



HENRIQUE ANTUNES WEDIG

**CALHA PARSHALL COMO ACIONADORA DE GERADOR DE ENERGIA
ELÉTRICA –PROJETO DE IMPLEMENTAÇÃO**

Porto Alegre
2023

HENRIQUE ANTUNES WEDIG

**CALHA PARSHALL COMO ACIONADORA DE GERADOR DE ENERGIA
ELÉTRICA –PROJETO DE IMPLEMENTAÇÃO**

Projeto de Pesquisa de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Ritter dos Reis, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Professor MSc. Manoel Henrique Alves

Porto Alegre
2023

“Dedico este trabalho aos meus pais, a dedicação de vocês ao me dar a melhor educação possível apesar das dificuldades enfrentadas, me orgulha.”

AGRADECIMENTOS

Pela orientação ao longo deste estudo de caso, agradeço ao Professor Manoel Henrique Alves.

Pela orientação e por todo conhecimento a mim passado nas disciplinas de TCC1 e Fenômenos de transporte agradeço ao saudoso Professor José Antônio Colvara de Oliveira.

À minha esposa Caroline, pela ternura, paciência e motivação durante as longas horas de estudo em épocas de prova, trabalhos e na elaboração do meu TCC.

A minha mãe Sonia pelo incentivo em retornar aos estudos, depois de quase uma década fora do meio acadêmico.

Aos meus filhos por serem o incentivo para buscar qualificação e ser um profissional e ser humano melhor.

Aos meus colegas da Companhia Riograndense de Saneamento - Corsan, empresa pública de sociedade mista do estado do Rio Grande do Sul, que durante os momentos que precisei me ausentar do trabalho para estudar, supriram minha falta para atender as demandas.

A Corsan, por incentivar a formação acadêmica de seus funcionários e permitir que pudesse desenvolver esse estudo e realizar meu estágio curricular na empresa.

Aos meus demais professores e colegas da Uniritter, que estiveram ao meu lado durante estes anos de estudo, pelo conhecimento adquirido e amizades construídas.

RESUMO

Esse estudo de caso vem do interesse de propor uma alternativa para economia de energia elétrica dentro de uma Estação de Tratamento de Água da Corsan, localizada na cidade de Montenegro. Aproveitando a energia cinética da água que chega na estação de tratamento através de bombas que fazem sua captação no manancial disponível da cidade. Desta forma, o objetivo deste estudo de caso é estimar a capacidade de produção de uma turbina instalada em uma Calha Parshall, analisando o quanto a variação da vazão na entrada da turbina interfere na geração de energia. Como objetivo de geração de energia elétrica, vamos descobrir se a turbina em estudo seria capaz de gerar energia elétrica suficiente para alimentar o circuito de iluminação do bloco hidráulico da Estação de Tratamento de Água. A metodologia prevê o uso de fórmulas matemáticas para estimar a capacidade de produção de energia elétrica e calcular a velocidade específica da turbina com os dados disponíveis de queda útil e vazão, sendo assim possível selecionar o modelo de turbina mais adequado para a instalação. As vazões do experimento variaram de 49 L /s até 75L /s, estas informações foram coletadas através de macro medidor instalado na Calha Parshall. Os resultados encontrados mostraram que a turbina mais adequada para a instalação é a turbina de Arquimedes, através da seleção da turbina foi estimada a sua capacidade de produção de energia elétrica para cada valor de vazão mencionado acima, através da modelagem matemática, mensuramos a vazão necessária afim de gerar energia suficiente para manter a iluminação do bloco hidráulico da Estação de Tratamento de Água em funcionamento.

Palavras-chave: Geração energia; Calha Parshall, Estação de Tratamento de água, Turbina.

ABSTRACT

This case study comes from the interest of proposing an alternative for saving electricity within a Corsan Water Treatment Plant, located in the city of Montenegro. Taking advantage of the kinetic energy of the water that arrives at the treatment plant through pumps that collect it from the city's available source. In this way, the objective of this case study is to estimate the production capacity of a turbine installed in a Parshall Gutter, analyzing how much the variation of the flow in the entrance of the turbine interferes in the generation of energy. As an objective of generating electricity, let's find out if the turbine under study would be able to generate enough electricity to feed the lighting circuit of the hydraulic block of the Water Treatment Station. The methodology foresees the use of mathematical formulas to estimate the electric energy production capacity and calculate the specific speed of the turbine with the available data of useful head and flow, thus being possible to select the most adequate turbine model for the installation. The flow rates of the experiment ranged from 49 L / s to 75 L / s, this information was collected through a macro meter installed in the Parshall gutter. The results found showed that the most suitable turbine for the installation is the Archimedes turbine, through the selection of the turbine, its capacity to produce electricity was estimated for each flow rate mentioned above, through mathematical modeling, we measured the necessary flow in order to generate enough energy to keep the lighting of the hydraulic block of the Water Treatment Station in operation.

Keywords: Energy generation; Parshall Gutter, Water Treatment Station, Turbine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Nível disponível dos reservatórios do sistema interligado nacional.....	17
Figura 2: Modelo turbina Pelton.....	20
Figura 3: Modelo turbina Francis.....	21
Figura 4: Modelo turbina Kaplan.....	22
Figura 5: Comparação de modelos e aplicação de turbinas	23
Figura 6: Exemplo do parafuso de Arquimedes.....	23
Figura 7: Bomba centrífuga funcionando como bomba e como turbina.....	26
Figura 8: Custo de equipamentos eletromecânicos utilizando BFTs em função da potência.....	27
Figura 9: Medidor de vazão.....	33
Figura 10: Calha Parshall.....	38
Figura 11: Turbina de Arquimedes.....	43
Figura 12: Turbina de Arquimedes CGH Timbó Grande.....	44
Figura 13: Turbina Arquimedes Roncuzzi.....	44
Figura 14: Turbina de arquimedes instalada na cidade de Curitiba.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Campo de aplicação das BFTs.....	24
Tabela 2: Dados da Calha Parshall.....	36
Tabela 3: Seleção de Turbina.....	37
Tabela 4: Potência hidráulica disponível para cada vazão.....	38
Tabela 5: Potência hidráulica requerida gerada pela turbina, incluindo perdas.....	39

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Àguas
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
ETA	Estação de Tratamento de Água
SE	Situação de Emergência
ECP	Estado de Calamidade Pública
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
BTF	Bombas Funcionando como Turbinas
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

LISTA DE SÍMBOLOS

P_{hidr}	Potência nominal de geração (w)
Q_n	Vazão nominal (m^3/s)
H	Altura de queda de água (m)
Q	Vazão útil (m^3/s)
n_t	Rendimento (adimensional)
P_{mec}	Potência mecânica. (w)
P_{vh}	Potência hidráulica. (w)
$\gamma_{\text{água}}$	Peso específico da água (N/m^3)
D	Diâmetro externo do parafuso (m)
g	Aceleração da gravidade em (m/s^2)
P_t	Potência Instalada (KW)
N_s	Velocidade específica (rpm).
n	Rotação no eixo da turbina (rpm).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Problema De Pesquisa	14
1.2 Delimitação Da Pesquisa	15
1.2.1 <i>Objetivos</i>	15
1.2.2 <i>Objetivo Geral</i>	15
1.3 Objetivos Específicos	16
1.4 Justificativa	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Geração de Energia Elétrica	18
2.2 Tipos de Turbina	19
2.2.1 <i>Turbina Pelton</i>	20
2.2.2 <i>Turbina Francis</i>	21
2.2.3 <i>Turbina Kaplan</i>	22
2.2.4 <i>Comparação dos modelos de turbina</i>	22
2.2.5 <i>Parafuso de Arquimedes</i>	23
2.3 Microcentrais Hidrelétricas	24
2.4 Estimativa de Custos	26
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	30
3.1 Caracterização da Pesquisa	30
3.1.2 <i>Requisitos de projeto</i>	31
3.1.3 <i>Programa de necessidades</i>	31
3.2 Técnicas e Instrumentos da Coleta de Dados	32
3.2.1 Cálculo de Potência Hidráulica	33
3.2.2 Perdas na turbina	33
3.2.3 Cálculo de eficiência da turbina	33
3.2.4 Cálculo da velocidade de rotação	34
3.2.5 Cálculo da Potência instalada de uma turbina	34
3.2.5 Cálculo da velocidade específica	35
3.2.6 Definição operacional das variáveis	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 Análise do Problema	37
4.1.2 <i>Análise Dimensional da Calha Parshall</i>	37

4.1.3 Seleção da Turbina	38
4.1.4 Análise	40
4.2 Discussão.....	44
CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Desde 2013 o Brasil passou a enfrentar uma crise energética que tem como um dos motivos a escassez hídrica, conforme à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (2020), está crise conforme relata a referida instituição afetou 48 milhões de pessoas no Brasil. Podemos ainda ressaltar que essa crise energética afeta boa parte da cadeia produtiva do país com o aumento da energia elétrica, contribuindo diretamente para o aumento da inflação no país.

Este trabalho pretende demonstrar a influência da quantidade e também do modelo das pás que compõem um gerador de energia elétrica instalado em uma Calha Parshall. Com isso pretende-se mensurar a quantidade de geração de energia elétrica em W (watts) que esse equipamento venha a produzir.

