

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E
SANITÁRIA**

TIMÓTEO DA SILVA

**ANÁLISE E CONFECÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA USANDO O PRINCÍPIO DE FORMAÇÃO DE VÓRTICES
ATRAVÉS DE UM CILINDRO**

**CERRO LARGO
2022**

TIMÓTEO DA SILVA

**ANÁLISE E CONFECÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
USANDO O PRINCÍPIO DE FORMAÇÃO DE VÓRTICES ATRAVÉS DE UM
CILINDRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS),
como requisito para obtenção do título de
Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Palácios Félix

CERRO LARGO

2022

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Silva, Timóteo da
ANÁLISE E CONFEÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA USANDO O PRINCÍPIO DE FORMAÇÃO DE
VÓRTICES ATRAVÉS DE UM CILINDRO / Timóteo da Silva. --
2022.
40 f.:il.

Orientador: Ph.D. Jorge Luis Palacios Felix

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro
Largo, RS, 2022.

1. piezeletricidade. 2. Vibrações induzidas por
vórtices. 3. Energias renováveis. I. Felix, Jorge Luis
Palacios, orient. II. Universidade Federal da Fronteira
Sul. III. Título.

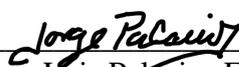
TIMÓTEO DA SILVA

**ANÁLISE E CONFECÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
USANDO O PRINCÍPIO DE FORMAÇÃO DE VÓRTICES ATRAVÉS DE UM
CILINDRO**

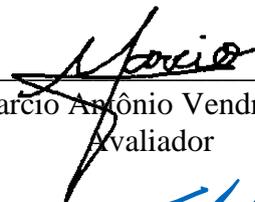
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 30/03/2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix – UFFS
Orientador



Prof. Dr. Marcio Antônio Vendrusculo – UFFS
Avaliador



Prof. Dr. Thiago de Cacio Luchese – UFFS
Avaliador

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos, amigos, namorada e professores, que não mediram esforços para que minha graduação fosse concluída.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, e aos meus pais, Julcí e Marina, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando, incentivando e compreendendo a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Aos meus irmãos e em especial a minha irmã Elisa por todo apoio e cuidado, sou muito grato por todo zelo e auxílios dos mais variados que ela me proporcionou ao longo desses anos. Aos demais irmãos Ana Raquel, Jonatas, Silvano e Isabel por sempre terem me dado apoio e incentivo ao longo da jornada. Amo muito todos vocês!

Agradeço ao Prof^o. Dr. Jorge Luis Palacios Felix por confiar em mim e em meu trabalho, por me orientar durante o desenvolvimento do mesmo. Aos professores da Banca, Dr. Marcio Antônio Vendruscolo e Dr. Thiago de Cacio Luchese, pois aceitaram o convite como avaliadores da apresentação do meu trabalho de conclusão de curso.

E aos amigos(as) que fiz durante a graduação, Lucas, Eduardo, Gabriel, Júlia, Kananda, e Mauricio, pois vocês passaram por essa jornada chamada graduação comigo. Durante esses cinco anos nós rimos, choramos, incentivamos e crescemos juntos. Nesse momento encerramos um ciclo para que outro possa se iniciar, mas quero que saibam que vocês sempre poderão contar comigo.

Também agradeço a minha namorada Bruna, pelo incentivo, dedicação e apoio em todos os momentos, os quais foram de grande valia para mim, tanto para minha formação pessoal quanto acadêmico.

Amo demais todos vocês!

Por fim, sou muito grato a todos aqueles que de alguma forma contribuíram comigo e me proporcionam momentos de alegrias, alívio e esperança, tal como, professores, demais amigos e colegas que convivi e conheci ao longo dos anos.

Vaca não dá leite. Você tem de tirar. Você precisa acordar 4 horas da manhã, ir ao pasto, entrar no curral cheio de fezes, amarrar rabo e pernas da vaca, sentar no banquinho e fazer o movimento certo! Esse é o segredo da vida. Vaca, búfala, cabra, não dão leite. Ou você tira ou não tem leite.

- Mario Sérgio Cortella

RESUMO

À medida que avança o desenvolvimento humano, a demanda por energia das mais variadas formas cresce de maneira muito significativa. Em busca de alternativas sustentáveis, o campo das energias renováveis torna-se pauta em diversos ramos da engenharia, buscando por formas de geração em pequena escala de forma descentralizada. Um mérito interessante surge com a energia proveniente dos ventos (eólica), o qual diversos pesquisadores buscam incansavelmente utilizar com menor robustez tal energia. Assim, como método de contorno a turbinas eólicas convencionais, surge um novo modelo conhecido como Bladeless Wind Turbine, que pode ser traduzido como turbina sem hélices. Inserido nesta perspectiva, o presente estudo buscou desenvolver e analisar o desempenho de um protótipo, onde o princípio usado é fundamentado pela mecânica dos fluídos, conhecido como formação de vórtices em um cilindro. Atrélado a isso um Transdutor Piezoelétrico (TP) de 27 mm de diâmetro foi utilizado, sendo este o gerador de energia elétrica. Tal componente é capaz de converter forças de deformações aplicadas sobre ele em sinais elétricos. Ainda, recorreu-se ao auxílio de ímãs, visando criar um campo magnético com o intuito de verificar a influência destes no sistema. Para tal, 4 diferentes situações foram propostas e verificadas ao longo da pesquisa, onde elas consistiram na variação de 3 diferentes distâncias entre os ímãs, buscando a melhor faixa de interação magnética com o sistema, bem como a experimentação do protótipo sem influencia magnética. As distâncias analisadas foram de 12, 15 e 19 cm, para 3 diferentes velocidades de vento, 3,49, 4,12 e 5,16 m/s. Assim, quando confrontados os resultados obtidos, percebeu-se que o melhor desempenho se deu para a situação em que os ímãs estavam a 19 cm de distância e velocidade de 3,49 m/s, na qual a tensão de saída foi de 4,28 Volts de pico a pico (Vpp). Sendo assim, conclui-se que o aparato experimental desenvolvido, torna-se mais atrativo para baixas faixas de velocidades de vento.

