema, devido à intensidade do impacto, poderia ocasionar danos (COSTA, 2013).

Fig. 5: Rotor Pelton com bocal injetor.



Fonte: Costa (2013)

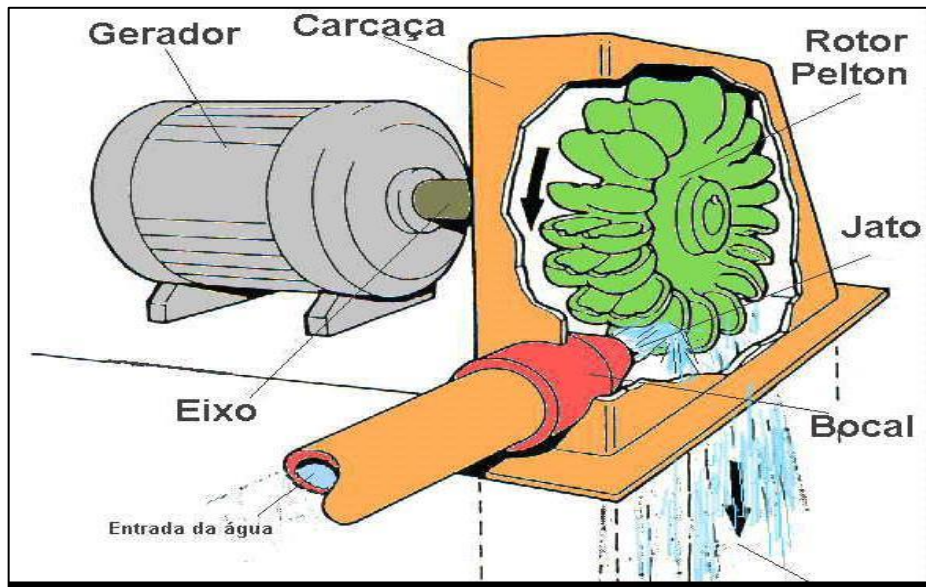
2.4.3.1 Estrutura e construção

A informação a seguir apresentada é baseada em Nogueira (2013) e Macyntire (1983).

As turbinas Pelton são compostas por vários componentes principais:

- **Rotor:** Possui conchas (ou pás) de formato característico, geralmente feitas de materiais resistentes como aço inoxidável, para suportar altas velocidades e abrasão.
- **Injetores:** Equipamentos responsáveis por direcionar o jato de água para as conchas do rotor. Podem ser ajustáveis para controlar o fluxo e a potência gerada.
- **Carcaça:** Envolve o rotor e os injetores, protegendo o sistema e conduzindo a água descarregada para o canal de fuga.
- **Eixo:** Conecta o rotor ao gerador, transmitindo o movimento rotacional.
- **Freio hidráulico:** Usado para parar o rotor quando necessário.

Fig.6: Principais componentes de uma turbina Pelton.

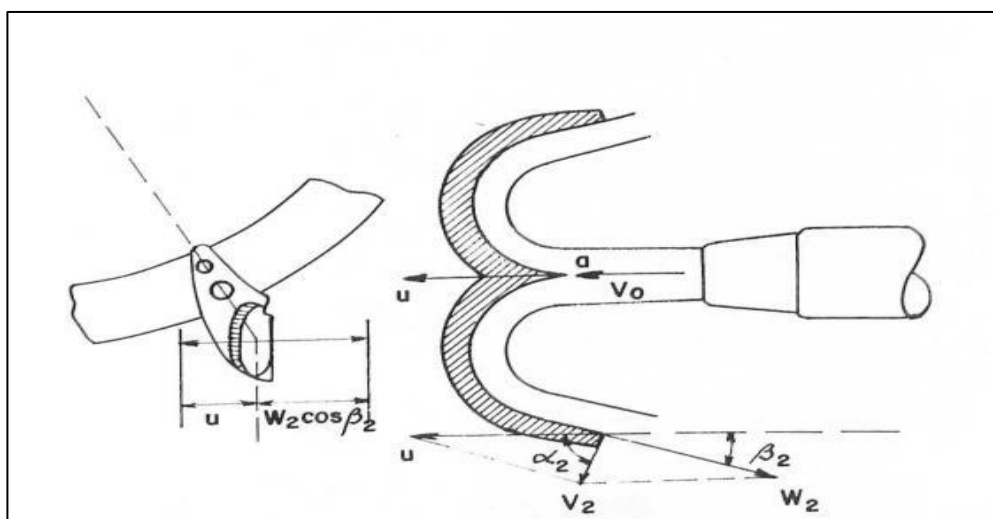


Fonte: <http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/> - Prof. Antônio Melo (Eng. Mecânica – Mackenzie)

A pá apresenta um gume médio, localizado sobre o plano médio da roda, que divide simetricamente o fluxo e o desvia para os lados. Designando U como a velocidade da pá, W_2 como a velocidade relativa da água ao deixá-la, a velocidade absoluta será V_2 , que deve ter uma direção aproximadamente paralela ao eixo da turbina e quase em ângulo de 90° com a velocidade de entrada V_0 (MACINTYRE, 1983).

Para facilitar a compreensão, a Figura 7 irá mostrar o diagrama das velocidades na pá da turbina.

Fig.7: Diagrama das Velocidades na Pá da Turbina de Pelton.



Fonte: MACINTYRE, 1983.

Onde:

a = Grau de abertura do sistema diretor de uma turbina

W = Velocidade relativa da corrente fluida

V = Velocidade absoluta

u = Velocidade da pá

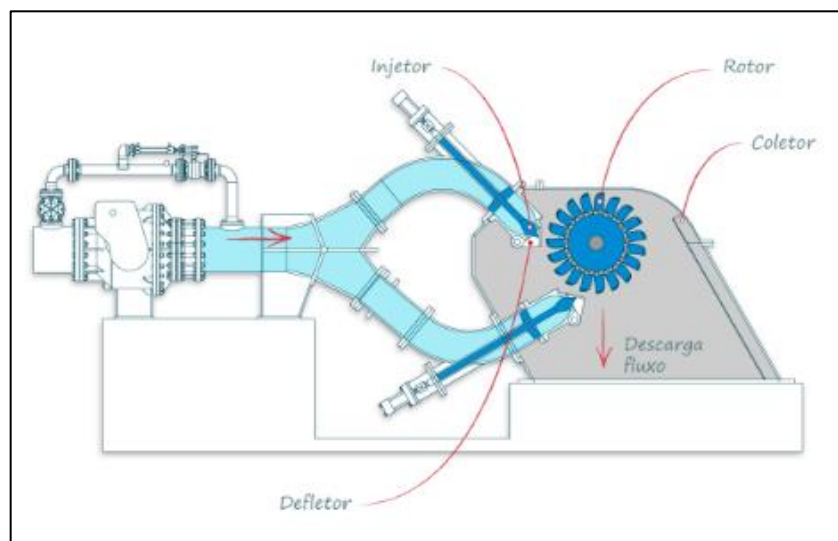
β = Ângulo que forma o sentido positivo de W com o negativo

2.4.3.2 Determinação do número de jatos

As turbinas Pelton podem ser de um, dois, quatro e seis jatos e, excepcionalmente, três. O aumento do número de jatos é devido à necessidade de se obter potências elevadas, tendo ultrapassado potência de 300 MW com turbinas Pelton de seis jatos (Macyntire, 1983). Devido à economia na instalação e acessibilidade maior da roda para inspeção e reparos que devem ser feitos quando a erosão das pás atinge um patamar acentuado, habitualmente, as turbinas Pelton são montadas com o eixo na horizontal, pois assim, não há necessidade de desmontar a turbina para realizar tais atividades, assim como não se utilizam normalmente mais do que dois jatos para alimentação.

A Figura 8 demonstrará uma turbina com apenas dois jatos.

Fig. 8: Turbina Pelton de dois Jatos.



Fonte: Hydrowheel (2024).

A frequência de jatos no rotor, a cada rotação, está relacionada à quantidade desses jatos, de modo que, quanto maior a queda, menor deverá ser a quantidade de impactos na lâmina por minuto. Da mesma forma, quanto maior o número de jatos, maior será a potência para uma mesma altura de queda e, assim, também maior será o desgaste causado por abrasão, caso a água contenha areia em suspensão (MACINTYRE, 1983).