A Calha Parshall é uma estrutura mecânica utilizada para medir a vazão instantânea de entrada e saída de água e efluentes, geralmente instalada em canais abertos nas estações de tratamento de água e efluentes. O gerador instalado na Calha Parshall, irá aproveitar a energia cinética da água bruta que foi bombeada até a estação de tratamento de água para movimentar suas pás, gerando assim energia elétrica.

Este estudo será feito em uma Estação de Tratamento de Água da CORSAN, toda energia elétrica que venha ser gerada, será aproveitada para garantir o funcionamento de equipamentos instalados no local.

No Capítulo 1, além desta Introdução, serão apresentados a Questão de Pesquisa, os Objetivos e a Justificativa. No Capítulo 2 é realizada uma breve Revisão Bibliográfica sobre o tema, seguida do Capítulo 3 onde é caracterizada a pesquisa, são apresentadas as Técnicas e Instrumentos de Coleta de Dados e definidas as variáveis. No Capítulo 4 apresentam-se os resultados, complementando-se pela discussão dos mesmos e respectiva Conclusão, no Capítulo 5.

1.1 Problema De Pesquisa

Com a crise energética enfrentada pelo Brasil nos últimos anos, a sociedade busca alternativas para suprir a demanda de energia e reduzir os custos para sua geração. No ramo do saneamento básico, as diversas empresas do setor apresentam

um custo de energia elétrica como um dos seus principais gastos.

Em vista do acima exposto, este Trabalho se propõe a buscar por respostas para as seguintes questões de pesquisa: O gerador de energia hidrelétrica poderia reduzir esse custo consideravelmente? Como os gestores da área técnica da empresa lidariam com esse desafio de gerar sua própria energia? Haverá impacto no processo de tratamento da água?

1.2 Delimitação Da Pesquisa

A pesquisa está limitada ao estudo do modelo de turbina que compõem o gerador de energia elétrica, com isso indicar qual melhor modelo de turbina a ser selecionada para alcançar a maior quantidade de geração de energia elétrica em W (watts) do equipamento. E também o quanto a variação de vazão da água vai influenciar no desempenho da turbina.

Não serão investigados outros parâmetros como o ângulo da hélice, número de filetes, número de pás e a relação dos diâmetros interno e externo. Neste caso as perdas de carga geradas pelo atrito dos equipamentos e do contato da água serão desconsideradas.

Este estudo será feito na Estação de Tratamento de Água 1 da CORSAN, localizada na cidade de Montenegro que pertence ao estado do Rio Grande do Sul. Serão necessários os dados de leitura de vazão do macro medidor modelo ITS 2000 da fabricante Incontrol.

1.2.1 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, os quais são apresentados a seguir..

1.2.2 Objetivo Geral

De forma mais ampla, o objetivo principal deste trabalho, consiste em selecionar o modelo de turbina com maior capacidade de produção de energia elétrica, quando instalada em uma Calha Parshall como acionadora de um gerador de energia

elétrica.

1.3 Objetivos Específicos

- a) Analisar as dimensões da calha Parshall para assim definir em qual posição deverá ser instalada a turbina.
- b) Quantificar a potência necessária em watts para manter em funcionamento a iluminação do bloco hidráulico onde fica instalada a Calha Parshall.
- c) Selecionar o modelo de turbina mais eficaz considerando a variação de vazão existente, para o melhor funcionamento de um gerador de energia elétrica acionado por uma Calha Parshall.

1.4 Justificativa

O Brasil passou por um aumento da crise energética em 2021 que tem como um dos motivos a escassez hídrica conforme à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (2020). Os efeitos dessa crise energética se refletem na vida de toda população e na cadeia produtiva de todo país com o aumento da conta de energia elétrica. Este trabalho apresenta um estudo sobre a capacidade de geração de um gerador de energia hidrelétrica, que venha ser instalado em uma calha Parshall, instalada na entrada do floculador de uma Estação de Tratamento de Água da Corsan.

O gerador de energia hidrelétrica aproveita a energia cinética contida no fluxo das massas de água que foram retiradas de um manancial e passaram por bombeamento até chegar à calha Parshall que fica instalada na entrada da Estação de Tratamento de Água. A energia cinética promove a rotação das pás que, posteriormente será transformada em energia elétrica pelo gerador.

A energia elétrica produzida será utilizada no sistema de iluminação e também no funcionamento de equipamentos utilizados no laboratório de análises físico-químicas da Estação de Tratamento de Água.

Dessa maneira, o presente trabalho se justifica nos âmbitos econômicos e de inovação, contribuindo para redução do consumo de energia elétrica pela empresa e apresentando ao mercado de saneamento uma evolução do modelo tradicional de calha Parshall.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O Brasil vem passando por uma crise energética desde 2013, que tem como um dos motivos a escassez hídrica conforme à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (2020), conforme o relatório da instituição 48 milhões de pessoas foram afetadas por secas (duradoura) ou estiagens (passageiras) no território nacional entre 2013 e 2016, durante estes determinados anos foram registrados 4.824 eventos de seca com danos humanos. Somente em 2016, ano mais crítico em impactos para a população, 18 milhões de habitantes foram afetados por estes fenômenos climáticos que causam escassez hídrica, sendo que 84% dos impactados viviam no Nordeste.

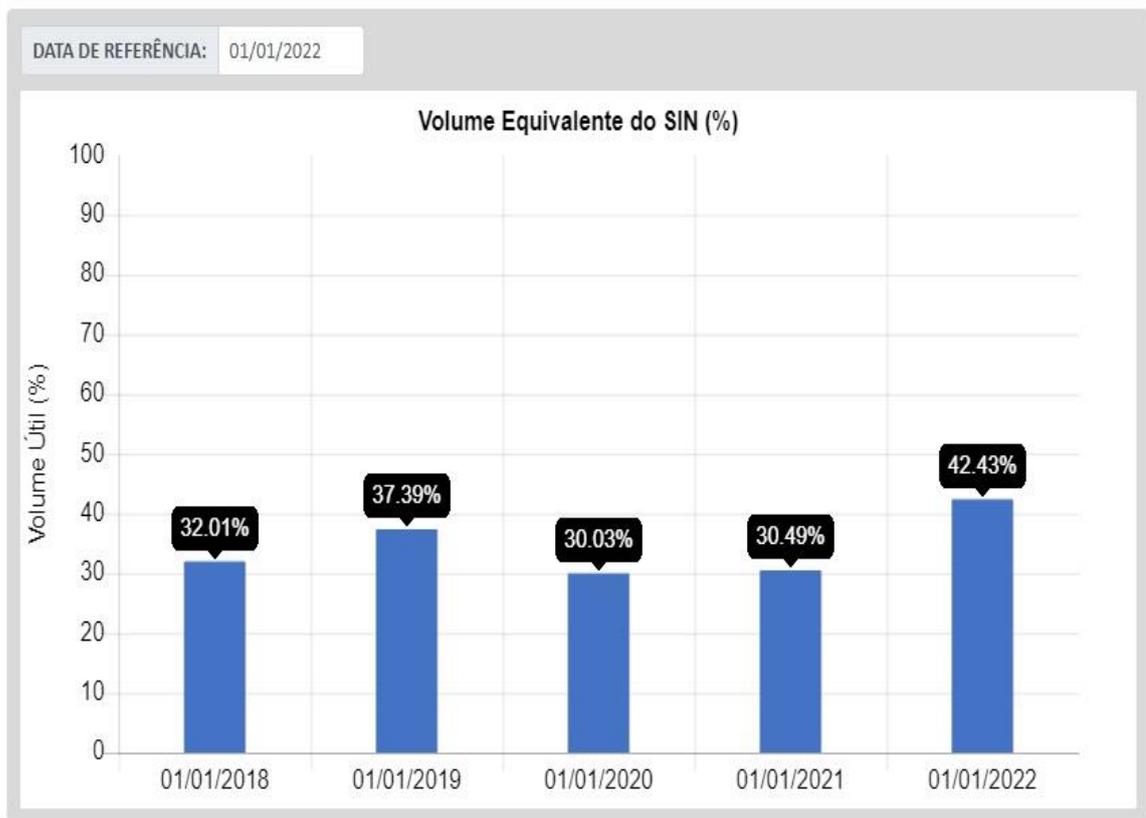
De 2003 a 2016, as secas e estiagens levaram 2.783 municípios a decretarem Situação de Emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP), sendo que 1.409 cidades do Nordeste (78,5% da região) tiveram que declarar SE ou ECP. Destes municípios, aproximadamente metade decretou emergência ou calamidade pelo menos uma vez em sete anos diferentes. Entre 2013 e 2016, o Nordeste registrou 83% dos 5.154 eventos de secas registrados no Brasil, que prejudicam a oferta de água para abastecimento público e para setores que dependem de água para realizarem atividades econômicas, como geração hidrelétrica, irrigação, produção industrial e navegação.

Os efeitos dessa crise energética se refletem claramente na vida de toda população e na cadeia produtiva de todo país com o aumento da conta de energia elétrica. Recentemente a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, emitiu a resolução nº 77 (ANA, 2021), que declarou situação crítica de escassez quantitativa dos recursos hídricos na Região Hidrográfica do Paraná.

A Região Hidrográfica do Paraná inclui importantes usos dos recursos hídricos, de relevância econômica e social, concentra os principais reservatórios de regularização do Sistema Interligado Nacional (SIN), com importância para a manutenção da segurança hídrica da região e energética do País.