Palavras chaves: Piezoeletricidade; Vibrações induzidas por vórtices; Energias renováveis.

ABSTRACT

As human development advances, the demand for energy in the most varied forms grows very significantly. In search of small engineering alternatives, the field of renewable energies becomes the agenda in several engineering, looking for branches of generation on a decentralized scale. An interesting merit arises with the energy from the winds (wind), which several researchers tirelessly seek to use such energy with less robustness. Thus, as the conventional wind turbines contour method, a new model appears known as Bladeless Wind Turbine. Inserted in this perspective, the study of buses develops and analyzes the performance of an instrument, where the principle is presented by fluid mechanics, known as formation of vortices in a cylinder. Linked to this, a Piezoelectric Transducer (PT) of 27 mm in diameter was used, which was the generator of electricity. Such a component is capable of converting applied strain forces into electrical signals. Still, the use of magnetic devices is used, aiming to create a magnetic field with control of the influence of these in the system. For that, 4 different ones were proposed and verified throughout the research, where they consist of 3 different magnetic distances between the magnets, seeking the best range of interaction with the system, as well as influencing the experimentation of the material without magnetic. The distances were 12, 15 and 19 cm, for 3 different wind speeds, 3.49, 4.12 and 5.16 m/s. Thus, confronted with the results obtained, a situation of 19 cm of distance and 3.49 m/s occurred, in which the output voltage was 4.28 Vpp. Therefore, it is concluded that the developed experimental apparatus becomes more attractive for low wind speed ranges.

Keywords: Piezoelectricity; Vortex-induced vibrations; Renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Objetivos do desenvolvimento sustentável.....	19
Figura 2 - Participação das fontes na capacidade instalada no ano de 2020	21
Figura 3 - Ilustração da formação de vórtices em um corpo cilíndrico.....	22
Figura 4 - Protótipo de geração de energia com piezoelétrico usando vórtice.....	24
Figura 5 - Representação esquemática do efeito piezoelétrico.....	25
Figura 6 - Representação esquemática da oscilação do cilindro sobre uma haste flexível.	26
Figura 7 - Posicionamento do TP na haste metálica.....	27
Figura 8 - Bancada experimental indicando os componentes do protótipo.....	28
Figura 9 - (a) Sistema com influência do campo magnético; (b) Sistema sem influência do campo magnético.....	29
Figura 10 - Desempenho de tensão observado para velocidades de vento de 5,16; 4,12; 3,49 m/s, respectivamente, de acordo com as distâncias (a) 12 cm, (b) 15 cm, (c) 19 cm.....	32
Figura 11 - Desempenho de tensão observado para velocidades de vento de 5,16; 4,12; 3,49 m/s, respectivamente, sem influência magnética.....	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Disposição geral do desempenho energético nas 4 diferentes situações estudadas.....	34
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações do Transdutor Piezoelétrico.....	26
Tabela 2 - Oscilações na VV em cada posição seguido da velocidade média	31

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

UFFS	Universidade Federal da Fronteira Sul
TWh	TeraWatts-hora
VIV	Vibrações Induzidas por Vórtices
VV	Velocidade do vento
TS	Tensão de saída
TP	Transdutor Piezoelétrico
EPS	Poliestireno Expandido
DEI	Distância entre os ímãs
Vpp	Tensão de pico a pico (volts)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
3.2	ENERGIA E MEIO AMBIENTE.....	18
3.3	FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIAS	20
3.4	VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES.....	22
3.5	CONCEITO DE TURBIANA EÓLICA SEM PÁS E SUAS INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS	23
3.6	PROPRIEDADES PIEZOELÉTRICAS.....	24
4	METODOLOGIA	26
4.1	PROTÓTIPO EXPERIMENTAL.....	26
4.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.1	ANÁLISE DAS VELOCIDADES EXPERIMENTAIS.....	31
5.2	ANÁLISE DO DESEMPENHO DO PROTÓTIPO	31
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
7	REFERÊNCIAS.....	37
8	ANEXO I.....	40

1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia cinética dos ventos é datado a cerca de 3000 A. C. Diversas formas de conversão eólica podem ser elencadas, as quais foram se desenvolvendo ao longo do tempo, tal como, moinhos de vento para moagem de grãos e bombeamento de água para o desenvolvimento agrícola, sendo estes, pioneiros neste processo. Posteriormente, novos meios de aproveitamento da força do vento foram surgindo, tal como a navegação (MARTINS et al., 2008; FARIAS & SELBITTO, 2011).

Almejando o desenvolvimento, o ser humano sempre buscou formas de energias, visando os menores custos de produção possível, sem medir as consequências atreladas ao processo. Em razão disto, tais ações mostraram-se danosas, tanto ao ambiente bem como a própria eficiência do sistema, causando efeitos negativos na economia, alterando a qualidade de vida da população especialmente em centros urbanos e ainda, aumentando os níveis de poluição no ambiente (LELLIS, 2007).

