

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**WILERSON ALVES CHUMA**

**GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE SIFÃO EM  
BARRAGENS**

**WILERSON ALVES CHUMA**

**GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE SIFÃO EM  
BARRAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Wagner Maciel  
Kaehler

**Alegrete  
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C676g Chuma, Wilerson

Geração de energia hidroelétrica através de sifões em  
barragens / Wilerson Chuma.

61 p.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2023.

"Orientação: Jose Wagner Maciel Kaehler Kaehler".

1. Geração . 2. Energia . 3. Hidroelétrica. 4. Sifão. I.  
Título.

**WILERSON ALVES CHUMA**

**GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE SIFÃO EM BARRAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Dissertação defendida e aprovada em: 7 de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. José Wagner Maciel Kaehler

Orientador

---

Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Natalia Braun Chagas

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete

2023



Assinado eletronicamente por **NATALIA BRAUN CHAGAS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2023, às 15:31, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2023, às 18:09, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **José Wagner Maciel Kaehler, Usuário Externo**, em 19/12/2023, às 06:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1313786** e o código CRC **04DE9BAC**.

Dedico este trabalho aos meus pais, Adriana e Ronaldo

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Adriana e Ronaldo, cujo apoio inabalável e generosidade me permitiram perseguir minha educação universitária longe de minha cidade natal.

Quero estender meus sinceros agradecimentos aos amigos que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada, sempre prontos para oferecer seu auxílio e apoio quando mais precisei.

Não posso deixar de destacar meu apreço especial aos professores que, com dedicação incansável, me guiaram em minha trajetória acadêmica, compartilhando seu conhecimento e experiência.

Por último, mas definitivamente não menos importante, desejo expressar minha gratidão a Deus pela oportunidade de experimentar momentos de profunda felicidade e realização ao longo desse caminho.

Para os dias bons, gratidão.

Para os dias difíceis, fé.

Para dias de saudade, tempo.

Para todos os dias, coragem. (Chico Xavier)



## RESUMO

Os sifões, dispositivos que exploram a diferença de altura entre a superfície da água na barragem e o ponto de descarga, foram implementados em uma barragem específica. Foram coletados dados operacionais e de desempenho, avaliando a eficácia do sistema em condições reais, incluindo a alocação da turbina no início do tubo ou no final para aproveitar a queda de água, o que indicou uma produção significativa de energia. Os impactos ambientais associados à implementação dessa tecnologia foram meticulosamente avaliados, revelando que, em comparação com barragens convencionais, os sifões demonstram menor impacto ambiental. Essa abordagem preserva os ecossistemas aquáticos e reduz a área alagada, contribuindo para práticas mais sustentáveis na geração de energia hidroelétrica. A análise econômica, que considerou os custos de implementação e retorno financeiro, evidenciou a competitividade dos sifões em termos de custo-benefício quando comparados aos métodos convencionais de geração hidroelétrica. As conclusões ressaltam a viabilidade econômica da geração de energia por meio de sifões. Os resultados sugerem que essa abordagem representa uma alternativa sustentável e eficiente para a produção de energia elétrica, desempenhando um papel importante na diversificação da matriz energética e na redução dos impactos ambientais associados à geração hidroelétrica.

**Palavras – chave:** Sifão, geração de energia elétrica, desempenho operacional.

## **ABSTRACT**

The siphons, devices that exploit the difference in height between the water surface in the dam and the discharge point, were implemented in a specific dam. Operational and performance data were collected, evaluating the system's effectiveness under real conditions, including the placement of the turbine at the beginning or end of the pipe to harness the water's descent, indicating a significant energy production. The environmental impacts associated with the implementation of this technology were meticulously assessed, revealing that, compared to conventional dams, siphons demonstrate a lower environmental impact. This approach preserves aquatic ecosystems and reduces the flooded area, contributing to more sustainable practices in hydroelectric power generation. The economic analysis, considering implementation costs and financial returns, highlighted the competitiveness of siphons in terms of cost-effectiveness when compared to conventional methods of hydroelectric power generation. The conclusions emphasize the economic viability of power generation through siphons. The results suggest that this approach represents a sustainable and efficient alternative for electricity production, playing a crucial role in diversifying the energy matrix and reducing the environmental impacts associated with hydroelectric power generation.

**Keywords:** Siphon, electric power generation, operational performance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Meios de geração de energia.....	22
Figura 2 – Limites de potência da micro e mini geração distribuída.....	22
Figura 3 – Formação da camada limite e filme laminar.....	23
Figura 4 – Barragem com encoramento rochoso e parte de terra.....	25
Figura 5 – Definição de montante, nível do reservatório, jusante e crista.....	26
Figura 6 – Esquema com válvula de pé com crivo dentro do reservatório e registro na saída para poder encher toda a tubulação.....	27
Figura 7 – Funcionamento de turbina na entrada do sifão.....	29
Figura 8 – Funcionamento de turbina na saída do sifão.....	30
Figura 9 – Esquema de forças atuantes no sifão.....	31
Figura 10 – Turbina localizada abaixo do nível da água na piscina inferior.....	33
Figura 11 – Turbina localizada abaixo do nível da água na piscina superior.....	34
Figura 12 – Geometria dos rotores de turbinas hidráulicas.....	35
Figura 13 – Tipo de turbina em função da vazão (Q) e queda líquida (H).....	37
Figura 14 – Componentes de uma turbina Kaplan.....	38
Figura 15 – Esquemática do funcionamento de uma turbina hélice e Kaplan.....	39
Figura 16 – Comparação rendimento X % plena carga das turbinas Kaplan, Francis e pelton.....	39
Figura 17 – Desenho dos principais diâmetros da turbina Kaplan.....	40
Figura 18 – Diferença de tempo no medidor ultrassônico.....	44
Figura 19 – Tipos de medições dos medidores de vazão ultrassônicos.....	45

Figura 20 – Molinete hidrométrico.....	46
Figura 21 – Turbogenerador.....	46
Figura 22 – Barragem na carta do exercito.....	48
Figura 23 – Vista geral da barragem com posicionamento da rede elétrica em 23 kV.....	48
Figura 24 - Margem Esquerda da Barragem com posicionamento da rede elétrica em 23 kV.....	49
Figura 25 – Leituras de vazão com a válvula totalmente aberta.....	49
Figura 26 – Volume útil e volume morto.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Capacidade instalada prevista de micro e mini geração.....	22
Tabela 2- Coeficientes de rugosidade de Hazen-Willians.....	52
Tabela 3- Comprimento equivalente a perdas localizadas.....	53
Tabela 4- Dados obtidos.....	56
Tabela 5 – Resultados obtidos.....	56

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

MCH – Micro Central Hidroelétrica

PCH – Pequena Central Hidroelétrica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ONS – Operador Nacional do Sistema

TGA – Turbogeração Anfíbio

HPS – Horas de sol por dia

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Motivação.....	18
1.2 Objetivos.....	18
1.3 Objetivo geral.....	19
1.4 Objetivos específicos.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	20
2.1 Natureza da perda de carga.....	23
3. DESENVOLVIMENTO.....	25
3.1 Teoria do sifão.....	26
3.2 Sistema de sifão normal, princípio de funcionamento.....	26
3.3 Equação para o cálculo de área.....	27
3.4 Aproveitamentos hidrelétricos.....	28
3.5 Turbinas de sifão.....	29
3.6 Método de comparação de eficiência na localização das turbinas de sifão..	30
3.7 Turbina utilizada.....	34
3.8 Geometria das turbinas hidráulicas.....	35
3.9 Turbinas de hélice e Kaplan.....	37
3.10 Diâmetro dos principais componentes da turbina.....	39
3.11 Diâmetro do tubo de sucção.....	40
3.12 Velocidade de saída.....	40
3.13 Diâmetro externo do rotor.....	41
3.14 Diâmetro interno do rotor.....	41
3.15 Diâmetro médio do rotor.....	41
3.16 Largura da caixa espiral.....	42
3.17 Cálculo do número de pás.....	43
4. MATERIAIS UTILIZADOS E MÉTODOS.....	44
4.1 Medidor de vazão ultrassônico.....	44
4.2 Medidor de velocidade de fluxo de água molinete hidrométrico.....	45
4.3 Turbogeração.....	46
4.4 Local de execução.....	47
4.5 Curvas de nível.....	47
4.6 Dados da barragem.....	50

4.7 Perdas de carga no sistema.....	51
4.8 Equação para o cálculo de diâmetro da tubulação.....	52
4.9 Equação para o cálculo de comprimento equivalente.....	53
4.10 Equação para o cálculo de vazão.....	53
4.11 Equação para calcular potência bruta gerada.....	54
4.12 Equação para o cálculo de perda de carga na tubulação.....	54
4.13 Equação para o cálculo de potência hidráulica na entrada da turbina.....	54
4.14 Equação para o cálculo de perdas na turbina.....	54
4.15 Equação para o cálculo de potência mecânica na saída da turbina.....	55
4.16 Equação para o cálculo de perdas no gerador.....	55
4.17 Equação para o cálculo de potência elétrica na saída do gerador.....	55
4.18 Equação para o cálculo de rendimento global do sistema.....	55
4.19 Resultados obtidos para o sistema de geração de energia.....	56
4.20 Período de utilização.....	56
4.21Custo de implementação de uma MCH ou PCH.....	57
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
6. REFERÊNCIAS.....	59



## 1. INTRODUÇÃO:

A energia hidrelétrica é uma das formas mais eficientes e sustentáveis de produção de energia. Dentre os diversos métodos utilizados para estudar o potencial hidráulico, o uso de sifões destaca-se como uma abordagem inovadora e eficaz. Tradicionalmente os sifões são associados ao transporte de líquidos entre dois pontos em altitudes diferentes, estão adaptados para utilizar recursos naturais, visando converter energia potencial gravitacional em energia elétrica.

Esta abordagem combina os princípios básicos da sifonagem com a energia hidrelétrica convencional para criar um sistema que maximiza a eficiência energética. O sifão guia a água de um ponto mais alto para um ponto mais baixo, acionando turbinas e geradores ao longo do caminho. Este processo aproveita ao máximo a energia cinética da água corrente e a transforma em fonte de energia limpa e renovável (Guitarra, 2016).

Segundo Caus & Michels (2014), a energia hidráulica é uma das opções de geração mais antigas e utilizadas no mundo, sendo obtida pelo aproveitamento do potencial gravitacional da água corrente e de quedas d'água. Essa transformação ocorre quando a água passa pela turbina hidráulica, que transforma a potência hidráulica em potência mecânica. A turbina gira e, no gerador, a potência mecânica é transformada em potência elétrica.

Para Teixeira (2014), o Brasil é um país afortunado quanto aos recursos hídricos, podendo contar em sua matriz energética com a geração de energia elétrica de origem hídrica, a partir de usinas de várias dimensões. Entretanto, o Brasil vive atualmente um momento de inquietação quanto ao fornecimento de energia elétrica, em razão do limitado acréscimo ao potencial instalado, pelas dificuldades para viabilização de grandes obras, e com os níveis dos reservatórios em valores perturbadoramente baixos. Assim, é primordial o acréscimo de qualquer valor de potência instalada ao sistema energético brasileiro. Nesse panorama, o potencial energético existente em barragens de abastecimento representa um acréscimo que, mesmo pequeno, mostra-se de fácil exploração.