O acompanhamento realizado pela ANA das vazões e dos níveis dos reservatórios da Região Hidrográfica do Paraná, que compõem o Sistema Interligado Nacional demonstra que os níveis dos reservatórios se mantem baixos ao longo dos últimos anos e será quantificado na figura a seguir.

Figura 1: Nível disponível dos reservatórios do sistema interligado nacional



Fonte: ANA (2020).

O Sistema Interligado Nacional - SIN é um sistema hidrotérmico de grande porte para produção e transmissão de energia elétrica, cuja operação envolve modelos complexos de simulações que estão sob coordenação e controle do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, que é fiscalizado e regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

A operação hidráulica dos sistemas de reservatórios integrantes do SIN é uma atividade de tempo real que consiste na operacionalização das diretrizes hidráulicas que, utilizando a capacidade de regulação dos reservatórios, permite o gerenciamento do armazenamento de água nos reservatórios considerando a otimização energética, o controle de cheias e o atendimento aos usos múltiplos da água.

2.1 Geração de Energia Elétrica

Conforme relata Simone (2010) a geração de energia elétrica a partir de máquinas hidráulicas, denominadas turbinas hidráulicas, recebe energia de um fluxo hidráulico, convertendo essa energia mecânico-hidráulica em mecânico-motriz, essa

será entregue a um gerador elétrico, que recebendo energia na forma mecânica, irá converter em energia elétrica que poderá ser transportada para os locais de consumo e utilização.

Como as turbinas são máquinas hidráulicas reais, a energia disponibilizada em seu eixo mecânico é menor do que aquela que o fluido forneceu a ela. O rendimento da turbina pode ser calculado assim:

$$\eta_{\text{ Turbina}} = \text{potência mecânico-motriz} / \text{potência mecânico-hidráulica}$$

Importante ressaltar que um fluido porta energia nas formas em que ele é capaz de receber, ou seja, energia de posição ou potencial, energia de pressão e energia cinética, a turbina que gira o seu rotor usando a energia cinética do fluido necessita de acessórios que convertam as outras formas de energia portada pelo fluido em energia cinética e direcionem o jato dele às pás do rotor da turbina.

2.2 Tipos de Turbina

As turbinas podem ser divididas de acordo com a trajetória do fluido no rotor, como: axiais, tangenciais, radiais e mistas.

Nas turbinas axiais, a trajetória do fluido ocorre em paralelo ao eixo de rotação do rotor. Nas turbinas tangenciais, o fluido percorre tangencial o eixo do rotor.

Nas máquinas de fluxo radiais, o fluido percorre trajetórias no plano perpendicular ao eixo do rotor, havendo componentes de velocidade em direções radiais. Nas turbinas mistas, as trajetórias percorridas pelo fluido estão em uma direção intermediária entre a radial e a axial.

Existem diversos elementos nas turbinas, como: eixos, mancais, elementos de vedação etc. Todos esses elementos mecânicos são fundamentais para o correto funcionamento. Entretanto, conforme afirma Oliveira, Obadowski e Silva (2021) há dois fundamentais que são encontrados nas turbinas: o rotor e o elemento direcionador do fluxo do fluido.

O rotor é a parte principal da turbina é um elemento que gira quando entra em contato com o fluido, extraíndo assim, energia deste e transformando em energia mecânica.

Ele é constituído de pás que são fixadas a ele, permitindo o contato com o fluido de trabalho. O elemento direcionador de fluxo além da função básica de guiar a

trajetória do fluido, evitando, assim o máximo de perdas de energia por choques, tem o papel fundamental de transformar energia potência e de pressão em energia cinética do fluido antes de contato com o rotor, que transforma essa energia cinética em energia de mecânica.

Nos dias atuais, existem vários tipos de turbinas hidráulicas, cada uma com sua aplicação e rendimento. Os principais modelos de turbinas estarão descritos a seguir.

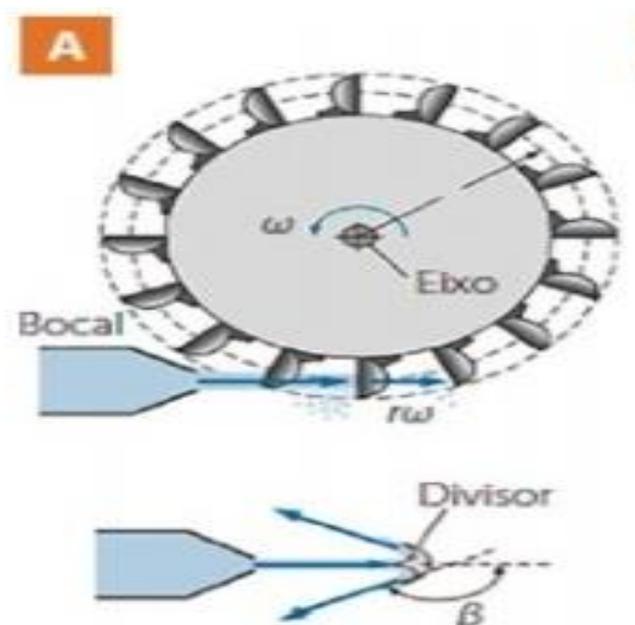
2.2.1 Turbina Pelton

A turbina Pelton é de ação (impulsão), o funcionamento dessa turbina é relativamente simples, similar ao das rodas d'água, extraindo energia cinética de um jato d'água que entra em contato tangencialmente ao eixo de rotação. (OLIVEIRA; OBADOWSKI; SILVA, 2021).

Muitas turbinas com esse mesmo princípio de funcionamento foram usadas antes de 1880, data de sua invenção, mas a turbina de Pelton apresentou melhor eficiência devido ao formato de concha, peculiar das pás, que permite o máximo de aproveitamento da energia dinâmica do jato.

São turbinas usadas frequentemente em locais com grandes quedas e pequenas vazões.

Figura 2: Modelo turbina Pelton



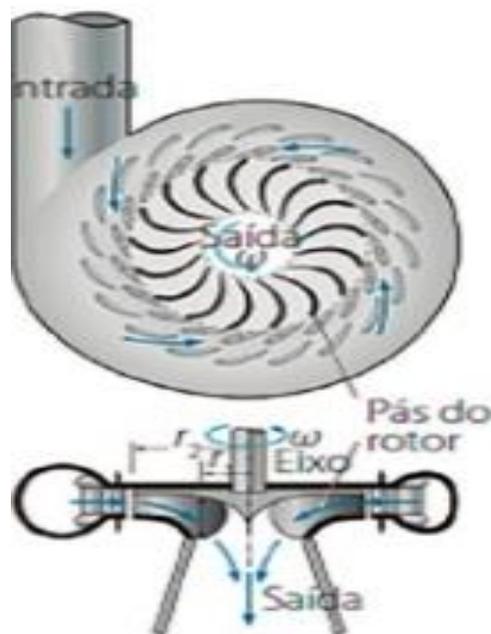
Fonte: Oliveira, Obadowski e Silva (2021).

2.2.2 Turbina Francis

A turbina Francis é de reação de fluxo interno, está representada logo a seguir pela figura. Seu funcionamento combina tanto o fluxo radial quanto o axial da água, sendo similar ao de uma bomba centrífuga na direção contrária. (OLIVEIRA; OBADOWSKI; SILVA, 2021).

O fluido entra usualmente de forma mista (radial e axialmente), sendo direcionado pelas palhetas até seu interior. Para ajustes de sazonalidade, essa turbina é dotada de palhetas móveis e fixas, para modificar o ângulo de entrada da água conforme a demanda, aumentando não só o rendimento como a faixa de operação. À medida que ocorre o contato do fluido com o rotor, a quantidade de movimento e pressão do fluido reduz, transferindo essa energia ao equipamento. Por suas características de funcionamento, são extremamente versáteis, apresentando eficiências da ordem de 95%, sendo a turbina mais usada na construção de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). Sua faixa de operação é intermediária, tanto para quedas quanto para vazões.

Figura 3: Modelo turbina Francis



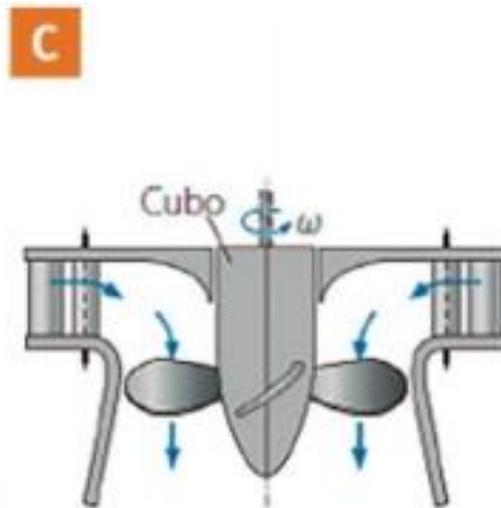
Fonte: Oliveira (2021).

2.2.3 Turbina Kaplan

A turbina Kaplan que será ilustrada pela figura 4, é de reação de fluxo interno, surgiu a partir do aperfeiçoamento da turbina Hélice. A principal diferença entre as duas é que na Kaplan, as pás acopladas ao rotor são móveis, enquanto, na Hélice, elas são fixas (OLIVEIRA; OBADOWSKI; SILVA, 2021). A entrada de água é similar à turbina Francis, entretanto ela é defletida para escoar axialmente antes de encontrar o rotor da máquina. Portanto, é uma máquina de fluxo axial.

