

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

DANIEL ALVES CAVALCANTE

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EMPREGO DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS EM  
BAIXAS CORRENTEZAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Joinville

2024

DANIEL ALVES CAVALCANTE

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EMPREGO DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS EM  
BAIXAS CORRENTEZAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Lucas Weihmann

Coorientador: Me. Victor Noster Kürschner

Joinville

2024

Cavalcante, Daniel Alves

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EMPREGO DE TURBINAS  
HIDROCINÉTICAS EM BAIXAS CORRENTEZAS PARA GERAÇÃO DE  
ENERGIA / Daniel Alves Cavalcante ; orientador, Lucas  
Weihmann, coorientador, Victor Noster Kürschner, 2024.  
58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,  
Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Turbina Savonius. 3. Geração de  
Energia. 4. Baixas Velocidades de Correnteza. 5.  
Experimental. I. Weihmann, Lucas . II. Kürschner, Victor  
Noster. III. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Graduação em Engenharia Naval. IV. Título.

DANIEL ALVES CAVALCANTE

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EMPREGO DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS EM  
BAIXAS CORRENTEZAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 04 de abril de 2024.

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Lucas Weihmann  
Orientador  
Presidente

---

Dr. Andrea Piga Carboni  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Me. Raphael Diego Comesanha e Silva  
Membro  
Universidade Federal do Amapá

Dedico este trabalho a Deus e meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a Deus por me dar forças para levantar todos os dias e ir à luta.

A minha mãe Lilian por sempre ter me apoiado a seguir meus sonhos e ao meu pai Neilton por me ensinar a perseverar e por terem sido os melhores pais que eu poderia ter tido.

Agradeço também aos meus amigos Maurício, Rafael, Filipe e Junior nessa jornada que dividiram noites em claro comigo estudando para provas e fazendo trabalhos.

Ao meu orientador Lucas por ter me dado a honra de trabalhar ao seu lado na iniciação científica e por ter acreditado no meu potencial.

Ao professor Anderson por ter me acolhido em seu laboratório e por iluminar os dias com o seu bom humor.

Aos meus amigos de laboratório Victor, Raphael, Yukio, Tesima, Bianca, Gabriel, Tiago, Thiago e Alan que me ensinaram muito sobre teoria e ainda mais sobre a vida.

Gostaria de agradecer também a Petrobrás por ter financiado meu projeto e minha bolsa.

"Devemos ser a mudança que queremos ver no mundo".  
(Mahatma Gandhi, 2008).

## RESUMO

A crescente demanda por energia sustentável destaca a necessidade de adotar recursos naturais. Os oceanos, como fontes renováveis, oferecem potencial significativo, incluindo energia de ondas, marés e correntes. No entanto, no leito oceânico em profundidades acima de 400 metros, desafios como a escassez de energia devido à ausência de ondas e efeitos de marés, além da diminuição da correnteza, tornam essas áreas críticas para a coleta de dados ambientais marinhos por meio de sensores. Para enfrentar esse cenário, turbinas hidrocinéticas emergem como solução viável. Este trabalho propõe o desenvolvimento e teste de duas turbinas utilizando manufatura aditiva, projetadas para operar em baixas velocidades de correnteza. As turbinas, uma com 2 pás e outra com 3 pás do modelo Savonius, serão avaliadas em um canal de água circulante. Os experimentos incluirão a medição das potências geradas por cada turbina. Os resultados avaliaram parâmetros adimensionais como o TSR e o  $C_p$  e eles indicam que a turbina de 2 pás apresenta um desempenho superior em comparação à de 3 pás. Este estudo visa contribuir para o avanço na busca por fontes de energia limpa em ambientes oceânicos de difícil acesso, explorando alternativas eficientes e adaptáveis às condições de baixa velocidade de correnteza específicas dessas profundidades marinhas.

**Palavras-chave:** turbinas Savonius; correntezas marítimas; energia de correnteza; leito oceânico.



## ABSTRACT

The increasing demand for sustainable energy underscores the need to adopt natural resources. Oceans, as renewable sources, offer significant potential, including wave, tidal, and current energy. However, on the ocean floor at depths exceeding 400 meters, challenges such as energy scarcity due to the absence of waves and tidal effects, coupled with reduced currents, make these areas critical for gathering marine environmental data through sensors. In response to this scenario, hydrokinetic turbines emerge as a viable solution. This study proposes the development and testing of two turbines using additive manufacturing, designed to operate at low flow velocities. The turbines, one with 2 blades and another with 3 blades of the Savonius model, will be evaluated in a circulating water channel. The experiments will include measuring the power outputs generated by each turbine. The results evaluated dimensionless parameters such as TSR and  $C_p$  and they indicate that the 2-blade turbine presents superior performance compared to the 3-blade turbine. This research aims to contribute to advancing the search for clean energy sources in challenging oceanic environments, exploring efficient alternatives adaptable to the specific low-flow conditions of these marine depths.

**Keywords:** Savonius turbines; ocean currents; current energy; ocean floor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Turbina a) Francis, b) Pelton e c) Kaplan.....	18
Figura 2 – Esquemático do Fluxo de Potência do sistema.....	19
Figura 3 – Turbina hidrocínética a) horizontal e b) vertical.....	20
Figura 4 – a) Turbina Savonius e b) linhas de corrente.....	21
Figura 5 – Potência da correnteza como função da área circular ( $A = \pi r^2$ ) e velocidade de correnteza. ....	23
Figura 6 – Potência mecânica em função da velocidade de correnteza para uma turbina com $C_p = 0,4$ .....	25
Figura 7 – Coeficiente de potência ( $C_p$ ) em função da velocidade de ponta do rotor ( $\lambda$ ou TSR) para diferentes modelos de turbinas.....	26
Figura 8 – Componentes do gerador CC .....	28
Figura 9 – Dimensões geométricas da turbina Savonius. ....	34
Figura 10 – Turbina Savonius modelada no SolidWorks: a) Vista de perfil; b) Corte transversal turbina de 2 pás; c) Corte transversal turbina de 3 pás .....	35
Figura 11 – Turbina impressa: a) duas pás b) três pás.....	36
Figura 12 – Canal de água circulante.....	36
Figura 13 – Turbina em canal de água circulante durante experimento.....	37
Figura 14 – Gerador DC.....	38
Figura 15 – Componentes do gerador DC .....	39
Figura 16 – Tacômetro digital.....	40
Figura 17 – Curva de Tensão a Vazio.....	43
Figura 18 – Aquisição feita durante 10 minutos. ....	45
Figura 19 – Conversão de dados de tensão em RPM.....	46
Figura 20 – Comparação de RPM entre 3 Pás e 2 Pás .....	46
Figura 21 – Comparação de TSR entre 3 Pás e 2 Pás .....	47
Figura 22 – Comparação entre Potências: a) Potência Analítica; b) Potência de 2 e 3 pás .....	48
Figura 23 – Comparação de $C_p$ e Potência entre Turbinas Savonius de 2, 3 e 4 Pás .....	49
Figura 24 – Gerador como validação da geração elétrica.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese dos estudos Savonius .....	33
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD – Dinâmica de Fluido Computacional

Cp – Coeficiente de Potência

Ec – Energia Cinética

LIFE – Laboratório de Interação Fluido-Estrutura

LISHA – Laboratório de Integração Software e Hardware

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

TSP – Tip Speed Ratio

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

RPM – Rotação por minuto

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1. OBJETIVOS .....	15
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>2. A ENERGIA DAS CORRENTEZAS MARINHAS</b> .....	<b>17</b>
2.1 FLUXO DE ENERGIA .....	19
<b>3. TURBINAS HIDROCINÉTICAS</b> .....	<b>20</b>
3.1. TURBINA SAVONIUS .....	21
3.2 ENERGIA CINÉTICA DA CORRENTEZA .....	22
3.3 COEFICIENTE DE POTÊNCIA .....	23
<b>4. GERADORES</b> .....	<b>27</b>
4.1 COMPONENTES .....	27
<b>4.1.1 Armadura</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1.2 Comutador</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1.3 Escovas</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1.4 Enrolamento de Campo</b> .....	<b>29</b>
4.2 ENSAIOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS .....	29
<b>5. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>31</b>
<b>6. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>34</b>
6.1 DESIGN DA TURBINA SAVONIUS .....	34
6.2 LOCAL DE TESTES .....	36
6.3 GERADOR .....	38
6.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	40
<b>6.4.1 Ensaio a Vazio do Gerador</b> .....	<b>40</b>
<b>6.4.2 Condição de Regime Permanente</b> .....	<b>41</b>
<b>6.4.3 Ensaio das turbinas</b> .....	<b>41</b>
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>43</b>
7.1 TESTE DO GERADOR A VAZIO .....	43
7.2 TESTE DE REGIME PERMANENTE .....	44
7.3 TESTE DE RPM DA TURBINA .....	45
7.4 TESTE DE POTÊNCIA DA TURBINA .....	49

<b>8. CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>8.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade urgente de adotar recursos energéticos naturais e sustentáveis é essencial para atender às demandas crescentes de energia, considerando que as sociedades enfrentam o desafio em ascensão relacionado às emissões e poluição associadas à utilização de combustíveis fósseis (Bahaj, 2013). Essa perspectiva sublinha as preocupações atuais da sociedade de buscar fontes de energia ambientalmente sustentáveis.

Os oceanos não ficam fora dessa preocupação, já que são fontes de energia sustentável e renovável. A energia proveniente dos oceanos deriva de seis fontes distintas, a saber: ondas, variações nas marés, correntes de maré, correntes oceânicas, conversão de energia térmica oceânica e gradientes de salinidade. Cada uma dessas fontes tem origens específicas e requer tecnologias particulares para sua conversão (Ellabban; Abu-rub; Blaabjerg, 2014).

O oceano possui um potencial teórico de energia em torno de 3,7 TW exclusivamente na parcela de ondas (Mørk *et al.*, 2010), além disso, há aproximadamente 5 TW de energia disponível nos oceanos na forma de correntezas (Boyle, 2012). É ressaltado o potencial de energia renovável e sustentável disponível nos oceanos, destacando a necessidade de seu aproveitamento.

Apesar disso, com o aumento da profundidade, a velocidade da correnteza é reduzida, o que torna escassa a disponibilidade de energia no leito oceânico. Correntezas de maré apresentam velocidades médias de aproximadamente 1 m/s (Bahaj, 2013), correntezas de superfície causadas principalmente por ações de vento normalmente tem velocidades de 0,3 m/s, enquanto as que ficam no fundo do oceano causadas, principalmente pela diferença de densidade, apresentam, em média, 0,02 m/s (Shanmugam, 2021).

A escassez de energia no leito oceânico é explicada por alguns fatores como: a ausência de luz solar proveniente dos efeitos de reflexão e difração causados pelo aumento da profundidade e a absorção da luz pela água do mar (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA, 2017). A redução da microbiota (Richter; Ayers, 2018) e de velocidades de correnteza também são observados com o aumento da profundidade. Nesse contexto, uma forma de captar a energia de baixas correntezas de forma eficaz é o uso de turbinas (Wang *et al.*, 2018).

Durante séculos, as turbinas têm desempenhado papel crucial na conversão da energia mecânica disponível nos rios e no vento em trabalho mecânico útil, cujo processo geralmente ocorre por meio de um eixo rotativo. Quando o fluido de trabalho é a água, essas máquinas são denominadas turbinas hidráulicas ou hidroturbinas (Çengel, 2007). Em um mundo onde a busca por fontes de energia limpa cresce rapidamente, as turbinas se destacam como uma tecnologia sustentável.

No entanto, em ambientes de difícil acesso como o leito oceânico a grandes profundidades ou mesmo no leito de rios, é necessária a presença de sensores para monitoramento de condições ambientais como: prevenção de desastre por monitoramento de atividades sísmicas, monitoramento de poluição, coleta de dados oceanográficos e outras aplicações (Melodia *et al.*, 2013). No leito de rios também são usados sensores que tem como objetivo monitorar o assoreamento e a integridade estrutural de pontes (Smart Structures and Materials + Nondestructive evaluation and Health Monitoring, 2018).

Surge então a necessidade de aumentar a permanência desses sensores no ambiente utilizando técnicas de *harvesting* de energia que possibilitem a autossuficiência energética dos dispositivos, prolongando sua vida útil e reduzindo a necessidade de manutenção frequente. Diante desse desafio, propõe-se o estudo teórico, fabricação e teste experimental de uma turbina para geração de energia em locais caracterizados por baixas correntezas.

As turbinas com diâmetro de 7,65 cm e altura de 7,65 cm de duas e três pás serão modeladas no Laboratório de Integração Software e Hardware (LISHA), do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e serão construídas no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACMA) por meio de manufatura aditiva, sendo de forma posterior testadas experimentalmente em diferentes condições de correnteza no canal de água circulante do Laboratório de Interação Fluido-Estrutura (LIFE), para se verificar a eficiência em coletar energia.

## 1.1. OBJETIVOS

Com a perspectiva de contribuir para o aumento da permanência de sensores marinhos no oceano, propõe-se os seguintes objetivos.



### **1.1.1. Objetivo Geral**

Produzir, analisar e comparar o funcionamento de duas turbinas hidrocínéticas em baixas velocidades de correntezas.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Obter um modelo geométrico da pá das turbinas;
- Testar o comportamento das turbinas sob diferentes velocidades de correnteza;
- Avaliar o coeficiente de potência ( $C_p$ ) das turbinas e comparar com os dados da literatura;
- Medir experimentalmente as potências geradas pelas turbinas para diferentes velocidades de correnteza;
- Identificar, entre as turbinas propostas, qual modelo melhor atende ao critério de geração de energia;

## 2. A ENERGIA DAS CORRENTEZAS MARINHAS

A energia das correntezas marinhas é oriunda do movimento das águas, então, convém entender como se dá a geração desse fenômeno oceânico. As correntezas marinhas são, essencialmente, correntes que se formam devido a gradientes de densidade na água do mar, influenciadas principalmente pelos gradientes de temperatura e salinidade, pelas forças do vento na superfície oceânica e pelos movimentos de ondas longas (Bahaj, 2011). As correntezas envolvem corpos d'água frios e quentes que se deslocam nos mares e oceanos do planeta Terra, transportando umidade e calor.

O deslocamento constante dessas correntezas marinhas pelo mundo permite a manutenção de um ciclo energético e calórico no planeta, o que resulta em um conjunto de climas relativamente constantes em certas regiões, como os climas secos das costas ocidentais da região subtropical e quente e úmido nas costas ocidentais dos continentes, nas latitudes médias e altas. O mesmo ocorre com os níveis de salinidade nas águas oceânicas, esse ciclo articular é conhecido como Circulação Termohalina Mundial (Pena, 2019).