Para estimar a quantidade correta de jatos, aplica-se a equação (1) para a definição do número de jatos, conforme indicado por Macintyre (1983).

$$a = \left(\frac{n\sqrt{N}}{25H} \right)^2 \quad (7)$$

Onde:

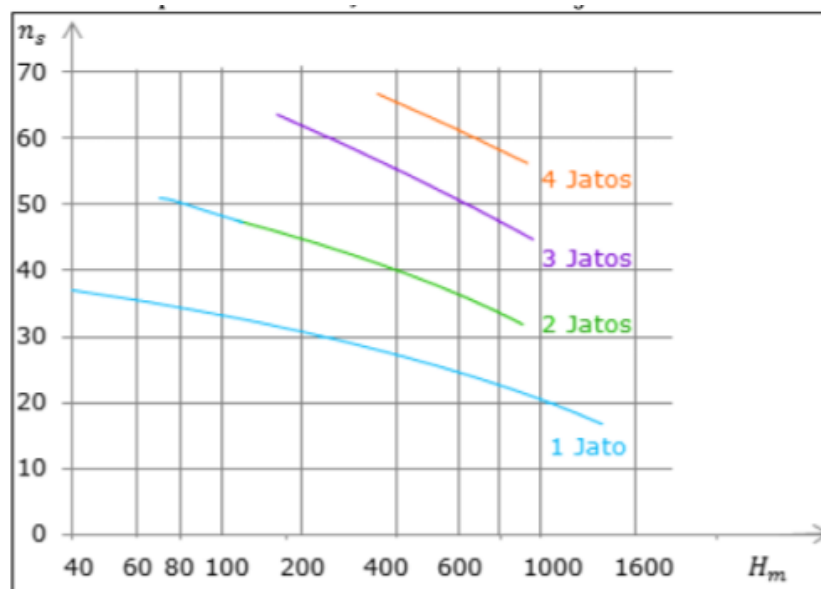
n = Rotação em (rpm);

N = Potência (cv);

H = Altura de queda (pés).

Macintyre (1983), sugere também o gráfico da Figura 9 para definir o número de jatos, que utiliza a velocidade específica.

Fig. 9: Gráfico número de jatos



Fonte: Macintyre (1983)

2.4.3.3 Velocidade do jato

O jato tem sua velocidade ($C1$) determinado a partir da saída do bocal do injetor em m/s , sendo calculada pela seguinte equação, sugerida por PFleiderer (1979):

$$C1 = \varphi \sqrt{2gH} \quad (8)$$

Onde:

φ = coeficiente de perda no injetor (0,98);

g = gravidade em (m/s^2);

H = altura (m).

2.4.3.4 Diâmetro máximo do jato

Conforme Pflleiderer (1979), o dimensionamento da lâmina é determinado exclusivamente por meio de dados empíricos e em relação ao diâmetro máximo do jato em milímetros (d_{max}), a fim de garantir que ele atenda adequadamente aos critérios operacionais executados pela lâmina, utilizamos a equação para o diâmetro máximo do jato:

$$d_{máx} = 151 \sqrt{\frac{N}{(a n)}} \quad (9)$$

Onde:

N = Potência unitária (cv);

a = Número de jatos;

n = Rendimento total da turbina.

O cálculo pode ser realizado de acordo com Macintyre (1983) com base na vazão, empregando a equação que relaciona o diâmetro máximo à vazão:

$$d_{máx} = \frac{\sqrt{4Q}}{\pi C1} \quad (10)$$

Onde:

Q = Vazão volumétrica (m^3/s);

$C1$ = Velocidade do jato na saída do injetor (m/s).

2.4.3.5 Roda

A roda da turbina, na qual as pás estão fixadas, recebe o fluxo resultante do injetor. (OST, 2013). O dimensionamento do rotor necessita do entendimento da velocidade periférica da roda (μ_2); através da equação de velocidade periférica (11), é possível determinar a velocidade apropriada para a roda.

$$\mu_2 = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{6000} \quad (11)$$

Onde:

D = Diâmetro do rotor em centímetro;

n = Rpm do motor a ser utilizado;

Onde 6000 é uma constante atingida pelo impulsor estando entre 4000 a 6000 podendo atingir uma média de velocidade equivalente ao valor de 18 a 25 m/s.

2.4.3.6 Velocidade periférica da roda

Para o dimensionamento do rotor pelton é necessário descobrir a velocidade periférica da roda, pode ser conhecida através da Equação (8) (OST, 2013).

$$u_1 = k_u \sqrt{2gH} \quad (12)$$

Onde:

u_1 = velocidade periférica da roda [m/s];

k_u = coeficiente de resistência (0,45 a 0,49).

2.4.3.7 Diâmetro da roda

O raio da roda Pelton é a distância do eixo de rotação ao eixo de arremesso do jato. O diâmetro da roda pode ser definido pela Equação (13) (OST, 2013).

Macintyre (1983), afirma também que por questões de limite prático, o valor do raio nunca deve ser inferior a três vezes o diâmetro máximo do jato.

$$D = \frac{60u_1 i}{\pi n} \quad (13)$$

D = diâmetro da roda [m];

i = relação de transmissão (rpm da máquina acionada/rpm da turbina; $i = 1$ se o gerador estiver acoplado diretamente).

Já o diâmetro externo do rotor pode ser encontrado através da Equação (14), após a definição da altura da pá.

$$D_a = D + 1,2h \quad (14)$$

Onde:

D_a = diâmetro externo do rotor [m]; h = altura da pá [m].

2.4.3.8. Número aproximado de pás

Vários autores mostram diferentes equações com várias considerações sobre o número de pás ideal para o rotor Pelton. Conforme Macintyre (1983), o número de pás influencia diretamente na eficiência da turbina, porém não há grande interferência na velocidade do rotor. Para o cálculo do número aproximado de pás da turbina aconselha-se utilizar a Equação (14).

Complementando, Macintyre (1983) afirma que o número deve ser inteiro e múltiplo de 2 ou 4. Também, um número de pás muito pequeno permite que há uma perda de água sem efetuar trabalho e um número excessivo eleva o custo e pode até reduzir o rendimento.

$$z \approx \frac{D\pi}{2d} \quad (15)$$

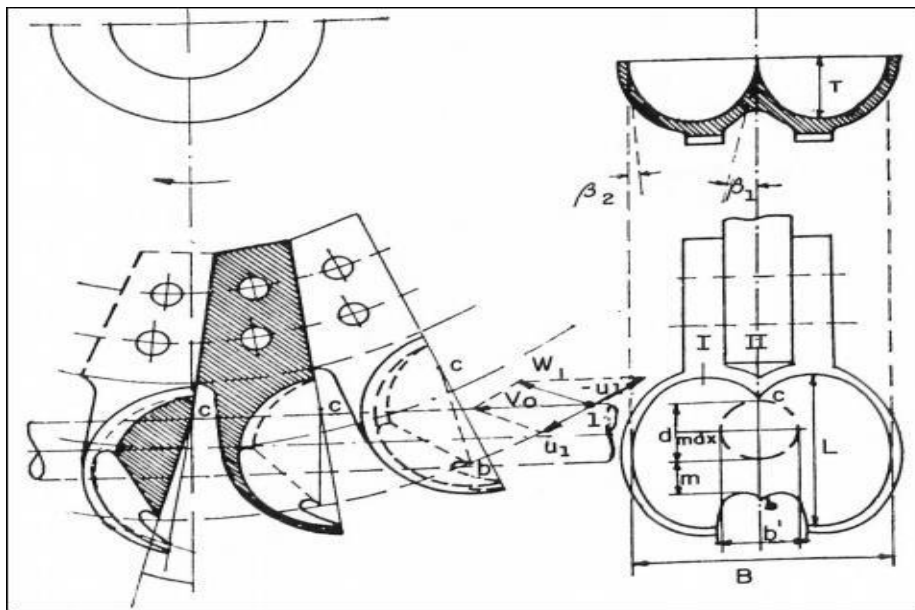
Onde z = número aproximado de pás

2.4.3.9 Dimensões da pá

O componente da roda Pelton que demanda maior atenção durante o planejamento e a construção é a pá, podendo prejudicar o desempenho da máquina quando fabricada de maneira inadequada. Ela possui duas superfícies côncavas, nas quais a água atua para converter sua energia cinética em trabalho mecânico, e no centro apresenta um gume que quebra o impacto do jato contra a pá, dividindo o jato em duas partes iguais (MACINTYRE, 1983).

A ilustração abaixo apresenta a configuração da pá, observada de frente e em seção, a porção superior do gume, denotada pela letra *c*, não deve ser impactada pelo jato. Entretanto, na extremidade da pá, realiza-se um corte com a forma de uma superfície cilíndrica cuja geratriz é paralela à direção da velocidade relativa W_1 , sendo esta obtida quando o ponto extremo *b* do gume interage com o jato no ponto 1. Na ilustração, podemos reconhecer o método para determinar a orientação de W_1 . O recorte dessa forma previne que partículas tenham suas trajetórias relativas fora da superfície côncava da pá, (MACINTYRE, 1983).

Fig.10: Pá de turbina Pelton.