De acordo com a ELETROBRÁS e Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) (1985), micro centrais hidrelétricas (MCH's) são definidas como centrais geradoras com potência instalada inferior ou igual a 100 quilowatts (kW). Já as Minicentraís são aquelas que produzem até 1.000 quilowatts (kW) e, por fim, Pequenas

Centrais Hidrelétricas (PCH's) são aquelas com potência instalada de 1.000 à 10.000 quilowatts (kW).

De acordo com Farret (2010), pequeno aproveitamento elétrico é toda forma de utilização de qualquer uma das várias fontes de energia encontradas na natureza e que são passíveis de serem economicamente convertidas em energia elétrica até um limite legal de 30 MW no Brasil e, de 5MW em outros países. A diferenciação entre mini e micro centrais em comparação com outras categorias se fundamenta na simplicidade dos requisitos legais, comerciais e técnicos associados à geração de pequenas quantidades de energia. Em contraste, as instalações destinadas à geração de energia em escalas maiores apresentam desafios mais complexos nos aspectos jurídicos, comerciais e técnicos.

Dessa forma, a produção de energia hidráulica, considerada uma fonte de energia "limpa", atingiu um estágio avançado de desenvolvimento, enquanto a geração por meio de pequenas hidrelétricas ainda não alcançou seu pleno potencial, conforme explicado por Soffia, Claps e Poggi (2008). Diante desse cenário, a busca por fontes de energia voltadas para integrar a geração hidrelétrica em pequenas propriedades, de maneira sustentável e ambientalmente responsável, levou alguns agricultores a explorarem novos métodos de produção de energia.

### **1.1 Motivação**

Em um mundo em que a demanda por energia é insaciável e a utilização responsável dos recursos naturais torna-se uma necessidade, surge a motivação para explorar uma inovação promissora: a geração de energia por meio de sifões em barragens. Este estudo representa uma busca por uma matriz energética mais verde e sustentável, onde a natureza é respeitada, mas também inteligentemente aproveitada. Ao investigar esta tecnologia, abrem-se portas para um futuro em que a energia é produzida de maneira eficiente e ecológica, transformando as necessidades energéticas numa oportunidade para um mundo mais equilibrado e sustentável.

### **1.2 Objetivos**

O objetivo fundamental deste trabalho consiste em avaliar a localização mais vantajosa de um sistema de geração hidrelétrica a partir da utilização de um sifão com a transformação da energia cinética em energia elétrica. A análise visa determinar o melhor rendimento do sistema com ele instalado na entrada do sifão ou na saída do mesmo. Além

disso, pretende-se avaliar o potencial energético dos sifões, levando em conta variáveis como altura da queda d'água e fluxo. Por fim, o trabalho visa propor recomendações práticas para a implementação dos sifões.

### **1.3 Objetivo geral**

Este estudo pretende contribuir significativamente para o conhecimento sobre a utilização inovadora de sifões para melhorar a eficiência energética e poupar recursos hídricos.

### **1.4 Objetivos específicos**

- Fornecer conhecimento da funcionalidade de um sifão em barragens;
- Evitar o desperdício de água;
- Facilitar o entendimento dos processos de geração de energia; e
- Minimizar as perdas hidráulicas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Caus & Michels (2014), os padrões atuais de produção e consumo de energia são baseados nas fontes fósseis, o que gera emissões de poluentes, gases de efeito estufa e põem em risco o suprimento no planeta. Com isso, é preciso estimular as energias renováveis, pois a energia é um ingrediente essencial para assegurar o desenvolvimento econômico e social de um país. O uso de energia está diretamente ligado à satisfação das necessidades humanas, especificamente como transporte, alimentação, moradia e saúde, tornando seu consumo associado ao bem-estar da sociedade. Porém, problemas ambientais como o aquecimento global e a poluição necessitam que essa expansão ocorra de forma sustentável, priorizando as fontes renováveis.

A implementação de sistemas hidroelétrico utilizando sifões em barragens oferece diversos benefícios que contribuem para a eficiência, sustentabilidade e o uso eficiente dos recursos hídricos. Algumas características positivas deste tipo de sistema incluem:

**Maior rapidez na implementação:** Em comparação com projetos de barragens de grande escala, o período de implementação dos sistemas de sifões é geralmente curto. Isso pode ser crucial para atender às demandas crescentes de energia em um prazo mais rápido (Campos, 2009).

**Melhor eficiência energética:** Sifões podem ser usados para maximizar a energia potencial gravitacional da água em energia cinética, aumentando a eficiência geral do processo de produção da usina hidrelétrica (Campos, 2009).

**Adaptação a barragens de diferentes alturas:** Os sistemas de sifão podem ser projetados para acomodar uma variedade de alturas de barragens, permitindo que sejam usados em diversas situações geográficas diferentes (Campos, 2009).

**Aproveitamento de quedas de água menores:** Em comparação com algumas formas tradicionais de energia hidrelétrica, os sifões podem ser eficazes na exploração de quedas de águas menores, ampliando as possibilidades de implementação em locais com baixo potencial hidráulico (Campos, 2009).

**Redução de impactos no meio ambiente:** A utilização de sifões pode ajudar a reduzir o impacto ambiental, reduzir mudanças significativas nos ecossistemas locais e conservar a biodiversidade (Campos, 2009).

**Integração com infraestrutura existente:** Em muitos casos, os sistemas de sifões podem ser integrados em barragens existentes, para otimizar a utilização de estruturas hidráulicas já construídas (Campos, 2009).

**Redução nas Perdas de Carga:** Os sifões podem ser projetados para minimizar a perda de carga no sistema, permitindo uma transferência mais eficiente de energia da água para o sistema de geração de energia (Campos, 2009).

**Baixo impacto social:** Em comparação com grandes barragens, que muitas vezes exigem a realocação de comunidades inteiras, os sistemas de sifão podem ter um impacto social menor, especialmente se integrados a barragens existentes (Campos, 2009).

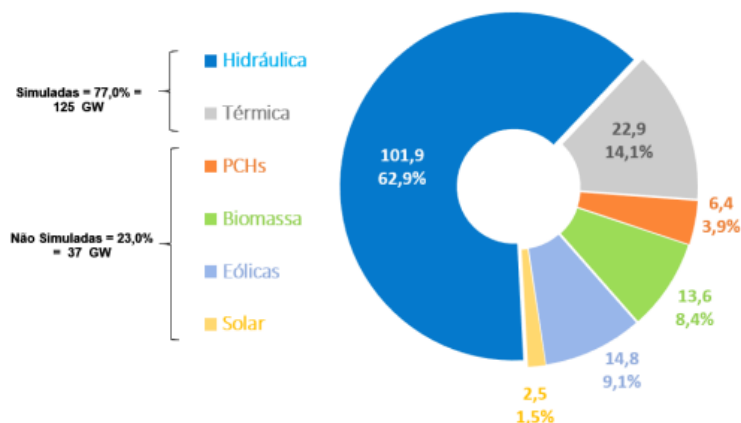
**Flexibilidade operacional:** Os sistemas de sifão podem ser ajustados e otimizados com relativa facilidade para se adequarem às mudanças nas condições hidrológicas e nos requisitos de energia, proporcionando grande flexibilidade operacional (Campos, 2009).

Com base nos dados do Operador Nacional do Sistema, estima-se que a 62,9% da geração total de energia elétrica do país é proveniente de fontes hídricas, seguida pela geração térmica conforme ilustra a Figura 1.

Um conceito que vem ganhando espaço quando se fala em sustentabilidade é o de geração distribuída, que segundo os Cadernos temáticos da ANEEL “é caracterizada pela instalação de geradores de pequeno porte, normalmente a partir de fontes renováveis ou mesmo utilizando combustíveis fósseis”. Isso causa um impacto positivo direto na rede, como por exemplo, a melhoria do nível de tensão da rede nos períodos de maior carga (período de ponta), baixo impacto ambiental. No entanto, é importante reconhecer que também pode acarretar desafios e impactos negativos pois a geração distribuída, se não integrada corretamente, pode gerar instabilidade na rede elétrica, com flutuações na frequência. A eficiente integração exige adaptações significativas e investimentos nas redes existentes. Os custos iniciais e de manutenção dos sistemas são elevados. Os desafios técnicos surgem devido à diversidade de tecnologias, especialmente quando diferentes fontes de energia são interconectadas. A adoção da geração distribuída pode resultar em desigualdades de acesso à energia, enquanto a substituição de equipamentos pode levar ao descarte inadequado, causando impactos ambientais.

Com isso pode-se destacar a ampliação dos pequenos aproveitamentos energéticos, ou seja, micro e mini geração, as quais podemos definir, segundo a ANEEL, como mostrado na Figura 2.

Figura 1- Meios de geração de energia



Fonte: ONS (2020).

Figura 2 – Limites de potência da micro e mini geração distribuída.



Fonte: Energês (2022).

No Brasil, a ideia de micro e mini geração é um conceito que vem em constante crescimento e apresenta uma expectativa bem otimista nos próximos anos, conforme Richter (2018), a Tabela 1, demonstra uma projeção até 2024

Tabela 1 – Capacidade instalada prevista de micro e mini geração (MW).

ANO	RESIDENCIAL	COMERCIAL	TOTAL
2017	71	30	102
2018	155	59	214
2019	283	102	385
2020	473	164	638

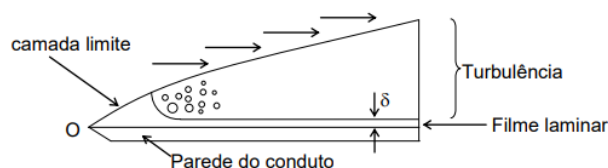
2021	752	254	1.006
2022	1.149	379	1.528
2023	1.696	552	2.248
2024	2.245	783	3.208

Fonte: Empresa de pesquisa energética.

## 2.1 Natureza da perda de carga

A perda de carga não deve ser interpretada como atrito semelhante ao de sólidos em contato, pois não há contato direto entre o fluido em movimento e a parede do conduto. Entre eles, existe uma camada de fluido aderente estacionária chamada de camada limite. Durante o escoamento, forma-se uma camada limite junto à parede do conduto, que aumenta até atingir um ponto crítico, a partir do qual sua espessura ( $\delta$ ) permanece praticamente constante, caracterizando um filme laminar.

Figura 3 – Formação da camada limite e filme laminar



Fonte: (Carvalho, 2017).

No escoamento laminar, a espessura da camada limite é igual ou maior que o raio do conduto, resultando em um fluxo contínuo e uniforme. A perda de carga nesse regime ocorre devido ao atrito interno do fluido, e a velocidade varia consideravelmente da superfície até o centro, onde é máxima.

Em contraste, no escoamento turbulento, a camada limite é fina e próxima à entrada do conduto. A partir desse ponto, o escoamento se torna turbulento, caracterizado por movimentos agitados e irregulares do fluido. Nesse regime, a perda de carga é influenciada pela inércia do fluido e pela viscosidade, e a velocidade varia pouco em toda a seção do conduto.

Em ambos os regimes, ocorre a formação de uma camada de fluido com baixa velocidade junto à parede do conduto, chamada de camada laminar ou filme laminar, cuja espessura é inversamente proporcional ao número de Reynolds. O estudo dessa camada

é crucial para entender questões relacionadas à rugosidade dos condutos e às perdas de carga.