Os movimentos da massa profunda dos oceanos, apesar de sua lentidão aparente, caracterizam-se como correntes, uma vez que deslocam a água em uma direção específica. Esse movimento é resultado das variações de densidade, as quais, por sua vez, são influenciadas majoritariamente pelos fatores de temperatura e salinidade (Alexandre, 2008). À medida que essas correntezas se movem, carregam consigo uma considerável quantidade de energia cinética.

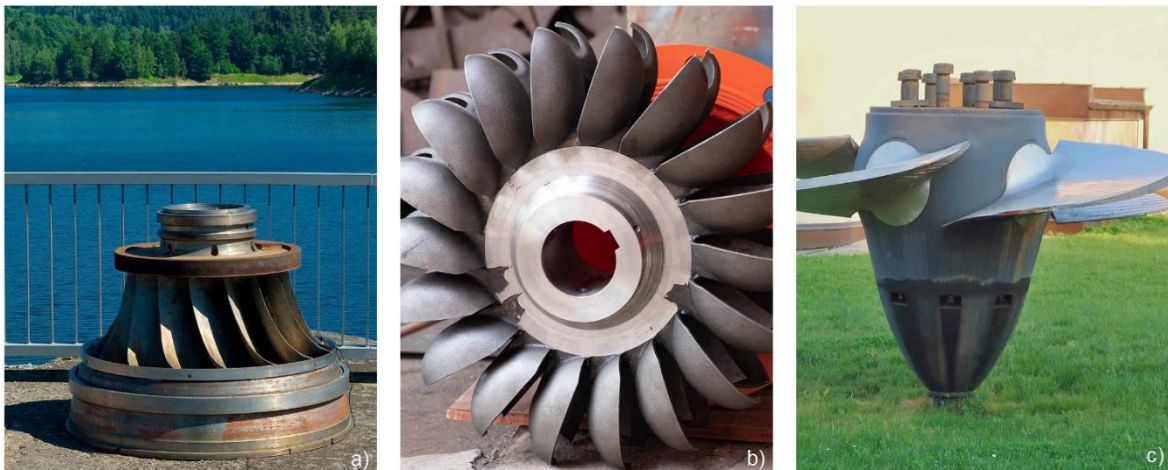
Essa energia cinética, por sua vez, pode ser capturada pelas pás estrategicamente posicionadas em turbinas subaquáticas. As pás, ao serem acionadas pelo fluxo das correntes, convertem a energia cinética em energia mecânica. Essa forma de energia mecânica é então transmitida através de um eixo conectado à turbina até um gerador. No gerador, ocorre uma transformação adicional, onde a energia mecânica é convertida de maneira eficiente em energia elétrica (Lyu; Cai; Huang, 2021).

As turbinas tem desempenhado uma função vital na transformação da energia mecânica presente em rios e na força do vento em trabalho mecânico útil, comumente realizado por meio de um eixo rotativo (Çengel, 2007). Esse processo de conversão

tem sido uma prática consolidada ao longo dos séculos, marcando um capítulo significativo na história da engenharia mecânica.

A diversidade de geometrias de turbinas adapta esses dispositivos a diferentes condições ambientais e fontes de energia. No âmbito das turbinas hidráulicas, há uma variedade de geometrias projetadas para explorar as características específicas dos cursos d'água. Turbinas de reação, como as turbinas Francis e Kaplan apresentadas na Figura 1 a) e c), respectivamente, são configuradas para operar em condições de fluxo constante, aproveitando tanto a pressão quanto a velocidade da água. Por outro lado, turbinas de ação, como as turbinas Pelton representadas na Figura 1 b), são projetadas para condições de alta queda d'água, convertendo a energia cinética da água em trabalho mecânico (Çengel, 2007).

Figura 1 – Turbina a) Francis, b) Pelton e c) Kaplan



Fonte: Enel Green Power (2019).

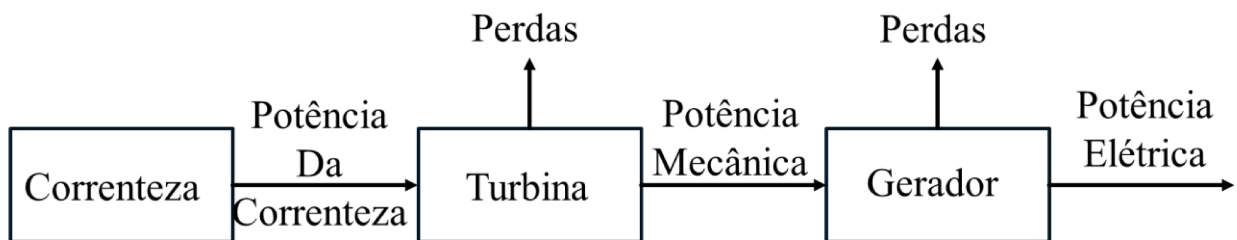
Além das turbinas hidráulicas, outras geometrias são usadas em diferentes contextos energéticos. As turbinas eólicas variam entre modelos de eixo horizontal, comuns em parques eólicos, e de eixo vertical, adequados para áreas urbanas (Thermal Engineering, 2020).

Na energia marinha, turbinas para correntes de maré e ondas se adaptam ao ambiente marinho. As turbinas de eixo horizontal são adequadas para locais com marés previsíveis e correntes fortes. As turbinas de eixo vertical, por outro lado, têm pás que giram em torno de um eixo vertical, permitindo captar a energia das marés independentemente da direção do fluxo da água, tornando-as versáteis para diferentes ambientes marinhos (Thermal Engineering, 2021).

## 2.1 FLUXO DE ENERGIA

A Figura 2 mostra, de maneira geral o fluxo de potência do sistema, a Potência cinética da correnteza calculada como Potência Da Correnteza é transformada em Potência Mecânica através da turbina e esta é transferida através do eixo para o gerador, que por fim transforma a Potência Mecânica em Potência Elétrica.

Figura 2 – Esquemático do Fluxo de Potência do sistema



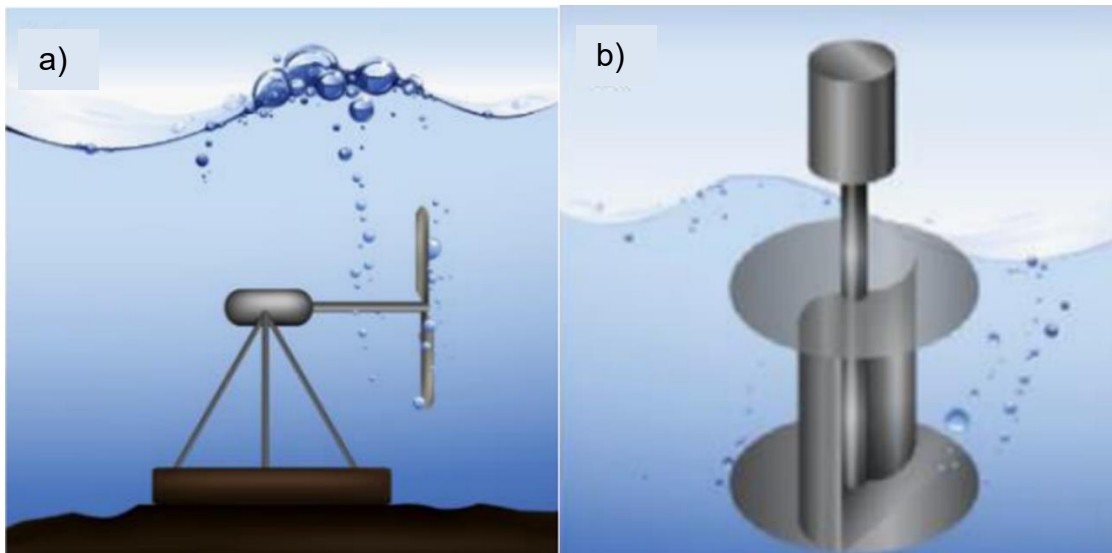
Fonte: autoria própria (2024).

Além disso, é preciso considerar que essas perdas de energia ocorrem em várias etapas do processo de conversão. Inicialmente, há perdas devido à eficiência da turbina, parte da energia mecânica é transformada em calor devido ao atrito e outras resistências internas da turbina. Em seguida, ao converter a energia mecânica em energia elétrica, o gerador também apresenta perdas, tanto por eficiência limitada quanto por resistências elétricas internas. Nesse trabalho são calculadas as três potências e a eficiência nas transformações entre elas para cada turbina.

### 3. TURBINAS HIDROCINÉTICAS

A energia cinética da corrente de água ou ar pode ser convertida em energia mecânica usando uma turbina, que pode ser do tipo eixo horizontal ou vertical conforme a Figura 3. Para aplicações em pequena escala, as turbinas de eixo vertical são preferíveis devido à sua característica omnidirecional, não precisa ser ajustada com a direção do fluido, o que evita a necessidade de mecanismos de inclinação e direcionamento (Alam; Iqbal, 2010).

Figura 3 – Turbina hidrocínética a) horizontal e b) vertical



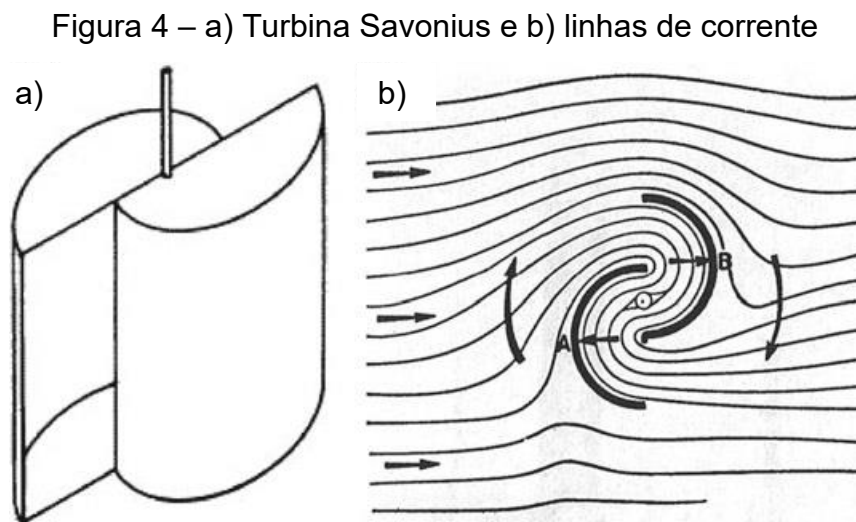
Fonte: Adaptado de Rocha, Vitoriano e Neto (2022).

Um dos problemas enfrentados quando uma turbina é posta em funcionamento é o torque inicial de rotação, tal fenômeno se assemelha a motores diesel de que precisam de um motor de partida para vencer a inércia de rotação inicial (Heard, 2015). Em inglês utiliza-se o termo *cut-in speed* para denominar a mínima velocidade necessária para que uma turbina comece a rotacionar (Alam; Iqbal, 2010). Essa velocidade mínima é crucial para o funcionamento das turbinas, pois abaixo dela, a correnteza não possui força suficiente para superar a inércia das lâminas e iniciar a rotação. Desenvolver uma turbina que tenha essa velocidade mínima baixa é um dos desafios para a geração de energia em baixas correntezas.

Nesse contexto, turbinas do tipo Savonius se tornaram populares entre os engenheiros e fabricantes de turbinas devido a apresentar um alto torque de início, ter um processo de construção simplificado e baixo custo (Khan; Iqbal; Hinchey, 2007), bem como seu funcionamento não depender da direção do fluxo da água, poder operar a pequenas velocidades de correnteza e precisar de menos manutenção que as turbinas convencionais, como a turbina Francis e a Kaplan (Alam; Iqbal, 2010).

### 3.1. TURBINA SAVONIUS

Inventada pelo engenheiro finlandês Sigurd Johannes Savonius em 1922 e patenteada em 1926, a turbina Savonius é um dispositivo de eixo vertical usado para converter a força do fluido em torque em um eixo rotativo. A Figura 4 a) apresenta uma versão inicial do projeto, que consistia em um corte transversal de um cilindro ao longo de seu eixo de simetria, com as partes deslocadas (Solari, 2019).



Fonte: Solari (2019, p.570).

Além disso, na Figura 4 b), é possível ver uma representação das linhas de corrente, que explicam o funcionamento da turbina, cada metade do cilindro é submetida a uma pressão em sua face frontal e a uma sucção na face traseira. Devido às diferentes resultantes dessas ações, a turbina é submetida a um momento de torção que a faz girar em torno de seu eixo. O diferencial da turbina Savonius é que ela opera principalmente por arrasto, em contraste com as turbinas de sustentação mais comuns (Solari, 2019).

A turbina tem várias vantagens, incluindo baixos níveis de ruído e relativa independência da direção do fluido incidente (Solari, 2019). Embora sejam menos eficientes, destacam-se por sua capacidade de capturar energia em correntezas de baixa velocidade e em áreas com variações de maré menores (Thermal Engineering, 2021).

Devido as características da turbina, esse perfil foi o escolhido para o desenvolvimento no trabalho.

### 3.2 ENERGIA CINÉTICA DA CORRENTEZA

A energia cinética é a forma de energia que um corpo possui devido ao seu movimento. Essa energia é uma grandeza escalar medida em Joules. A energia cinética pode ser calculada pela Equação (1).

$$Ec = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Onde  $Ec$  é a energia cinética em joules,  $m$  é a massa do corpo em quilogramas e  $v$  é a velocidade em metros por segundo. Em correntezas, a energia cinética das partículas de água pode ser calculada usando a mesma fórmula, considerando a massa de água em movimento e sua velocidade (Donev, 2015). É importante notar que a energia cinética é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade, o que significa que um pequeno aumento na velocidade resultará em um grande aumento na energia cinética, sendo o contrário também verdadeiro.