Fonte: MACINTYRE, 1983

O dimensionamento da pá é realizado unicamente com base em dados empíricos e em relação ao diâmetro máximo $dmáx$ do jato, extraído da fórmula do diâmetro $dmáx$ do jato 6.

$$\frac{\pi(dmáx)^2}{4} = \frac{Qi}{a.Vo} = \frac{75Ni}{1000.\eta.aVo} \quad (15)$$

Em que:

Qi e Ni são: as descargas e as potências unitárias para a sobrecarga máxima, em m^3/s e cv ;

a é o número de jatos;

Vo a velocidade do jato em m/s

η o rendimento total da turbina admitindo $Vo = 4,29 m/s$, obtém-se equação reduzida do diâmetro $dmáx$ do jato 7:

$$dmáx = 151\sqrt{Ni/a.n} \text{ (mm)} \quad (16)$$

As turbinas Pelton de alta potência apresentam um rendimento total superior a 90%, podendo atingir até 94%.

Segundo Macintyre, 1983, para as dimensões principais a prática aconselha:

Tabela 2: Dimensões principais.

Largura	$B = 2 \text{ a } 3. dmáx$
Comprimento	$L = 2, 25 \text{ a } 2, 8. dmáx$
Excesso	$m = 0, 5 \text{ a } 0, 7. dmáx$
Profundidade	$T = 0, 8 \text{ a } 1. dmáx$
Largura do rasgo	$b' = 1, 2 \text{ a } 1, 25. dmáx$

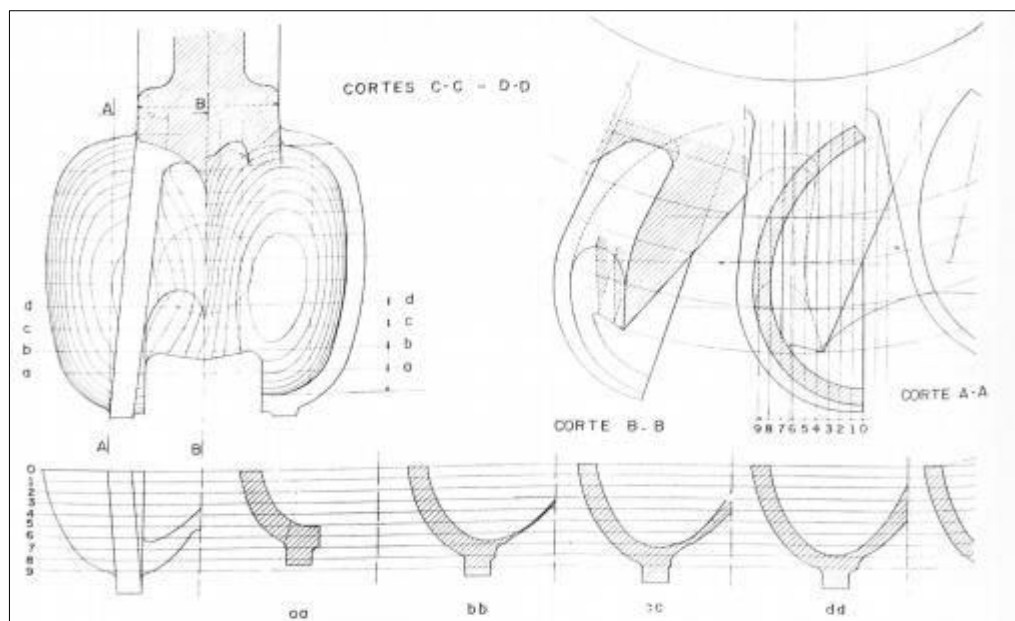
Fonte: MACINTYRE, 1983.

Ângulo β_1 do gume central = 10° .

A face interna é semelhante a uma semi-elipsoide e sua elaboração deve possuir um acabamento adequado, a fim de minimizar os atritos indicados pela constante K .

As ilustrações a seguir evidenciam as pás, apresentando as curvas de nível relativas aos cortes e algumas seções planas, de aa e dd .

Fig.11: Representação de uma pá de turbina de Pelton



Fonte: MACINTYRE, 1983.

A turbina Pelton pode apresentar variações de peso de acordo com as necessidades, no entanto, ao se manter os dimensionamentos adequados, obtém-se um bom desempenho. O peso, que inclui a caixa, o regulador automático de velocidade, defletores, entre outros, é expresso em quilogramas-força por cavalo-vapor produzido, sendo tanto menor quanto maiores são a potência e a altura de queda.

Dessa forma, para diversas alturas, temos:

Tabela 3: Diferença de altura.

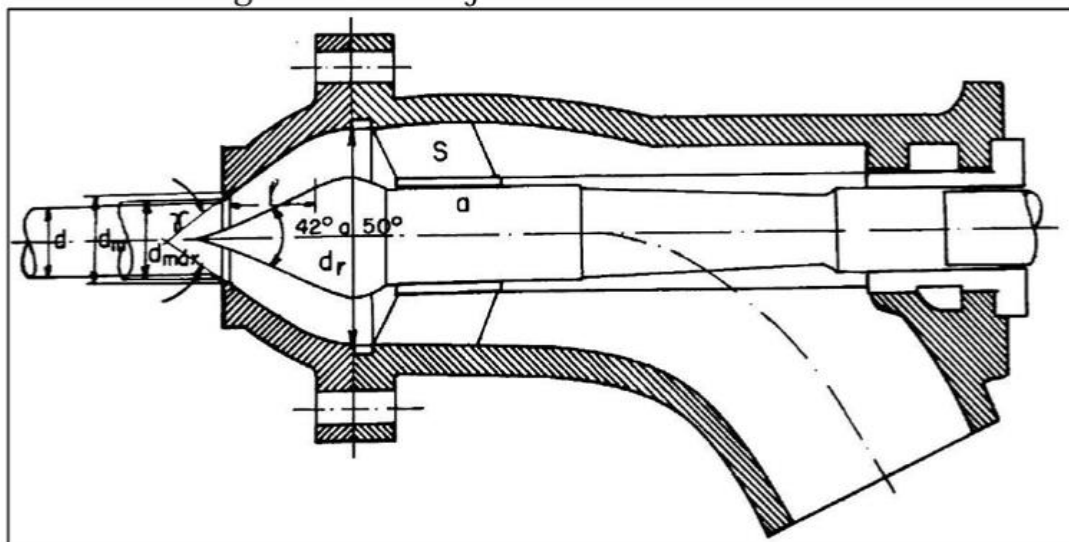
Alturas entre 1.000 e 400 m grandes unidades	0,03 a 0,67 N/W
400 a 200m	0,08 a 0,09 N/W
Abaixo de 200 m	0,09 a 0,4 N/W
Pequenas unidades de 100 a 300 cv	0,27 a 0,4 N/W

Fonte: MACINTYRE, 1983.

De acordo com Macintyre (1983), o sistema diretor nas turbinas Pelton é o bico injetor, que tem por finalidade direcionar e regular o jato d'água para o acionamento da turbina.

A forma adotada de seção de saída é sempre circular, pois fornece menor área lateral do jato para uma mesma descarga, assim, menor atrito da água contra o ar que a envolve. Geralmente, o bico recebe a forma de um cone cujas geratrizes formam com o eixo um ângulo compreendido entre 60 a 90°. A Figura 12 apresenta um bico injetor com bocal e agulha.

Fig.12 - Bico injetor de uma turbina Pelton



Fonte: Macintyre (1983).

Para o dimensionamento dos principais pontos do bico injetor adotou-se como referência Macintyre (1983). O diâmetro de saída do bocal é encontrado a partir da Equação (19).

$$d_s = \frac{d}{1,12 \text{ a } 1,27} \quad (19)$$

Onde: d_s = diâmetro de saída do bocal [m]. Para o diâmetro da seção de entrada do bocal, pode-se adotar a Equação (20).

$$d_r = (2,6 \text{ a } 2,8)d \quad (20)$$

Onde:

d_r = diâmetro da seção de entrada do bocal [m].

As curvas da tubulação e do bocal devem ter raios grandes, nunca inferiores a quatro vezes o raio das tubulações. O diâmetro de entrada do bocal é igual ao da tubulação que o alimenta e até quatro ou cinco vezes o diâmetro do jato, conforme Equação (21).