- **Perda de Carga Distribuída:** a parede dos dutos retilíneos causa a perda de pressão distribuída ao longo do comprimento do tubo, fazendo com que a pressão total vá diminuindo gradativamente ao longo do comprimento e por isso é denominada de Perda de Carga Distribuída. (Bolleli, 2023).
- **Perda de Carga Localizada:** este tipo de perda de carga é causado pelos acessórios de canalização, isto é, as diversas peças necessárias para a montagem da tubulação e para o controle do fluxo do escoamento, que provocam variação brusca da velocidade, em módulo ou direção, intensificando a perda de energia nos pontos onde estão localizadas, sendo por isso conhecidas como Perdas de Carga Localizadas. O escoamento sofre perturbações bruscas em pontos da instalação tais como em válvulas, curvas, reduções, etc. (Bolleli, 2023).



### 3. DESENVOLVIMENTO

Segundo Lopes (2005), barragem rural é uma estrutura construída, geralmente de terra, que pode ser também com enrocamento rochoso e terra, em sentido oblíquo ao fluxo de água de tal forma que permita a formação de um reservatório artificial, denominado lago. Esse reservatório tem o intuito de acumular água ou elevar o nível do curso d'água. Vale ressaltar que a estrutura que interrompe um percurso de água é chamada de barragem e caso a captação de água seja apenas pluvial é denominado açude. A Figura 3 demonstra uma barragem com estrutura de terra.

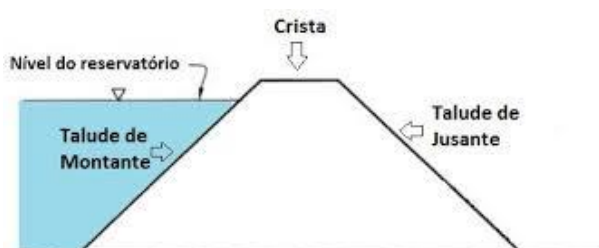
Figura 4 – Barragem com encoramento rochoso e parte de terra.



Fonte: Richter (2018).

As barragens desempenham um papel fundamental no manejo dos recursos hídricos, proporcionando uma diversidade de vantagens que vão desde o controle de enchentes até a produção de energia renovável. A água represada pela barragem é liberada de forma controlada, passando por turbinas que acionam geradores elétricos. Conforme representado na Figura 4 são ilustradas as definições de barramento, montante, nível de reservatório, jusante e crista (Machado, 2023).

Figura 5 – Definição de montante, nível do reservatório, jusante e crista.



Fonte: (Serratine, s.d.).

Assim:

- **Nível do Reservatório:** É a altura que corresponde ao nível de água armazenado na barragem no momento.
- **Crista:** Parte superior horizontal da barragem.
- **Talude de montante:** Superfície inclinada do maciço em contato com a água do reservatório produzido pelo barramento.
- **Talude de Jusante:** Superfície inclinada do maciço que não está em contato com a água do reservatório.

### 3.1 Teoria do sifão:

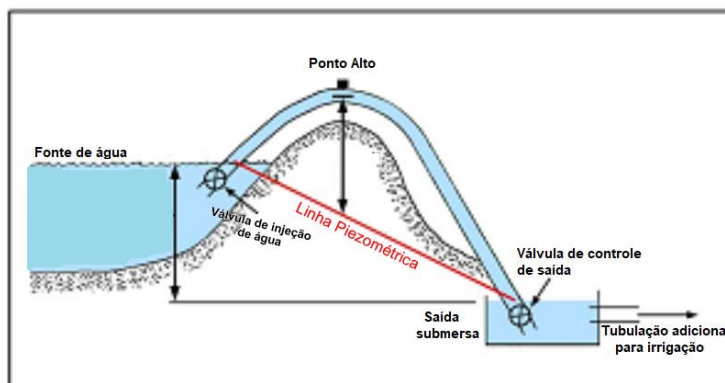
Quanto maior a vazão, com diâmetro constante, maior será a velocidade de escoamento e a perda de carga. Logo, variando o diâmetro da tubulação mantendo a vazão constante, minimiza-se a perda de carga e a energia necessária para transportar a água (Inforagro, 2015).

### 3.2 Sistema de sifão normal, princípio de funcionamento

O processo de sifonamento é amplamente utilizado e consiste em estabelecer um fluxo contínuo de líquido de uma altura para outra mais baixa, passando por um ponto mais alto usando um tubo flexível, aproveitando a pressão atmosférica para criar o movimento do fluido (Cunha, 1939).

Conforme Plínio Tomaz (2012), para injetar água em um sifão de um barramento de tem-se que retirar o ar da sucção e do recalque, injetando água através de um motor. Quando toda a tubulação está com água é aberto o registro de saída e começa o sifonamento da água conforme a Figura 5.

Figura 6 – Esquema com válvula de pé com crivo dentro do reservatório e registro na saída para poder encher toda a tubulação.



Fonte: Tomaz (2012).

O processo de equacionamento de um sifão é dado pela Equação 1 de Bernoulli

$$\frac{v_1^2}{2 * g} + \frac{p_1}{\gamma} + h_1 = \frac{v_2^2}{2 * g} + \frac{p_2}{\gamma} + h_2 = \text{Perdas} \quad (1)$$

Com isso é possível calcular as perdas em cada parte do sifão em função da carga de velocidade pela vazão que é dada como mostrado em (2).

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Onde:

V = Velocidade

Q = Vazão

A = Área

### 3.3 - Equação para o cálculo de Área:

Para realizar o cálculo da área da seção do cilindro é utilizada a Equação 3.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3)$$

Onde:

A = Área

D = Diâmetro

### 3.4 Aproveitamentos hidrelétricos

Aproveitamentos hidrelétricos por meio de sifões são uma forma de geração de energia a partir do fluxo de água utilizando a tecnologia de sifonamento. Um sifão é um dispositivo que permite que a água flua de uma altura mais alta para uma mais baixa, usando o princípio da pressão atmosférica para manter o fluxo contínuo (Enciclopédia 2022).

No contexto hidrelétrico, o sifão é utilizado para transportar água de um reservatório mais alto para um reservatório mais baixo, com o objetivo de aproveitar a diferença de altura (queda) entre dois pontos para gerar energia.

Conforme Caus & Michels, (2014), o funcionamento básico de uma usina hidrelétrica com sifão é o seguinte:

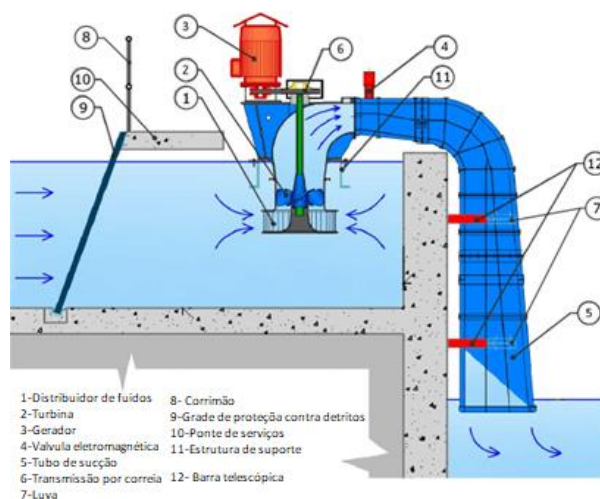
- **Reservatório superior:** Armazena água em local mais alto, geralmente formado por barragem, represa ou lago.
- **Tubulação de sifão:** Conecta os reservatórios, apresentando seção de diâmetro maior no ponto mais alto e menor no ponto mais baixo, mantendo o fluxo contínuo da água.
- **Queda d'água:** A água desce através do sifão por gravidade, ganhando velocidade e pressão, permitindo o fluxo mesmo quando a tubulação se inclina para cima.
- **Turbina e gerador:** No reservatório inferior, uma turbina hidráulica é instalada na saída do sifão, sendo movida pela pressão e velocidade da água, gerando energia mecânica.
- **Geração de eletricidade:** A turbina está conectada a um gerador elétrico, que converte o movimento rotativo da turbina em eletricidade.
- **Distribuição de energia:** A eletricidade gerada é transmitida por linhas de transmissão para abastecer residências, empresas e indústrias.

### 3.5 Turbinas de sifão

As turbinas de sifão se referem a um tipo específico de turbina hidrelétrica que utiliza o sifão como uma forma de aproveitar a energia hidráulica de maneira eficiente em locais onde a altura do desnível entre a entrada e a saída da água é significativa.

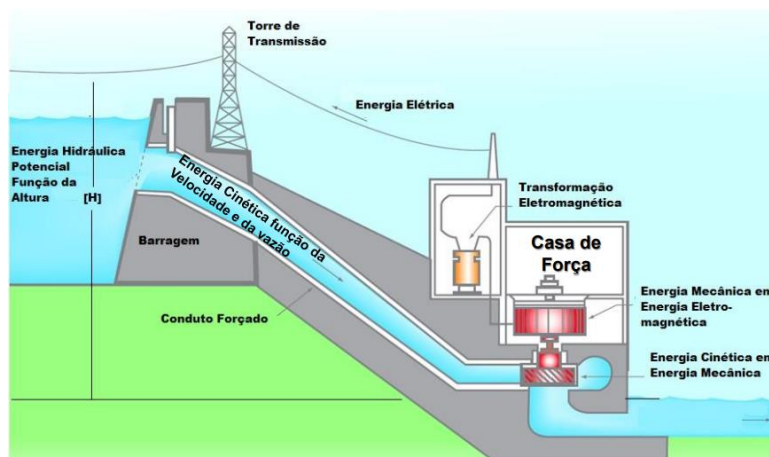
O sifão é um dispositivo composto por um tubo onde o fluxo de água sobe por um lado e desce pelo outro, impulsionado devido a diferença de altura entre as duas extremidades. A turbina é colocada no início do sifão, conforme a Figura 7, ou no final, conforme a Figura 8. Essa disposição permite aproveitar a energia cinética da água que flui para girar as pás da turbina, com a rotação, um gerador é conectado ao seu eixo e converte a energia mecânica em energia elétrica, produzindo assim eletricidade que pode ser utilizada para diversos fins, como abastecer indústrias, residências, ou até mesmo ser integrada a rede elétrica para fornecer energia a uma região mais ampla (Alidai, 2014).

Figura 7 – Funcionamento de turbina na entrada do sifão.



Fonte: Mavel (2023).

Figura 8 – Funcionamento de turbina na saída do sifão



Fonte : Material de aula Sistemas Hidráulicos e térmicos

### 3.6 Método de comparação de eficiência na localização das turbinas no sifão

A fim de comparar a eficiência de projetos de micro central hidrelétrica de sifão, será utilizada uma Equação 4 conhecida para determinação da velocidade do fluxo de água dentro do sifão. Essa equação é válida para condições em que o escoamento é uniforme e a rugosidade do canal é relativamente pequena (Parygin, 2015).

$$V^2 = 2 * g * \frac{H}{1 + C} \quad (4)$$

Onde:

$V$  = Velocidade (m/s)

$H$  = Altura entre a superfície mais alta e mais baixa (m)

$g$  = Aceleração da gravidade

$C$  = coeficiente de rugosidade da tubulação (valor tabelado)

A Equação 4 é derivada das equações de Bernoulli para seções transversais do sifão em diferentes níveis de reservatórios. A pressão estática nas seções transversais dos reservatórios superior e inferior do sifão não permanece inalterada e igual à pressão atmosférica, pois é influenciada pelo ambiente. Portanto, em pesquisas recentes, um modelo computacional baseado na lei de conservação do momento linear tem sido utilizado para levar em conta essas influências ambientais (Parygin, 2015).