São adequadas para condições em que as quedas disponíveis são baixas, mas as vazões disponíveis são altas, podendo apresentar eficiências similares às das turbinas Francis, entre 90% e 95%, sendo também boas opções para instalações de pequenas centrais hidrelétricas.

Figura 4: Modelo turbina Kaplan

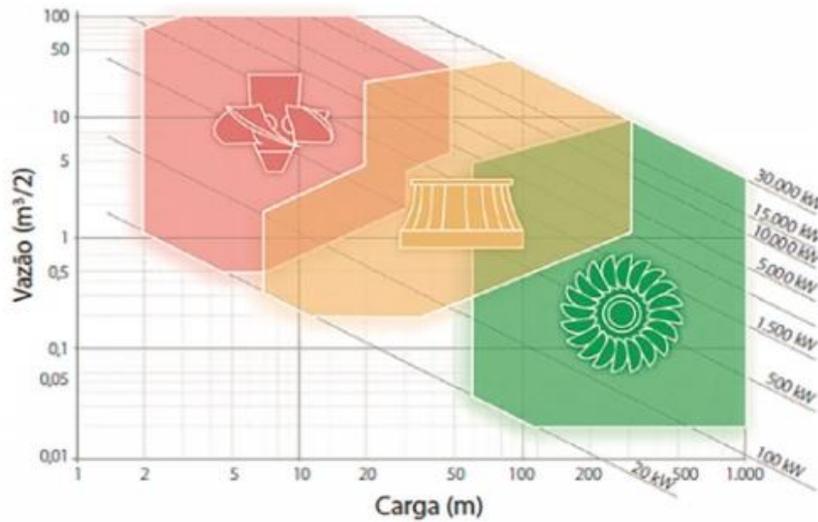


Fonte: Oliveira, Obadowski e Silva (2021).

2.2.4 Comparação dos modelos de turbina

A seguir uma comparação dos 3 modelos de turbinas por sua faixa de aplicação.

Figura 5: Comparação de modelos e aplicação de turbinas



Tipo de turbina por faixa de operação: Kaplan (baixa carga e alta vazão), Francis (média vazão e carga) e Pelton (alta carga e baixa vazão).

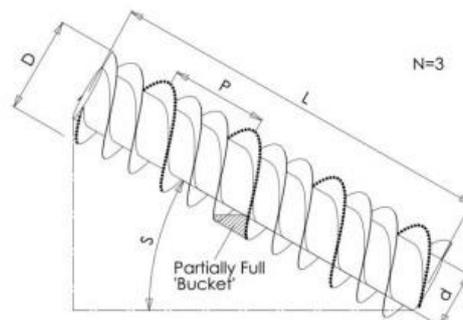
Fonte: Oliveira, Obadowski e Silva (2021).

2.2.5 Parafuso de Arquimedes

O parafuso atribuído a Arquimedes de Siracusa, físico grego que viveu no século III a.C, tinha como função desde a sua invenção o bombeamento de água para irrigação e aplicações de drenagem. Sua fundamentação teórica está inserida nas grandes máquinas transportadoras em parafuso. (RORRES, 2000).

Conforme Lubitz *et al.* (2013), o parafuso de Arquimedes possui a geometria semelhante a um parafuso convencional, onde superfícies helicoidais são enroladas ortogonalmente a superfície de um cilindro interno que funcionam como uma passagem (caminho para o fluido). A Figura 6 mostra o perfil do helicoidal da lâmina.

Figura 6: Exemplo do parafuso de Arquimedes



Fonte: Lubitz *et al.* (2013).

O parafuso é fixado em suas extremidades através de mancais de rolamento ou deslizamento, para assim ter o movimento de rotação livre. O parafuso é instalado sobre uma calha cilíndrica ou um tubo, havendo uma pequena folga entre a lâmina helicoidal e a parede da calha para se evitar a perda de carga por fuga de água. Quando usado como bomba, o parafuso é rotacionado, retendo a água sobre duas passagens consecutivas. Esta área delimitada por duas passagens junto com a calha é denominada de “balde”, onde a água captada é levada através dos baldes à medida que o parafuso é rotacionado com a aplicação de força mecânica no eixo. A extremidade inferior deve estar inundada no reservatório inferior para ocorrer a elevação de água (LUBITZ *et al.*, 2013). A altura de queda geralmente se encontra na faixa de 3 a 8 metros e apresenta pequena rotação de funcionamento, como 24 a 60 RPM, o que resulta elevado torque na transmissão (NIEDERLE, 2018).

Lubitz *et al.* (2013) relata que, examinando a potência em função da velocidade de rotação em seus testes, verificou que a rotação varia muito pouco próximo da faixa onde a potência é máxima, mesmo aumentando a altura de queda. Quando testado para vazões menores, observou que a potência diminui gradativamente até que a vazão seja insuficiente para girar a turbina. O estudo concluiu que a eficiência diminui lentamente para 50% do fluxo projetado, sendo que abaixo deste valor a eficiência cai bruscamente. Assim, fica claro que as turbinas de Arquimedes são relativamente tolerantes a mudanças de vazão mantendo relativa eficiência.

2.3 Microcentrais Hidrelétricas

Turbinas hidráulicas não convencionais têm sido desenvolvidas principalmente para uso em aproveitamentos de pequeno porte. No Brasil, essas turbinas têm sido pesquisadas e fabricadas para atender potências inferiores a 100 kW, ou seja, dentro dos limites das microcentrais hidrelétricas. Estas máquinas são simples, com os objetivos de ter um custo reduzido e um rendimento aceitável. Dentre os seus tipos, destacam-se as turbinas Michell-Banki e Turgo, e as Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) (VIANA, 1987).

A implantação de microcentrais hidrelétricas é uma das alternativas para suprir com energia comunidades pequenas e isoladas, situadas normalmente na área rural. O aproveitamento de potenciais hidráulicos de pequeno porte

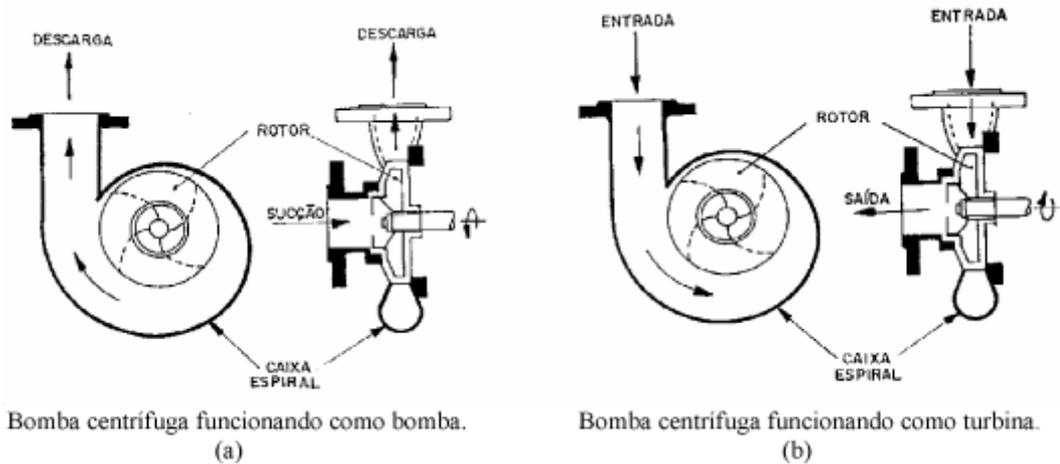
é uma alternativa cada vez mais viável devido não só à falta de recursos financeiros para os grandes empreendimentos, mas também pelo imenso potencial de geração em centrais de pequeno porte, que pouco tem sido aproveitado. Uma metodologia simples de engenharia para estimar o custo das Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) utilizadas em microcentrais hidrelétricas, que possam ser usadas em estudos preliminares de novos aproveitamentos hidrelétricos, sem uma investigação detalhada dos lugares onde se pretende implantar. Os custos foram obtidos consultando-se diretamente os fabricantes de equipamentos e o mercado da praça de Ponta Grossa - PR. Os resultados mostraram que, para as microcentrais hidrelétricas, sempre que os custos constituírem o aspecto dominante, e para potências até 50 kW, a opção por Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) deve ser considerada em lugar das turbinas hidráulicas. (BALARIM *et al.*, 2004).

A ideia de utilizar bombas como turbinas para geração de energia elétrica ou acionamento mecânico não é recente. Seu uso é justificado por serem menos complexas, isto é, mais fáceis de instalar, manter e operar, e por serem produzidas em grande escala, sendo facilmente encontradas no mercado, em diversos modelos. O comportamento de bombas hidráulicas sob condições especiais de operação é bem conhecido desde a década de 30 (STEPANOFF, 1967).

As bombas operando em reverso como turbinas, para gerar energia em pequenos recursos hidro energéticos, têm sido utilizadas em países como EUA, Alemanha e França. Bombas essas desde as centrífugas de vários estágios, de um estágio, mistas, até as axiais, substituindo as turbinas Pelton, Francis e hélices. Para que a bomba funcione como turbina, o sentido do fluxo de escoamento da água se inverterá e, conseqüentemente, haverá a inversão no sentido de rotação.

No caso do funcionamento como bomba, o líquido entra na sucção a baixa pressão, transforma energia de velocidade em pressão através do rotor, saindo pela descarga. No funcionamento como turbina, o líquido entra com energia de pressão, aciona o rotor em reverso e sai com baixa pressão, como mostra a figura 7 a seguir.