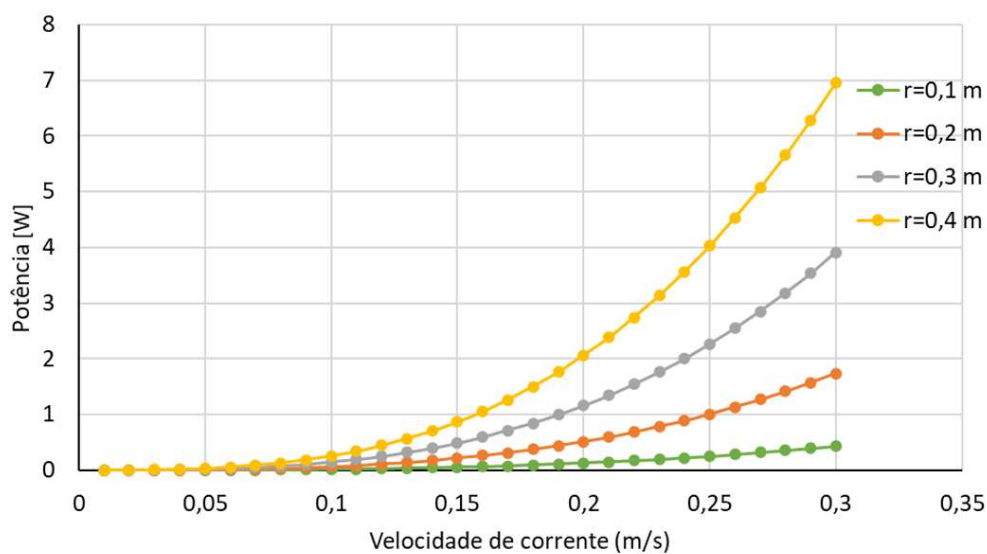
A potência  $P_o$  (Watts) disponível a partir de uma correnteza de água (na ausência de mudanças significativas na profundidade ou elevação) pode ser obtida pela Equação (2).

$$P_o = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2)$$

Onde  $P_o$  é a potência disponível em Watts,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $A$  é a área transversal da turbina e  $v$  é a velocidade do Fluido (Bahaj, 2011). Em posse dessa equação é possível estimar analiticamente a potência disponível com base na

velocidade do fluido e a área projetada calculada da turbina. A Figura 5 apresenta o comportamento energético para uma turbina horizontal de seção transversal circular, variando o raio da turbina e a velocidade do fluido. Embora a turbina desenvolvida nesse trabalho não apresente seção transversal circular, as mesmas equações podem ser utilizadas para o cálculo da potência, adaptando apenas a forma como é calculada a área projetada.

Figura 5 – Potência da correnteza como função da área circular ( $A = \pi r^2$ ) e velocidade de correnteza.



Fonte: autoria própria (2024).

O gráfico mostra que uma redução de 0,05 m/s na velocidade, de 0,30 m/s para 0,25 m/s, é capaz de reduzir a potência disponível na correnteza em torno de 70,4% para uma turbina com raio igual a 0,4 m, o que ocasiona a dificuldade em geração de energia em baixas correntezas, uma vez que a própria energia disponível na corrente é baixa.

### 3.3 COEFICIENTE DE POTÊNCIA

Coeficiente de potência ( $C_p$ ) é um parâmetro que estabelece a relação entre a potência de saída mecânica da turbina e a potência da corrente marinha incidente na área abrangida pelo rotor (Yadav *et al.*, 2023). O  $C_p$  é fundamental para avaliar a eficiência do aproveitamento da energia da corrente. Quanto maior o  $C_p$ , maior a



eficiência, indicando uma relação direta entre o coeficiente e a capacidade de conversão da energia disponível em energia útil (Alcorn; O'Sullivan, 2013). O  $C_p$  pode ser definido pela Equação (3).

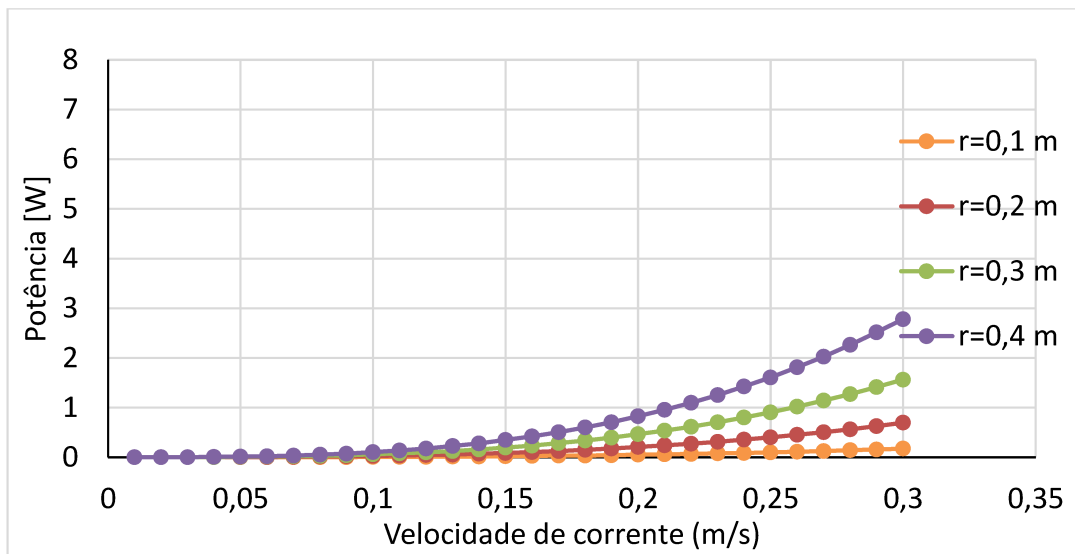
$$C_p = \frac{P_{mecânica}}{P_{correnteza}} \quad (3)$$

O estudo de Betz (1926) demonstrou que existe um valor limite para o coeficiente de potência ( $C_p$ ), conhecido como a Lei de Betz, estabelecendo que o limite máximo de  $C_p$  é de 0,593. O maior coeficiente atual de potência para turbinas hidrocínéticas varia entre 0,3 e 0,4 (Boretti, 2020). Em posse dessa informação o gráfico anterior da Figura 5 pode ser corrigido para estimar os valores de capacidade de geração de potência para uma turbina com  $C_p$  de 0,4. A Equação (2), então passaria a ser corrigida para Equação (4).

$$P_o = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

Na Figura 5, a potência total da correnteza foi definida como uma função da área e da velocidade da correnteza. A Figura 6 mostra quanto uma turbina com um coeficiente de potência de 0,4 poderia coletar dessa correnteza. Em termos gerais, essa turbina seria teoricamente capaz de coletar 40% da potência disponível na correnteza.

Figura 6 – Potência mecânica em função da velocidade de correnteza para uma turbina com  $C_p = 0,4$



Fonte: autoria própria (2024).

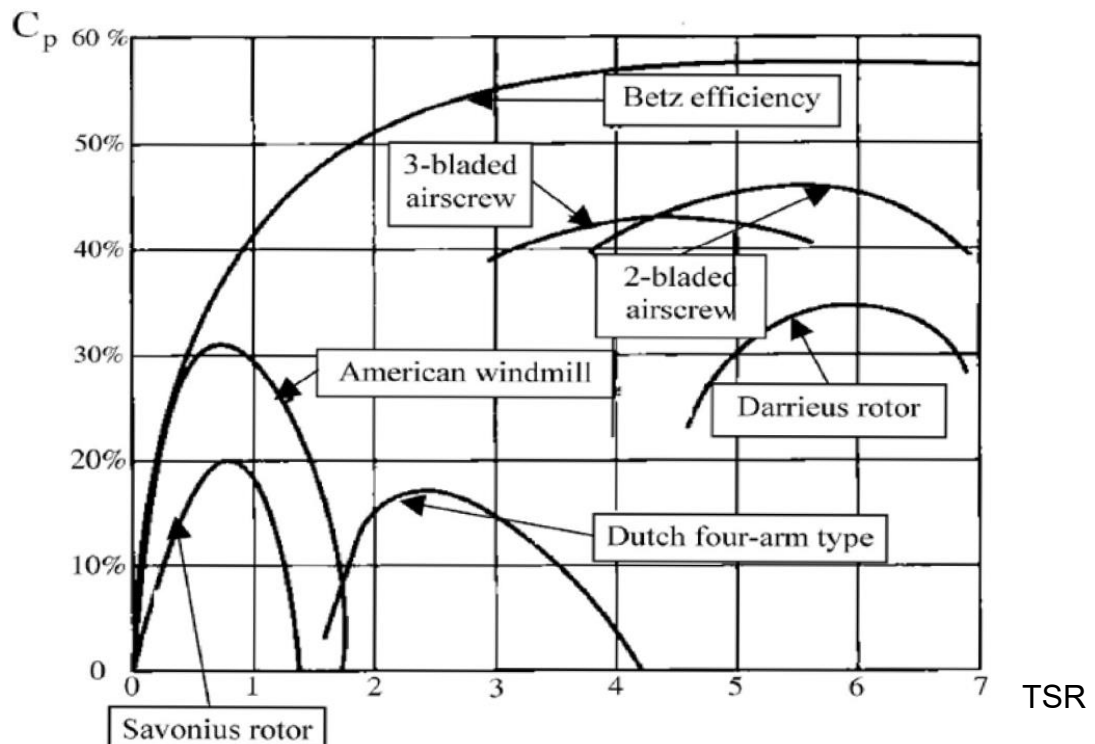
A Figura 6 demonstra que mesmo com um coeficiente de potência alto, a velocidade do fluido influencia de maneira significativa a capacidade que uma turbina tem de gerar potência.

Um fator que influencia o  $C_p$  é o TSR (*Tip Speed Ratio*) que é a razão entre a velocidade linear da ponta da pá e a velocidade do fluido incidente. O valor ideal de TSR para máxima eficiência depende do projeto da turbina (Tian; Mao; Ding, 2018). A Equação (5) define *TSR*.

$$TSR = \frac{\omega R}{V} \quad (5)$$

Onde  $\omega$  é a velocidade angular da turbina,  $R$  é o raio da pá e  $V$  é a velocidade da correnteza. A Figura 7 relaciona o  $C_p$  com *TSR*. A partir desses dados é possível encontrar a geometria de pá ou rotor que melhor se adequa a situação ambiental a qual a turbina estará exposta (Alam; Iqbal, 2010).

Figura 7 – Coeficiente de potência ( $C_p$ ) em função da velocidade de ponta do rotor ( $\lambda$  ou TSR) para diferentes modelos de turbinas.



Fonte: Alam e Iqbal (2010).

A Figura 7 mostra como a turbina Savonius é ideal para baixas velocidades, uma vez que seu TSR varia entre 0,4 à 1 nessa condição e seu  $C_p$  está entre os maiores nessa faixa de funcionamento. O moinho de vento americano, apesar de também ser uma boa solução, tem um fluido diferente de trabalho que é o ar.

## 4. GERADORES

Os geradores desempenham um papel fundamental na conversão de energia mecânica em energia elétrica, especialmente em sistemas que requerem uma saída de energia estável e controlada. Esses dispositivos operam baseados no princípio da indução eletromagnética, onde um condutor em movimento dentro de um campo magnético gera uma corrente elétrica (Villar, 2006). A simplicidade e a robustez dos geradores os tornam ideais para uma variedade de aplicações, desde pequenos dispositivos portáteis até grandes sistemas de geração de energia.

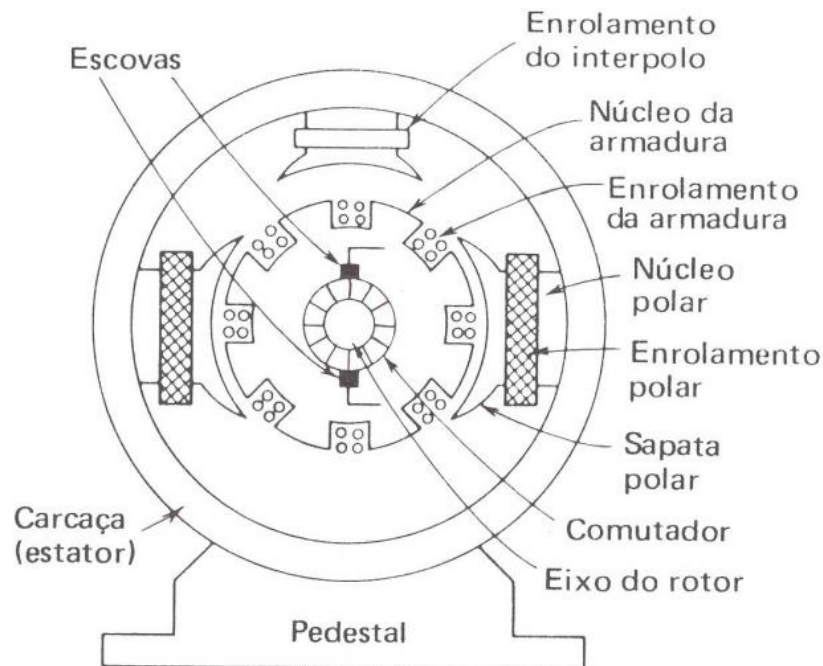
No contexto das turbinas eólicas, os geradores de indução trifásico gaiola de esquilo (GIGE) são frequentemente empregados devido à sua capacidade de fornecer uma tensão constante e facilmente regulável, o que é crucial para muitas aplicações industriais e residenciais. Em turbinas eólicas, por exemplo, a variabilidade da velocidade do vento pode ser compensada pelo uso de conversores eletrônicos de potência, que ajustam a saída elétrica de acordo com a velocidade de rotação do rotor (Filho e Cardoso, 2014), permitindo uma geração de energia mais eficiente e adaptável às condições ambientais flutuantes.

Independentemente da fonte original de energia seja carvão, óleo, gás, plutônio, urânio, correnteza, queda d'água, sol ou vento, a etapa final de conversão em energia elétrica ocorre sempre no gerador. Esse processo é fundamental não apenas em grandes usinas, mas também em pequenos conjuntos geradores em navios, veículos motorizados e fontes de energia de emergência, destacando a importância dos geradores na infraestrutura energética (Villar, 2006).

### 4.1 COMPONENTES

A Figura 8 ilustra os componentes presentes no gerador de corrente contínua de maneira simplificada.

Figura 8 – Componentes do gerador CC



Fonte: Villar (2006).

Os componentes fundamentais de geradores CC representados na Figura 8 são explicados nos subtópicos a seguir.

#### 4.1.1 Armadura

Em um gerador, a armadura é acionada por uma força mecânica externa, resultando em sua rotação. Essa rotação induz uma tensão que é conectada a um circuito externo. Em essência, a armadura do gerador entrega corrente elétrica para um circuito externo, designado como a carga. Devido à sua função rotativa, a armadura é também referida como rotor (Villar, 2006).

O núcleo da armadura é fabricado com camadas laminadas de aço, oferecendo uma faixa de baixa relutância magnética entre os pólos. Essas lâminas reduzem as correntes parasitas no núcleo, e o aço utilizado é de alta qualidade para minimizar a perda por histerese. O núcleo possui ranhuras axiais em sua periferia para acomodar o enrolamento da armadura, composto por bobinas isoladas entre si e do núcleo, inseridas nas ranhuras e eletricamente conectadas ao comutador (Villar, 2006).