A cada dia, maior é a demanda de energia requerida para o desenvolvimento das atividades humanas diárias. Diante disto, o desenvolvimento de energias renováveis mostra-se em plena evolução, amenizando os danos ao meio ambiente (MASSONE, et al., 2019). Sendo assim, a energia eólica tem sido um dos responsáveis mais importante para esse processo (VILLARREAL, 2018).

Entretanto, a geração de energia elétrica a partir de modelos convencionais está num impasse, o qual mostra-se cada dia um desafio maior. Considerando que as torres eólicas estão gradativamente mais altas e suas pás aumentam o tamanho, a logística e transporte é dificultado cada vez mais, visto a necessidade de caminhões maiores e especializados, bem como, rodovias que comportem a passagem dos mesmos (NETO, 2016; HARSHITH et al, 2016).

Deste modo, novos conceitos e formas de conversão de energia eólica em eletricidade são estudados e introduzidos no meio científico. Dentre estes métodos, as vibrações induzidas por vórtices (VIV) começam a se destacar como alternativa ao sistema tradicional de geradores eólicos. As VIV ocorrem de forma recorrente em diversas estruturas, tais como chaminés, linhas de transmissão de energia elétrica, edifícios altos, entre outras estruturas de engenharia. De modo geral, tais vibrações mostram-se como um efeito prejudicial, uma vez que estas podem reduzir a vida útil das

estruturas significativamente, alterar o desempenho para as quas foram projetadas e até mesmo rompe-la pelo efeito vibracional (XU-XU et al, 2016; HUYNH et al, 2018).

Este fenômeno ocorre, pois o “escoamento em torno de um cilindro circular liso pode desenvolver uma configuração regular de vórtices alternados a jusante” (FOX e PRITCHARD,2014). Assim, com a formação de vórtices, a estrutura pela qual o fluido está interagindo, começa a oscilar, e este pode entrar em ressonância. Desta forma, introduz-se um modelo de turbina eólica conhecida como Bladeless Wind Turbine, a qual é capaz de absorver estas instabilidades aerodinâmicas, maximizando o fenômeno oscilatório e convertendo a energia mecânica em eletricidade (VISHNU et al, 2019).

Nesse sentido, um dos métodos utilizados para tal conversão da energia eólica que tem se mostrado atrativo é a piezoelectricidade. Este fenômeno se destaca por converter vibrações, torções, pressão ou qualquer tipo de estimulação mecânica, em eletricidade. Neste aspecto, autores como ZHOU et al., 2021; AKAYDIN et al., 2010; VISHNU et al., 2019, fizeram uso de componentes eletrônicos piezoelétricos, com o objetivo de maximizar a conversão energética em seus protótipos. Entretanto, vale ressaltar que tais sistemas são ideais para serem utilizados em pequena escala e de maneira descentralizada, visto que a capacidade de geração de eletricidade é bastante limitada.

Portanto, o presente estudo busca investigar o modelo de Bladeless Wind Turbine apresentado pelos autores ZHOU et al., 2021, os quais utilizaram de artifícios adicionais, como a inserção de ímãs, buscando intensificar os movimentos oscilatórios produzidos a partir do princípio da formação de vórtices em um cilindro. Dessa forma, este trabalho foi elaborado a partir da inserção de um Transdutor Piezoelétrico (TP) e da utilização de ímãs no sistema, buscando explorar a relevância e o ganho de performance no protótipo. Maiores detalhes serão expostos ao longo do texto os métodos e meios de pesquisa utilizados.

2 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo investigar a capacidade de geração de energia elétrica através do potencial oscilatório dos ventos, utilizando um disco piezoelétrico associado ao princípio de formação de vórtices em um cilindro.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a resposta elétrica de um Transdutor Piezoelétrico do tipo pastilha com 27 Milímetros (mm), quando acoplado a uma haste em oscilação.
- Utilizar um sistema haste-cilindro como estimulador vibracional ao Transdutor Piezoelétrico.
- Analisar o desempenho oscilatório em um cilindro quando submetido a uma corrente de ar.
- Verificar se existe aumento no desempenho do sistema, em razão à adição de ímãs para intensificar os movimentos gerados pela formação de vórtices em uma superfície cilíndrica.
- Analisar a influência da velocidade do vento sobre o sistema, através da resposta de tensão de saída.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste tópico buscou-se por disposições gerais acerca de energias, sustentabilidade, métodos de produção e inovação tecnológica, visando uma maior inclusão de tecnologias sustentáveis ao setor energético. Assim, esta breve revisão de bibliografia tem como intuito oferecer a fundamentação teórica sobre as relações entre energia e meio ambiente, fontes alternativas de energias, conceitos como vibrações induzidas por vórtices, bem como o conceito de Bladeless Wind Turbine e suas inovações tecnológicas.

3.2 ENERGIA E MEIO AMBIENTE

Ao longo do desenvolvimento humano, em todas as ocasiões, é no meio ambiente que a busca por recursos acontece. Visando a evolução e aprimoramento de práticas e atividades, diversas formas de transformações em espaços do ambiente foram sendo alterados para que, de tal modo, passasse a satisfazer as mais variadas necessidades humanas. Entretanto, este fenômeno sucedeu-se em desarmonia na relação homem-ambiente, uma vez que os recursos ambientais passaram a ser consumidos de forma inadequada.

Aliado ao desenvolvimento humano, um dos principais fatores tem sido a energia elétrica. Esta, sendo um item facilitador da vida moderna, atualmente tem se mostrado como um recurso de grande valia, visto a demanda cada vez maior em decorrência do atual estado de desenvolvimento. (SILVA & VIEIRA, 2016; MASSONE, et al., 2019).