Figura 7: Bomba centrífuga funcionando como bomba e como turbina



Fonte: Viana (1987).

No Brasil em 1988, surgiu o projeto Bombas Funcionando como Turbinas (BFT), coordenado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), com o objetivo de desenvolver pesquisas e testes com vários tipos de bombas e apresentá-las como uma alternativa simples para a eletrificação do meio rural. Desse projeto resultou a publicação de (VIANA; FARIAS; LEITE, 1986) que apresentam de forma detalhada o comportamento e os aspectos operacionais da utilização em modo reverso de bombas centrífugas.

A escolha de uma turbina é feita em função das condições de vazão e de queda existentes no local. Segundo Viana (1987), o campo de aplicação das BFTs é o indicado na tabela a seguir.

Tabela 1: Campo de aplicação das BFTs

Tipo de turbina	Faixa de quedas(m)	Vazões(m ³ /s)	Faixa Potência (Kw)
BFTS	6-100	0,02 á 0,25	<50

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

2.4 Estimativa de Custos

As estimativas de custos das estruturas e equipamentos dos pequenos aproveitamentos têm sido pouco contempladas na literatura especializada. Os diversos estudos desenvolvidos nessa área dedicaram-se principalmente a centrais com capacidade instalada acima de 500 kW, existindo pouco material para usinas com

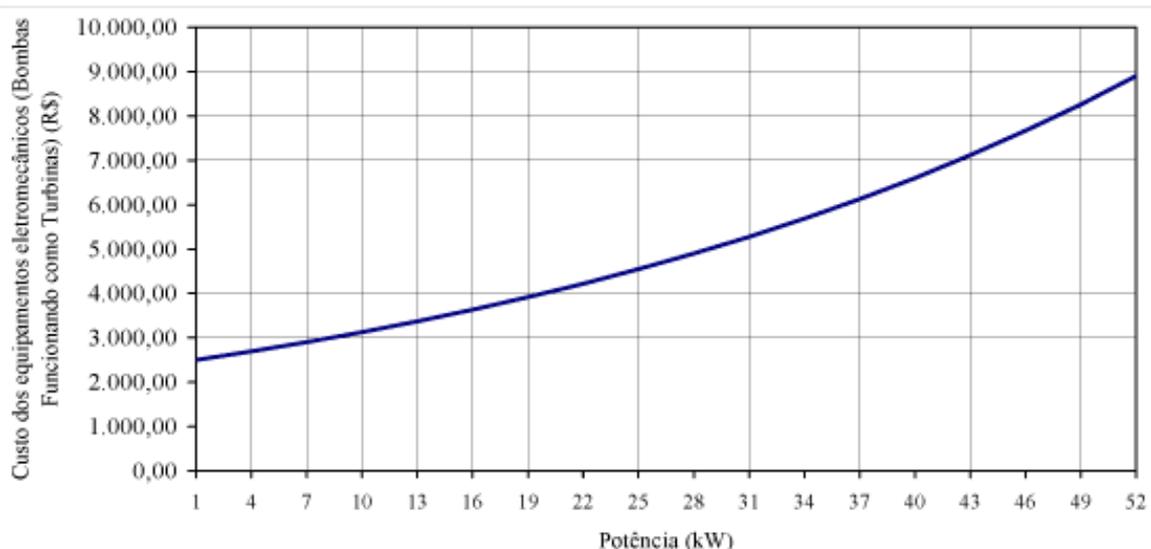
potências abaixo desse valor.

Para o caso de micro usinas utilizou informações da publicação, A Sistemática de cálculo para determinação do custo do kW instalado dos componentes hidromecânicos e elétricos de micro usinas hidrelétricas (GUIMARÃES; ROCHA, 1983). As bombas utilizadas para operarem em reverso como turbinas são as bombas de fluxo, ou seja bombas centrífugas, mistas e axiais. Foram estudadas as bombas centrífugas operando em reverso com potências abaixo de 50 kW.

Para a obtenção dos dados de custo dos equipamentos eletromecânicos da casa de máquinas, os quais geralmente representam uma grande parcela do custo total da obra, principalmente nas pequenas usinas, foi consultado o trabalho de (BELUCO,1994).

Na avaliação do custo dos equipamentos eletromecânicos, estão incluídos os seguintes componentes: conjunto turbina-gerador síncrono, assim como os equipamentos complementares (regulador de carga, válvula borboleta, curva de sucção, tubo de sucção, grade e quadro de comando). A figura a seguir fornece as estimativas de custo para os equipamentos eletromecânicos utilizando Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) para as potências estudadas.

Figura 8: Custo de equipamentos eletromecânicos utilizando BFTs em função da potência



Fonte: Beluco (1994).

O resultado mostrou que o custo dos equipamentos eletromecânicos por kW

instalado diminui com o aumento da potência quando se utilizam Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs).

Um importante conceito para o dimensionamento dos aproveitamentos hidráulicos e da Eficiência Energética das pequenas centrais hidrelétricas (PCH), calculada pela relação entre a energia total gerada e a energia potencial total disponível, durante o período de um ano. Recomenda para PCHs o uso de uma turbina com vazão ótima de projeto igual a Q95%. Analisando um estudo de caso, (ANAGNOSTOPOULOS; PAPANTONIS, 2007) verificaram que a inclusão de uma segunda turbina em uma PCH eleva sua eficiência energética consideravelmente, tendo atingido um máximo de 80%.

A otimização econômica de PCHs de baixa queda na Amazônia providas de duas turbinas axiais operando em paralelo, verificou-se ser mais eficiente o uso de turbinas de mesma potência. Foram simulados três cenários de mercado, (desaquecido, neutro e aquecido), concluindo-se que os melhores resultados econômicos correspondem ao uso de duas turbinas dotadas de regulação apenas do rotor, potência total da PCH da ordem de 30MW, em um mercado desaquecido, resultando em período de retorno de 1,7 anos e rentabilidade de 222% (VINAGRE *et al.*, 2016).

Os sistemas de abastecimento, distribuição e drenagem do setor da água são um dos principais tipos de sistemas hidráulicos artificiais com potencial para a instalação de micro hidrelétricas (SIMÃO; RAMOS, 2020). Apesar de existirem algumas aplicações nas condutas de adução, as redes de distribuição de águas urbanas continuam a ser pouco exploradas.

A energia hidroelétrica de pequena escala vem surgindo como fonte alternativa para satisfazer a procura local de eletricidade, o que torna a utilização de sistemas eficientes, não poluidores, econômicos e diversificados que permitam uma gestão integrada e racionalizada de recursos. O interesse em micro hidrelétricas, com potências instaladas abaixo dos 100 kW, tem aumentado, uma vez que esta é uma solução com baixo impacto ambiental e com potencial para ser utilizada em diferentes tipos de instalação (SAMORA; SCHLEISS; RAMOS, 2016). No entanto, as tecnologias disponíveis para a exploração de energia a esta escala são ainda limitadas, sendo atualmente temas de investigação.

Em função das condições locais, é possível avaliar e propor soluções para a instalação de micro hidrelétricas. O potencial hídrico de um local, a potência mecânica

para se transformar em elétrica, deverá ser avaliado segundo dois fatores fundamentais: a queda disponível e a vazão (RAMOS, 2013). Há uma tendência de pouca viabilidade para os pequenos aproveitamentos hídricos, mas é possível inverter este conceito com o aperfeiçoamento de técnicas construtivas e automação dos equipamentos envolvidos na construção dessas micro hidrelétricas (PAISH, 2002).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os Procedimentos Metodológicos correspondem a todo conjunto de tomada de decisões e ações quanto à escolha das técnicas de pesquisa e método para o desenvolvimento de um trabalho científico.

3.1 Caracterização da Pesquisa

Segundo a área do conhecimento, conforme definidas pelo CNPq (2020), este Trabalho se situa na grande área das engenharias, dentro da sub-área da Engenharia mecânica, mais especificamente no ramo dos fenômenos de transporte, especificamente na área de mecânica dos fluidos.

Quanto à finalidade, o Trabalho classifica-se como sendo uma pesquisa aplicada, uma vez que, conforme Gil (2010, p. 27), o tipo de pesquisa assim denominado pretende “resolver problemas identificados no âmbito das sociedades em que os pesquisadores vivem”. Ora, na medida em que se pretendem apresentar soluções para a utilização da água que flui pela calha Parshall que se destina ao abastecimento público da cidade, considera-se que se está resolvendo um problema que envolve toda a sociedade.

Quanto aos métodos empregados, classifica-se a mesma, ainda conforme a sub-divisão estabelecida por Gil (2010), referente a natureza dos dados, como uma pesquisa quantitativa, uma vez que nos interessa neste trabalho a quantidade de energia gerada pela calha Parshall como acionadora de um gerador elétrico. Quanto ao ambiente em que os dados serão coletados, o trabalho será parcialmente de campo, pois trata-se de uma pesquisa onde os dados coletados a respeito de rendimento do gerador serão no local da sua instalação e considerando-se aqui esta expressão como o escritório onde se realizarão os cálculos hidráulicos. Quanto ao grau de controle das variáveis, será uma pesquisa experimental, a qual, conforme Gil (2010) é conceituada onde cada experimento é constituído de variáveis cujos valores são mantidos constantes e o pesquisador examina a interferência das mesmas em outras variáveis, foco da observação (GIL, 2010), pois alterando a vazão do fluido que passa pela calha Parshall o rendimento do gerador irá diminuir.