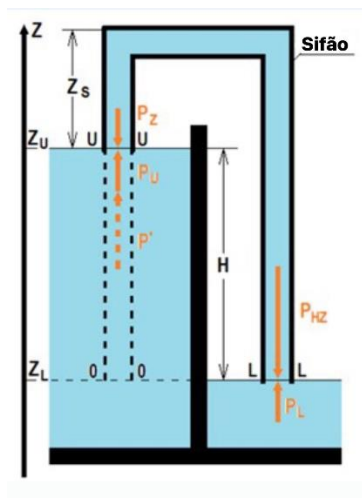
Esse modelo computacional utiliza a Equação 4 para descrever o comportamento do sifão. Essa equação é baseada na lei de conservação do momento linear, que afirma que a taxa de variação na quantidade de movimento de um tubo de corrente é igual à soma de todas as forças exercidas em sua superfície.

Com base na Figura 9, no “sistema reservatório superior-sifão” as forças aplicadas são exercidas na sessão transversal da comporta sifão no nível da água na piscina inferior são as seguintes: de baixo para cima, a pressão da coluna de água da perna mais longa do sifão conforme a Equação 5, e de cima para baixo, a pressão da coluna de água na perna mais longa Equação 6,  $\rho$  é a densidade da água.

$$P_L = p_L * F = p_A * F \quad (5)$$

$$P_{HZ} = \rho * (H + Z_S) * F * g \quad (6)$$

Figura 9- Esquema de forças atuantes no sifão



Fonte: Parygin (2015).

As seguintes forças são exercidas na seção transversal da comporta do sifão no nível da água na piscina inferior, são as seguintes: de baixo para cima, a pressão da água na piscina superior Equação 7, e de cima para baixo, a pressão da coluna de água na perna mais curta do sifão Equação 8.

$$P_U = P_U * F = P_A * F \quad (7)$$

$$P_Z = \rho * Z_S * F * g \quad (8)$$

A soma total de todas as forças sobre a água no sifão, na direção descendente, é dada por:

$$P = P_U - P_Z + P_{HZ} - P_L = p_A * F - \rho * Z_S * F * g + \rho * (H + Z_S) * F * g - p_A * F \quad (9)$$

Simplificando a expressão, obtemos:

$$P = \rho * H * F * g \neq 0 \quad (10)$$

É importante destacar que a soma de todas as forças dentro do sifão não é nula. Esse desequilíbrio de forças ocorre no início do efeito sifão e a força P encontrado na equação (10) determina a aceleração inicial da água dentro do sifão quando a velocidade do fluxo é igual a zero.

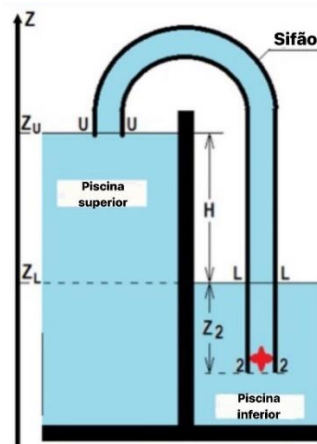
Dentro do sifão, um fluxo constante só pode ser mantido se as forças estiverem totalmente equilibradas. Assim, no caso de um fluxo constante, o valor absoluto da força P', exercido de baixo para a seção transversal do sifão no nível da água na piscina superior e apontando para cima (como indicado na Figura 9 por uma linha pontilhada), é igual a P. Na Figura 9, as linhas pontilhadas representam o fluxo em um tubo simbólico com uma área de seção transversal F, que é uma continuação simbólica do tubo de escoamento dentro do sifão até a região abaixo do nível da água na piscina superior. A pressão estática exercida em sua seção transversal mais baixa (0-0) é igual a Equação 11, velocidade do fluxo nesta seção transversal é igual a zero.

$$P_0 = p_A * F + \rho * H * F * g \quad (11)$$

A Figura 10 demonstra uma representação da turbina na posição inferior do sifão. A turbina é estrategicamente localizada na parte inferior com o intuito de aproveitar a energia cinética gerada pela diferença de altura entre as extremidades do sifão.



Figura 10 – Turbina localizada abaixo do nível da água na piscina inferior



Fonte: Parygin (2015).

Vale ressaltar que se a perna mais longa do sifão terminar abaixo do nível da água, a pressão na seção transversal da comporta é sempre igual a pressão exercida pelo ambiente, ou seja, a pressão da água na profundidade  $Z_2$ . No caso do projeto estrutural essa pressão é igual à soma como mostrado na Equação 12, tal pressão é exercida na área  $F$  neutralizado pelo peso da coluna de água dentro da comporta do sifão, cuja altura é igual à soma conforme a Equação 13. A força resultante é excedida na seção transversal 2-2 é determinado apenas pela pressão atmosférica e pela altura de coluna de água dentro do sifão acima do nível da água na piscina inferior como na Equação 14, semelhante a situação de um sifão cuja perna mais longa não está submersa na piscina inferior.

$$P_{A+\rho * Z_2 * g} \quad (12)$$

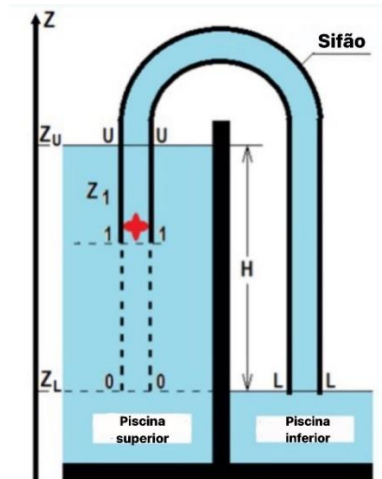
$$H + Z_s + Z_2 \quad (13)$$

$$P_2 = \rho * (H + Z_s) * F * g + P_A * F \quad (14)$$

Na próxima etapa a turbina está situada dentro da perna mais curta do sifão a uma altura de profundidade  $Z_1$  e abaixo do nível da água na piscina inferior. Porém esse fato não altera o modelo computacional mostrado na Figura 9 quando derivamos a equação 4. Isso significa que é válido levando em conta que na prática a maioria dos casos a perna mais curta do sifão termina abaixo do nível da água na piscina superior e que a

configuração da Figura 11 é idêntico ao da Figura 10 em termos de eficiência. Sendo assim o cálculo do valor ideal é válido para o projeto da figura 9.

Figura 11 - Turbina localizada abaixo do nível da água na piscina superior



Fonte: Parygin (2015).

### 3.7 Turbina utilizada

Na tecnologia de "turbina de sifão" ou "turbina de energia azul," a turbina utilizada é geralmente uma turbina hidráulica de baixa queda, como a Turbina Kaplan. Essa escolha de turbina é apropriada para aproveitar a energia cinética gerada durante a transferência de água de um reservatório mais alto para outro mais baixo, como ocorre em processos de tratamento de água ou em sistemas específicos projetados para gerar energia renovável.

A turbina Kaplan é uma turbina hidráulica de fluxo axial com pás ajustáveis, o que permite otimizar o desempenho em diferentes condições de fluxo de água, sua capacidade de operar eficientemente em baixas quedas d'água e alto volume de água permite que ela aproveite ao máximo a energia cinética gerada durante a transferência de água de um reservatório mais alto para um reservatório mais baixo, como acontece nos sistemas de sifão. Suas pás ajustáveis permitem otimizar o desempenho da turbina em diferentes condições de fluxo de água, o que é vantajoso para a geração de energia elétrica nesses sistemas.

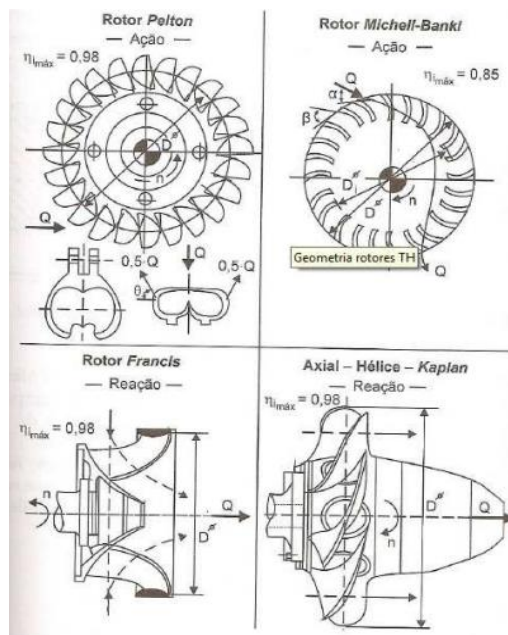
Portanto, a turbina Kaplan é uma escolha apropriada e eficiente para ser utilizada em tecnologias de turbina de sifão, onde a energia cinética da água em baixa queda é

aproveitada para gerar eletricidade ou realizar outras atividades que demandem energia mecânica.

### 3.8 Geometria das turbinas hidráulicas

A geometria dos rotores de turbinas hidráulicas é meticulosamente projetada para extrair a máxima eficiência da energia hídrica disponível, contribuindo para a geração sustentável de eletricidade a partir de fontes renováveis como demonstra a Figura 12.

Figura 12 – Geometria dos Rotores de Turbinas Hidráulicas.



Fonte: SOUZA; SANTOS; BORTONI, (2012, p.313)

Segundo Viana (2010), uma turbina é constituída basicamente por cinco partes: Caixa espiral, pré-distribuidor, distribuidor, rotor e eixo, tubo de sucção.

- **caixa espiral**

É uma tubulação toroidal integrada à estrutura da usina, fabricada com segmentos de chapas de aço carbono soldadas. Sua função principal é garantir a distribuição uniforme da água na entrada da turbina. Conecta-se ao conduto forçado na entrada e ao pré-distribuidor na saída (Sloppo, 2012).

- **Pré-distribuidor**

A finalidade do pré-distribuidor é direcionar a água para a entrada do distribuidor. Ele é composto por dois anéis superiores nos quais são montadas palhetas fixas de baixo arrasto hidrodinâmico, evitando perda de carga e turbulência. Esta parte, sem movimento, é soldada à caixa espiral e feita de chapas de aço carbono (Slompo, 2012).

- **Distribuidor**

O distribuidor é equipado com palhetas móveis acionadas por um mecanismo hidráulico montado na tampa da turbina. Todas as palhetas se movem simultaneamente e de forma uniforme, controladas por um ou dois pistões hidráulicos. Esse sistema regula a vazão da água, controlando a potência da turbina. Pode ser operado manualmente ou em modo automático, eliminando a interferência do operador no controle da turbina (Slompo, 2012).

- **Rotor e eixo**

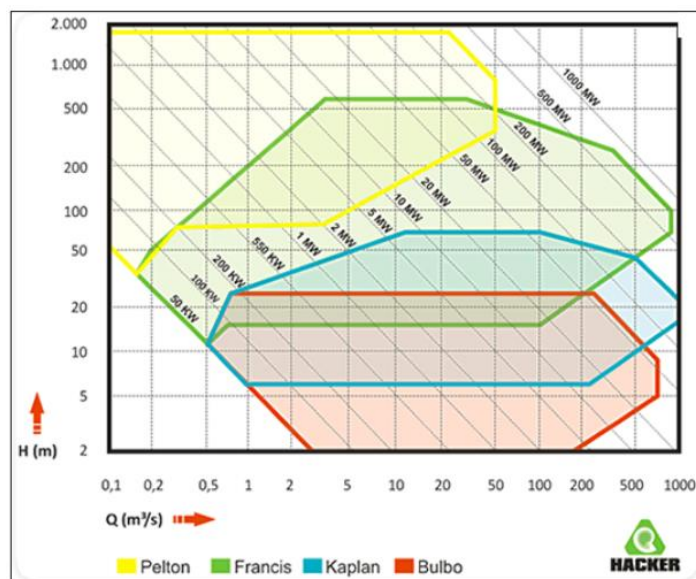
O rotor da turbina é onde ocorre a conversão de energia hídrica em potência de eixo (Slompo, 2012).