Neste aspecto, o desenvolvimento sustentável surge como um fator indispensável para o meio de convivência, tanto social como ambiental. Em virtude de tal afirmação, deve-se promover e aperfeiçoar cada vez mais pesquisas e inovações tecnológicas que possam contribuir com a amenização dos danos causados ao meio ambiente, principalmente no setor energético. Assim, destaca-se as fontes alternativas de energia onde, junto a estas, é assegurado a possibilidade de manter um ambiente propício ao crescimento sustentável para as presentes e futuras gerações (MASSONE, et al., 2019).

Em prol de questões ambientais e de desenvolvimento, em setembro de 2015 representantes de 193 países da Organização das Nações Unidas (ONU) se reuniram com o intuito de debater e propor medidas para o desenvolvimento sustentável. Nesta ocasião, foi determinada uma agenda, onde consta que até o ano de 2030 os países membros devem tomar medidas que visam sustentabilidade ao desenvolvimento e que, nesta, todos os países têm como principal objetivo evoluir conjuntamente. Tais medidas incluem 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável, tais como listado na Figura 1, os quais tem como meta erradicar a pobreza, promovendo uma vida de qualidade a todos. Dentre os objetivos desta agenda, encontra-se incluído um que diz respeito ao fomento de produção

Figura 1 - Objetivos do desenvolvimento sustentável de energias limpas e renováveis.



Fonte: ONU, (2015)

Sendo assim, com a inserção e o fomento relacionado a fontes alternativas de energia, estas possuem uma tendência cada vez mais forte de se consolidarem na diversificação energética mundial, tornando-se algo irreversível. Inserido nesta perspectiva, questiona-se sobre o potencial sustentável, proporcionado através das mais diversas fontes e formas de produção de energias limpas, as quais mostram-se mais e mais promissoras ao longo dos últimos anos (SOUZA, 2017). Assim, tendo em vista as afirmações e preocupações propostas, dentre as possibilidades de obtenção de energias renováveis, a energia eólica vem se configurando como um dos principais meios de obtenção de energia ambientalmente adequada. Essa é considerada uma fonte de baixo

impacto ambiental quando comparada com outras formas de geração já consolidadas (MARTINS et al., 2008; SILVA & VIEIRA, 2016).

3.3 FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIAS

Dentre as mais variadas fontes de energias renováveis disponíveis ao uso no cotidiano, destacam-se a energia hidráulica, energia solar, energia eólica, energia de biomassa, energia geotérmica e energia dos oceanos (LELLIS, 2007). Muitas destas, suas utilizações remontam tempos antigos, tal como os ventos, os quais começaram a ser utilizados para o desempenho de atividades humanas em 3000 A.C., aproximadamente. Os primeiros registros da utilização da então energia eólica na navegação, foi pelos Egípcios, Fenícios e Romanos. A partir disto, foram se aperfeiçoando outras técnicas, tal como a utilização de moinhos pelos holandeses para moagem de grão, bombeamento de água, dentre outras atividades (FARIAS & SELLITTO, 2011).

Entretanto, após a descoberta de combustíveis fósseis, estes passaram a fazer grande parte na matriz energética dos países. Esta utilização teve início com o carvão mineral, sendo ele o combustível pioneiro na produção de eletricidade e atualmente ele ainda continua sendo o principal dentre os combustíveis de origem fóssil (SANTOS et al., 2010).

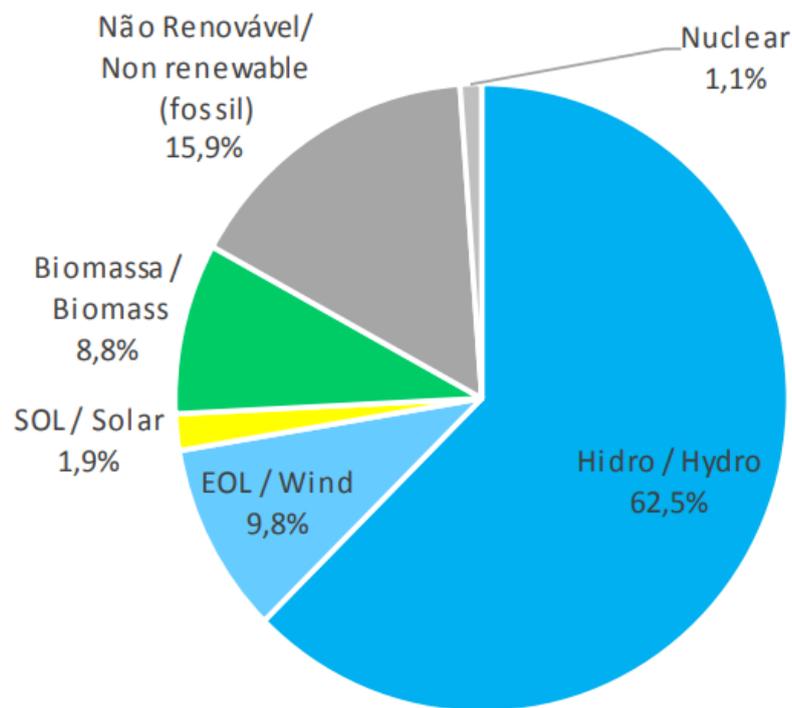
No Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2021), tendo como base o ano de 2020, a geração de energia elétrica foi de 621,2 TWh, sendo que a produção a partir de fontes não renováveis representou 15,8% deste total. Vale ressaltar que no ano de 2019 a geração por fontes não renováveis representou 17,7%. Neste aspecto, é notório que o incentivo da inserção de fontes renováveis mostra-se eficaz neste processo, reduzindo assim a demanda de fontes não renováveis.