Quanto aos objetivos, enquadra-se esta pesquisa dentro do tipo denominado pesquisa exploratória, pois, tendo em vista o que afirma o mesmo autor, este é o tipo

da “maioria das pesquisas realizadas com propósitos acadêmicos, pelo menos num primeiro momento.” (GIL, 2010, p. 27). o que está em sintonia com o que pretende este trabalho, uma vez que serão feitas pesquisas sobre o rendimento de um gerador de energia elétrica. Ainda dentro dessa sub-divisão, a coleta de dados se dará através de pesquisa bibliográfica e também da pesquisa dos dados descritos na seção 3.2.1. Para o levantamento de dados será realizada também uma pesquisa de campo, conforme conceituada por Martins Junior (2008, p. 59) é aquela em que ocorre “[...] um maior contato com a população pesquisada a fim de verificar a ocorrência de algum fenômeno que estaria influenciando sobre a mesma.”.

3.1.2 Requisitos de projeto

A seleção de turbinas hidráulicas para geração de energia depende de características, como altura de queda d’água e vazão, onde a turbina hidráulica será instalada. Essas características são fundamentais, porque com elas será possível selecionar corretamente a turbina apropriada para instalação. Ainda não é plausível decidir qual modelo de turbina será selecionado, então vamos mencionar de maneira geral algumas propriedades a serem estudadas quando se planeja instalar uma turbina hidráulica:

- a) Geração média anual esperada
- b) O fluxo médio aproveitado
- c) as condições de inundação do reservatório inferior
- d) as condições de saída de água no reservatório superior
- e) velocidade de rotação
- f) ângulo de inclinação
- g) diâmetro externo
- h) diâmetro interno

3.1.3 Programa de necessidades

No ano de 2021 nas dependências da empresa Corsan, ocorreu uma reunião envolvendo o setor de manutenção eletromecânica da Coordenadoria de Operações da COP Montenegro, o assunto principal da reunião era comunicar uma parceria com a empresa de fornecimento de energia elétrica RGE, para substituição dos motores

instalados nas bombas do 2º e 3º Recalque de água tratada localizado na ETA 1 de Montenegro por motores de alto rendimento que seriam 15% mais econômicos que os atuais.

A explanação do Coordenador Operacional trouxe um dado preocupante em relação ao consumo de energia elétrica da respectiva unidade, o gasto com energia elétrica representa 50% do custo de produção de cada litro de água tratado pela estação de tratamento.

Durante a reunião surgiram ideias para aumentar a economia de energia elétrica na Estação de Tratamento como: troca de todas lâmpadas internas e externas por lâmpadas de led, sabidamente mais econômicas que as lâmpadas eletrônicas, instalação de fotocélula para acionamento de todo circuito de lâmpadas externas, aproveitar mais a iluminação natural, procurar sobreaquecimento em cabos elétricos para evitar o efeito joule.

E durante essa reunião nasceu a ideia de aproveitar a energia cinética da água que entra na Calha Parshall para gerar energia elétrica suficiente para manter ligado a iluminação do bloco hidráulico, a potência total deste circuito é de 248 W.

3.2 Técnicas e Instrumentos da Coleta de Dados

O Medidor de vazão Ultrassônico para Calha Parshall, modelo ITS 2000 da fabricante Incontrol representado na figura 9, será utilizado para medir a vazão na entrada da estação de tratamento. A medição acontece em conduto livre, onde o regime fluvial da vazão é submetido a um regime crítico, fazendo com que obtenhamos relação entre a altura do fluido na calha e a vazão.

Figura 9: Medidor de vazão



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.2.1 Cálculo de Potência Hidráulica

Em posse dos dados de vazão e altura disponíveis podemos calcular a potência hidráulica disponível, segundo (ÇENGEL; CIMBALA, 2015 p.196), conforme mostra a equação 1:

$$Ph = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$

Onde:

Ph = potência em watts.

ρ = densidade da água em kg/m³.

g = aceleração da gravidade em m/s².

Q = vazão em m³/s.

H = altura da queda em metros.

3.2.2 Perdas na turbina

Outro ponto muito importante na seleção de uma turbina é sua eficiência, existem vários motivos que podem levar à perda de rendimento em uma turbina hidráulica. Alguns dos principais motivos incluem:

1. Perdas mecânicas: nos rolamentos e nas transmissões mecânicas.
2. Perdas Hidráulicas: devido as turbulências, atrito e redirecionamento inadequado do fluxo de água dentro da turbina, desgaste das pás, ângulos de entrada e saída incorretos das pás.
3. Perdas por vazamentos: Na voluta, caixa espiral, gaxeta, retentores, juntas.

3.2.3 Cálculo de eficiência da turbina

A eficiência da turbina é calculada pela razão da energia mecânica produzida e a energia hidráulica disponível para movimentar a turbina. A eficiência será conhecida pela equação 2 (ÇENGEL; CIMBALA, 2015, p. 196).

$$n_t = \frac{P_{mec}}{P_{vh}}$$

Onde:

n_t = Rendimento.

P_{mec} = Potência mecânica.

P_{vh} = Potência hidráulica.

3.2.4 Cálculo da velocidade de rotação

A velocidade máxima de rotação do parafuso conforme estudos práticos, considera que as câmaras entre lâminas adjacentes estão todas preenchidas perfeitamente, sem que houvesse retorno de água pelo parafuso. Equação 3 (NAGEL, 1968, p. 36).

$$N = \frac{50}{\sqrt[3]{D^2}}$$

Sendo:

N: velocidade de rotação (RPM).

D: diâmetro externo do parafuso (m).

3.2.5 Cálculo da Potência instalada de uma turbina

O manual "Micro –hydro design manual – a guide to small scale water power schemes" (HARVEY, 1998), propõe a equação 4, para Potência instalada somente em turbinas para micro e minicentraís.

$$P_t = g \cdot Q \cdot H \cdot n_t$$

Onde:

P_t = Potência Instalada (KW)

g= Gravidade

Q =Vazão (m³/s)

H = Altura disponível (m)

n_t = Rendimento (%)

3.2.5 Cálculo da velocidade específica

Define-se a velocidade específica (N_s) como sendo um índice adimensional de projeto, que identifica a semelhança geométrica de turbinas e 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. Desenvolvendo a potência de $P_t = 1$ HP, sob uma queda $H_d = 1$ m. A velocidade específica é calculada no ponto de melhor eficiência da turbina com rotor de diâmetro máximo (OMEL, 2018). O manual "Micro –hydro design manual – a guide to small scale water power schemes" (HARVEY, 1998), propõe a equação 5 para rotação específica aplicada somente às turbinas para micro e minicentrals.

$$N_s = 1,2 \cdot n \cdot (P_t^{0,5} / (H_d)^{\frac{5}{4}})$$

Onde:

N_s = Velocidade específica (rpm).

n = Rotação no eixo da turbina (rpm).

P_t = Potência da turbina em quilowatts por hora (kW/h).

H_d = Altura da queda d'água disponível em metros (m).

3.2.6 Definição operacional das variáveis

- a) Analisar as dimensões da calha Parshall para assim definir em qual posição deverá ser instalado o gerador de energia elétrica.

Com o auxílio de uma trena vamos medir comprimento, largura e profundidade da calha Parshall, escolhendo assim a melhor posição para instalação do gerador conforme suas medidas físicas.

- b) Quantificar a potência necessária em watts para manter em funcionamento a iluminação do bloco hidráulico onde fica instalada a Calha Parshall.

Será feito o levantamento da quantidade de lâmpadas e suas potências específicas, assim será realizado o cálculo da demanda de energia para manter a iluminação do salto hidráulico em funcionamento.

c) o quanto a vazão de água na entrada da Calha Parshall influencia no rendimento do gerador de energia elétrica.

Através dos dados de controle de vazão apresentados pelo medidor de vazão Ultrassônico será possível estimar a influência da vazão na rotação das pás do gerador o que vai influenciar diretamente no rendimento do mesmo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo visa apresentar os métodos empregados para seleção de uma turbina instalada em uma calha Parshall e descobrir sua eficiência, tendo como parâmetro de análise a variação da vazão de entrada da mesma.

Também contextualizar qual era a ideia inicial da aplicação, as dificuldades e as mudanças ao longo de sua execução.

4.1 Análise do Problema

Em 2022 houve o início deste estudo de caso com a sugestão de idealizar o desenvolvimento de um gerador de energia instalado em uma calha Parshall. Para isso seria necessário avaliar o local a ser instalado e propor uma possível alternativa para aproveitar a energia cinética da água disponível na calha Parshall.

A seleção da turbina ideal é fundamental para alcançar o máximo rendimento do gerador, sendo assim foram coletadas as medidas físicas da calha Parshall. Em conjunto foi realizado a coleta dos registros de vazão, registrados pelo medidor ultrassônico instalado na entrada do floculador no período de 24hrs de 1 dia inicialmente.

Conforme a época do ano esses valores se alteram, infelizmente durante o verão que necessitamos uma maior vazão para atender o consumo da população, visto que a demanda aumenta em torno de 20%, o nível do manancial baixa consideravelmente, exigindo que a vazão da bomba que faz a coleta da água bruta do rio e envia até a estação de tratamento tenha que ser reduzida, para evitar o fenômeno conhecido como cavitação.