- **Tubo de sucção**

O duto de saída da água desacelera o fluxo após passar pela turbina e a devolve ao rio jusante da casa de força (Slompo, 2012).

É possível escolher o tipo de turbina adequado para cada usina, considerando a altura de queda específica como indicado na Figura 13, cada tipo de turbina é projetado para operar em uma faixa específica de altura de queda. As vazões podem variar, mas a potência gerada é proporcional ao produto da altura de queda (H) e da vazão (Q).

Figura 13 – Tipo de turbina em função da vazão (Q) e queda líquida (H).



Fonte: Hacker (2012).

### 3.9 Turbinas de hélice e Kaplan

As turbinas Hélice e Kaplan possuem uma geometria semelhante à turbina Francis, mas o rotor é composto por um cubo com pás. Se as pás são fixadas rigidamente ao cubo, o rotor é chamado de Hélice. Se as pás têm movimento em relação ao cubo, o rotor é chamado de Kaplan (SILVA; MADRUGA; GUEDE, 2009, p.1).

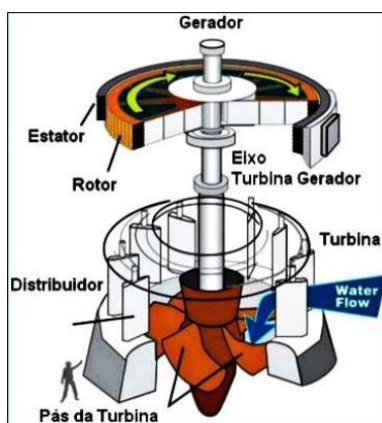
As turbinas Kaplan, desenvolvidas em 1913 pelo engenheiro austríaco Victor Kaplan (1876-1934) que, por meio de estudos teóricos e experimentais criou um novo tipo de turbina a partir das turbinas de Hélice com a possibilidade de variar o passo das pás. Surge então uma turbina de Hélices com pás reguláveis. O mecanismo que permite regular o ângulo de inclinação da pá conforme a descarga, sem que ocorra uma variação considerável do rendimento, fica alojado numa peça com o formato de uma ogiva e é comandado por um regulador automático de velocidade (Junior, 2013)

Segundo (BARRENA, 2010) essas turbinas são adequadas para serem usadas em quedas d'água pequenas e com grande vazão. Elas podem ser instaladas tanto horizontalmente quanto verticalmente, apresentando rotores que operam em velocidades cada vez mais rápidas, podendo chegar a velocidades específicas acima de 450 rpm.

As turbinas Kaplan são preferencialmente utilizadas em situações em que as turbinas Francis super-rápidas começam a perder eficiência, geralmente acima de 400 rpm, devido à sua limitação em escoar o fluxo de água com precisão nessas condições.

O rotor das turbinas Kaplan é composto por poucas pás, conferindo-lhes o formato de uma hélice de barco. As pás podem ser fixas, tornando-as turbinas de hélice, ou móveis, tornando-as turbinas Kaplan. Em ambos os casos, o fluxo de água ocorre em apenas um sentido de rotação, tornando-as turbinas irreversíveis. A Figura 14 apresenta uma turbina Kaplan e seus principais componentes.

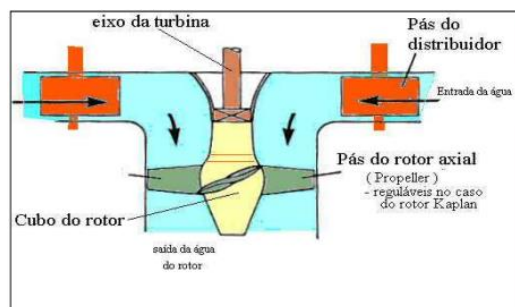
Figura 14 - Componentes de uma turbina Kaplan.



Fonte: Close-up Engineering Daily Vehicle NewsPaper.

A turbina Kaplan é classificada como uma turbina de reação, com o fluxo d'água direcionado radialmente no distribuidor e aproximadamente axial na entrada do rotor. Suas pás possuem um passo regulável, permitindo ajustes durante o funcionamento, enquanto na turbina Hélice, as pás são fixas. Conforme a Figura 15 o mecanismo que controla o ângulo das pás nas turbinas Kaplan é alojado numa peça com formato de ogiva e é controlado pelo regulador automático de velocidade. Estas turbinas são indicadas para baixas quedas e grandes vazões, exigindo alta tecnologia em sua fabricação. (JUSTINO, 2006).

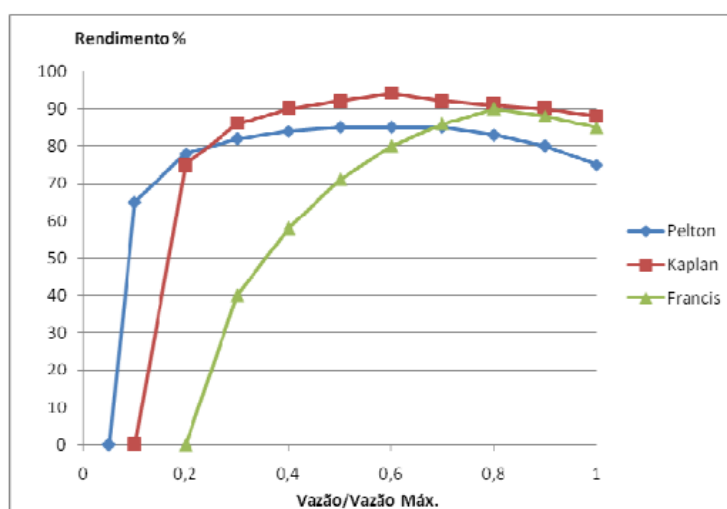
Figura 15 – Esquemática do funcionamento de uma Turbina Hélice e Kaplan.



Fonte: Buhler (2016).

As turbinas geralmente têm um eixo vertical, mas também podem ser do tipo horizontal. Nas turbinas Kaplan, a capacidade de ajuste das pás permite um rendimento superior aos 90% mesmo com cargas menores, em comparação com outras turbinas, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Comparação Rendimento X % Plena Carga das Turbinas Kaplan, Francis e Pelton.



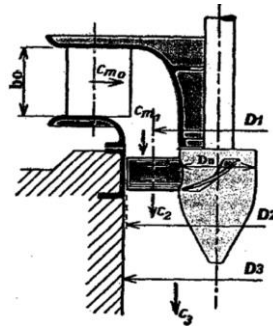
Fonte: Santos (2023).

### 3.10 Diâmetro dos principais componentes da turbina

O dimensionamento retratado na Figura 17, referente ao diâmetro dos principais componentes da turbina hidráulica, desempenha um papel crucial na garantia de uma eficiente captação da energia hídrica disponível. Essa abordagem contribui diretamente para o alcance de um desempenho ótimo e sustentável neste vital meio de geração de

eletricidade a partir de fontes renováveis. Ao adequar precisamente o diâmetro dos componentes, maximiza-se a eficiência do processo de conversão de energia, destacando a importância da engenharia detalhada para otimizar o aproveitamento dessa valiosa fonte de energia limpa.

Figura 17 – Desenho dos principais diâmetros da turbina Kaplan



Fonte: BARRENA (2010).

### 3.11 Diâmetro do tubo de sucção

A equação 15 é usada para turbinas Kaplan e de hélice (Bergamo, 2018).

$$D_3 = 1000 \sqrt{\frac{4Q}{\pi C_3}} \quad (15)$$

Em que:

$D_3$ : Diâmetro do tubo de sucção em milímetros (mm);

$Q$ : Vazão em metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ );

$C_3$ : Velocidade de saída em metros por segundo (m/s);

### 3.12 Velocidade de saída

A Equação 16 é ser usada para o cálculo de velocidade de saída (Bergamo, 2018).

$$C_3 = \sqrt{\frac{2 * g * K_c * H}{100}} \quad (16)$$



Em que:

$C_3$ : velocidade de saída em metros por segundos (m/s);

$g$ : gravidade em metros por segundo ao quadrado (m/s<sup>2</sup>);

$H$ : altura disponível em metros (m);

$K_C$ : constante, por unidade. Considerar para Kaplan e hélice 30% (BARRENA, 2010).

### 3.13 Diâmetro externo do rotor

A Equação 17 é usada para o cálculo do diâmetro externo do rotor (Bergamo, 2018).

$$D_2 = 0,98D_3 \quad (17)$$

Em que:

$D_3$  : diâmetro do tubo de sucção em milímetros (mm);

$D_2$  : diâmetro do rotor em milímetros (mm).

### 3.14 Diâmetro interno do rotor

A Equação 18 é usada para o cálculo do diâmetro interno do rotor.

$$D_N = D_3 \left( 0,25 + \frac{94,64}{N_S} \right) \quad (18)$$

Em que:

$D_N$  : diâmetro interno do rotor em milímetro (mm);

$D_3$  : diâmetro do tubo de sucção em milímetros (mm);

$N_S$  : velocidade específica em rpm.

### 3.15 Diâmetro médio do rotor

A Equação 19 é usada para o cálculo do diâmetro médio do rotor (Bergamo, 2018).

$$D_1 = D_N + \left( \frac{D_2 - D_N}{2} \right) \quad (19)$$

Em que:

$D_1$  : diâmetro médio do rotor em milímetros (mm);

$D_N$  : diâmetro interno do rotor em milímetro (mm);

$D_2$  : diâmetro do rotor em milímetros (mm).

### 3.16 Largura da caixa espiral

Para o cálculo da largura da caixa espiral da turbina Kaplan deve ser considerada uma vazão 80% do total, e que a seção diminui 10% devido a espessura das pás (BARRENA, 2010); dessa forma a Equação 20 é utilizada para o cálculo da largura da caixa espiral.

$$B_0 = \frac{0,8 * Q}{0,9 * D_2 * \pi * C_{m0}} \quad (20)$$

Em que:

$B_0$  : largura da caixa espiral em milímetro (mm);

$Q$  : vazão em metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s);

$D_2$  : diâmetro externo do rotor em milímetros (mm);

$C_{m0}$  : velocidade de entrada em metros por segundo (m/s).

A seção livre da saída deve ser maior que a seção livre da entrada do rotor:  $0,6C_{m1} \leq C_{m0} \leq 0,7C_{m1}$ .

$C_{m1}$ : componente da velocidade de saída em metros por segundo (m/s).

A Equação 21 é usada para o cálculo da componente de velocidade de saída (Bergamo, 2018).

$$C_{m1} = \frac{4 * 0,8 * Q * 10^6}{(D_2^2 - D_N^2)\pi} \quad (21)$$

Em que:

$C_{m1}$  : componente da velocidade de saída em metros por segundo (m/s);

$D_2$  : diâmetro externo do rotor em milímetros (mm);

$D_N$  : diâmetro interno do rotor em milímetro (mm);

$Q$  : vazão em metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s).