Dentro deste contexto, o setor energético, tanto a nível nacional como mundial, encontra-se em um estado de preocupação em relação ao meio ambiente. Oferecendo maiores cuidados e precauções para questão ambiental, busca-se por formas de redução nas emissões de poluentes. Neste sentido, a dependência por combustíveis fósseis, no tocante a geração de energia elétrica, torna-se menor em razão das energias renováveis (PACHECO, 2006).

Com incentivo de órgãos e setores ambientais, obteve-se um crescimento

significativo no setor de energias renováveis no Brasil, sendo que em 2020, por exemplo, a potência instalada para geração de energia eólica no país aumentou 11,4% em relação a 2019. Na Figura 2 percebe-se, então, que a participação da energia eólica na capacidade instalada chegou a 9,8% contra 9,0% do ano anterior (BEN, 2021; BEN, 2020).

Figura 2 - Participação das fontes na capacidade instalada no ano de 2020



Fonte: BEN, (2021)

Com ênfase na energia proveniente dos ventos, esta é considerada uma das fontes de energias renováveis mais promissoras, sendo passível de uma grande variabilidade no modo de aproveitamento deste recurso, bem como a sua contribuição na diversificação da matriz energética como um todo (SILVA & VIEIRA, 2016; VILLARREAL, 2018). Segundo TERCIOTE, 2002, a energia eólica é um fenômeno que pode ser considerado uma das formas de manifestação da energia solar, visto que os ventos são provenientes de diferentes faixas de aquecimento de massas de ar na atmosfera em função da radiação solar incidente na superfície terrestre.

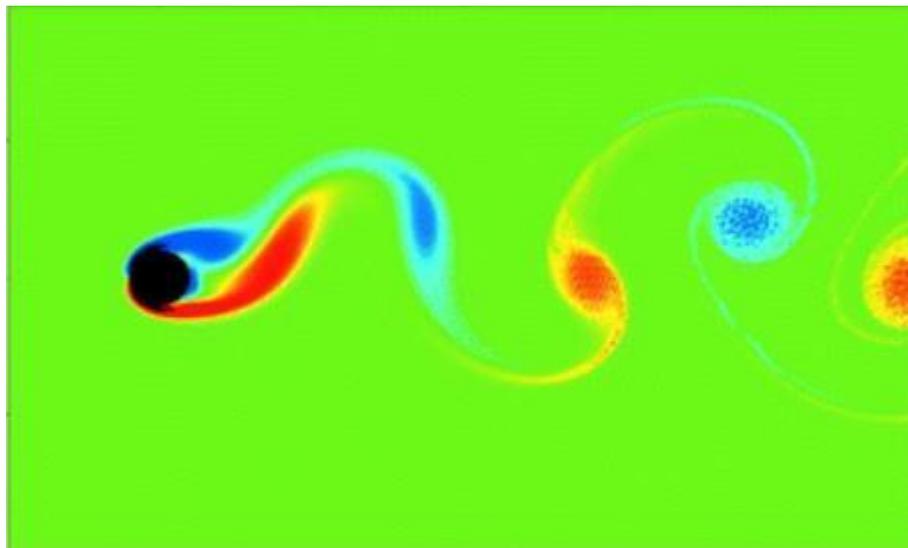
Desta forma, esta energia pode ser utilizada de maneira totalmente limpa no processo de geração de energia elétrica, seja para fins de pequena ou larga escala. Ela ainda mostra-se como uma opção alternativa para ser utilizada em períodos de estiagem, quando há escassez de recursos hídricos, atrelado ao fato de que a potência fornecida pelos ventos aumenta durante este período (NASCIMENTO et al., 2012).

3.4 VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES

As VIV encontram-se presente em diversas áreas da engenharia, seja em chaminés, linhas de transmissão de energia elétrica, prédios, trocadores de calor, oleodutos subaquáticos dentre outros. Em geral este fenômeno caracteriza-se como um fator prejudicial a estas estruturas, visto os possíveis danos que pode acarretar pelo processo de fadiga do material, reduzindo a vida útil e comprometendo a integridade da estrutura (XU-XU et al, 2016; HUYNH et al, 2018).

O fenômeno propriamente dito se caracteriza por ocorrer quando um corpo (geralmente cilíndrico) rígido é exposto perpendicularmente a direção de um fluxo de fluido. Quando encontrado nesta situação, em determinada faixa de velocidade de vento (VV) acontece o desprendimento de vórtices, os quais ocasionam forças de elevação periódicas que agem sobre o corpo. Desta forma, o cilindro ao responder às forças de sustentação dele próprio, faz com que se inicie um processo vibracional no corpo, devido à ressonância não linear do mesmo (BAI & BAI, 2005; CAMACHO, 2016; ZHANG et al., 2021). A Figura 3 demonstra ilustrativamente como ocorre o processo de formação de vórtices.

Figura 3 - Ilustração da formação de vórtices em um corpo cilíndrico



Fonte: WILLIAMSON & GOVARDHAN, (2004)

Considerando este fenômeno, surge a possibilidade do aproveitamento da energia vibracional proveniente destas estruturas. Diversos autores e pesquisadores voltam a atenção para esta possibilidade e desenvolvem mecanismos capazes de absorver e utilizar este efeito vibracional gerado pelo fluido, geralmente ar, em prol da geração de

eletricidade. Assim, um dos tipos de geradores recorrentes neste meio são os piezoelétricos, os quais vem sendo empregado fortemente para este fim, visto sua ótima capacidade de conversão elétrica a partir de perturbações mecânicas (ZHOU et al., 2021; AKAYDIN et al., 2010; VISHNU et al., 2019; WANG et al., 2020).