Esta redução de vazão entre os meses de Dezembro e Abril gira em média de 34,6% tomando como parâmetro a vazão máxima de operação da bomba que é 75L/s e a mínima registrada em fevereiro que foi de 49L/s.

4.1.2 Análise Dimensional da Calha Parshall

Este estudo de caso visa responder sobre a questão da viabilidade da instalação de uma turbina para geração de energia elétrica, instalada na calha Parshall. Para isso foram analisadas as medidas físicas da mesma, altura da queda e

disponibilidade de vazão mínima e máxima. Com esses dados chegamos na tabela 1, assim vamos analisar os valores e verificar se atendem os requisitos mínimos do projeto.

Tabela 2: Dados da Calha Parshall

Comprimento calha Parshall (m)	Largura de saída da calha Parshall (m)	Altura da queda(m)	Vazão m ³ /s
1,52	0,38	1	0,049 á 0,075

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Conforme a figura 10, podemos visualizar o local da instalação da turbina e também a limitação de espaço para sua instalação.

Figura 10: Calha Parshall



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.1.3 Seleção da Turbina

Analisando os dados da tabela anterior, e levando em consideração nesse primeiro momento somente a queda disponível, é possível compreender que os modelos de turbina que poderiam ser instalados no local e já citados ao longo deste estudo de caso, seriam a turbina de modelo Kaplan ou turbina de Arquimedes.

Conforme descreve Clementino (2015) a seleção de turbinas é feita levando

em consideração a velocidade específica (rpm) e altura da queda (m) disponível. O mesmo sugere na tabela 3 que, para um rendimento acima de 80% na turbina os requisitos mínimos serão:

Tabela 3: Seleção de Turbina

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).

A queda disponível é insuficiente para seleção de qualquer um dos modelos da tabela, tendo disponível uma altura manométrica de 1m o rendimento da turbina seria baixo, descartando assim a seleção da turbina Kaplan neste estudo de caso.

Assim concluímos que a turbina de Arquimedes será a alternativa mais adequada para as condições disponíveis de projeto.

Muitas turbinas de Arquimedes utilizam caixas de velocidade e geradores síncronos, limitando a sua operação, pois este tipo de instalação é feito em córregos e sem reservatório a montante, limitando-se a diferença de nível a jusante e a montante, pois não há reservatório de acumulação. Por isso, a importância de se verificar o comportamento da turbina quanto a essa variação de vazão (LUBITZ *et al.*, 2013).

4.1.4 Análise

Alguns dados serão predefinidos para realização dos cálculos do projeto, são eles: vazão disponível variando de 49 L/s á 75L/s , altura de queda útil de 1m, densidade da água 1000 Kg/m³, rendimento da turbina 50%, diâmetro externo do parafuso 0,35 m, potência requerida pelo sistema de iluminação 248W.

Utilizando a equação 1 apresentada no capítulo 3, foi possível estimar à potência hidráulica em watts produzida pela turbina com a variação da vazão. Os resultados obtidos estão descritos na tabela 4.

Tabela 4: Potência hidráulica disponível para cada vazão

Q (m ³ /s)	Ph (W)	Q (m ³ /s)	Ph (W)	Q (m ³ /s)	Ph (W)
0,049	480,2	0,060	588	0,071	695,8
0,050	490	0,061	597,8	0,072	705,6
0,051	499,8	0,062	607,6	0,073	715,4
0,052	509,6	0,063	617,4	0,074	725,2
0,053	519,4	0,064	627,2	0,075	735
0,054	529,2	0,065	637		
0,055	539	0,066	646,8		
0,056	548,8	0,067	656,6		
0,057	558,6	0,068	666,4		
0,058	568,4	0,069	676,2		
0,059	578,2	0,070	686		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os valores de potência gerada pela turbina representados na tabela 3, demonstram a capacidade de geração da mesma com a vazão e altura de queda disponíveis em determinado instante, não levando ainda em conta as perdas, no item 3.2.2 deste estudo de caso citamos algumas delas. Podemos dizer que a potência gerada pela turbina é a relação entre a potência que o fluido coloca na entrada do seu rotor, com aquilo que a turbina coloca à disposição do gerador como resultado de seu trabalho.

A potência requerida podemos definir como aquela necessária para que a turbina entre em movimento, e atenda a demanda da aplicação para qual ela está sendo projetada, levando em consideração as perdas que existem no sistema.

A discussão sobre a eficiência da bomba de parafuso de Arquimedes, conclui-se que para um parafuso pequeno, os aumentos das perdas por vazamento em grande parte são compensados pela redução das perdas de descarga de vazão. Esta consideração é válida também para a não utilização do parafuso em altas velocidades. Já para baixas alturas de queda, a perda por atrito e por descarga no reservatório tem um grande efeito adverso na eficiência do parafuso, principalmente para parafusos de maior porte (NAGEL, 1968, p.50).

Aplicando a equação 2, do item 3.2.3 sobre Cálculo de eficiência da turbina foi constatado que a partir da vazão de 51 L/s a potência hidráulica gerada pela turbina é capaz de gerar energia suficiente para manter ligada a iluminação do bloco hidráulico, inclusive levando em consideração as perdas da turbina para sua geração. Para esse cálculo de eficiência da turbina, escolhemos o pior cenário encontrado durante as pesquisas bibliográficas deste estudo de caso, adotamos um rendimento de 50%. Os valores obtidos no Cálculo de eficiência da turbina constam na tabela 5.

Tabela 5: Potência hidráulica requerida gerada pela turbina, incluindo perdas.

Q (m3/s)	Ph (W)	Q (m3/s)	Ph (W)	Q (m3/s)	Ph (W)
0,049	240	0,060	294	0,071	347,9
0,050	245	0,061	298,9	0,072	352,8
0,051	249,9	0,062	303,8	0,073	357,7
0,052	254,8	0,063	308,7	0,074	362,6
0,053	259,7	0,064	313,6	0,075	367,5
0,054	264,6	0,065	318,5		
0,055	269,5	0,066	323,4		
0,056	274,4	0,067	328,3		
0,057	279,3	0,068	333,2		
0,058	284,2	0,069	338,1		
0,059	289,1	0,070	343		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A próxima análise a ser feita é sobre a velocidade específica da turbina, ao longo dessa pesquisa, todos autores consultados relataram que para uma seleção correta do modelo de turbina é fundamental que a velocidade específica e altura útil da queda sejam atendidos para alcançar um bom rendimento do equipamento.

Começamos calculando a velocidade de rotação do parafuso através da já conhecida equação 3.

$$N = \frac{50}{\sqrt[3]{D^2}} \quad (3)$$

$$N = \frac{50}{\sqrt[3]{0,35^2}} = \sim 101 \text{ rpm}$$

Aplicando o valor de 0,35m na equação 3, que tem no item D a representação do valor de Diâmetro externo do parafuso, encontramos sua velocidade máxima de operação que é aproximadamente 101 RPM.

Partimos agora para o Cálculo da Potência Instalada de uma turbina usando a equação 4.

$$P_t = g \cdot Q \cdot H \cdot n_t \quad (4)$$

$$P_t = 9,81 \cdot 0,075 \cdot 1 \cdot 0,5 = 0,367 \text{ Kw}$$

Com a equação anterior descobrimos o valor de P_t , o mesmo será usado na resolução da equação 5, do cálculo da velocidade específica.

$$N_s = 1,2 \cdot n \cdot (P_t^{0,5} / (Hd)^{\frac{5}{4}}) \quad (5)$$

$$N_s = 1,2 \cdot 101 \cdot (0,367^{0,5} / (1)^{\frac{5}{4}})$$

$$N_s = 73,42 \text{ rpm}$$

Existe uma grande dificuldade em encontrar catálogos técnicos sobre a Turbina de Arquimedes se compararmos com outras turbinas citadas nesse estudo de caso como Kaplan, Pelton e Francis. Hoje no Brasil temos apenas uma empresa especializada na fabricação e instalação da turbina de Arquimedes, ela se chama Arkenergy (2023), fica localizada na cidade de São Bento do Sul -SC. No site da empresa até o momento informa a conclusão e instalação de duas turbinas de

Arquimedes no Brasil, uma delas representada na figura 11, e mais uma em fase de instalação figura 12.

Figura 11: Turbina de Arquimedes



Fonte: Arkenergy (2023).

O site da fabricante não informa onde a PCH com turbina de Arquimedes está instalada, mas revela dados técnicos da mesma como:

- Diâmetro do parafuso: 2,1 m
- Comprimento do parafuso: 5,7m
- Altura Manométrica H: 2,0 m
- Vazão Q: 1,4 m³/s
- Potência Elétrica P: 21 kW

Em fase de construção a Usina Hidrelétrica CGH Timbó Grande, localizada na cidade de Timbó Grande - SC, com uma vazão de 7,5 m³/s, altura manométrica de 4,9 metros e estimado uma geração de 265 kW de potência. Neste projeto, serão instaladas duas turbinas Arkenergy do tipo parafuso de Arquimedes (ARKENERGY, 2023).

Figura 12: Turbina de Arquimedes CGH Timbó Grande



Fonte: Arkenergy (2023).

Outro fabricante especializado na fabricação de turbina de Arquimedes é a empresa italiana Roncuzzi, a empresa tem sede na cidade de Mezzano. No site da fabricante existem vários registros fotográficos de PCH's com turbina de Arquimedes instalados pela empresa, mas em nenhum registro consta localização ou algum tipo de dado técnico da PCH. Uma de suas Turbinas de Arquimedes é representada na figura 13.