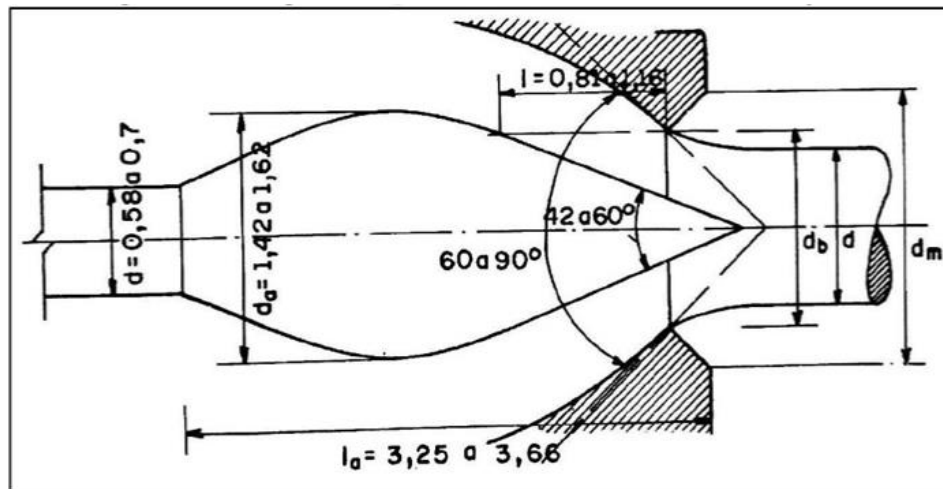
$$d_e = (4 \text{ a } 5)d \quad (21)$$

Onde:

d_e = diâmetro de entrada do bocal [m].

A Figura 13 apresenta demais grandezas da agulha e da ponta do bocal, expressas em função do diâmetro do jato (d). Além disso, para o ângulo da ponta da agulha o autor sugere de 42° a 60° e para o ângulo do bocal de 60° a 90°.

Fig.13: Agulha e ponta do bocal de um bico injetor



Fonte: Macintyre (1983).

Diâmetro da haste, Equação (20)

$$d_h = (0,58 \text{ a } 0,7)d \quad (20)$$

Onde:

 d_h = diâmetro da haste [m].

Diâmetro da agulha, Equação (21).

$$d_a = (1,42 \text{ a } 1,62)d \quad (21)$$

Onde:

 d_a = diâmetro da agulha [m].

Comprimento da agulha, Equação (22).

$$l_a = (3,25 \text{ a } 3,66)d \quad (22)$$

Onde:

 l_a = comprimento da agulha [m].

Curso da agulha, Equação (23).

$$l = (0,81 \text{ a } 1,16)d \quad (23)$$

Onde:

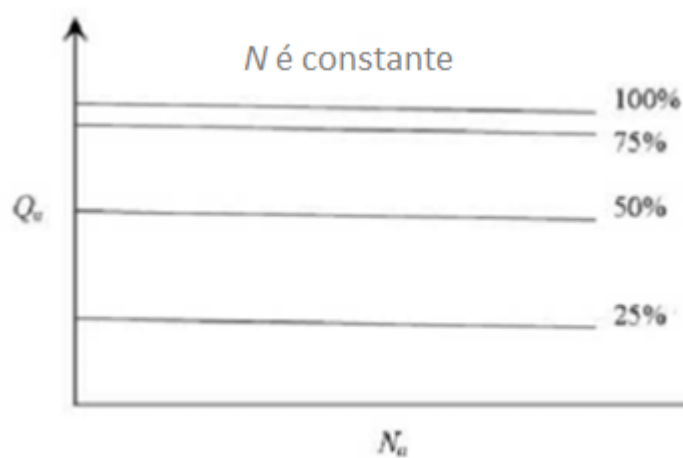
 l = curso da agulha [m].

2.4.3.10 Curvas características das Turbinas Pelton

As curvas características das turbinas Pelton fornecem informações sobre o desempenho da turbina em diferentes condições operacionais. Essas curvas são representações gráficas das relações entre variáveis como vazão, potência, eficiência e velocidade específica em função da abertura da porta injetora.

Vazão e velocidade

Fig.14: Vazão e velocidade

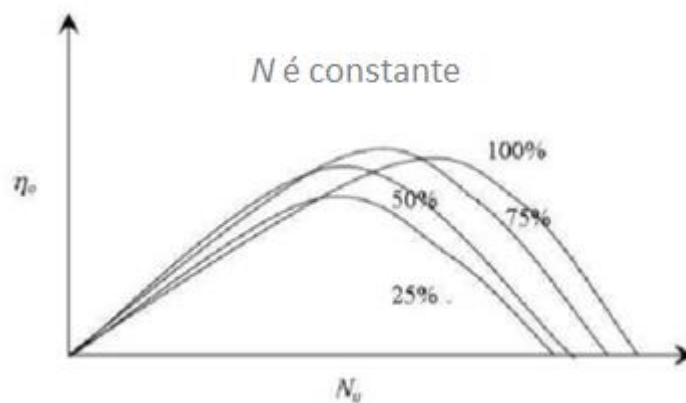


Fonte: Souza Júnior (2014)

Onde Q_u é a vazão e N_u é a velocidade.

Eficiência e velocidade

Fig.15: Eficiência e velocidade

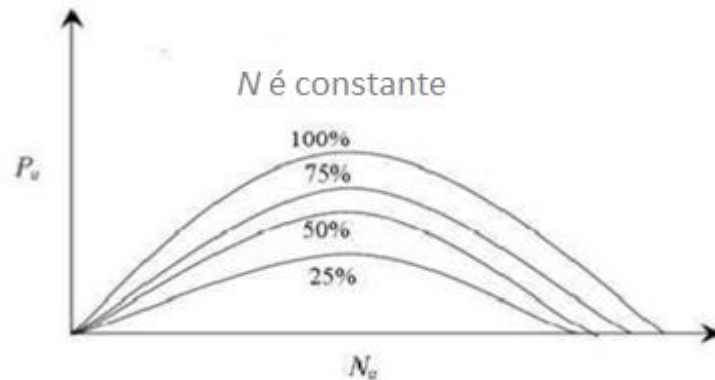


Fonte: Souza Júnior (2014)

Onde η_o é a eficiência e N_u é a velocidade.

Potência e velocidade

Fig.16: Potência e velocidade



Fonte: Souza Júnior (2014)

Onde P_u é a potência e N_u é a velocidade.

2.4.3.11 Cavitação

A cavitação é um fenômeno originado em quedas repentinas de pressão, onde a combinação entre a pressão, temperatura e velocidade resulta na liberação de ondas de choque e micro jatos altamente energéticos, causando a aparição de altas tensões mecânicas e elevação da temperatura, provocando danos na superfície. Nas turbinas Pelton este acontecimento pode ocorrer no injetor. Se isso ocorrer próximo a uma superfície metálica, pode provocar microscópicas rachaduras no material que, com o tempo, podem ocasionar fissuras na estrutura metálica e a consequente erosão das superfícies metálicas mais próximas (CARDOSO, 2016).

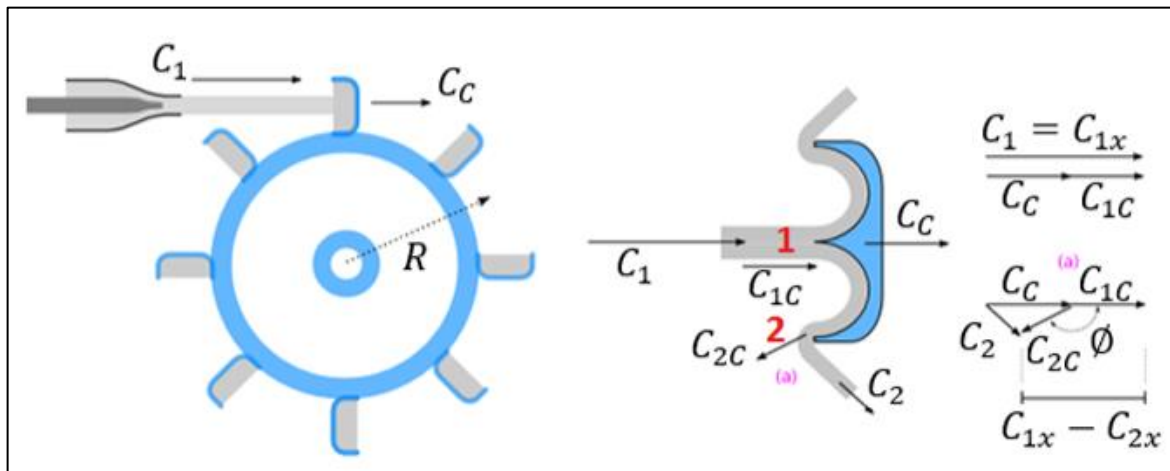
A erosão numa turbina hidráulica é bem perceptível uma vez que prejudica a rotação do rotor através do desbalanceamento do mesmo. Para repor a normalidade é necessária a parada da máquina para manutenção corretiva (aplicação de solda ou até mesmo a troca das pás) (CARDOSO, 2016).

2.4.3.12 Triângulo de velocidades

Na análise de velocidades presentes numa concha da turbina Pelton vai considerar-se que a face da concha que recebe o jato possui um septo que divide o jato em duas partes sem provocar choques. Assim, nos instantes em que o jato aciona a concha, o movimento desta pode ser avaliado como uma simples translação na direção e sentido do jato.