### **4.1.2 Comutador**

Uma máquina de corrente contínua (CC) possui um comutador que converte a corrente alternada (induzida) na armadura em corrente contínua, liberada através de seus terminais, no caso de um gerador. O comutador é composto por segmentos de cobre, com um par de segmentos para cada enrolamento da armadura. Cada segmento é isolado dos outros por lâminas de mica. Os segmentos são montados ao redor do eixo da armadura e são isolados tanto do eixo quanto do ferro da armadura. No estator da máquina, duas escovas fixas são instaladas para fazer contato com os segmentos opostos do comutador (Villar, 2006).

### **4.1.3 Escovas**

As escovas são conectores de grafite fixos, montados sobre molas, o que lhes permite deslizar sobre o comutador no eixo da armadura. Dessa forma, as escovas estabelecem o contato entre os enrolamentos da armadura e a carga externa, no caso de um gerador. As escovas estão constantemente conectadas a um segmento do comutador e em contato com uma bobina localizada na zona interpolar (Villar, 2006).

### **4.1.4 Enrolamento de Campo**

O eletroímã gera o fluxo magnético que é captado pela armadura. Em um gerador, a corrente de campo pode ter origem em uma fonte separada, denominada excitador, ou pode ser derivada da própria armadura. O enrolamento do campo pode ser constituído por algumas espiras de fio grosso para o campo-série ou muitas espiras de fio fino para o campo-shunt (em derivação) (Villar, 2006).

## **4.2 ENSAIOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Os ensaios realizados tem como objetivo encontrar os parâmetros do gerador, dois deles são os mais importantes:

1. O ensaio de curto-circuito consiste em conectar os terminais do gerador diretamente, sem carga externa, resultando em uma corrente muito elevada e reduzindo a tensão nos terminais do gerador a um valor próximo de zero.

Esse ensaio é realizado para determinar a corrente de curto-circuito, a resistência do enrolamento da armadura e a queda de tensão interna do gerador. A partir desses dados, é possível calcular a corrente de curto-circuito, que é importante para dimensionar os dispositivos de proteção do gerador e avaliar sua capacidade de suportar curtos-circuitos sem danos (Umans, 2014).

2. Já o ensaio de tensão a vazio envolve a medição de tensão nos terminais do gerador sem carga externa, ou seja, sem que haja corrente sendo fornecida ou retirada do gerador. Nesse ensaio, a tensão nos terminais do gerador é medida enquanto a velocidade do eixo é variada dentro de uma faixa especificada. Esse ensaio é utilizado para determinar a tensão gerada pelo gerador em condições nominais de operação, bem como a sua característica de tensão em relação à velocidade do eixo. A partir desses dados, é possível avaliar o desempenho do gerador em relação à sua tensão nominal e determinar a sua capacidade de fornecer energia elétrica de forma estável e confiável (Umans, 2014).

## 5. REVISÃO DA LITERATURA

Visando a geração de energia em baixas velocidades de correnteza, algumas tecnologias de microgeradores se destacam, como os TENGs (nanogeradores triboelétricos). Os TENGs operam com base na triboeletricidade e na indução eletrostática. Quando dois materiais diferentes entram em contato, uma camada de cargas positivas ou negativas é gerada em suas superfícies, respectivamente. Ao se separarem, a diferença de potencial resultante faz com que os elétrons fluam através de um circuito externo (Shen *et al.*, 2021).

Wang *et al.* (2021) desenvolveram um TENG com formato de bandeira capaz de gerar energia em condições de correnteza tão baixa como 0,133 m/s, conseguindo um pico de potência de 52.3  $\mu$ W com 6 unidades de TENGs em uma correnteza de 0,461 m/s. Também é notável o uso de materiais piezo elétricos para geração de energia. O efeito piezoelétrico direto ocorre quando um material piezoelétrico é exposto a um estresse externo. À medida que o material sofre uma mudança volumétrica, os dipolos elétricos no sólido se reorientam e experimentam uma mudança de potencial elétrico em resposta ao estresse aplicado (Kim *et al.*, 2020).

Kim *et al.* (2020) desenvolveram um sistema mecânico que utiliza a rotação de uma hélice e um bastão mecânico em sua extremidade para gerar energia através de impactos em um módulo piezoelétrico. Com uma correnteza de 1,2 m/s o sistema conseguiu produzir 17 mW de potência. A configuração inclui bastões de impacto que giram com a hélice, atingindo uma viga piezoelétrica em balanço, resultando em uma das maiores eficiências relatadas para dispositivos de coleta de energia piezoelétrica em condições reais.

Dentre essas tecnologias, a turbina Savonius se destaca por sua eficiência em gerar potência mesmo em baixas velocidades de correnteza. Por exemplo, Khan *et al.* (2007) desenvolveram uma turbina Savonius para baixas velocidades de correnteza que conseguiu produzir 0,45 W com uma velocidade de correnteza de 0,70 m/s. Sampelawang *et al.* (2020) construíram e testaram várias turbinas Savonius com ranhuras nas pás e conseguiram aumentar o coeficiente de arrasto de 2,71 para 3,08, ao mesmo tempo que aumentaram o pico de eficiência de 30,97% para 35,26%.

Kumar e Saini (2017) realizaram simulações de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) variando o ângulo de torção das pás entre 0° e 25°, alcançando um



Coeficiente de Potência ( $C_p$ ) de 0,39 com um *Tip Speed Ratio* (TSR) de 0,9 a uma correnteza de 2 m/s. Kailash *et al.* (2012) adicionaram placas na entrada e na saída do fluido da turbina Savonius. Sem as placas, a turbina apresentava um  $C_p$  de 0,14, mas com a melhor configuração das placas, o  $C_p$  aumentou para 0,35.

Modelos que utilizam híbridos da turbina Savonius com outras turbinas também são desenvolvidos, como é o caso de Alam e Iqbal (2010) que construíram uma turbina híbrida Savonius-Darrieus alcançando um  $C_p$  de 0,15 para uma velocidade de correnteza igual a 0,6 m/s com um TSR de 2,7. Durante o experimento também foi alcançado uma produção de 21,3 W com uma correnteza de 0,8 m/s.

Shanegowda *et al.* (2024) realizaram simulações numéricas utilizando uma velocidade de entrada de 0,5 m/s e analisaram cinco geometrias de turbina únicas, variando em número de lâminas, diâmetro e posições angulares. Dentre as testadas a de duas pás obteve o melhor desempenho alcançando um coeficiente de potência máximo de 0,217, marcando um aumento de 155% em relação aos projetos de quatro lâminas testados.

Alguns estudos combinam experimento com simulação, como é o caso de Ramadan *et al.* (2021) que investigou experimentalmente a performance de duas turbinas Savonius de uma pá para aplicação em um rio, e posteriormente analisou numericamente a adição de duas placas para convergência de fluido naquela com o melhor resultado experimental, de forma a aumentar ainda mais a eficiência. Os resultados encontraram que a melhor turbina apresentava um  $C_p$  de 0,13 com um TSR de 0,61. A análise numérica revelou que a melhor combinação de placas aumentou o  $C_p$  da turbina para 0,24 com um TSR de 0,7.

Mahmoud *et al.* (2012) realizaram experimentos com diferentes tipos de geometrias e encontraram que a turbina Savonius com duas pás é mais eficiente que a de três pás e a de quatro pás. Também encontraram que as turbinas que tem as extremidades fechadas são mais eficientes que as abertas e por fim que as de duplo estágio tem performance melhor que as de único estágio.

A Tabela 1 exibe de forma simplificada os resultados dos estudos de turbina Savonius e os métodos que foram utilizados de forma a aumentar o  $C_p$  e o TSR das turbinas.

Tabela 1 – Síntese dos estudos Savonius

Autor	Ano	Tipo de Estudo	Turbina(s) Testada(s)	Melhoria	Parâmetro Avaliado	Resultados
Khan <i>et al.</i>	2007	Experimental	2 pás	–	Potência	0,45 W com uma correnteza de 0,70 m/s
Alam e Iqbal	2010	Experimental	Híbrida Savonius-Darrieus	Combinar duas turbinas	Cp e TSR	Cp = 0,15 TSR = 2,7
Mahmoud <i>et al.</i>	2012	Experimental	2 pás, 3 pás e 4 pás	–	Cp e Potência	2 pás é superior aos outros modelos em ambos os parâmetros
Kailash <i>et al.</i>	2012	Experimental	2 pás	Placas de desvio de Fluxo	Cp e placas de desvio de fluxo	Conseguiu aumentar o Cp de 0,14 para 0,35 com duas placas de desvio de fluxo, uma na entrada e outra na saída.
Kumar e Saini	2017	CFD	2 pás	Ângulo de torção	Cp, TSR e ângulo de torção	Encontrou que o ângulo de torção de 12,5° tem o maior Cp de 0,39 com TSR de 0,9
Sampelawang <i>et al.</i>	2020	Experimental	2 pás	Ranhura nas pás	Cp e Coeficiente de arrasto	Pás com ranhuras de 12,5 mm apresentam um pico de eficiência de Cp = 0,356 e um coeficiente de arrasto de 0,37
Ramadan <i>et al.</i>	2021	Experimental e CFD	1 pá	Ângulo de arco da lâmina e placas de desvio de fluxo	Cp, TSR, Ângulo de arco da lâmina e placas de desvio de fluxo	Experimentalmente a melhor turbina teve Cp de 0,1285 e TSR de 0,61. Numericamente foi possível aumentar o Cp para 0,24, TSR para 0,7 com duas placas defletoras
Shanegowda <i>et al.</i>	2024	CFD	2 pás, 4 pás e 6 pás	Diferentes designs de turbina	Cp e TSR	A turbina de 2 pás tem o maior Cp de 0,217 com TSR de 0,9

Fonte: autoria própria (2024).

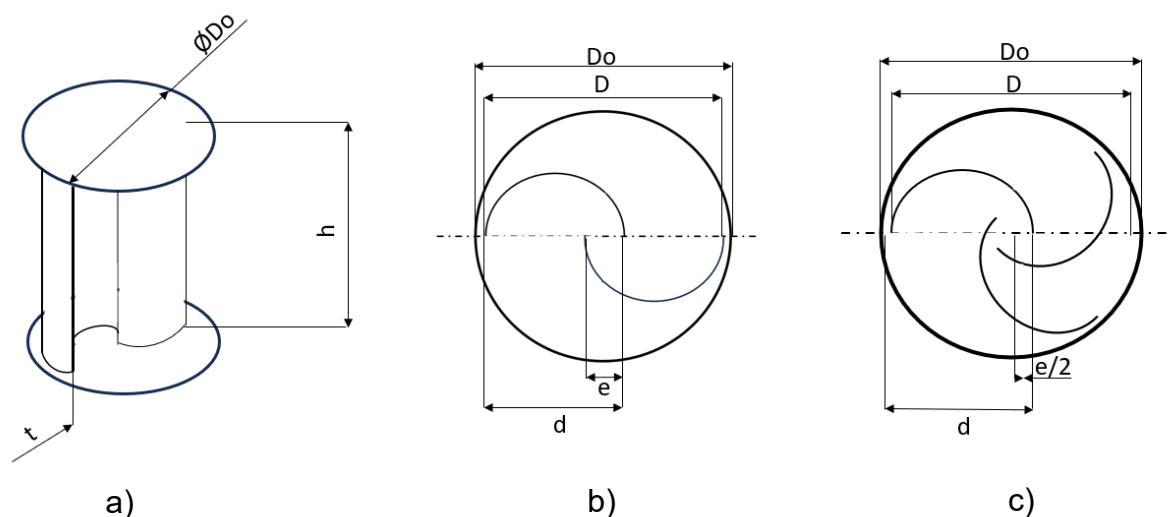
## 6. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os equipamentos empregados e os métodos aplicados, como os parâmetros para o dimensionamento da turbina Savonius e sua construção, o local e as condições ambientais onde os testes foram conduzidos, e os ensaios feitos com o gerador e as turbinas.

### 6.1 DESIGN DA TURBINA SAVONIUS

Alguns aspetos geométricos construtivos devem ser considerados ao desenvolver uma turbina Savonius, a Figura 9 mostra uma vista em perspectiva e superior da turbina e nela algumas dimensões cujas definições são necessárias. As pesquisas científicas que versam sobre o dimensionamento de turbinas Savonius levam em considerações aspectos como: taxa de sobreposição ( $e:d$ ), relação de aspecto ( $D:h$ ) e o parâmetro de placas externas ( $Do:D$ ).

Figura 9 – Dimensões geométricas da turbina Savonius.

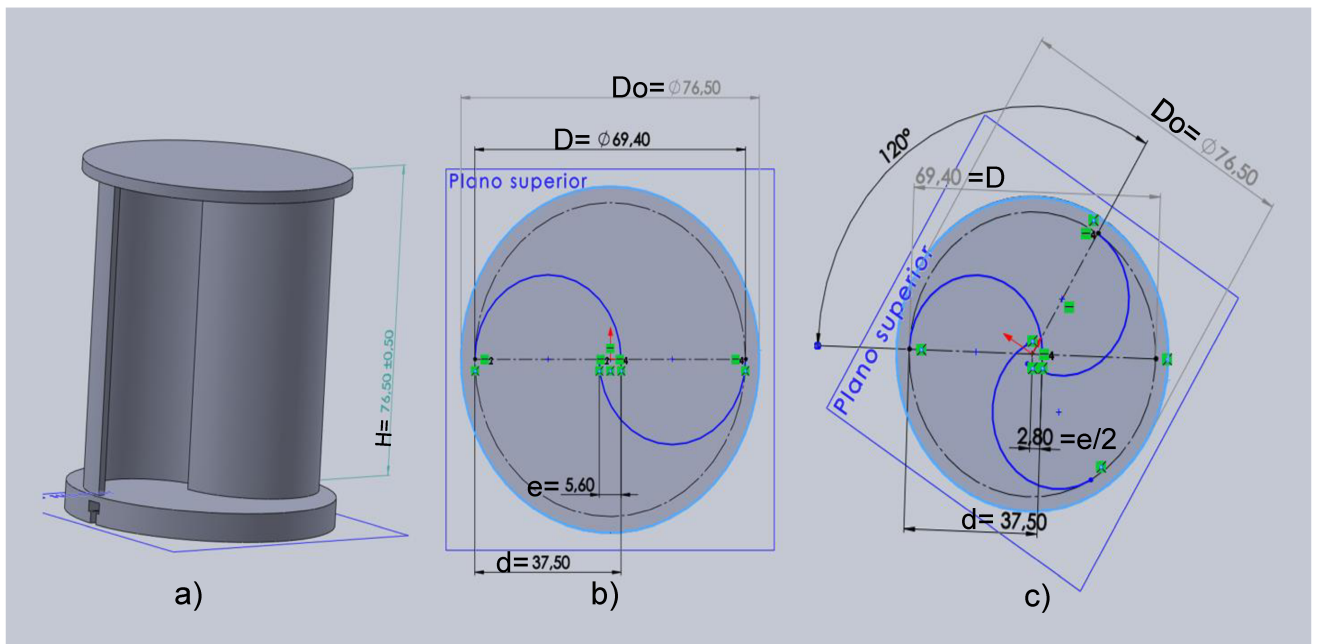


Fonte: Adaptado de Wenehenubun *et al.*, (2015).