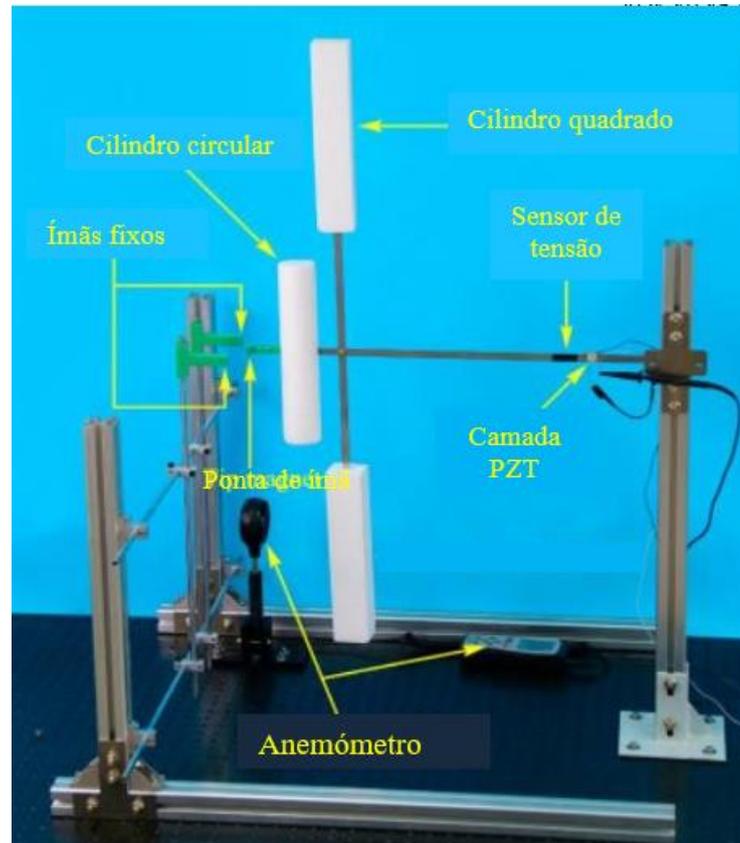
3.5 CONCEITO DE TURBINA EÓLICA SEM PÁS E SUAS INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

O conceito Bladeless Wind Turbine surge quando se percebe que o comportamento oscilatório de um cilindro submetido a um escoamento de fluido permite ser usado como um tipo de turbina para um gerador eólico. Assim, o desenvolvimento destas turbinas torna-se atrativo para o desenvolver de tecnologias sustentáveis, uma vez que estas podem ser utilizadas em pequena escala como sistemas compactos de micro geração de eletricidade, quando comparado com modelos convencionais (VILLARREAL, 2018; HARSHITH et al, 2016; FRANCIS, et al., 2021).

De acordo com FRANCIS, et al., 2021, uma turbina eólica do tipo bladeless, quando usado um alternador acoplado, sendo ele responsável pela conversão de energia oscilatória em eletricidade, pode ser utilizada em locais que há uma demanda mais branda de energia. Este modelo se revela como uma solução satisfatória quando comparada com modelos convencionais de geração eólica. Tal fator se dá pela praticidade de construção, desde a fase de projeto até a de instalação, destacando-se pelo custo de manutenção reduzido e a possibilidade de ser utilizada no próprio local de consumo da energia, evitando perdas energéticas ao longo da rede de transmissão.

Outros autores, como ZHOU et al., 2021, usaram o princípio de formações de vórtices visando a deflexão de uma haste horizontal. Em suas experimentações, fizeram uso de um piezoelétrico com o intuito de absorver as torções mecânicas proporcionadas pelo processo de oscilação e vibração dos cilindros bases do protótipo. Este modelo torna-se interessante pela geometria simples e necessitando de pequenas demandas quanto a velocidades de vento. Na Figura 4 pode ser observado o modelo apresentado pelos autores, onde foram realizados os experimentos.

Figura 4 - Protótipo de geração de energia com piezoelétrico usando vórtice



Fonte: ZHOU et al., 2021

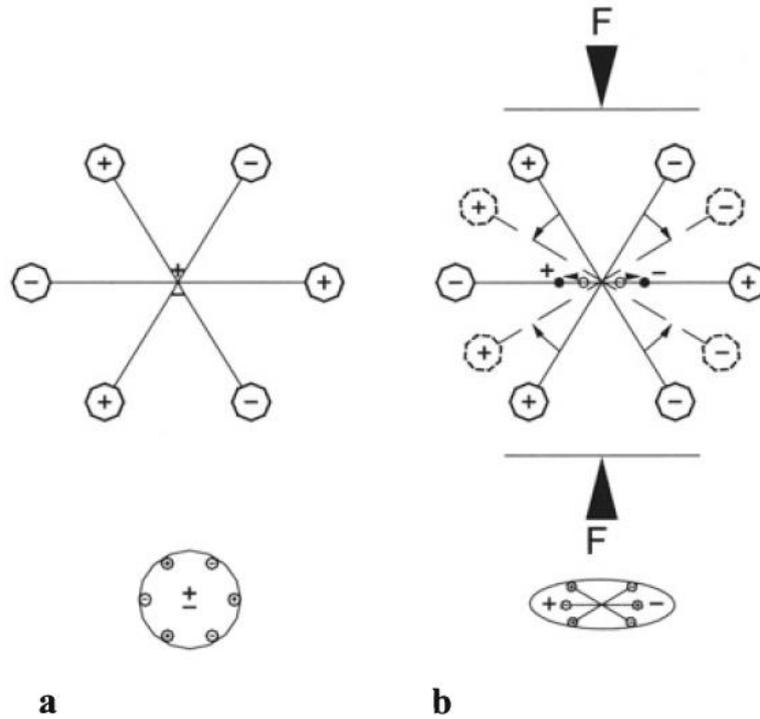
3.6 PROPRIEDADES PIEZOELÉTRICAS

A palavra piezeletricidade tem origem do grego, onde piezo significa pressão. Desse modo, a piezeletricidade, em uma tradução literal pode ser entendida como eletricidade por pressão. E, de fato, este é o princípio do funcionamento dos piezoelétricos, visto que alguns tipos de materiais cerâmicos são capazes de formar uma polarização em suas extremidades, gerando uma diferença de potencial (ARNAU, et al, 2004).