O jato atinge a pá com velocidade absoluta C_1 , transmitindo-lhe um movimento com velocidade CC e deixa a pá com velocidade C_2C . O desvio sofrido pelo jato de água é de aproximadamente 180° . Na entrada, o jato e a pá têm o mesmo sentido e direção, o que faz com que a velocidade relativa tenha o valor de $C_1C = C_1 - CC$. Na saída, a direção de C_2C é tangente ao bordo da pá e o seu valor é $C_2C = C_2 - CC$. Todas as velocidades relativas e absolutas inerentes à análise do triângulo de velocidades estão ilustradas na Fig.17.

Fig. 17: Triângulo de velocidades



Fonte: Cardoso (2016)

Sendo

CC , velocidade tangencial da concha tal que $CC = \omega \times R$;

C_1 , velocidade linear do jato à saída do injetor tal que $C_1 = C_1C + CC$;

C_1C , velocidade do jato relativamente à concha;

C_2 , velocidade absoluta de saída do jato tal que $C_2 = C_2C + CC$;

C_2C , velocidade do jato à saída da concha relativamente à mesma;

K_{fc} , coeficiente de perda por atrito na concha;

$\emptyset$, ângulo entre C_1C e C_2C ;

É necessário salientar que o trabalho útil cedido às conchas será tanto maior quanto menor for o valor de C_2 , sendo que não pode ter valor nulo para poder deixar a água sair da concha e não interferir com o jato que chega à pá. Para tal, $\emptyset < 180^\circ$

2.4.3.13 Principais exemplos da aplicação de turbinas Pelton

As turbinas Pelton são amplamente utilizadas em usinas hidrelétricas localizadas em regiões montanhosas ou áreas com grandes desníveis, onde a vazão de água é limitada, mas a pressão é alta. Exemplos incluem:

- Usinas em regiões alpinas ou andinas.
- Sistemas de geração de energia para comunidades remotas.
- Reservatórios de grande altura com baixo fluxo de descarga.

As turbinas Pelton são utilizadas em projetos emblemáticos em todo o mundo, segue alguns exemplos de usinas hidrelétricas que usam turbinas Pelton:

1) A Usina Hidrelétrica de Luzzone é uma instalação localizada na Suíça, conhecida por estar próxima ao lago Luzzone, no cantão de Ticino. Essa usina é parte de um sistema hidrelétrico que aproveita os recursos hídricos da região montanhosa dos Alpes para geração de energia elétrica. A Usina Hidrelétrica de Luzzone é parte do sistema da represa Luzzone, localizada no cantão de Ticino, Suíça. A barragem foi concluída em 1962, com uma altura inicial de 208 metros, que foi elevada para 225 metros entre 1995 e 1998 para aumentar sua capacidade de armazenamento. Atualmente, é a terceira barragem mais alta da Suíça e a nona mais alta da Europa. Seu reservatório, o Lago di Luzzone, pode armazenar até 107 milhões de metros cúbicos de água e está situado a 1.606 metros acima do nível do mar (DARLA, 2024).

A usina utiliza as águas do rio Brenno e seus afluentes para gerar energia elétrica, particularmente no inverno, quando o consumo é maior. Além de sua função energética, a barragem é conhecida mundialmente por abrigar a maior parede de escalada artificial do mundo, com 165 metros de altura e 650 apoios, inaugurada em 1999.

As principais características da usina hidrelétrica de Luzzone são:

- Localização: Está situada em uma área alpina, famosa por sua beleza natural e infraestrutura hidrelétrica avançada.
- Barragem de Luzzone: A barragem associada é um marco arquitetônico e técnico. Com 225 metros de altura, é uma das barragens mais altas da Suíça.
- Escalada na Barragem: A parede da barragem Luzzone é também famosa por ser utilizada para escalada esportiva, considerada uma das maiores paredes artificiais de escalada do mundo.
- Produção de Energia: Faz parte de um complexo sistema de aproveitamento hídrico, contribuindo significativamente para o fornecimento de energia renovável no país.

Fig. 18: Imagem da barragem de Luzzone.



Fonte: Darla (2023).

2) Usina Hidrelétrica de Grand Dixence (Suíça): Uma das maiores do mundo em capacidade de armazenamento, utiliza turbinas Pelton para aproveitar a grande altura da barragem. O Lago da Barragem Dixence é um lago artificial com origem numa barragem de gravidade em cimento localizada em Val d'Hérens no cantão de Valais na Suíça.

A parede da barragem que origina o lago tem 285 metros de altura, sendo a barragem de gravidade mais alta do mundo, a maior barragem do seu género na Europa.

O seu principal objetivo é a produção de energia hidrelétrica e as quatro estações que fornece têm uma capacidade combinada de 2.069 MW para produzir 2 bilhões de kWh por ano, suficiente para 400 mil residências.

Fig. 19: A barragem Grande Dixence, com 285 metros de altura, no oeste da Suíça.



Fonte: Darla (2023).

3) A Usina de Henry Borden fica localizada no sopé da Serra do Mar, em Cubatão, no estado de São Paulo.

Henry Borden é um complexo hidrelétrico composto por duas usinas de alta queda, aproximadamente de 720 metros, chamadas de Externa e Subterrânea, com um total de 14 grupos geradores acionados por turbinas tipo Pelton. O complexo possui uma capacidade instalada de 889 MW para uma vazão de 157,3 m³/s (EMAE, 2025).

Fig.20: Vista aérea da usina de Henry Borden.



Fonte: EMAE (2025)

Segue abaixo alguns exemplos de instalações com turbinas Pelton no Brasil e no mundo:

Tabela 4: Instalações com turbinas Pelton.

Instalações	Brasil			
	H _d (m)	Q (m ³ /s)	P _t (CV)	N (rpm)
Parigot de Souza – Rio Capivari	714,3	10	87200	514
Macabu – Rio Macabu	317	1,3	4480	722
Canastra – Rio Santa Cruz	314,6	10,8	33100	450
Instalações	Mundo			
	H _d (m)	Q (m ³ /s)	P _t (CV)	N (rpm)
New Colgate - EUA	416	-	226000	-
Mont-Cenis - França	870	-	272000	-

Fonte: MACINTYRE, 1983.

2.4.3.14. Principais vantagens da turbina Pelton

A turbina Pelton é amplamente utilizada em regiões montanhosas, onde a queda d'água é elevada. Suas principais vantagens incluem:

- **Alta eficiência para grandes quedas d'água:** A turbina Pelton é ideal para locais com quedas elevadas e vazões relativamente baixas, otimizando a conversão de energia cinética da água em energia mecânica.
- **Baixa necessidade de manutenção:** Como o rotor não fica imerso na água, o desgaste das partes móveis é reduzido, aumentando sua vida útil e diminuindo os custos de manutenção.
- **Capacidade de operar com múltiplos bocais:** Dependendo do projeto, a turbina Pelton pode utilizar mais de um jato d'água, melhorando sua eficiência e permitindo ajustes conforme a demanda de energia.
- **Facilidade de controle e ajuste:** A potência gerada pode ser ajustada facilmente controlando a vazão de entrada, o que torna essa turbina ideal para sistemas de energia variável.
- **Durabilidade e robustez:** A estrutura das turbinas Pelton é projetada para suportar longos períodos de operação sem perda significativa de eficiência.
- **Menor impacto ambiental em comparação a outras turbinas:** Em pequenas centrais hidrelétricas, a turbina Pelton pode ser instalada com menor necessidade de barragens de grande porte, reduzindo impactos ambientais associados a alagamentos e deslocamento de populações.

2.4.3.15 Principais desvantagens da turbina Pelton

Apesar de suas vantagens, a turbina Pelton apresenta algumas desvantagens, tais como:

- **Dependência de grandes quedas d'água:** Sua operação eficiente exige quedas d'água elevadas, limitando sua aplicação em regiões de baixa altitude.
- **Baixa eficiência para vazões elevadas:** Em sistemas onde há grande disponibilidade de vazão, outras turbinas, como Francis ou Kaplan, podem ser mais adequadas.
- **Requer infraestrutura específica:** A instalação da turbina Pelton exige um sistema de tubulação pressurizada para direcionar a água com alta velocidade ao rotor, o que pode aumentar os custos de implementação.

- **Sensibilidade a variações de fluxo:** Quedas significativas na vazão podem impactar diretamente a eficiência da turbina, tornando necessário um controle rigoroso do fluxo de entrada.
- **Custo inicial elevado:** Embora tenha baixa manutenção, o custo inicial da instalação pode ser mais alto devido à necessidade de bocais de alta pressão e um design robusto para suportar o impacto dos jatos d'água.

3 TESTES PRÁTICOS COM A TURBINA DIDÁTICA PELTON

A bancada didática da turbina Pelton, juntamente com todos os instrumentos utilizados para a realização das análises e medidas, estão localizadas no Laboratório de Fontes Renováveis do Departamento de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Goiás e atende ao curso de graduação de Engenharia Elétrica e de Controle e Automação.