A escolha desses parâmetros foi feita baseada no estudo de Altan *et al.* (2008) que encontrou como bons parâmetros,  $(e:d) = 0,15$ ;  $(D:h) = 0,90$  e  $(Do:D) = 1,10$ . A dimensão  $Do$  foi escolhida com base no gerador, uma vez que a turbina estaria livre

em uma de suas extremidades, foi optado por um tamanho que não causasse balanço do eixo durante o funcionamento. Portanto,  $D_o$  foi definido como 76,50 mm e as outras dimensões foram calculadas segundo os parâmetros de Altan *et al.* (2008). A Figura 10 mostra o desenho final feito no SolidWorks com as dimensões em milímetros, indicando as duas variantes de turbinas: uma com 2 pás e outra com 3 pás.

Figura 10 – Turbina Savonius modelada no SolidWorks: a) Vista de perfil; b) Corte transversal turbina de 2 pás; c) Corte transversal turbina de 3 pás

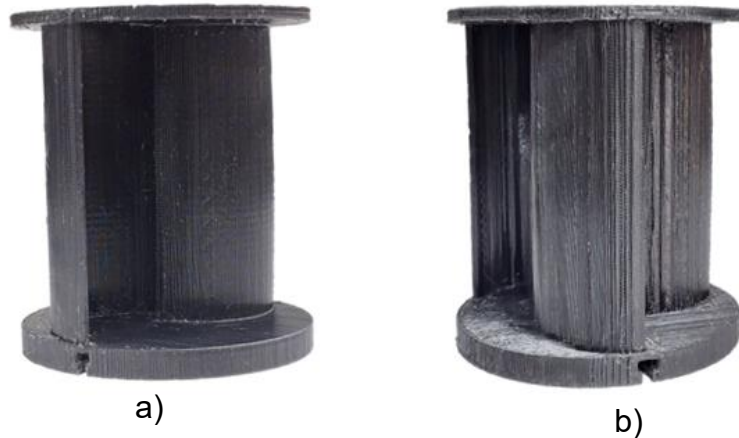


Fonte: autoria própria (2024).

Conforme pode ser visto na Figura 10, os valores escolhidos para o dimensionamento da turbina foram:  $D_o = 76,50$  mm;  $D = 69,40$  mm;  $d = 37,50$  mm;  $e = 5,60$  mm;  $H = 76,50$  mm e as espessuras das pás foram feitas com  $t = 2$  mm.

Uma vez que a turbina estava devidamente modelada no SolidWorks, a mesma foi salva em formato STL e enviada para impressão 3D no LACMA. A Figura 11 mostra a turbina impressa em plástico ABS, escolhido devido à sua densidade de  $1,05$  g/cm<sup>3</sup>, que resultou em uma turbina mais leve e de rotação mais suave, devido também à sua flexibilidade.

Figura 11 – Turbina impressa: a) duas pás b) três pás.



Fonte: autoria própria (2024).

Na Figura 11 a) é possível ver a turbina de 2 pás e na Figura 11 b) está representada a turbina de 3 pás. Como não foi realizado tratamento superficial a turbina apresentou uma rugosidade superficial alta que pode melhorar o desempenho de uma turbina Savonius devido ao aumento do arrasto.

## 6.2 LOCAL DE TESTES

Os testes foram conduzidos no canal de água circulante do LIFE (Laboratório de Interação Fluido-Estrutura) ilustrado na Figura 12. A área de testes se estende desde o início até o final da plataforma, após as escadas.

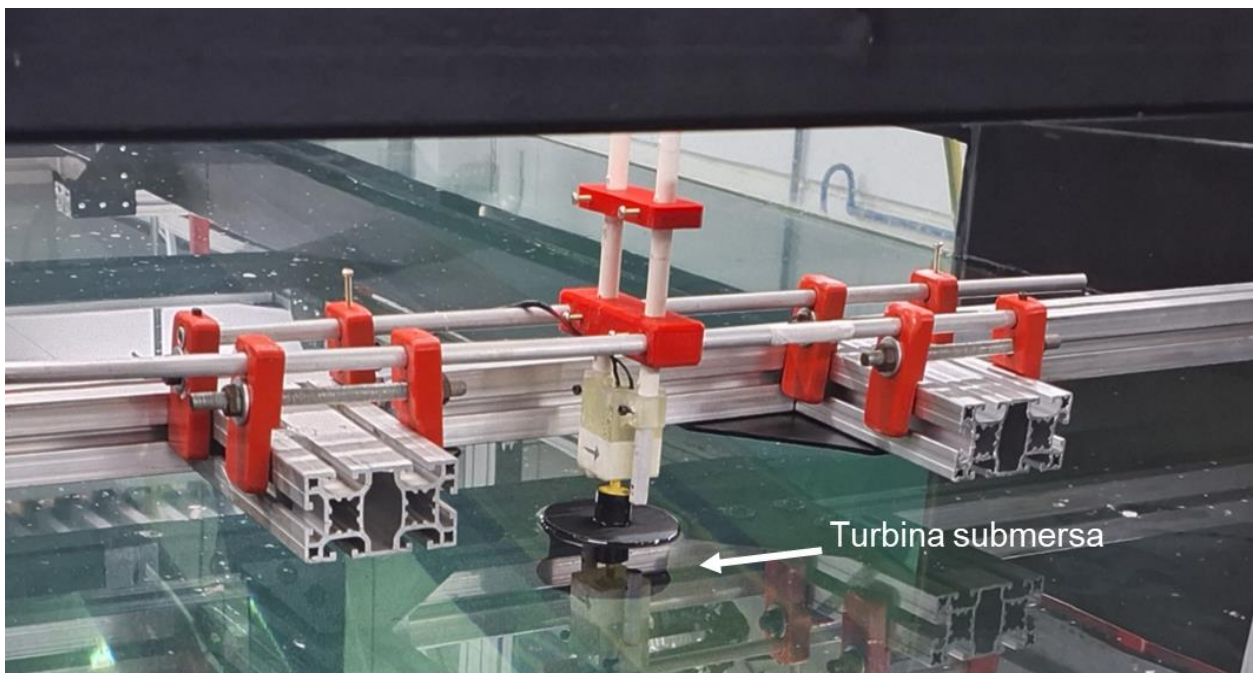
Figura 12 – Canal de água circulante.



Fonte: Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa MCTI (2024).

A Figura 13 mostra a turbina submersa na área de testes. As correntezas testadas variaram de 0,22 a 0,28 m/s, com incrementos de 0,01 m/s, visando simular pequenas velocidades de correnteza. Os testes começaram com uma velocidade de 0,22 m/s, que foi determinada como a velocidade mínima de correnteza na qual a turbina ainda rotacionava. O limite de velocidade para o canal de água circulante durante os testes foi de 0,28 m/s devido ao instrumento utilizado para medição da velocidade de correnteza.

Figura 13 – Turbina em canal de água circulante durante experimento.



Fonte: autoria própria (2024).

A turbina foi posicionada no centro do canal, pois assim ela fica menos sujeita aos efeitos da camada limite, onde a velocidade do fluxo de água é reduzida significativamente devido ao atrito com a parede. Isso ocorre porque o escoamento no centro do canal tende a ser mais uniforme e menos afetado pela viscosidade do fluido, especialmente em comparação com as regiões próximas às paredes (Çengel, 2007). Ao minimizar a interferência da camada limite, a turbina pode operar de maneira mais eficiente, capturando uma correnteza mais próxima da velocidade média do fluxo principal do canal.

A medição da velocidade de correnteza foi feita utilizando o Nortek N3015-030 que é um velocímetro acústico doppler, o que significa que ele utiliza o efeito

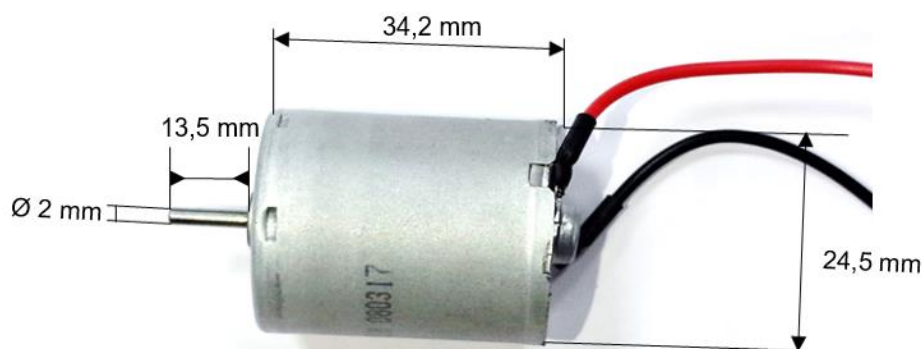
doppler para medir a velocidade das partículas em suspensão na água. O instrumento possui três transdutores acústicos que emitem pulsos sonoros na água. Esses pulsos são refletidos pelas partículas em movimento na água (como sedimentos ou pequenos organismos), retornando ao transdutor. Com base no tempo de retorno dos pulsos sonoros e na mudança de frequência desses pulsos devido ao movimento das partículas, o velocímetro calcula a velocidade relativa da água.

### 6.3 GERADOR

O modelo do gerador escolhido para o projeto foi o S17028 080317, selecionado devido ao seu baixo custo e facilidade de acesso. A Figura 14 apresenta o gerador utilizado. Segundo as especificações fornecidas pelo fabricante, a tensão dos terminais do gerador varia de 0,01 a 5,5 V, enquanto a corrente pode variar de 0,01 a 100 mA. A velocidade nominal de operação do gerador está na faixa de 100 a 6000 RPM.

Embora o gerador S17028 080317 não fosse ideal para nossa aplicação de baixo RPM, pois sua faixa de operação nominal está bem acima das velocidades que se pretende trabalhar, ele foi o modelo disponível para o projeto. A escolha deste gerador foi motivada principalmente pelo foco do trabalho estar em verificar o potencial da turbina.

Figura 14 – Gerador DC



Fonte: autoria própria (2024).

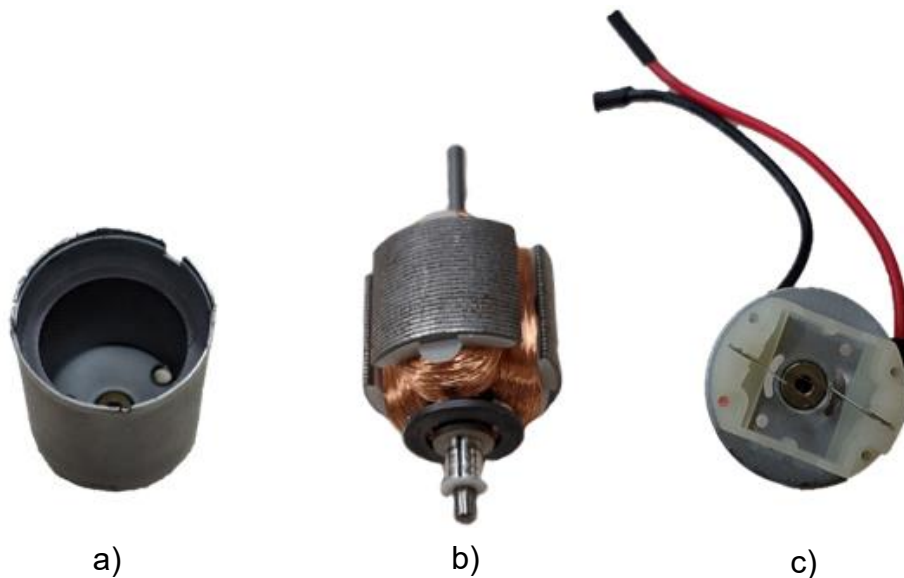
Com base nas especificações do fornecedor e na Lei de Ohm (Equação (6)), com uma tensão nominal de 5,5 V e uma corrente de 100 mA, foi encontrado um valor

de resistência nominal de  $55 \Omega$ , esta resistência utilizada como carga, garante que o gerador trabalhe no ponto máximo de potência, dado os valores nominais. No entanto, a disponibilidade em laboratório foi de uma resistência de carga de  $67 \Omega$ , que, embora um pouco maior que a nominal, ainda estava próxima do ponto de máxima potência que o gerador pode fornecer.

$$R = \frac{U}{I} \quad (6)$$

A Figura 15 exibe os componentes do gerador, detalhando suas partes. Na Figura 15 a), são mostrados a carcaça e o ímã permanente, que são fundamentais para a geração do campo magnético necessário para a operação do gerador. Na Figura 15 b), pode-se visualizar o comutador, a armadura e o rotor com as bobinas, que são responsáveis por converter a energia mecânica em energia elétrica através do movimento rotacional.

Figura 15 – Componentes do gerador DC



Fonte: autoria própria (2024).

Na Figura 15 c), estão presentes as escovas e os terminais de saída, que fazem a conexão elétrica entre o rotor e o circuito externo, permitindo a transferência de energia gerada para o sistema elétrico. Esses componentes juntos formam o núcleo funcional do gerador, garantindo sua operação eficiente.



## 6.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesta seção serão discutidos os ensaios que foram organizados em três principais etapas: Ensaio a Vazio do Gerador, destinado a caracterizar seu comportamento sem carga; Ensaio de Regime Permanente, para determinar a estabilidade operacional da turbina sob variadas condições de correnteza; e Ensaio das Turbinas, focado na análise do desempenho energético da turbina Savonius em diferentes configurações geométricas e condições de operação. Cada etapa é detalhada em termos de metodologia, equipamentos utilizados e parâmetros medidos.

### 6.4.1 Ensaio a Vazio do Gerador

O ensaio de tensão a vazio foi realizado utilizando o gerador S17028 080317, ao qual foi aplicado torque por meio de um motor auxiliar. Durante o ensaio, foram registradas medições da tensão gerada em diferentes valores de RPM para estabelecer a curva característica de RPM em relação à tensão em vazio do gerador.

Essa curva, essencialmente ligada às propriedades do gerador, desempenhou um papel crucial na determinação do RPM da turbina submersa de forma indireta, pois o uso do tacômetro se provou difícil em ambiente submerso. Utilizando os dados de RPM por tensão a vazio, é possível desenvolver uma equação de interpolação para converter dados de tensão em RPM. A medição de RPM foi realizada com o auxílio de um tacômetro digital a laser, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Tacômetro digital



Fonte: autoria própria (2024).