### 3.17 Cálculo do número de pás

A equação 22 é usada para o calcular o número de pás da turbina Kaplan (Bergamo, 2018).

$$Z = \frac{2170 - 1,2N_S}{250} \quad (22)$$

Em que:

Z: número de pás da turbina Kaplan;

$N_S$ : velocidade específica (rpm).

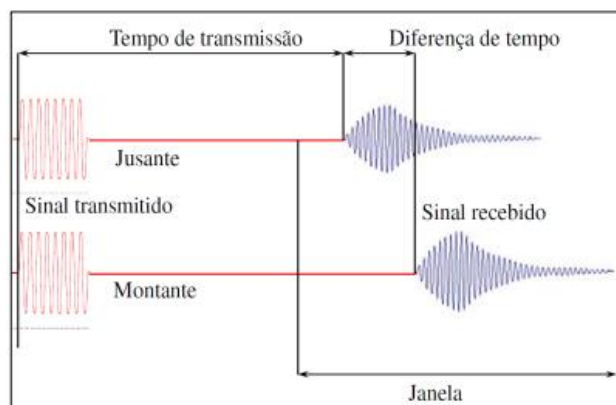
## 4. MATERIAIS UTILIZADOS E MÉTODOS

### 4.1 Medidor de vazão ultrassônico

O medidor de vazão ultrassônico é um equipamento de medição de vazão de líquidos e gases que não é invasivo. Este medidor não necessita de perfuração da tubulação para efetuar a medição. O medidor de vazão ultrassônico é comumente utilizado em águas poluídas ou líquidos de qualquer espécie, desde que sejam condutivos ou tenham água em sua base (Digitrol, 2021).

Segundo Justino (2006), “os medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito baseiam-se na medição dos tempos de onda acústicas são emitidas simultaneamente no sentido do escoamento e contra o mesmo”. Conforme a Figura 18, o valor da vazão é obtido pela diferença de tempo de trânsito da onda ultrassônica no sentido de jusante e no sentido de montante.

Figura 18 – Diferença de tempo no medidor ultrassônico.



Fonte: Forghieri (2009, p. 38).

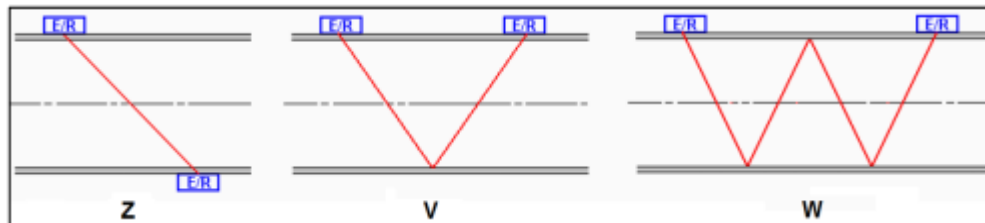
Ainda podem-se classificar os instrumentos em dois tipos:

- O medidor de vazão ultrassônico não intrusivo, onde o sistema emissor/receptor é colocado externamente ao tubo (instalação móvel);
- O medidor de vazão ultrassônico intrusivo, onde o sistema emissor/receptor é colocado internamente ao tubo (instalação fixa);

A medição do sinal poderá ser feita dependendo da escolha do trajeto da onda ultrassônica que passa dentro da tubulação, conforme observado na Figura 19, podendo

ser classificadas em três tipos: “Z”, “V” e “W”. Sendo que o E/R se refere ao emissor/receptor.

Figura 19 – Tipos de medições dos medidores de vazão ultrassônicos.



Fonte: Justino (2006, p.79).

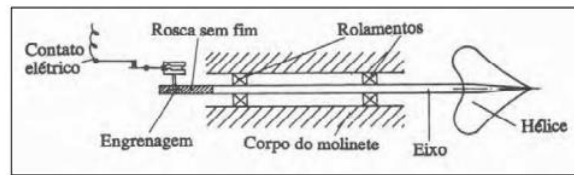
A escolha do tipo de medição utilizada foi o tipo “V” pois a tubulação tem o diâmetro de 250mm, se a tubulação for de diâmetro pequeno é recomendado usar as configurações “V” e “W”, pois assim irá aumentar o caminho de propagação. Já em tubulações com diâmetros maiores recomenda-se o uso da configuração “Z”, pois já existe um caminho longo o suficiente para a medição (JUSTINO, 2006).

#### 4.2 Medidor de velocidade de fluxo de água molinete hidrométrico

Conforme a Figura 20 o molinete hidrométrico são equipamentos compostos por uma hélice e um contador de número de voltas que a hélice realiza durante um intervalo de tempo previamente estabelecido. Conhecendo o número de voltas da hélice num dado intervalo de tempo, é possível determinar a velocidade do fluxo. Para obter os dados do aparelho deve-se (JUSTINO, 2006):

1. Verificar qual o tempo gasto para a hélice dar um determinado número de rotações;
2. Definir qual a quantidade de voltas que o “conta-giros” deverá dar para enviar um sinal ao operador;
3. Determinar o número de rotações por segundo (n) marcando o tempo entre alguns sinais.

Figura 20 – Molinete hidrométrico

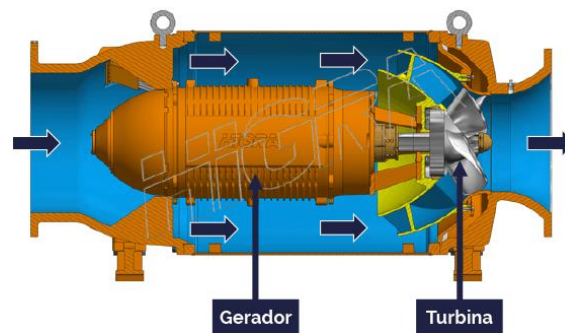


Fonte: Justino (2006,p.71).

### 4.3 Turbogenerador

O turbogenerador anfíbio é um equipamento completamente integrado, incluindo gerador elétrico e turbina. O gerador elétrico síncrono é do tipo submerso molhado, sendo refrigerado pelo próprio fluido que passa pela máquina, fornecendo excelente condição de rendimento. A turbina é projetada de acordo com as condições operacionais da aplicação, utilizando-se ferramenta do tipo CFD (ou Fluidodinâmica Computacional) para a produção das geometrias das turbinas. Isso garante um aproveitamento de 70% de energia recuperada, restando, portanto, 30% de volume morto, ou seja, que não é utilizável, a Figura 21 ilustra a diferença entre volume útil e volume morto (Higra, 2020).

Figura 21 -Turbogenerador Anfíbio (TGA)



Fonte: Higra (2020).

TGA - Principais características:

- Gerador Elétrico Interno / Acoplado;
- Potência de geração de 5kW a 500kW;
- Tecnologia anfíbia;
- Sistema monobloco e compacto;
- Fácil instalação;
- Permite instalações submersas enterradas ou ao ar livre;
- Potências de geração de 20kW a 500kW;

- Vazões de até 10.000m<sup>3</sup>/h;
- Quedas de 4 a 200mca; e
- Micro e mini geração distribuída “On-Grid”.

#### **4.4 Local de execução**

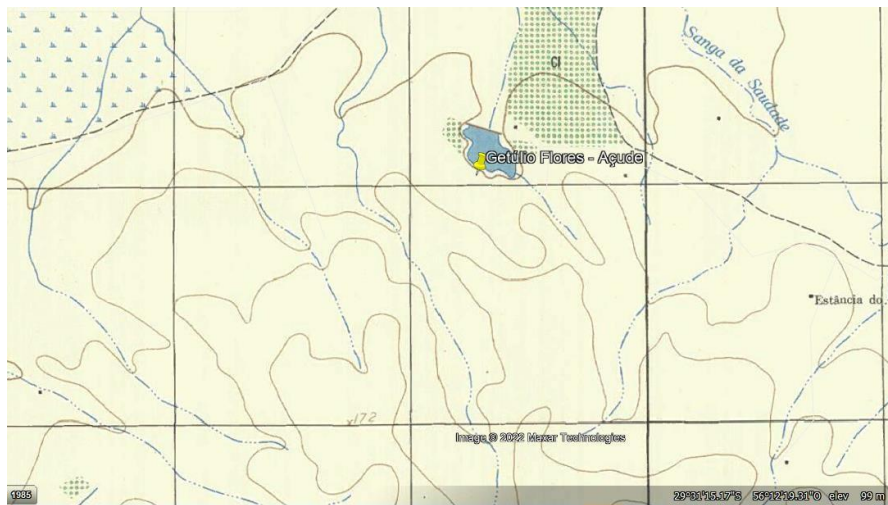
O projeto da micro central hidroelétrica (MCH) utilizando sifões será implementado na barragem Getúlio Flores, situada na região sul, nas coordenadas 29°31'07.2" S 56°11'16.2" W. A escolha desta barragem se deve ao seu potencial hidráulico para geração de energia por meio de um sistema de sifões. Feito isso, foi utilizado o software de desenho solidworks para planejar um procedimento de montagem ideal. A barragem Getúlio Flores é uma estrutura hidráulica de grande porte, com uma capacidade de armazenamento de água significativa. Sua topografia e características geológicas proporcionam condições ideais para a implementação bem-sucedida de um sistema de sifões, permitindo a maximização da energia gerada por meio do fluxo de água.

Este local foi escolhido após cuidadosa avaliação das condições geográficas e hidrológicas, garantindo que o projeto possa operar de forma eficiente e sustentável. A robustez da estrutura da barragem, aliada à consistência do fluxo de água, proporciona uma base sólida para a instalação da micro central hidroelétrica por meio do sistema de sifões.

#### **4.5 Curvas de Nível:**

A Figura 22 destaca a localização geográfica específica da barragem Getúlio Flores na carta do Exército. A utilização da carta do Exército é fundamental para uma compreensão abrangente do contexto geográfico da barragem, sendo uma ferramenta para análises precisas e tomada de decisões relacionadas à gestão e operação dessa infraestrutura.

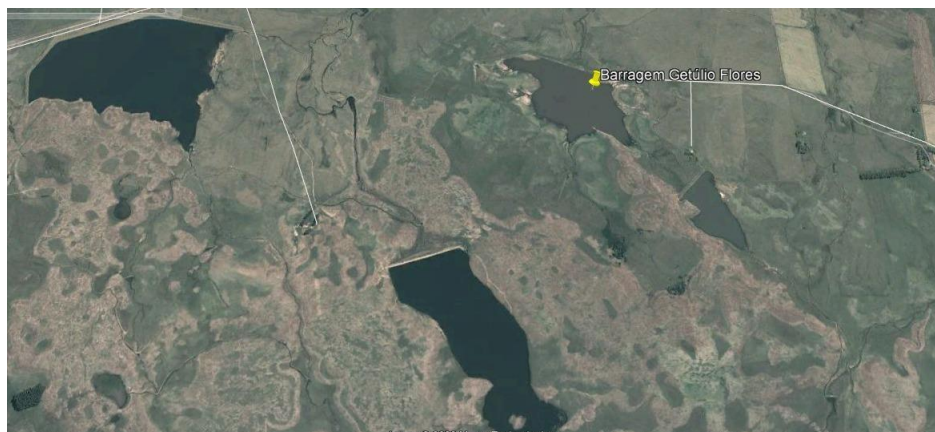
Figura 22 – Barragem na Carta do Exército, escala 1:50.000



Fonte: Equipe do EIRE

A vista geral da Barragem, conforme apresentada na Figura 23, oferece uma visão panorâmica da estrutura e do entorno, destacando de maneira específica o posicionamento estratégico da rede elétrica em 23 kV.