3.1 INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Controlador de Carga Hídrica – MPPT

Módulo com controlador de carga MPPT para turbina tipo Pelton com display de visualização, portas USB e terminais de acoplamento para baterias, fonte de energia e cargas CC. O módulo além de realizar o gerenciamento da energia, também disponibiliza o barramento padrão RS485 para comunicação.

Fig.21 - Controlador de Carga Hídrica – MPPT



Fonte: Manual do instrumento

IHM – Interface Homem Máquina

Uma IHM – modelo Beijer X2 base 7- tela sensível ao toque de 7 polegadas. Possui barramento de dados RS485, porta USB e porta Ethernet para conexão e transferência de dados com alimentação de 24 Vcc.

Fig.22 - IHM – Interface Homem Máquina



Fonte: Manual do instrumento

Bateria 12 Vcc Estacionária

Módulo de bancada composto por uma bateria estacionária do tipo inundada de 12 Vcc, com autonomia de 30 Ah. Disponibiliza visualizador multicolorido para análise de estado da bateria.

Fig.23 - Bateria 12 Vcc Estacionária



Fonte: Manual do instrumento

Carga AC/DC – 12V/50W

Módulo de bancada composto por um banco de cargas luminosas de 12V/50W, o módulo possui ventilação na parte traseira.

Fig.24 - Carga AC/DC – 12V/50W



Fonte: Manual do instrumento

Alimentação e proteção 10A

Módulo de alimentação e proteção monofásico curva C, com LED de indicação de ligado e energizado. Possui conexão IEC na parte traseira e acompanha um cabo IEC/ABNT 10A.

Fig.25 - Alimentação e proteção 10A



Fonte: Manual do instrumento

Fonte de 24Vcc

Módulo com fonte de alimentação, com entrada de 110 a 220 VCA e saída de 24 Vcc / 1,5 A, para energização em periféricos de corrente contínua.

Fig.26 - Fonte de 24Vcc



Fonte: Manual do instrumento

Turbina Pelton

Estrutura composta por uma turbina do tipo Pelton com as seguintes especificações: A bancada possui bomba trifásica de 2 cv acoplada ao inversor de frequência parametrizável e alimentação 220 VCA monofásica, posicionado dentro de um painel com grau de proteção IP 54. Possui reservatório de 180 litros, rotâmetro de 2 a 20 m³/h analógico e um manômetro de 2000 kPA, duas válvulas manuais para o controle do fluxo d'Água, também possui um medidor digital de velocidade rotativa e porta de comunicação RS-485.

Fig.27 - Turbina Pelton



Fonte: Manual do instrumento

3.2 METODOLOGIA E RESULTADOS DO EXERCÍCIO

A atividade prática envolveu a elaboração da curva de potência em função da velocidade da turbina didática Pelton, bem como a medição dos valores de tensão, corrente e potência fornecidos pela turbina, que será responsável por alimentar as baterias e as cargas disponíveis no laboratório, juntamente com todos os instrumentos pertinentes para a realização dessa análise.

Primeiramente foi realizada a montagem do circuito envolvendo todos os módulos dos componentes necessários para a elaboração do exercício. O módulo de alimentação e proteção monofásico curva C foi conectado à fonte que possui entrada de 110/220V e saída 24Vcc, para que a saída desta fonte ligue o IHM, conforme a figura 28.

Fig.28 – Conexão entre os módulos de alimentação, fonte 24Vcc e IHM.



Fonte: Próprio Autor (2025).

As 2 Baterias 12 Vcc Estacionárias foram ligadas em paralelo e conectadas ao Controlador de Carga Hídrica – MPPT, juntamente da turbina didática Pelton que também foi conectada ao controlador de carga, conforme as figuras 29 e 30:

Fig.29 – Baterias 12Vcc ligadas em paralelo que foram conectadas ao controlador de carga.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Fig.30 – Turbina didática Pelton conectada ao controlador de carga.



Fonte: Próprio Autor (2025).

O IHM e a turbina didática Pelton também foram conectados ao controlador de carga através do RS-485 que é um padrão de comunicação serial que permite a troca de dados entre dispositivos elétricos. É utilizado em aplicações industriais, comerciais e de automação.

Após a realização da conexão de todos os componentes o circuito foi energizado para que a turbina pudesse ser ligada e consequentemente todos os dados necessários pudessem ser coletados. Com o Modbus RTU habilitado é possível ocorrer a comunicação com os módulos pela comunicação RS 485.

Após energizado o circuito, no IHM é feito o manuseio remoto dos parâmetros que foram explorados como por exemplo a velocidade da turbina e também no IHM é retirada a coleta dos dados como por exemplo as tensões, correntes e potências dos elementos do circuito. A figura 31 mostra a tela no IHM onde é possível utilizar a bancada da turbina Pelton de maneira remota e alterar o RPM e definir a velocidade da turbina.

Fig.31 – Tela do IHM referente ao sistema hídrico.

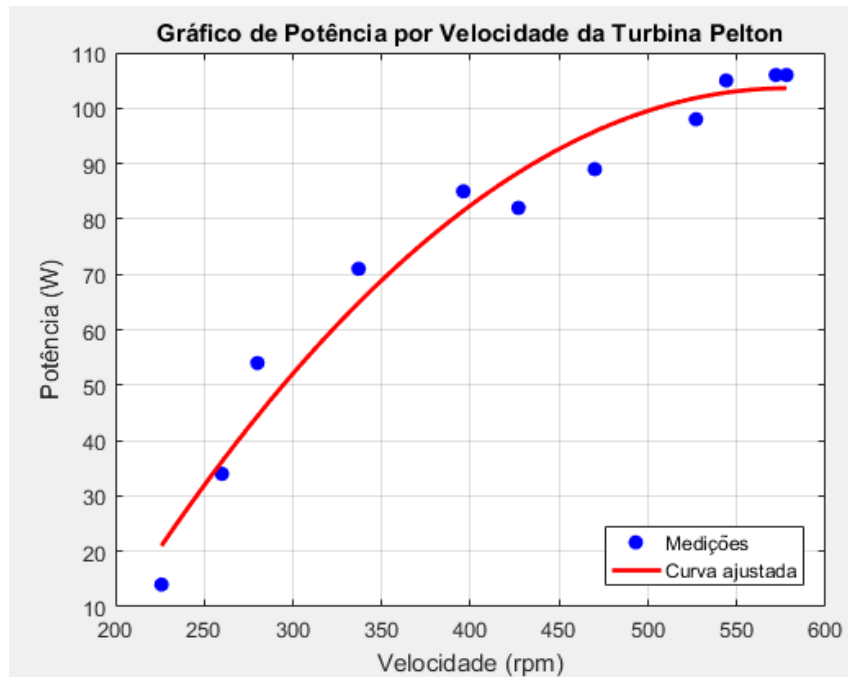


Fonte: Manual do instrumento

Por não ter uma carga acoplada aos terminais de acoplamento de cargas do controlador de carga, a turbina didática Pelton estará atuando apenas no carregamento das baterias que estão ligadas em paralelo e conectadas ao controlador de carga. A velocidade da turbina foi sendo alterada de maneira que foi possível traçar a curva de potência por velocidade desta turbina variando seu valor de velocidade e coletando o valor da potência do gerador para a velocidade determinada. Os valores de potência proporcionados pelo controlador de carga eram exibidos apenas se o valor de velocidade da bomba era maior que 30% no painel do sistema hídrico no IHM, pois se o valor da velocidade da bomba era menor que 30% a turbina não ligava e, portanto, não eram registrados seus valores de potência no controlador.

As velocidades em rpm registradas no ensaio foram na faixa de 220 à 574 rpm. A figura 32 ilustra o gráfico de potência por velocidade.

Fig.32 – Gráfico de potência por velocidade.



Fonte: Próprio Autor (2025).