O tacômetro digital a laser funciona emitindo um feixe de laser que é direcionado para um ponto específico em um objeto em movimento, como o eixo de um motor. O objeto em movimento geralmente tem uma marca reflexiva ou uma fita refletiva aplicada a ele. Quando o feixe de laser atinge essa marca, ele é refletido de volta para o sensor do tacômetro. O tacômetro então mede o tempo entre os pulsos de luz refletida para calcular a velocidade de rotação do objeto. A leitura é exibida digitalmente, proporcionando uma medição mais precisa.

#### **6.4.2 Condição de Regime Permanente**

Para determinar o momento em que a turbina atinge o regime permanente, foi realizado um teste durante 10 minutos com a turbina de 3 pás no canal circulante, utilizando uma taxa de amostragem de 1 segundo e uma correnteza de 0,235 m/s. O objetivo do teste é identificar o tempo necessário para que o fluxo de correnteza do canal de água circulante se estabilize e como consequência o RPM da turbina.

Durante o teste, a turbina operou com o gerador a vazio, e os dados de tensão coletados foram convertidos em valores de RPM utilizando os resultados obtidos no ensaio a vazio. Com os resultados de velocidade da turbina ao longo do tempo, seu perfil de rotação foi analisado por meio de uma média móvel, com intuito de encontrar o ponto em que a velocidade de rotação da turbina atinge o regime permanente, ou seja, quando a média móvel não apresenta mais variação ao longo do tempo.

#### **6.4.3 Ensaio das turbinas**

Neste trabalho, os testes das turbinas foram separados em dois ensaios:

1. Ensaio de RPM: Neste teste o gerador foi mantido sem carga - a vazio. O objetivo é registrar a velocidade angular da turbina em função da velocidade da correnteza, sem a presença de torque resistivo. Esse teste visa encontrar o TSR da turbina, utilizando o gerador apenas como sustentação, com um eixo livre girante. Os dados de saída desse teste foram valores de tensão que foram posteriormente convertidos em valores de RPM.

2. Ensaio de Potência: Nesse teste, é conectada uma carga aos terminais do gerador, com objetivo de avaliar quanto de potência elétrica pode ser gerada utilizando a turbina com o gerador nas condições de correnteza específicas.

Por fim, cada ensaio foi repetido duas vezes para as velocidades de correnteza de: 0,223; 0,235; 0,246; 0,256; 0,269 e 0,280 m/s. No final, foi calculado uma média aritmética dos valores obtidos para cada velocidade.

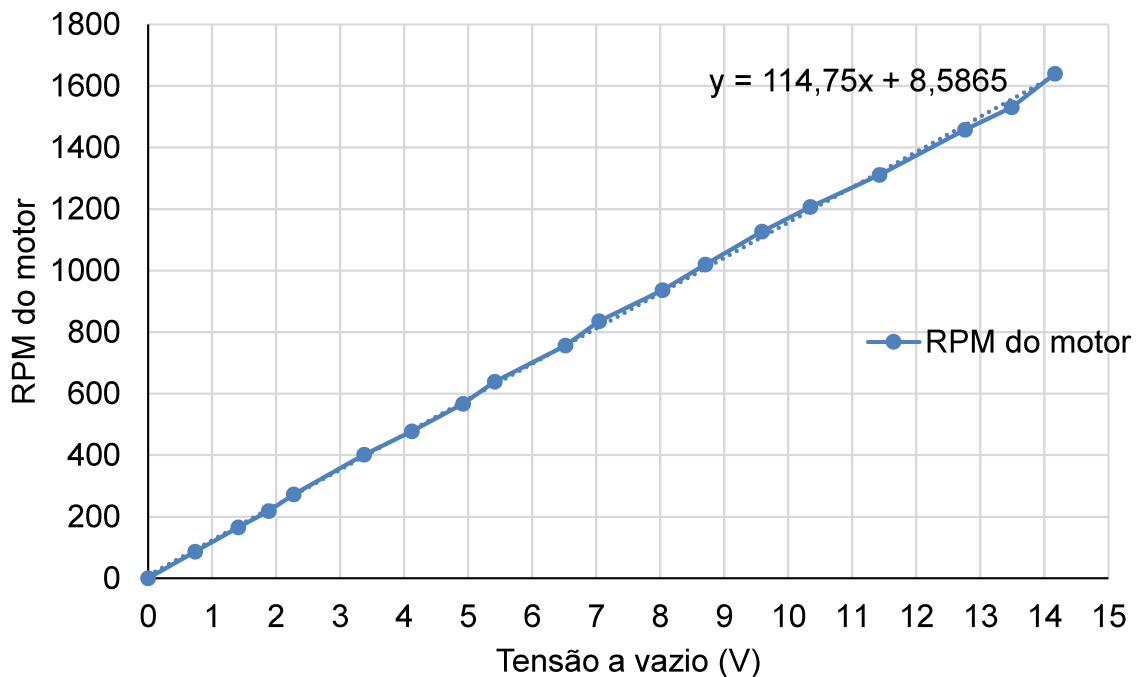
## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo abrange os dados coletados nos ensaios do gerador, incluindo o teste de gerador a vazio, além dos ensaios de desempenho da turbina submersa. São apresentadas medições de RPM, potência gerada e eficiência sob 6 velocidades de correnteza. As discussões são baseadas na interpretação desses resultados à luz dos objetivos estabelecidos, destacando aspectos como o impacto das variáveis de operação na performance da turbina, incluindo a avaliação do teste de regime permanente.

### 7.1 TESTE DO GERADOR A VAZIO

Os resultados das medições de velocidade de rotação da turbina em função da tensão a vazio estão apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Curva de Tensão a Vazio



Fonte: autoria própria (2024).

A Figura 17 ilustra a relação entre a velocidade de rotação do gerador e a tensão de saída, permitindo a análise do comportamento do gerador sob condições

de operação variáveis. A interpolação feita no gráfico da Figura 17 foi essencial para o cálculo de velocidade de rotação da turbina. Com a turbina submersa, o uso de um tacômetro digital para medir diretamente sua rotação tornou-se desafiador.

Dessa forma, os testes destinados a medir o RPM da turbina foram conduzidos de maneira indireta. Primeiro, a turbina foi operada submersa no canal circulante em condições de gerador a vazio, registrando-se os valores de tensão. Em seguida, esses dados foram correlacionados ao RPM por meio da Equação (7). Esse método permitiu determinar a rotação da turbina submersa, superando a limitação imposta pelo ambiente submerso.

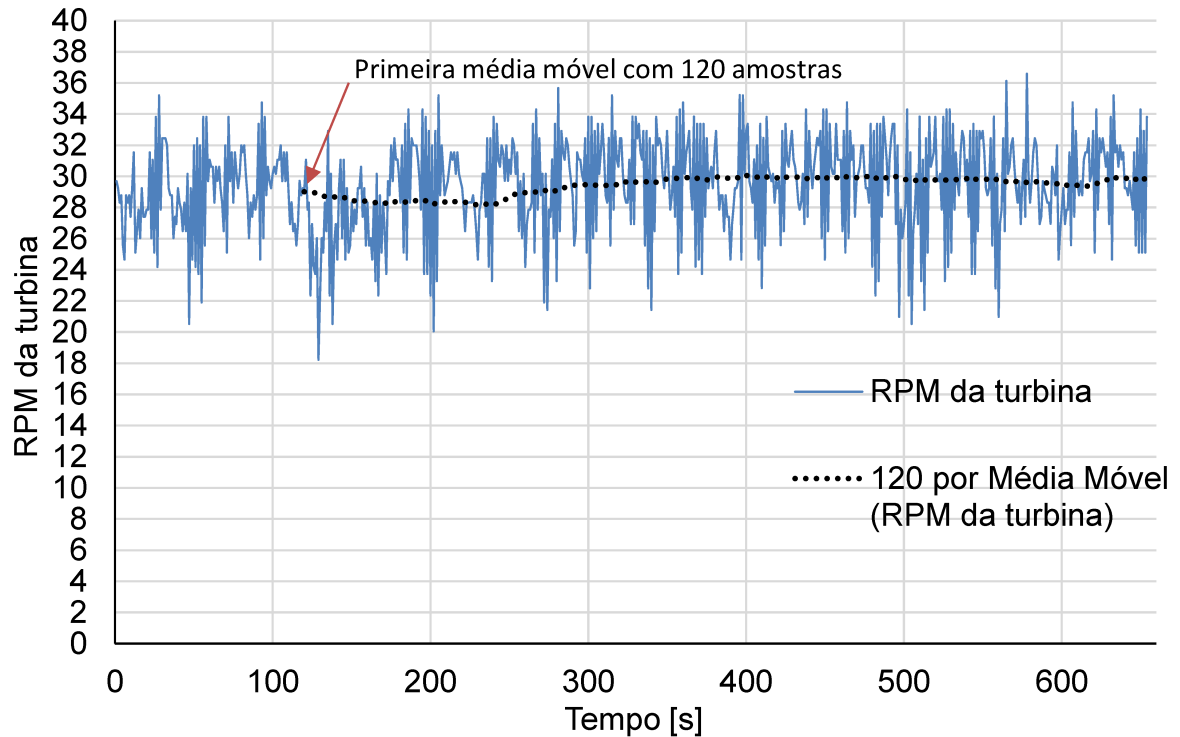
$$y = 114,75x + 8,5865 \quad (7)$$

A Equação (7) foi obtida por meio da interpolação dos dados da Figura 17, onde  $y$  é o valor em RPM e  $x$  é o valor da tensão a vazio do gerador. Como a turbina está acoplada ao gerador, essa Equação pode ser utilizada para encontrar os valores de rotação da turbina submersa.

## 7.2 TESTE DE REGIME PERMANENTE

A análise da média móvel revelou que, após 120 segundos, os resultados se mostraram satisfatórios. Conforme ilustrado na Figura 18, houve uma leve variação de 29,0 RPM na primeira amostra para 29,8 RPM no último cálculo da média móvel, representando um erro de 2,7%. Devido ao alto custo energético do uso do canal de água circulante, foi decidido que todas as medições seriam realizadas durante 120 segundos, com uma taxa de amostragem de 1 segundo, totalizando 120 amostras para cada velocidade de correnteza. E para cada velocidade foram feitos dois ensaios nessas condições, o ensaio de RPM (sem carga) e o ensaio de potência (com carga).

Figura 18 – Aquisição feita durante 10 minutos.



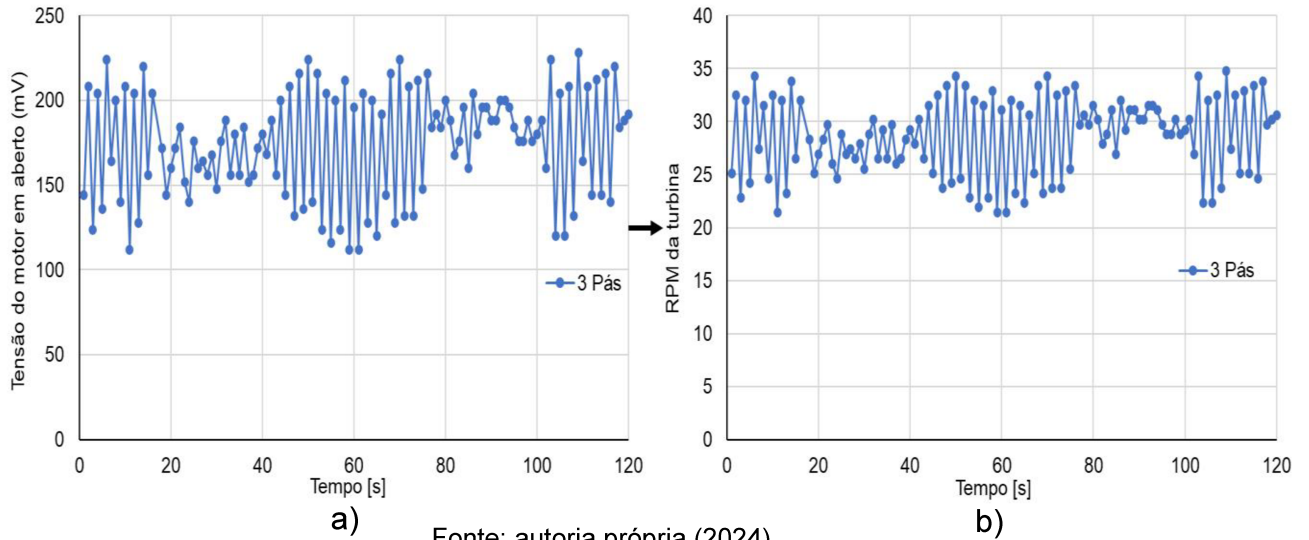
Fonte: autoria própria (2024).

A linha em azul representa a variação do RPM ao longo do tempo e a linha pontilhada em coloração preta é a média móvel calculada para um período de 120 amostras.

### 7.3 TESTE DE RPM DA TURBINA

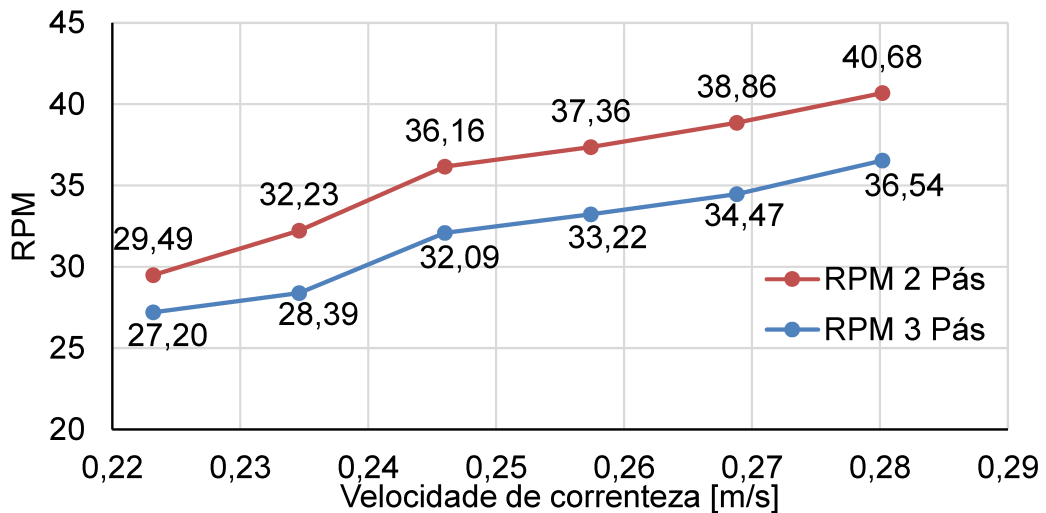
O ensaio de RPM foi realizado com a turbina submersa no canal circulante e o gerador a vazio, ou seja, sem carga. Durante o experimento, foram obtidos valores de tensão, conforme ilustrado na Figura 19 a) que mostra os resultados de um teste realizado com a turbina de 3 pás durante 120 segundos em uma correnteza de 0,22 m/s. Esses valores foram convertidos em RPM por meio da Equação (7), resultando nos dados mostrados na Figura 19 b).