O efeito piezoelétrico foi descoberto em razão de estudos que buscavam por uma relação entre fenômenos piroelétricos e a simetria dos cristais. Entretanto, como consequência desta pesquisa, foi observado tal ocorrência e constatado que o efeito ocorre através do deslocamento de cargas iônicas no interior do composto cristalino, quando submetido a um estresse mecânico. No exercício desta força deformadora sobre o piezoelétrico ocorre uma polarização nas extremidades do material, como mostrado na Figura 5, podendo transformar a energia mecânica aplicada em um campo elétrico, produzindo assim uma corrente elétrica. O inverso também é válido,

quando um campo elétrico é aplicado material, este fica sujeito a deformações mecânicas. (JORDAN, OUNAIES, 2001; ARNAU, et al, 2004; GALLEGO-JUAREZ, 1989).

Figura 5 - Representação esquemática do efeito piezoelétrico: (a) Sem perturbação mecânica; (b) Com perturbação mecânica



Fonte: Adaptado ARNAU, et al, 2004.

4 METODOLOGIA

4.1 PROTÓTIPO EXPERIMENTAL

A montagem do protótipo experimental se deu a partir da premissa vibracional de um cilindro quando sujeito a um determinado fluxo de ar e da capacidade de absorção mecânica através de um Transdutor Piezoelétrico (TP) (VISHNU et al, 2019). Assim, com o auxílio de uma estrutura metálica, esta serviu de suporte principal de sustentação para que os componentes envolvidos no projeto pudessem ser fixados. Dessa forma, para a absorção da energia mecânica produzida, utilizou-se um TP cerâmico com diâmetro de 27 mm cujas especificações estão descritas Tabela 1.

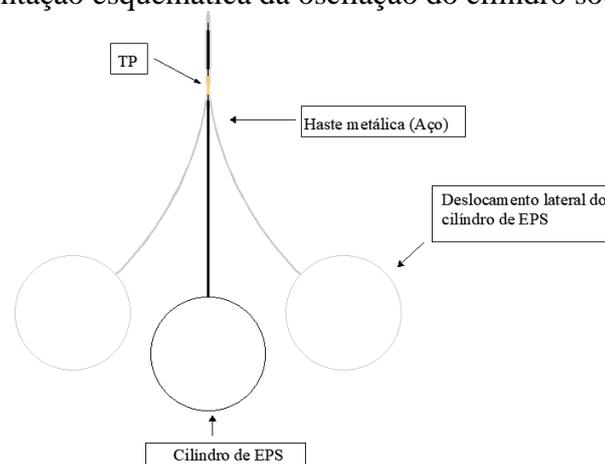
Tabela 1 - Especificações do Transdutor Piezoelétrico

Diâmetro	27 mm
Frequência Ressonante (kHz)	4,6 +/- 0,5 kHz
Impedância Ressonante (Ohm)	300 Ohm
Capacitância (NF)	20,0 +/- 30% NF
Peso unitário	0,8 g

Fonte: USINAINFO, 2022

A configuração estrutural do protótipo foi fundamentada no modelo apresentado pelos autores WANG et al., 2020 e ZHOU et al., 2021, onde é constituído por um conjunto gerador de vórtices (objetos com geometrias variadas) conectados perpendicularmente a uma haste laminar flexível. Com fins ilustrativos, o princípio geométrico desta estrutura é representado na figura 6.

Figura 6 - Representação esquemática da oscilação do cilindro sobre uma haste flexível.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A montagem deste aparato experimental se deu pela confecção inicial do objeto oscilante, onde foi utilizado um cilindro de Poliestireno Expandido (EPS) com dimensões de 5 cm de diâmetro por 25 cm de altura. Nele foi fixado, na parte central uma haste de aço flexível, esta responsável pela deformação mecânica do sistema. Com o objetivo de converter a deformação mecânica em eletricidade, fez-se uso de um TP cerâmico descrito na Tabela 1, o qual foi fixado na haste indicada na Figura 7. A escolha do local de fixação do TP, foi baseada em observação experimental realizada durante a visualização da oscilação do cilindro, pois foi constatado através de tentativa e erro, que a maior faixa de deflexão da haste se deu em aproximadamente 6 cm a partir da base fixa da mesma. Esta visualização pode ser verificada na Figura 7. Assim, fixando o TP neste local, permite que sobre ele seja aplicado maior deformação, o que conseqüentemente produz melhores resultados.