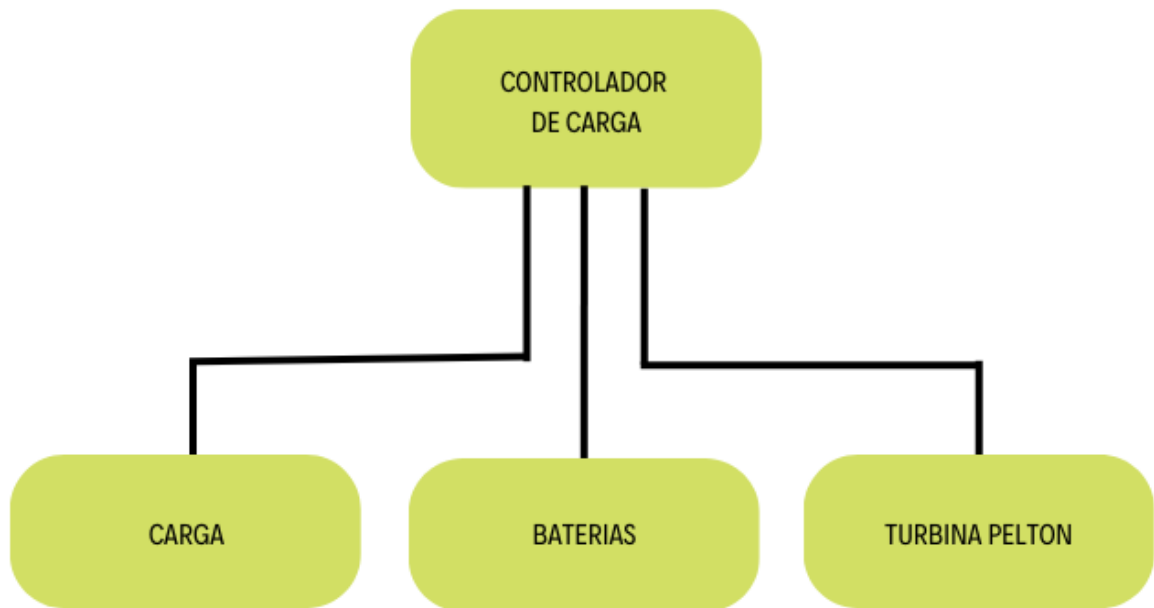
Posteriormente, a carga AC/DC – 12V/50W foi acoplada ao circuito. Esta carga foi conectada aos terminais de acoplamento de carga do controlador de carga para que as medições dos valores de tensão, potência e corrente de cada componente que estava conectado ao controlador de carga fossem medidos. Portanto, foi feita a medição de todos os valores citados acima, para o gerador, as duas baterias conectadas em paralelo e para a carga de 50W. As figuras 33 e 34 demonstram como ficou a montagem dos componentes conectados ao controlador de carga.

Fig.33 – Baterias ligadas em paralelo e carga de 50 Watts que foi conectada ao controlador de carga.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Fig.34 – Diagrama das conexões no controlador de carga.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Pelo IHM o valor da velocidade da bomba foi definido para 100%, o que resultou em uma velocidade de 524 rpm da turbina e pressão de 165 Kpa medida no manômetro acoplado próximo à entrada de água da mesma. O controlador de carga gera um gráfico com todos os valores de tensão, potência e corrente destes componentes conectados a ele. O período de tempo definido no controlador de carga para a plotagem gráfica das medidas foi definido em 30 segundos. A legenda de cores dos gráficos é demonstrada pela figura 35:

Fig.35 – Legenda de cores dos gráficos.

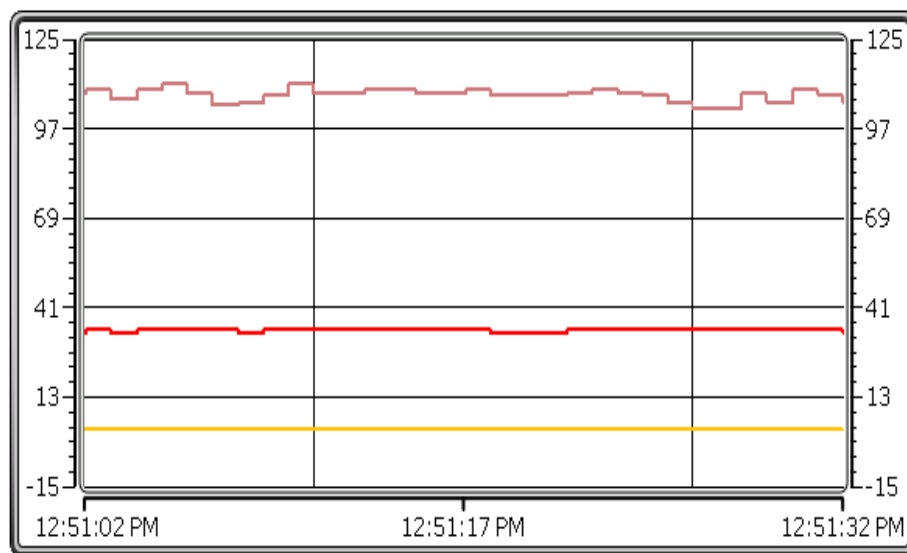


Fonte: Próprio Autor (2025)

O gráfico que mostra os dados de tensão, corrente e potência da turbina didática Pelton (Painel Gerador) é representado pela Figura 36.

Na figura é possível analisar os valores que foram medidos das grandezas elétricas do painel gerador em um intervalo de tempo de 30 segundos e verificar que os valores de corrente praticamente se mantêm estáveis, enquanto ocorre uma ligeira variação na tensão e potência da turbina didática Pelton. A potência fornecida pela turbina estava variando entre uma faixa de 103 à 108 Watts.

Fig.36 – Gráfico da tensão, corrente e potência do gerador.

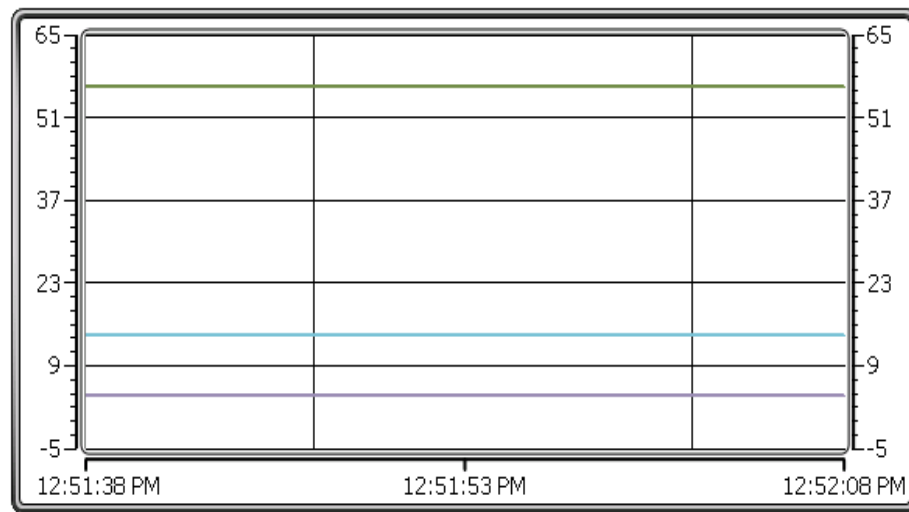


Fonte: Próprio Autor (2025).

A medição realizada para obter as grandezas elétricas das baterias, nos mostrou que os valores dessas grandezas se mantiveram estáveis, no intervalo de tempo de 30 segundos os valores permaneceram os mesmos sem variações.

O gráfico que mostra os dados de tensão, corrente e potência das duas baterias que estão ligadas em paralelo (Banco de Acumuladores) é representado pela Figura 37.

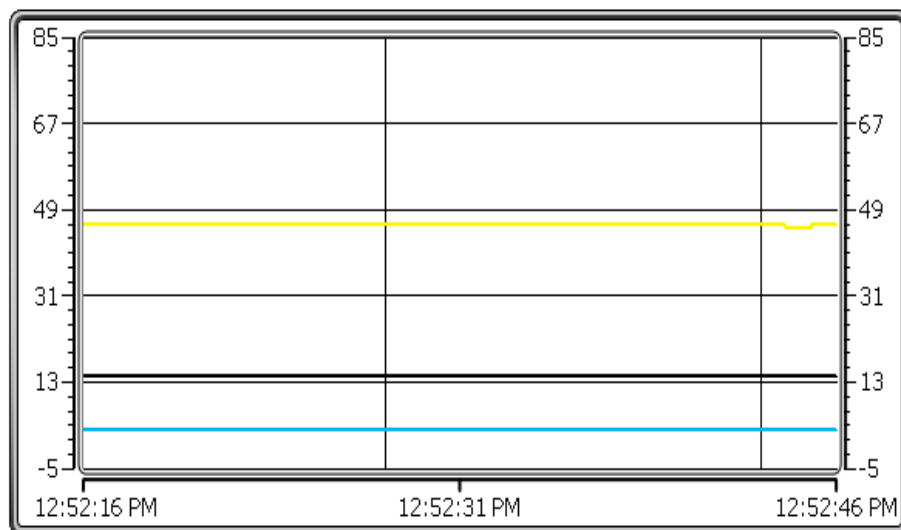
Fig.37 – Gráfico da tensão, corrente e potência das baterias.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Realizando uma análise gráfica para os valores medidos das grandezas elétricas da carga que foi conectada ao circuito, nota-se que o consumo da carga estava perto do seu valor de potência nominal, em torno de 92% deste valor. Percebe-se pouquíssima variação na potência consumida por ela. O gráfico que mostra os dados de tensão, corrente e potência da carga (Consumo CC) é representado pela Figura 38.

Fig.38 – Gráfico da tensão, corrente e potência da carga.



Fonte: Próprio Autor (2025).