Figura 19 – Conversão de dados de tensão em RPM



O processo foi repetido para cada ensaio de RPM, tendo sempre como saída um gráfico do tipo b) da Figura 19, em seguida as médias aritméticas de cada ensaio de RPM foram computadas. Como síntese, a Figura 20 apresenta o resultado dos testes de RPM, evidenciando a velocidade de rotação de cada turbina em função da correnteza.

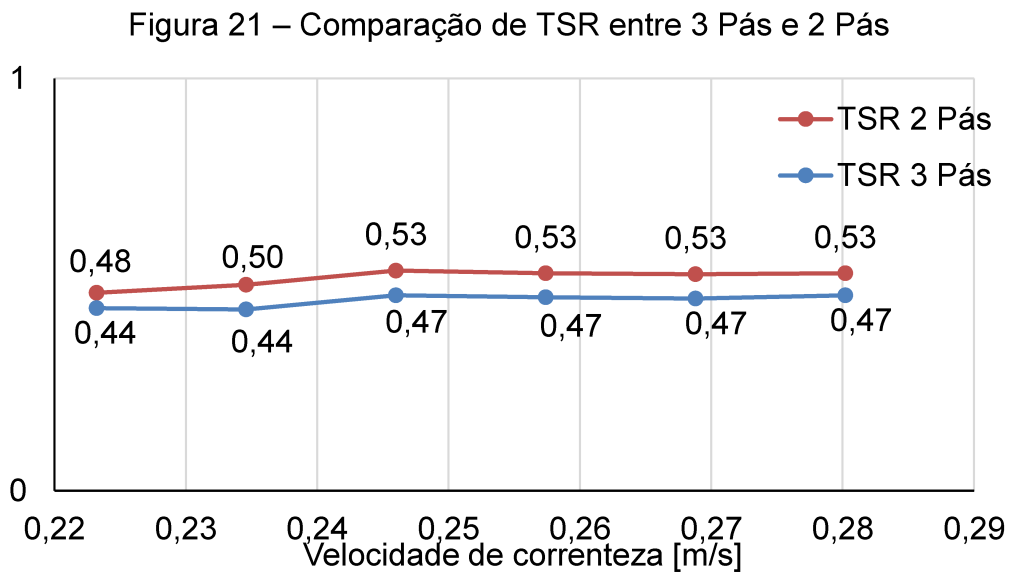
Figura 20 – Comparação de RPM entre 3 Pás e 2 Pás



Fonte: autoria própria (2024).

Comparando os resultados das duas turbinas, nota-se que os valores de RPM da turbina de 2 pás são de 8 a 13% maiores do que os da turbina de 3 pás. Com o gráfico de RPM em função da velocidade é possível calcular o TSR por meio da

Equação (5). A Figura 21 apresenta os valores específicos do TSR para cada turbina em relação à velocidade da correnteza. Como esperado, devido ao comportamento estável da turbina Savonius em baixas velocidades de correnteza, houve pouca variação no TSR. Adicionalmente, observa-se que esses valores de TSR estão diretamente relacionados com o maior intervalo dos valores de  $C_p$  da turbina Savonius, conforme ilustrado na Figura 7.



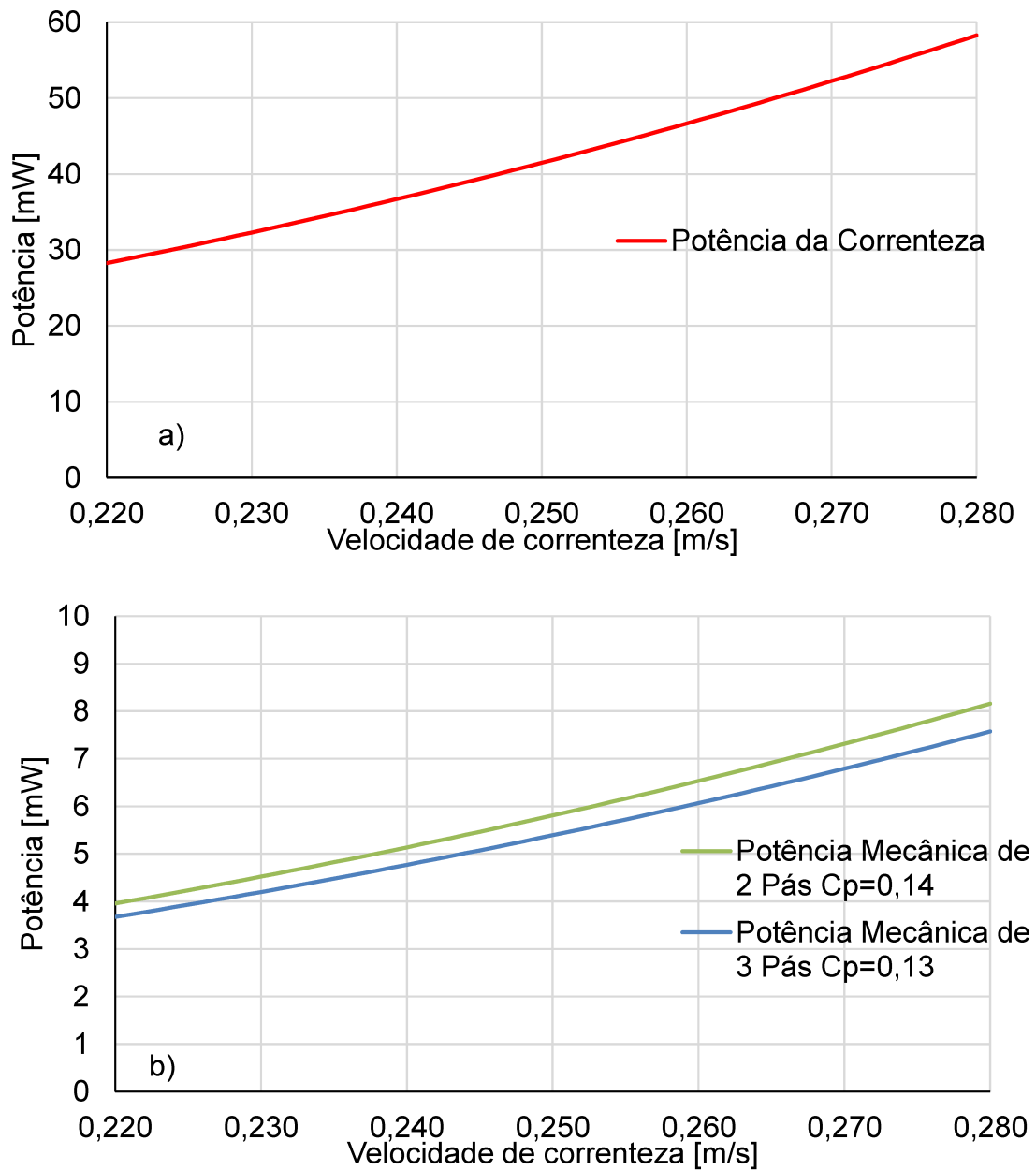
Fonte: autoria própria (2024).

Por meio da curva que estabelece a relação entre TSR e  $C_p$ , apresentada na Figura 7 é possível estimar o  $C_p$  para ambas as turbinas. Como não houve mudanças significativas nos valores de TSR das turbinas ao longo da correnteza, optou-se por fazer uma leitura do gráfico da Figura 7 utilizando os valores máximos de TSR de 0,53 para a turbina de 2 pás e TSR de 0,47 para a turbina de 3 pás. Como o valor de TSR da turbina de 2 pás é maior que o valor de TSR da turbina de 3 pás, e considerando que essa região do gráfico é ascendente, estimou-se um valor teórico de  $C_p$  de 0,14 para a turbina de 2 pás e um  $C_p$  de 0,13 para a turbina de 3 pás.

A Figura 22 faz uma comparação entre a potência teórica da correnteza e as estimadas pelo  $C_p$  de cada turbina. A potência na correnteza de água foi calculada segundo a Equação (2). As potências das turbinas foram calculadas utilizando seu valor estimado de  $C_p$  e a Equação (4). Essa potência é a que a turbina consegue entregar de forma mecânica no eixo.



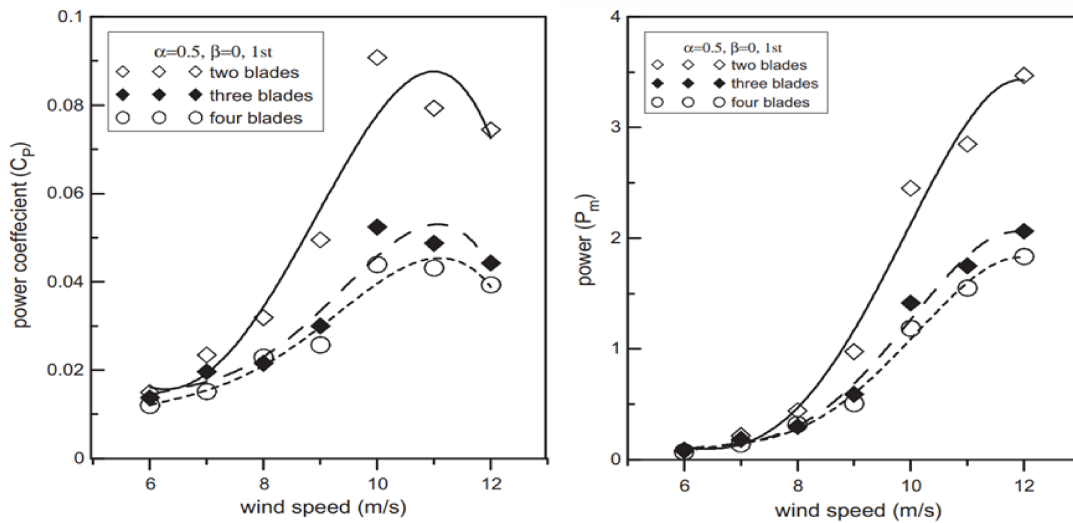
Figura 22 – Comparação entre Potências: a) Potência Analítica; b) Potência de 2 e 3 pás



Fonte: autoria própria (2024).

Um estudo similar ao resultado apresentado na Figura 22 é o de Mahmoud *et al.* (2012), que investigou diferentes designs de turbinas Savonius para geração de energia. Eles verificaram que a capacidade da turbina de três pás de coletar potência da correnteza e transferi-la mecanicamente para o eixo é ligeiramente inferior à da turbina de duas pás, o que também se reflete no coeficiente de potência ( $C_p$ ). Os resultados de Mahmoud *et al.* (2012) são apresentados na Figura 23, que mostra a comparação entre os dois designs de turbinas.

Figura 23 – Comparação de  $C_p$  e Potência entre Turbinas Savonius de 2, 3 e 4 Pás



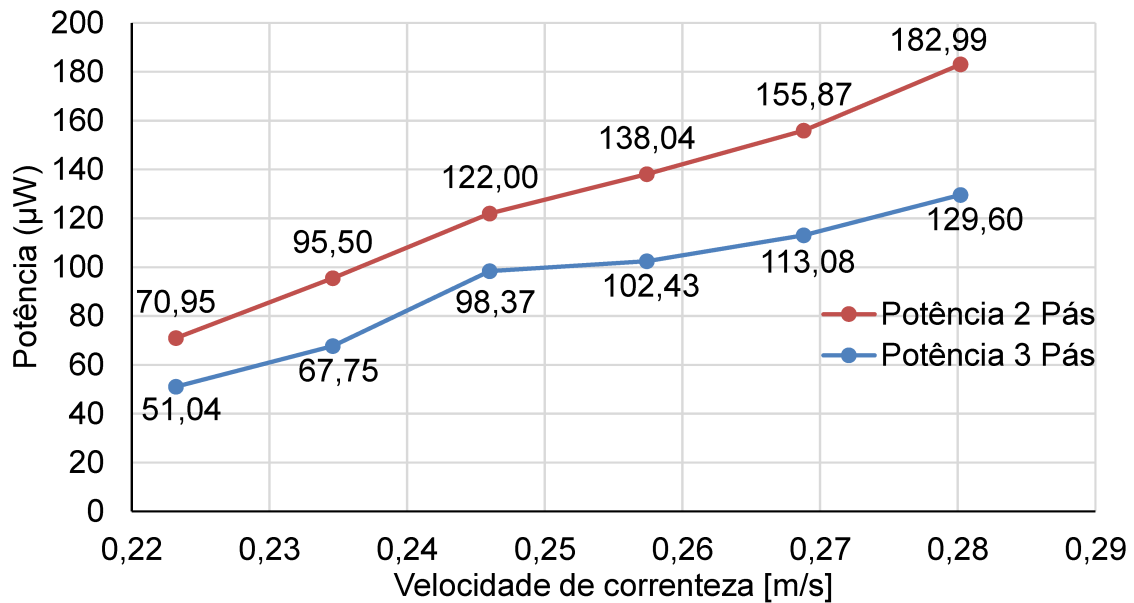
Fonte: Mahmoud *et al.* (2012)

Essa diferença entre os  $C_p$ s e as potências podem ocorrer devido ao fato de a força de arrasto líquida afetar mais o rotor no caso de duas pás do que nos casos de três pás (Mahmoud *et al.*, 2012). Fica evidente que especialmente em baixas velocidades, essa diferença entre as duas turbinas é pequena e se torna acentuada conforme é aumentado a velocidade do fluxo de fluido incidente.

#### 7.4 TESTE DE POTÊNCIA DA TURBINA

Os ensaios realizados nessa seção foram feitos utilizando o gerador com uma carga de  $67 \Omega$  gerando uma potência elétrica nos terminais de saída que foi devidamente registrada ao longo do funcionamento da turbina em cada velocidade de correnteza durante 120 segundos. Na Figura 24 é possível visualizar os valores de potência média para cada velocidade de correnteza referentes ao segundo teste realizado com o gerador e a carga.

Figura 24 – Gerador como validação da geração elétrica



Fonte: autoria própria (2024).