Figura 23 – Vista geral da Barragem com posicionamento da rede elétrica em 23 kV



Fonte: Richter (2018).

A Figura 24 oferece uma perspectiva detalhada da margem esquerda da barragem, destacando de forma específica o posicionamento da rede elétrica em 23 kV. Nessa representação visual, é possível observar a disposição da infraestrutura elétrica ao longo da margem.



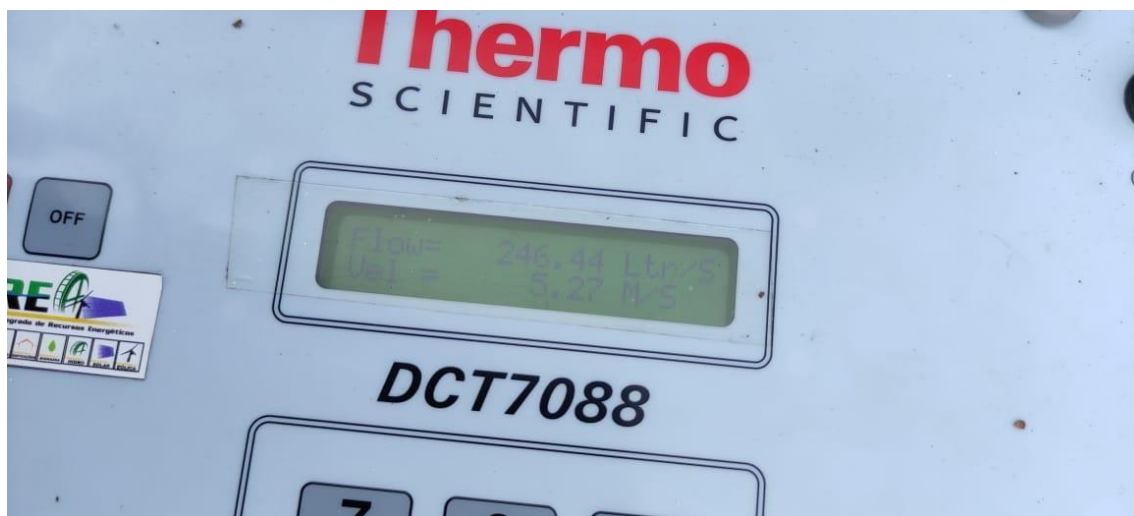
Figura 24 – Margem Esquerda da Barragem com posicionamento da rede elétrica em 23 kV



Fonte: Equipe do EIRE

A Figura 25 apresenta as leituras de vazão e velocidade com a válvula totalmente aberta, fornecendo uma representação visual das medidas obtidas nessa condição específica. Esse conjunto de dados é fundamental para a avaliação do comportamento hidráulico do sifão sob máxima abertura da válvula.

Figura 25 – Leituras de vazão com a válvula totalmente aberta



Fonte: Equipe do EIRE

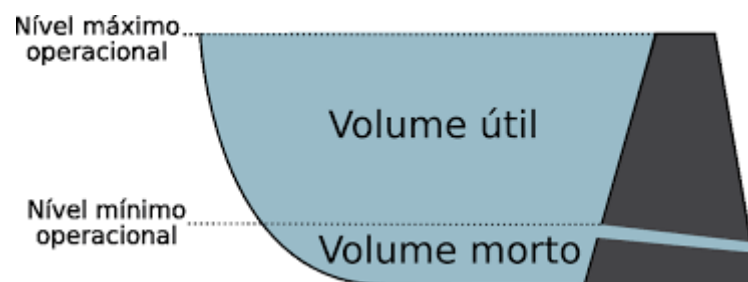
O sistema operará durante a irrigação da lavoura orizícola. No entanto, no resto do ano será exclusiva para geração de energia elétrica, visando o acumulado de crédito. Registro instalado sobre base de concreto, 50 cm, acima do nível do solo. O comprimento do cano de 250mm é de 58m. O cano é de PVC de alta densidade, o mesmo material usado nos pivôs que resiste a alta pressão. A cota máxima da barragem conforme projeto é 9 m.

#### 4.6 Dados da barragem

- Área alagada 34 hectares;
- Volume represado 1.200.000 m<sup>3</sup>;
- Altura da taipa 10 m;
- Nível normal da água 9,0m;
- Nível máximo da água 9,20 m;
- Cano de descarga com 250 mm;
- Cano de descarga instalado na cota 3.

Para o cálculo de potência, foi estimado um valor de vazão baseado no volume útil bom, como a altura da barragem no nível normal é de 9 metros. Para a energia capaz de ser produzida, foi considerado 70% do volume útil de cada barramento individualmente, restando, portanto, 30% de volume morto, ou seja, que não é utilizável, a Figura 26 ilustra a diferença entre volume útil e volume morto (Richter, 2018).

Figura 26 – Volume útil e volume morto



Fonte: Rodolfo Ladeira (2011).

Sendo assim, através da Equação 14, foi estimado o potencial gerador do espelho d'água (Richter, 2018).

$$P = \rho * g * h * Q \quad (14)$$

Onde:

$\rho$ =Densidade da água ( $kg/m^3$ )

$g$  = Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$h$  = Altura do barramento ( $m$ )

$Q$ = Vazão do tubo ( $m^3/s$ )

De posse desses dados, foi possível quantificar a geração de energia que seria alcançada pelo produtor que queria amenizar o impacto financeiro da fatura de energia, a partir da instalação de uma MCH.

#### 4.7 Perdas de carga no sistema

A determinação da perda de carga total do sistema se dá a partir da soma da perda de carga distribuída e das perdas de carga localizadas. A perda de carga distribuída ocorre devido ao atrito entre as camadas do escoamento e ao atrito entre o fluído e as paredes da tubulação. As perdas localizadas ocorrem pela utilização de peças especiais como registros, válvulas, curvas entre outros que geram turbulência adicional e maior dissipação de energia. Sendo assim, para determinar as perdas de cargas foi utilizada a equação de Hazzen-Williams para tubulações com diâmetro maior que 50 mm.

$$Hf = 10.643 * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} * \frac{L + Leq}{D^{4,87}} \quad (15)$$

Onde:

$hf$ =Perda de carga ( $m$ )

$D$ = Diâmetro da canalização ( $m$ )

$L$ =Comprimento do tubo ( $m$ )

$C$ = coeficiente de rugosidade da tubulação (conforme a tabela 2)

$Q$ = Vazão ( $m^3/s$ )

Tabela 2 – Valores dos coeficientes de rugosidade C pra a equação de Hazen-Williams

Material da tubulação	Coefficiente de rugosidade C
Ferro fundido novo	130
Ferro fundido em uso	90
Ferro fundido revestido com cimento	130
Aço novo	135
Aço galvanizado	125
Cobre, chumbo, latão	130
PVC, vidro	140
Concreto	120

Fonte: Porto (1999).

#### 4.8 Equação para o cálculo de diâmetro da tubulação:

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * V}} \quad (16)$$

Onde:

$D$  = Diâmetro ( $m$ )

$Q$  = Vazão ( $kg/m^3$ )

$V$  = Velocidade ( $m/s$ )

A determinação das perdas de carga localizadas empregou o método do comprimento equivalente, no qual cada peça especial foi substituída por um trecho retilíneo com o mesmo diâmetro da tubulação. Esse procedimento foi executado com base nos dados fornecidos pela Tabela 3

Tabela 3 - Comprimento equivalentes a perdas localizadas (expresso em metros)

DIÂMETRO NOMINAL D		DOTOV. 90° RAIO LONGO	DOTOV. 90° RAIO MÉDIO	DOTOV. 90° RAIO CURTO	DOTOV. 45°	CURVA 90° RD-1 1/2	CURVA 90° RD-1	CURVA 45°	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	REG. DE GAVETA ABERTO	REG. DE GLOBO ABERTO	REG. DE ÂNGULO ABERTO	TÉ PASS. DIRETA	TÉ SAÍDA DE LADO	TÉ SAÍDA MATRIAL	VÁLVULA DE PÉ E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE RET. TIPO LEVE	VÁLVULA DE RET. TIPO PESADO	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
mm	pol																				
13	1/2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6	
19	3/4	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4	
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2	
32	1 1/4	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0	
38	1 1/2	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8	
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4	
63	2 1/2	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1	
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7	
100	4	2,1	2,8	3,4	1,5	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	8,4	12,9	
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1	
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3	
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0	
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0	
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0	
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0	

Fonte: (Carvalho, 2017)

#### 4.9 Equação para o cálculo para o comprimento equivalente

Foi utilizado um tubo de 250mm pois já estava implementado na barragem com isso foi utilizado todos os componentes e cálculos para esse diâmetro conforme mostrado na Tabela 3. Foi utilizado uma válvula pé de crivo, uma curva de 45° à montante, uma curva de 90° à jusante, e um registro gaveta, de posse desses dados utiliza-se a Equação 17 para o cálculo de comprimento equivalente a perda de carga.

$$Leq = 65 * D + 1,8 * D + 5,5 * D + 1,7 * D \quad (17)$$

#### 4.10 Equação para o cálculo de vazão

$$Q = V * \frac{\pi D^2}{4} \quad (18)$$

Onde:

$Q$  = Vazão

$V$  = Velocidade (m/s)

$D$  = Diâmetro (m)

**4.11 Equação para o cálculo de potência bruta gerada:**

$$P_b = \frac{\rho * g * h * Q}{1000} \quad (19)$$

Onde:

$\rho$ =Densidade da água ( $kg/m^3$ )

$g$  = Gravidade ( $m/s^2$ )

$h$  = Altura ( $m$ )

$Q$ = Vazão ( $m^3/s$ )

**4.12 Equação para o cálculo de perda de carga na tubulação**

$$H_t = \frac{\rho * g * Hf * Q}{1000} \quad (20)$$

Onde:

$\rho$  = Densidade da água ( $kg/m^3$ )

$Hf$ =Perda de carga ( $m$ )

$Q$ = Vazão ( $m^3/s$ )

**4.13 Equação para o cálculo de potência hidráulica na entrada da turbina**

$$P_h = P - H_t \quad (21)$$

Onde:

$P$  = potência bruta gerada ( $kW$ )

$H_t$  = potência bruta gerada ( $kW$ )

**4.14 Equação para o cálculo de perdas na turbina**

$$P_t = P_h * (1 - \eta) \quad (22)$$

Onde:

$P_h$  = Potência hidráulica na entrada da turbina ( $kW$ )

$\eta_t$  = Rendimento (%)

#### 4.15 Equação para o cálculo de potência mecânica na saída da turbina

$$P_{mt} = Ph - Pt \quad (23)$$

Onde:

$Ph$  = Potência hidráulica na entrada da turbina ( $kW$ )

$Pt$  = Perdas na turbina ( $kW$ )

#### 4.16 Equação para o cálculo de perdas no gerador

$$P_g = P_m * (1 - \eta_g) \quad (24)$$

Onde:

$P_{mt}$  = potência mecânica na saída da turbina ( $kW$ )

$\eta_g$  = Rendimento do gerador (%)

#### 4.17 Equação para o cálculo de potência elétrica na saída do gerador

$$P_{Eg} = P_{mt} - P_g \quad (25)$$

Onde:

$P_{mt}$  = potência mecânica na saída da turbina ( $kW$ )

$P_g$  = Perdas no gerador ( $kW$ )

#### 4.18 Equação para o cálculo de rendimento global do sistema

$$\eta_s = \frac{P_{Eg}}{P_b} \quad (26)$$

Onde:

$P_{Eg}$  = potencia elétrica na saída do gerador ( $kW$ )

$P_b$  = Potência Bruta ( $kW$ )

#### 4.19 Resultados obtidos para o sistema de geração de energia

De posse das equações e dados obtidos na Tabela 4 é possível chegar a uma solução para cada dado mostrado na Tabela 5. A análise detalhada dessas equações e dados permite uma compreensão aprofundada entre as variáveis e, assim, possibilita a determinação precisa dos valores correspondentes na Tabela 5.