Figura 13: Turbina Arquimedes Roncuzzi



Fonte: Roncuzzi (2023).

4.2 Discussão

Após a conclusão da análise numérica poderemos concluir que a turbina de Arquimedes foi a melhor escolha para as condições de queda útil e vazão disponíveis.

Os valores encontrados no cálculo de velocidade específica da turbina demonstram que não seria possível a escolha de algum dos modelos de turbina que constam na tabela 2.

Em 2019 foi inaugurada uma turbina de Arquimedes em Curitiba, no Parque Barigui, a qual aproveita a queda de 3,5 m do vertedouro do lago para gerar cerca de 30 kW. O custo total do investimento foi de R\$ 450 mil. A produção será injetada na rede, gerando créditos de energia para o município e estima-se que a economia seja de R\$ 132 mil ao ano (ABRAPCH, 2019). A Figura 14, mostra o momento da inauguração da turbina.

Figura 14: Turbina de Arquimedes instalada na cidade de Curitiba



Fonte: ABRAPCH (2019).

A aplicação da turbina de Arquimedes na cidade de Curitiba demonstra que é viável do ponto de vista energético a instalação do modelo como Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) quando temos baixas alturas disponíveis de queda útil.

Através dos resultados dos cálculos de eficiência, foi possível demonstrar sob um ponto de vista econômico, a viabilidade da instalação do gerador de energia na Calha Parshall.

Cabe ressaltar que a energia gerada pela PCH em estudo é uma energia limpa, e sem causar nenhum dano ao meio ambiente, já que para sua instalação não afetará a fauna e flora existentes no local.

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A realização deste estudo de caso para geração de energia com a instalação de uma turbina em uma Calha Parshall, permitiu que fossem elaboradas conclusões que estão expostas neste capítulo.

Nesse estudo de caso foi avaliado a viabilidade de instalação de um gerador de energia em uma Calha Parshall, foi realizado a modelagem matemática onde o parâmetro a ser avaliado foi a potência hidráulica disponível gerada com a variação da vazão. A variação da vazão para essa estimativa foi de 49 L/s até 75 L/s, foram realizados 26 cálculos que geraram uma tabela, informando a potência hidráulica gerada para cada vazão aplicada na entrada da turbina. As condições específicas de queda útil e vazão disponíveis no local da aplicação indicaram que qual modelo de a turbina a ser escolhida.

Com os resultados apresentados durante o estudo de caso, podemos concluir que a turbina de Arquimedes atenderia os parâmetros mínimos de funcionamento. Com a sua seleção foi possível especificar a rotação máxima do parafuso da turbina e sua velocidade específica.

Através dos cálculos de potência hidráulica gerada usando os dados coletados pelo macro medidor de vazão, foi possível determinar que a partir da vazão de 51L/s a energia gerada pela turbina é suficiente para manter a iluminação do bloco hidráulico da Estação de Tratamento de Água em funcionamento. Provando a viabilidade do projeto e abrindo a possibilidade de instalação deste equipamento em outras Estações de Tratamento de Água, que tem uma vazão de operação até 16 vezes maior.

Para trabalhos futuros seria pertinente avaliar o quanto a inclinação do parafuso, comprimento e aumento da vazão poderiam influenciar na eficiência do mesmo, sabemos que aumento em demasia de alguns fatores citados pode tornar a passagem do fluido pela turbina turbulento, o que justificaria a continuação desse estudo de caso.

É importante ressaltar a aplicabilidade da turbina de Arquimedes em canais onde há variação de vazão mantendo um bom rendimento, visto que este tipo de instalação normalmente não possui reservatório de acumulação e é ideal para pequenas quedas d'água.

Devemos salientar também que do ponto de vista ambiental , a energia produzida pela turbina de Arquimedes é uma energia limpa e de baixo impacto ao

meio ambiente e tem custo de instalação até 30% menor, comparado a outros modelos de turbinas de geração de energia citados nesse estudo de caso.

REFERÊNCIAS

ABRAPCH. **Começa a operar em Curitiba usina que vai gerar energia limpa no Parque Barigui**. 2019. Disponível em: <https://abrapch.org.br/2019/10/comeca-a-operar-em-curitiba-usina-que-vai-gerar-energia-limpa-no-parque-barigu>. Acesso em: 20 de maio 2023

ANA. **Relatório da ANA apresenta situação das águas do Brasil no contexto de crise hídrica**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/relatorio-da-ana-apresenta-situacao-das-aguas-do-brasil-no-contexto-de-crise-hidrica>. Acesso em: 18 abr. 2022.

ANA. **Resolução nº 77, de 1º de junho de 2021**. Ministério Do Desenvolvimento Regional/ Agência Nacional De Águas E Saneamento Básico, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-ana-n-77-de-1-de-junho-de-2021-323553340> . Acesso em 18 de abr.22.

ANAGNOSTOPOULOS, J. S.; PAPANTONIS, D. E. Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant. **Energy conversion and management**, v. 48, n. 10, p. 2663-2670, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890407001318>. Acesso em 24 maio 2023.

ARKENERGY. **Projetos em execução**. 2023. Disponível em: <https://arkenergy.com.br/projetos.html>. Acesso em 24 maio 2023.

BALARIM, C. R. *et al.* Custo de bombas centrífugas funcionando como turbinas em microcentrais hidrelétricas. **Engenharia Agrícola**, v. 24, p. 219-225, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/4G7p59f8ZDGD6kcVtFTvwkR/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 06 de maio 2022.

BELUCO, A. **Viabilidade de microcentrais hidrelétricas baseadas no emprego de equipamentos de mercado** 1994. 170 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994. CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos** . Grupo A, 2015. *E-book*. ISBN 9788580554915. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580554915/>. Acesso em: 07 mai. 2023.

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

GUIMARÃES, L. B.; Rocha, J. C. A. **Sistemática de cálculo para a determinação do kW instalado dos componentes hidromecânicos e elétricos de micro usinas hidrelétricas**, Curitiba: Secretaria de Estado de Planejamento, Coordenadoria de Estudos e Projetos, 1983. 58 p.

GIL, A. C.. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2010.

HARVEY, A.. **Micro –hydro design manual – a guide to small scale water power schemes**. , Editora Intermediate Technology Publications ,1998.

LUBITZ, W. D. *et al.* **Archimedes Screws for Microhydro Power Generation**. ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability, July 2013, 87 p. 1–7, 2013. Disponível em: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/E S2013-18067> . Acesso em: 06 de maio 2022.

MARTINS JUNIOR, J.. **Como escrever trabalhos de conclusão de curso**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2008.

NIEDERLE, G. D.. **Eficiência da Turbina de Arquimedes Usando Multiplicador de Velocidade, Inversores de Frequência e Gerador PMSG**. Hidroenergia Engenharia e Automação Ltda., 2018. Disponível em: <http://www.hidroenergia.com.br/eficiencia-da-turbina-de-arquimedes-usando-multiplicador-de-velocidade-inversores-de-frequencia-e-gerador-pmsg>. Acesso em: 06 de maio 2023.

OLIVEIRA, I. C. D.; OBADOWSKI, V. N.; SILVA, A. P. B.J.; **Geração de Energia Elétrica** .1 ed. Porto Alegre: Grupo A, 2021.

OMEL. **Omel modelos de Bombas e Compressores**. 2018. Disponível em: <https://www.omel.com.br/> . Acesso em: 02 maio 2023.

PAISH, O. Micro-hidrolétrica: situação e perspectivas. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A. **Journal of Power and Energy**, p. 31-40, 2002.

RONCUZZI. **Formulários**. 2023. Disponível em: <https://www.roncuzzi.com//pae/applications.asp> Acesso em: 24 de maio 2023

RORRES, C.. Buchwald Reactions. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 9429, n. 1, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228581326_The_Turn_of_the_Screw_Optimal_Design_of_an_Archimedes_Screw . Acesso em: 06 maio 2023.

SAMORA, I.; SCHLEISS, A.; RAMOS, H. Experimental characterization of a five blade tubular propeller turbine for pipe inline installation. **Renewable Energy**, v. 95, p. 356-366, 2016. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.023>. Acesso: 15 jun. 2023.

SIMÃO, M.; RAMOS, H. M. Recuperação de energia de baixa queda: turbina hélice tubular com 5 pás. **Ingeniería del agua**, v. 24, n. 4, p. 285-294, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4995/ia.2020.13636>. Acesso: 15 jun. 2023.

SIMONE, G. A. **Centrais e aproveitamentos hidrelétricos: uma introdução ao estudo**,1. ed.São Paulo: Erica, 2010.

STEPANOFF, A. J. **Centrifugal and axial flow pumps** 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1967. 462 p.

VIANA, A.N.C. **Comportamento de bombas centrífugas funcionando como turbinas hidráulicas** 1987. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1987.

VIANA, A.; FARIA, T.; LEITE, F. Bombas centrífugas funcionando como turbinas, para microcentrais. **Mundo Elétrico**, v. 320, p. 52-5, 1986.

VINAGRE, M. V. A. *et al.* Otimização do uso de turbinas axiais em pequenas centrais hidrelétricas da Amazônia. **RBRH**, v. 21, p. 88-98, 2016. Disponível: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/bJmh4CTm3XdSZHBjWMcGgQw/?lang=pt&format=html>. Acesso: 15 jun. 2023.