4 CONCLUSÃO

Através deste estudo foi possível conhecer a turbina Pelton, que foi desenvolvida por Allan Lester Pelton, sendo um dos equipamentos mais eficientes para a geração de energia hidrelétrica em locais com grandes desníveis. Seu funcionamento baseia-se no aproveitamento da energia cinética da água, transformando-a em trabalho mecânico por meio do impacto do jato d'água sobre as conchas do rotor.

Seu design específico, com injetores que direcionam o fluxo de água e pás especialmente projetadas para maximizar a conversão de energia, faz com que essa turbina apresente alta eficiência, podendo atingir rendimentos superiores a 90%. A estrutura da turbina Pelton inclui componentes como rotor, injetores, carcaça, eixo e freio hidráulico, cada um desempenhando um papel fundamental na sua operação e durabilidade.

A aplicação de turbinas Pelton pode ser observada em diversas usinas hidrelétricas ao redor do mundo, sendo a Usina Hidrelétrica de Luzzzone, na Suíça um exemplo do uso dessa turbina. Essa tecnologia continua sendo uma solução viável para a geração sustentável de energia em locais com grande potencial hidrelétrico.

O estudo detalhado sobre a turbina Pelton incluiu cálculos fundamentais para determinar a velocidade do jato, diâmetro máximo, velocidade periférica da roda e número de pás, garantindo um funcionamento eficiente e seguro.

Neste relatório foi conduzido um estudo experimental detalhado da turbina Pelton realizado no Laboratório de Fontes Renováveis do Instituto Federal de Goiás, através da turbina didática Pelton, investigando seu comportamento sob diferentes condições de medições de potência, tensão, corrente e velocidade. As curvas características derivadas dos dados teóricos e experimentais foram relatadas, revelando uma concordância geral, embora algumas discrepâncias tenham sido observadas devido à possíveis erros experimentais durante a realização do experimento, que podem impactar fisicamente o desempenho da turbina.

Os resultados proporcionaram valores significativos sobre o desempenho e a eficiência da turbina Pelton em várias configurações. As curvas características destacaram relação entre vazão de água, potência, velocidade e rendimento da turbina.

Os resultados demonstraram a importância do controle preciso da vazão e da velocidade para otimizar a geração de energia, destacando a aplicabilidade desse tipo de turbina em sistemas de pequeno e grande porte.

Demonstrou-se assim que a turbina Pelton é altamente eficiente em condições de baixo fluxo de água e alta queda, em comparação com as turbinas Francis e Kaplan, sendo especialmente adequada para locais com essas características específicas.

Os resultados deste estudo são relevantes, pois oferecem informações valiosas para a compreensão aprofundada do funcionamento da energia pela turbina Pelton. Com base nesses dados, é possível otimizar tanto o projeto quanto a operação de usinas hidrelétricas, visando alcançar a máxima eficiência energética e promover o uso sustentável dos recursos hídricos disponíveis.

Uma possível melhoria no trabalho, seria adicionar cargas não lineares ao experimento e fazer um estudo detalhado com o exercício prático através de corrente alternada.

Em suma, a turbina Pelton apresenta vantagens significativas, como alta eficiência, baixa manutenção e durabilidade, mas também desafios relacionados à necessidade de infraestrutura adequada e controle de fluxo. Seu uso contínuo na geração de energia demonstra sua relevância e contribui para a produção de eletricidade sustentável em diferentes contextos geográficos.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, Rodolfo dos Santos – **Projeto estrutural do cubo do rotor de uma turbina hidráulica Tipo Kaplan**, Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá – São Paulo, Brasil, 2013.

BARRENA, B. V. **Análise e dimensionamento de uma turbina hidráulica, por redes neurais para uma minicentral**. Universidade Nacional de Engenharia, Lima, Peru, 2010.

BELIDOR, B. F. **Architecture Hydraulique**. Paris: Claude-Antoine Jombert. 2015.

BERGAMO, Paula R. **Especificações de turbinas hidráulicas**. 2018. XXf. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

CLEMENTINO, Jackeline. **Dimensionamento de turbinas hidráulicas**. Instituto Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

COSTA, A. S. **Turbinas Hidráulicas e Condutos Forçados**. Março, 2013. Disponível em: <http://www.labspot.ufsc.br/~simoed/dincont/turb-hidr-2003.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2025.

DARLA. **Grande Dixence Dam in Switzerland**. 2023. Disponível em: <https://www.touringswitzerland.com/grande-dixence-dam-in-switzerland/>. Acesso em: 18 Nov. 2024.

DARLA. **Luzzone Dam and the World's Highest Climbing Wall**. 2023. Disponível em: <https://www.touringswitzerland.com/luzzone-dam-and-the-worlds-highest-climbing-wall/>. Acesso em: 18 Nov. 2024.

EMAE – **Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A.** Disponível em: <http://www.emae.com.br/emae/>. Acesso em: 10 fev.2025.

GONÇALVES, Bernardo Hermont - **Estudo comparativo da resistência à erosão por cavitação do metal de solda depositado por um arame tubular tipo 13%Cr, 4% Ni, 0,4% Mo e do aço fundido ASTM a 743 CA-6NM**, Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2007.

GUTIÉRREZ, Héctor G. MASTACHE, Arturo N. **Seleção e Dimensionamento de turbinas hidráulicas para centrais hidrelétricas**. Universidade Autônoma do México, 2013.

HACKER. **Turbinas Hidráulicas**. 2012. Disponível em: http://www.hacker.ind.br/produtos_turbinas_hidraulicas.php. Acesso em: 03 fev. 2025.

HYDROWHEEL. **Turbinas Pelton Horizontal**. Disponível em: <https://hydrowheel.com.br/produtos/turbinas-hidraulicas/pelton/pelton-horizontal/>. Acesso em 18 Nov. 2024.

HUGHES, T. P. **Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930**. Johns Hopkins University Press, 2006.

JÚNIOR, Ricardo L. S. **Projeto conceitual de uma turbina hidráulica a ser utilizada na usina hidrelétrica externa de Henry Borden**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

JÚNIOR, A.C.B; GONÇALVES, A.D.S. **International Hydropower Association (IHA)**, 2013.

LOPES, Rafael – **Comissionamento de turbinas hidráulicas: ensaios de faixa operativa, index teste e rejeição da carga**, Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá – São Paulo, Brasil, 2011

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

MAIOR, Francisco S. **Turbinas Pelton**. Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

MELO JÚNIOR, B.R. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 584 p.

MHFPREDITIVA. **Preditiva em turbinas e geradores, Ensaios de Index Test, Comissionamento, Faixa Operativa**. Disponível em: <<http://www.mhfpredictiva.com.br/site/pagina/11>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

MOSONYI, E. **Water Power Development: Low Head Power Plants and Pumped Storage**. Akademiai Kiado, 2011.

NOGUEIRA, Fábio José Horta. **Microcentrais Hidrelétricas**. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/cartilhas.html>>. Acesso em: 03 jan. 2025.

OMEL. **Omel Bombas e Compressores LTDA**. 2018. Disponível em: <<http://www.omel.com.br>>. Acesso em: Março/2025.

OST, Ana Paula; KRAULICH, Claudia Vanessa. **Dimensionamento e modelagem de um rotor de turbina pelton para ser aplicado em uma bancada didática**. Orientador: Prof. Dr. Ademar Michels, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina. Horizontina, 2013

PFLEIDERER, Carl; PETERMANN, Hartwig. **Máquinas de fluxo**. Rio de Janeiro: LTC, 1979.

PINTO, Milton. **Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados**. São Paulo: LTC, 2019.

RAMOS, Ricardo A. V. SILVA, João B. C. **Máquinas Hidráulicas e Térmicas**. Universidade Federal do Pará, 2009. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/37852751/ramos-ricardo-a-v-silva-joao-b-c-maquinas-hidraulicas-e-termicas-2009>>. Acesso em: Ago 2024.

REIS, Lineu B. D. **Geração de energia elétrica**. Editora Manole, 2º Edição, Barueri, SP, 2013.

REYNOLDS, T. S. **Stronger Than a Hundred Men: A History of the Vertical Water Wheel.** Johns Hopkins University Press, 1983.

ROUSE, H., & INCE, S. **History of Hydraulics.** Iowa Institute of Hydraulic Research, 2011.

SOARES JÚNIOR, M.C. (2013). "Wear and Erosion Characteristics of Pelton Turbines: Challenges and Solutions." *Materials Science for Energy Systems*.

SCHREIBER, Gerhard P. **Usinas Hidrelétricas.** Editora Edgard Blücher LTDA, 1997.

SMIL, V. **Energy and Civilization: A History.** MIT Press, 2017.

SOUZA, A.; ZULCY, D. **Dimensionamento de máquinas de fluxo turbinas, bombas, ventiladores.** Editora Edgard Blucher LTDA, Rio de Janeiro, 1991.