O ensaio com o gerador demonstrou novamente que a potência elétrica gerada pela turbina de 2 pás é superior à da turbina de 3 pás, esse resultado se mostrou coerente com o trabalho de Mahmoud *et al.* (2012). Durante o ensaio, verificou-se que a turbina de 2 pás gerou valores de potência entre 24% a 41% maiores do que a turbina de 3 pás.

Ao comparar as potências do gerador da Figura 24 com a potência estimada por meio do  $C_p$  da Figura 22 nota-se que menos de 1% da potência mecânica coletada foi transformada em potência elétrica, o que já era esperado dado que esse gerador não consegue gerar valores de potência ideais para baixas velocidades de rotação, uma vez que ele opera com valores de rotação acima de 100 RPM até 6000 RPM e a turbina utilizada foi projetada para baixas rotações, como pode ser visto na Figura 20, o pico de rotação foi de 40,68 rpm para a turbina de 2 pás na velocidade de correnteza de 0,28 m/s sem carga.

## 8. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo analisar o desempenho de turbinas de eixo vertical em baixas velocidades de correnteza, com foco na geração de energia elétrica para aumentar a permanência de sensores que habitam o leito oceânico e o leito de rios. Para tanto, foram estabelecidos cinco objetivos específicos que nortearam o desenvolvimento e os testes realizados.

Primeiramente, foi obtido um modelo geométrico da pá da turbina. Optou-se pelo modelo Savonius, conhecido por sua boa performance em baixas velocidades de correnteza e alto torque nessas condições. Essa escolha se mostrou adequada para as condições previstas no projeto, permitindo um desempenho eficiente.

Em seguida, testou-se o comportamento da turbina sob diferentes velocidades de correnteza. Foram realizados testes com turbinas de 2 e 3 pás em velocidades que variaram entre 0,2 a 0,3 m/s. Ambas as configurações apresentaram um comportamento estável e previsível, demonstrando a viabilidade do modelo Savonius nessas condições de operação.

O coeficiente de potência ( $C_p$ ) das turbinas também foi avaliado de maneira teórica. Os resultados obtidos, a partir do seu TSR, estavam alinhados com os valores previstos na literatura: a turbina de 2 pás apresentou um  $C_p$  de 0,14, enquanto a de 3 pás obteve um  $C_p$  de 0,13. Os valores confirmam a eficiência esperada das turbinas e sua capacidade de conversão de energia cinética em energia mecânica.

Além disso, foram registradas as curvas de potência das turbinas para diferentes velocidades de correnteza. Essas curvas, calculadas com base no  $C_p$  das turbinas e também com o gerador utilizado, evidenciaram que o gerador disponível não atendia aos requisitos de produção de energia. Este gerador não é adequado para a aplicação devido às suas limitações de funcionamento em baixas rotações.

Por fim, foi identificado que, entre os modelos propostos, a turbina de 2 pás apresentou uma melhor geração de energia. Esse resultado, já previsto na literatura, confirma a superioridade do modelo de 2 pás em termos de eficiência e capacidade de geração, reforçando a escolha inicial para aplicações em ambientes com baixa velocidade de correnteza.

Em resumo, a pesquisa atingiu seus objetivos, demonstrando a viabilidade do uso de turbinas Savonius em baixas velocidades de correnteza e identificando a turbina de 2 pás como a melhor opção para geração de energia nessas condições.

## 8.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros que visem aprimorar a aplicação da turbina Savonius em baixas velocidades de correnteza sugere-se:

- Variar a profundidade da turbina para estudar como a pressão afeta seu desempenho.
- Investigar a encapsulação do gerador para operação submersa.
- Realizar a impressão 3D da turbina utilizando diferentes materiais e comparar seu desempenho.
- Testar a turbina com um gerador otimizado para baixas rotações.
- Utilizar um torquímetro para medir os valores de torque gerados pela turbina.
- Otimizar dimensões e geometria da turbina.
- Medição da rotação da turbina com carga.
- Investigar o efeito da rugosidade superficial na eficiência da turbina.

## REFERÊNCIAS

- ALAM, MD. J.; IQBAL, M. T.. A low cut-in speed marine current turbine. **Journal of Ocean Technology**, St. John's, California, v. 5, n. 4, p. 49–61, dez. 2010.
- ALCORN, R.; O'SULLIVAN, D.. **Electrical Design for Ocean Wave and Tidal Energy Systems**. London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2013.
- ALEXANDRE, J. A. A.. **As correntes marinhas**. 2008. Monografia (Especialização Curso de Geografia) – Faculdade de Letras, da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2008.
- ALTAN, B. D.; ATILGAN, M.; ÖZDAMAR, A.. An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining. **Experimental Thermal And Fluid Science**, Amsterdam, Netherlands, v. 32, n. 8, p. 1673–1678, set. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.06.006>.
- BAHAJ, A. S.. Generating electricity from the oceans. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, Netherlands, v. 15, n. 7, p. 3399–3416, set. 2011.
- BAHAJ, A. S.. Marine current energy conversion: the dawn of a new era in electricity production. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, London, England, v. 371, n. 1985, p. 1–15, 28 fev. 2013.
- BETZ, A.. **Wind–Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen**. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1926.
- BORETTI, A.. State-of-the-art of MW-level capacity oceanic current turbines. **Nonlinear Engineering**, Germany, v. 9, n. 1, p. 361–369, 21 ago. 2020. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/nleng-2020-0022>.
- BOYLE, G.. **Renewable Energy: power for a sustainable future**. 3. ed. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press (Uk), 2012.
- CHENG, Gang et al. Simultaneously Harvesting Electrostatic and Mechanical Energies from Flowing Water by a Hybridized Triboelectric Nanogenerator. **ACS Nano**, v. 8, n. 2, p. 1932–1939, 27 jan. 2014. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/nn406565k>.
- ÇENGEL, Y. A., CIMBALA, J. M.. **Mecânica dos fluidos: Fundamentos e aplicações**. São Paulo: AMGH, 2007.
- DONEV, J.. **Energy from Water**. Disponível em: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Energy\\_from\\_water](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Energy_from_water) [2015]. Acesso em: 15 nov. 2023.
- ELLABBAN, O.; ABU-RUB, H.; BLAABJERG, F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, Netherlands, v. 39, p. 748–764, nov. 2014.

Enel Green Power. **Turbina Hidrelétrica**, [2019]. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-hidraulica/turbina-hidreletrica>. Acesso em: 20 maio 2024.

FILHO, A. S.; CARDOSO, J. G.. **Energia eólica: tipos de geradores e conversores usados atualmente**, 2014. Disponível em: <https://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/artigo-do-espaco-do-IEEE-maio-2014.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2024.

HEARD, S. A.. **Heavy duty equipment technology: a systems approach**. Philadelphia, United States of America: Pearson Education, 2015.

KAILASH, G.; ELDHO, T. I.; PRABHU, S. V.. Performance Study of Modified Savonius Water Turbine with Two Deflector Plates. **International Journal Of Rotating Machinery**, London, United Kingdom, v. 2012, p. 1–12, 2012. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/679247>.

KHAN, M.; IQBAL, M. T.; HINCHEY, M.. Sea-floor power generation system. In: **Proceedings** of the NORTHEAST CLEAN ENERGY COUNCIL, 17, 2007, St. John's, Netherlands. St. John's: IEEE NECEC, 2007 p.1–8. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/347439875\\_Sea-Floor\\_Power\\_Generation\\_System](https://www.researchgate.net/publication/347439875_Sea-Floor_Power_Generation_System). Acesso em: 22 nov. 2023.

KIM, S. *et al.* Propeller-based Underwater Piezoelectric Energy Harvesting System for an Autonomous IoT Sensor System. **Journal Of The Korean Physical Society**, [S.L.], v. 76, n. 3, p. 251-256, fev. 2020. Korean Physical Society. <http://dx.doi.org/10.3938/jkps.76.251>.

KUMAR, A.; SAINI, R.P.. Performance analysis of a Savonius hydrokinetic turbine having twisted blades. **Renewable Energy**, Amsterdam, Netherlands, v. 108, p. 502–522, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.006>.

LYU, F.; CAI, T.; HUANG, L.. Harvesting Weak Ocean Current Energy for Resident Unmanned Underwater Vehicles. In: **Proceedings** of the Oceans Conference Record, 10., 2021, San Diego, Porto. San Diego: IEEE, 2021 p.1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9705760>. Acesso em: 22 nov. 2023.

MAHMOUD, N.H.; EL-HAROUN, A.A.; WAHBA, E.; NASEF, M.H.. An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. **Alexandria Engineering Journal**, Alexandria, Egypt, v. 51, n. 1, p. 19–25, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2012.07.003>.

MELODIA, T.; KULHANDJIAN, H.; KUO, L.; DEMIRORS, E.. Advances in Underwater Acoustic Networking. **Mobile Ad Hoc Networking**, New Jersey, USA, p. 804–852, 22 fev. 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118511305.ch23>.

MØRK, G. *et al.*. Assessing the Global Wave Energy Potential. In: **Proceedings** of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 29th., 2010, Shanghai, China. Shanghai, China: ASME, 2010. Disponível em:

<https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings-abstract/OMAE2010/49118/447/345942>. Acesso em: 15 nov. 2023

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (United States of America). **How far does light travel in the ocean?** 2023. Disponível em: [https://oceanservice.noaa.gov/facts/light\\_travel.html](https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html). Acesso em: 29 out. 2023.

NS ENERGY. **Ocean bottom nodes are becoming critical tools for offshore oil exploration**, 2020. Disponível em: <https://www.nsenergybusiness.com/analysis/ocean-bottom-nodes-seismic/?cf-view>. Acesso em: 28 nov. 2023.

PENA, R. F. A.. **Influência das correntes marítimas no clima** [2019]; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/influencia-das-correntes-maritimas-no-clima.html>. Acesso em: 22 nov. 2023.

Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa MCTI. **Canal de água circulante**, [2024]. Disponível em: <https://pnipe.mcti.gov.br/equipment/33276>. Acesso em: 06 maio 2023.

RAMADAN, A.; HEMIDA, M.; ABDEL-FADEEL, W.A.; AISSA, W.A.; MOHAMED, M.H.. Comprehensive experimental and numerical assessment of a drag turbine for river hydrokinetic energy conversion. **Ocean Engineering**, United Kingdom, v. 227, p. 108587, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108587>.

RICHTER, K.; AYERS, J.. An Approach to Predicting Sediment Microbial Fuel Cell Performance in Shallow and Deep Water. **Applied Sciences**, California, United States of America, v. 8, n. 12, p. 1–14, dez. 2018.

ROCHA, A. C. B.; VITORIANO, J. da R.; NETO, J. C. do L.. Produção de pás para turbina hidrocínética: inovação de alta tecnologia a partir de baixa tecnologia. **Dat Journal**, São Paulo - Sp, v. 7, n. 1, p. 307-321, 23 mar. 2022. Universidade Anhembi Morumbi. <http://dx.doi.org/10.29147/datjournal.v7i1.585>.

SAMPELAWANG, P.; SALAM, N.; SULE, L.; TARAKKA, R.. Enhancing savonius rotor model with additional grooves on hydrokinetic turbine performance. **Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies**, Ukraine, v. 1, n. 8127, p. 28–37, 28 fev. 2024. Private Company Technology Center. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298915>.

SHANEGOWDA, T.G.; SHASHIKUMAR, C.M.; GUMPTAPURE, V.; MADAV, V.. Numerical studies on the performance of Savonius hydrokinetic turbines with varying blade configurations for hydropower utilization. **Energy Conversion And Management**, United Kingdom, v. 312, p. 118535, jul. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118535>.

SHANMUGAM, G.. **Mass transport, gravity flows, and bottom currents**: downslope and alongslope processes and deposits. Oxford, United Kingdom: Elsevier, 2021.

SHEN, F.; LI, Z.; GUO, H.; YANG, Z.; WU, H.; WANG, M.; LUO, J.; XIE, S.; PENG, Y.; PU, H.. Recent advances towards ocean energy harvesting and self-powered



applications based on triboelectric nanogenerators. **Advanced Electronic Materials**, v. 7, n. 9, p. 2100277, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/aelm.202100277>.

Smart Structures and Materials + Nondestructive evaluation and Health Monitoring, 2018, Denver, Colorado, United States. **An energy-harvesting power supply for underwater bridge scour monitoring sensors**. Denver, Colorado, United States: Spie, 2018.

SOLARI, G. **Wind Science and Engineering**: origins, developments, fundamentals and advancements. Cham, Sweden: Springer Cham, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-18815-3>. Acesso em: 28 abr. 2024

THERMAL ENGINEERING. **12 tipos de turbinas de maré para energia renovável marinha**, [2021]. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/12-tipos-de-turbinas-de-mare-para-energia-renovavel-marinha/>. Acesso em: 28 nov. 2023.

THERMAL ENGINEERING. **Turbinas eólicas de eixo vertical: design urbano e eficiência**, [2020]. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/turbinas-eolicas-de-eixo-vertical-design-urbano-e-eficiencia/>. Acesso em: 25 nov. 2023.

TIAN, W.; MAO, Z.; DING, H.. Design, test and numerical simulation of a low-speed horizontal axis hydrokinetic turbine. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, Seoul, South Korea, v. 10, n. 6, p. 782–793, nov. 2018.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**; tradução: Anatólio Laschuk. - 7. ed. - Dados eletrônicos. - Porto Alegre: AMGH, 2014.

VILLAR, G. J. de V.. **Geradores e Motores CC**. Mossoró/RN: IFRN, 2006. 33 p. Disponível em: <https://docentes.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-maquinas-de-cc-1>. Acesso em: 10 abr. 2024.

WANG, Y. *et al.*. An energy-harvesting power supply for underwater bridge scour monitoring sensors. **Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, And Transportation XII**, Missouri, United States of America, v. 10599, p. 1–10, mar. 2018.

WANG, Y.; LIU, X.; CHEN, T.; WANG, H.; ZHU, C.; YU, H.; XU, M.. An underwater flag-like triboelectric nanogenerator for harvesting ocean current energy under extremely low velocity condition. **Nano Energy**, v. 90, p. 106503, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106503>.

WENEHENUBUN, F.; SAPUTRA, A.; SUTANTO, H.. An Experimental Study on the Performance of Savonius Wind Turbines Related With The Number Of Blades. **Energy Procedia**, Amsterdam, Netherlands, v. 68, p. 297–304, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.259>.

YADAV, K. P.; KUMAR, A.; JAISWAL, S.. A critical review of technologies for harnessing the power from flowing water using a hydrokinetic turbine to fulfill the

energy need. **Energy Reports**, Kanput, India, p. 2102–2117, abr. 2023. Elsevier BV.  
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.033>.