Tabela 4 – Dados obtidos

DADOS				
VAZÃO	0,2651	m <sup>3</sup> /s	954,231	m <sup>3</sup> /h
COMPRIMENTO	25	m		
DIÂMETRO	0,25	m		
RENDIMENTO DA TURBINA	90%			
RENDIMENTO DO GERADOR	78%			
DENSIDADE DA ÁGUA	1000	kg/m <sup>3</sup>		
ALTURA BRUTA	9	m		
COEFICIENTE DE RUGOSIDADE	140			
GRAVIDADE	9,81			
VELOCIDADE	5,4	m/s		
LEQ	17,575	m		

Fonte: O autor

Tabela 5 – Resultados obtidos

SOLUÇÃO		
PERDA DE CARGA	1,453	m
POTÊNCIA BRUTA	23,403	kW
PERDA DE CARGA NA TUBULAÇÃO	3,777	kW
POTÊNCIA HIDRÁULICA NA ENTRADA DA TURBINA	19,625	kW
PERDAS NA TURBINA	1,963	kW
POTÊNCIA MECÂNICA NA SAÍDA DA TURBINA	17,663	kW
PERDAS NO GERADOR	3,886	kW
POTÊNCIA ELÉTRICA NA SAÍDA DO GERADOR	13,777	kW
RENDIMENTO GLOBAL DO SISTEMA HIDRELÉTRICO	58,87%	

Fonte: O autor

#### 4.20 Período de utilização

Com base nessas informações, foi viável calcular a quantidade de energia que o produtor poderia gerar para reduzir o impacto financeiro em sua fatura de energia por meio da instalação de uma Micro Central Hidrelétrica (MCH), conforme o gerador tendo potência elétrica na saída de 13,6378 kW, sendo utilizado durante a safra do arroz que se estende de novembro a abril em um período de 6 meses a plena carga por 24h temos uma potência gerada 58.915,296 kW/h como pode ser calculado a partir da Equação 27.



$$P_{gerada} = kW_{gerador} * (meses * dias * horas) \quad (27)$$

#### 4.21 Custo de implementação de uma MCH ou PCH

A instalação de uma MCH ou PCH apresenta um desafio significativo devido ao custo inicial avaliado, que para uma usina de 20 kW é aproximadamente R\$ 400.000,00, incluindo a obra de execução civil da barragem. Isso resulta em um valor de US\$ 5.797,10 por kW. No entanto, quando a barragem já está construída, o custo diminui consideravelmente, chegando a cerca de R\$ 3.800,00 por Kw, conforme informações fornecidas pelo fabricante HIGRA durante uma apresentação sobre um turbo gerador hidroelétrico compacto (Richter, 2018).

Comparando com outras fontes de energia alternativa, a implementação torna-se menos atrativa quando é necessária a construção da barragem, especialmente em comparação com o preço da energia solar, que está atualmente em torno de US\$ 1.267,82 por kW. No entanto, uma das grandes vantagens da geração hidráulica é a disponibilidade constante em ambos os turnos, dia e noite, ao contrário da energia solar, que depende do índice de HPS (Horas de Sol por Dia) variando entre 4,7 e 5,1 horas. Isso faz com que o retorno do investimento em equipamentos de geração hidráulica seja mais sólido.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo desta pesquisa, foram explorados os aspectos fundamentais da geração de energia hidroelétrica por meio de sifões em barragens, um tema que se destaca pela sua relevância no contexto das fontes renováveis de energia.

Uma das principais conclusões desta pesquisa é a demonstração do potencial significativo dos sifões como uma alternativa eficaz para a geração de energia. A capacidade de otimizar a produção de eletricidade aproveitando o fluxo natural da água, aliada à simplicidade conceitual, destaca-se como uma solução promissora para a diversificação da matriz energética, contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

Ao longo do estudo, observou-se que a implementação bem-sucedida de sistemas de sifões em barragens requer uma abordagem integrada, considerando fatores técnicos, econômicos e ambientais.

Além disso, ressalta-se a importância da pesquisa contínua e do aprimoramento tecnológico nesta área. Investir em estudos mais avançados, protótipos e testes práticos contribuirá não apenas para a validação dos resultados apresentados, mas também para o refinamento das práticas e a maximização do potencial energético.

Em síntese, a geração de energia hidroelétrica por meio de sifões em barragens representa uma abordagem promissora que merece atenção e investimentos adicionais. Os resultados alcançados nesta pesquisa oferecem uma base sólida para futuros trabalhos e projetos práticos, visando a consolidação dessa tecnologia como uma opção sustentável e eficiente na produção de energia.

## 6 REFERÊNCIAS

- Parygin, A. G. **Commentary on the Efficiency of Selected Structural Designs of Low**. (2015). Citado na página 10.
- Campos, M. *UOL*. 2009. Disponível em:  
<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/energia-hidreletrica.htm>
- Cunha, E. B. (1939). **Pressão e diferenças de pressão** . Em *História da mecânica* P.F. Collier & Son Corp. Citado na página 424
- Guitarra, P. *UOL*. 2016. Disponível em:  
<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/energia-hidreletrica.htm>
- Richter, L. S. *Avaliação da Capacidade de Acumulação Hídrica na Fronteira Oeste - RS para a Produção Descentralizada de Energia Elétrica*. 2018.
- AgroSmart. **Principais tipos de irrigação: Vantagens e Desvantagens**. 2016. Disponível em: <https://agrosmart.com.br/blog/vantagens-tipos-de-irrigacao/>
- Alidai, A. Energia renovável. 2014. *ELSEVIER*, 2-7.
- Barrena, V.V *Análise do dimensionamento de uma turbina hidráulica, por redes neurais para uma mini usina*. 2014. Citado na página 33.
- Bock, M. *Tipos de Turbinas Hidráulicas*. Disponível em:  
<https://www.hidroenergia.com.br/blog/tipos-turbinas-hidraulicas/>
- Bolleli, T. d. *Perda de carga*. 2023 São paulo: USP.
- Brasil, R. A. **Rede dos Engenheiros Agrônomos do Brasil**. 2022. Disponível em:  
<https://agronomos.ning.com/profiles/blogs/projeto-de-irriga-o-com-sulcos-de-infiltra-o>
- Buhler, C. *Controlando energia, gerando desenvolvimento*. 2016. Disponível em:  
<https://www.reivax.com/wp-content/uploads/2022/03/Otimizacao-Kaplan.pdf>
- Carvalho, J. d. *Captação de águas* . 2017.
- Caus, R. T., & Michels, A. **Energia Hidrelétrica: Eficiência na Geração**. *Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos*. Citado na página 27.
- Chapter. *Classificação e seleção de turbinas hidráulicas*. 2018.
- Digitrol. *Digitrol Reinvente o futuro*. 2021 Disponível em: <https://digitrol.com.br/o-que-e-e-como-funciona-um-medidor-de-vazao-ultrassonico/>
- Educação, C. C. **Comentário sobre a eficiência de projetos estruturais selecionados de baixa**. 2015. Citado na página 10.
- Elétrabras*. **Centro da Memória da Eletricidade no Brasil**. Pequenas Centrais Hidrelétricas. 2000. Disponível em:  
[https://eletrobras.com/pt/\\_layouts/15/osssearchresults.aspx?u=https%3A%2F%2Feleto%2F%2Ecom%2Fpt&k=pelton#k=turbinas%20pelton#l=1046](https://eletrobras.com/pt/_layouts/15/osssearchresults.aspx?u=https%3A%2F%2Feleto%2F%2Ecom%2Fpt&k=pelton#k=turbinas%20pelton#l=1046)
- Enciclopédia, W. *Sifão*. 2022. Disponível em:  
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Sif%C3%A3o>

Energês. **COMO CALCULAR A POTÊNCIA HIDRELÉTRICA**. 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/potencia-energia-hidreletrica-como-calcular/>

Energês. **NOVOS LIMITES DE POTÊNCIA INSTALADA NOS SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR**. 2022. Disponível em: <https://energes.com.br/limite-de-potencia/>

Farret, A. F. **Aproveitamentos de pequenas fontes de energia elétrica**. 2010. 2 ed. Santa Maria: UFSM.

Felipe, M. **Equação de Bernoulli aprenda de uma vez**. 2019. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/equacao-bernoulli-teoria/>

Fernanda, R. P. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO**. 2023. *XIX Simpósio Brasileiro de Recurso Hídricos*. Citado na página 12.

Higra. **Turbogerador anfíbio**. 2020. Disponível em: <https://www.higra.com.br/?s=turbo+gerador+anfíbio>

HydroWheel. **Turbinas hidráulicas**. 2022 Disponível em: <tps://hydrowheel.com.br/produtos/turbinas-hidraulicas/kaplan/>

Inforagro. **equivalente a perda de carga expressa em metros**. 2015. Disponível em: <https://inforagro.wordpress.com/2015/10/18/perda-de-carga/>

Jr, A. G., & Sauer, I. L. **A turbina de fluxo**. 2023. Disponível em: <http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/A%20turbina%20de%20fluxo/A%20turbina%20de%20fluxo%20.htm>

Junior, R. L. **PROJETO CONCEITUAL DE UMA TURBINA HIDRÁULICA A SER UTILIZADA**. 2013.

Mardiani-Euers, E. **A Study of Low head Hydropower using a siphon system and conversion to air pressure**. 2013.

Mataix, C. **Turbinas hidráulicas**. 2009.

Mavel. **Turbina Sifão. TM Modular Micro Turbine**. 2023.

Netafim. **O melhor sistema de irrigação tem retorno garantido**. 2023. Disponível em: <https://www.netafim.com.br/noticias/o-melhor-sistema-de-irrigacao-tem-retorno-garantido/>

Neto, J. G. **passedireto**. 2018. Disponível em:

ONS. **O Plano da Operação Energética**. 2020. Citado na página 26.

Reis, L. B. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento**. 2012.

Rodolfo Ladeira, S. M. **Um método para o cálculo da barragem necessária para gerar um reservatório com um determinado volume**. 2011.

Roger E.A. Arndt, L. P. **Hydraulic Turbines**. 2017.

Santos, R. C. **ANÁLISE DE CAVITAÇÃO EM UMA TURBINA HIDRÁULICA DO TIPO KAPLAN**. 2023. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/11545/3/monopoli10009083.pdf>

Teixeira, L. E. **GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA**. 2014. Citado na página 93.

Tomaz, P. *Sifão curso de Manejo de águas pluviais*. 2012. Citado na página 19.

Viana, D. **Análise de Perdas de carga**. 2012. Disponível em:  
<https://www.guiadaengenharia.com/perda-carga/>