Figura 7 - Posicionamento do TP na haste metálica



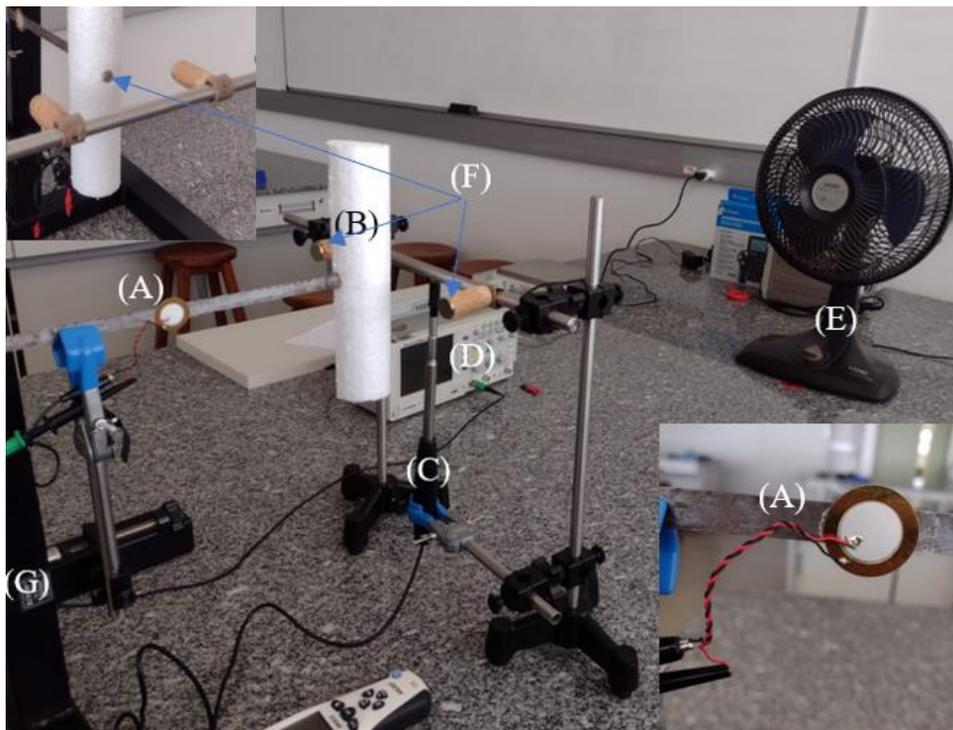
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Em virtude das limitações laboratoriais, a geração artificial de vento e medição de velocidade do vento foram, respectivamente, um ventilador Arno turbo de 30 cm e 3 pás e um anemômetro digital de fio quente AKSO, modelo AK833. Ainda como parte do protótipo experimental, foi realizada a inserção de ímãs de neodímio N50 com o intuito de estabilizar o processo oscilatório pois, de acordo com ZHOU et al., 2021, quando utilizados ímãs na estrutura como componentes auxiliares, ocorre um aumento na frequência vibração, proporcionando maiores taxas de oscilações e intensificando, assim, a saída de sinais elétricos. A indicação dos ímãs pode ser observada nas Figuras 8 e 9.

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento Experimental foi conduzido no laboratório 110 do bloco 3, na Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, *Campus Cerro Largo*. Em razão da inexistência de um túnel de vento em laboratório, o mecanismo adotado para produção de vento foi adaptado de Nascimento (2019), o qual consistiu no uso do ventilador doméstico. Com este, foi possível produzir três diferentes velocidades de vento, sendo controladas pelas três opções disponíveis no próprio eletrodoméstico. Para fins de conformidades na direção do vento, o eixo de rotação do ventilador foi mantido com um alinhamento fixo em relação ao centro do cilindro de EPS, visando maior constância de oscilação. O aparato experimental encontra-se mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Bancada experimental indicando os componentes do protótipo, onde: (A) Transdutor Piezoelétrico, (B) Cilindro EPS, (C) anemômetro de fio quente, (D) Osciloscópio digital, (E) Ventilador, (F) ímãs, (G) base de fixação dos componentes.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Com a finalidade de monitorar o fluxo de ar atuante sobre o sistema, realizou-se o monitoramento da velocidade em tempo integral à aquisição de dados de tensão de saída. O equipamento usado para esse fim possui capacidade de mediação entre 0,1 a 35m/s. Sendo assim, o equipamento foi validado para ser utilizado no protótipo, além de conter sua calibração válida até julho de 2022. O método de medição de velocidade foi realizado

a partir da média de todas as velocidades mostradas no anemômetro em um intervalo de 10 segundos. Para tal, foi utilizado o cálculo da média e do desvio padrão, visando obter maior confiabilidade nos resultados alcançados. O cálculo foi realizado segundo a equação 1 adaptada de SILVA et al. (2015).

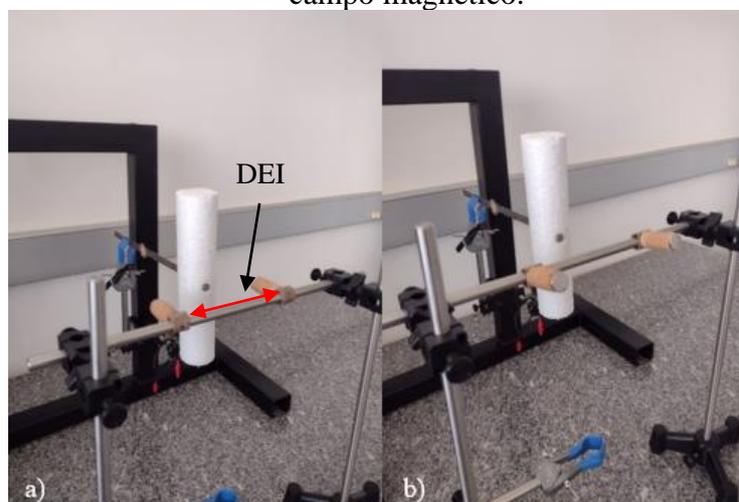
$$v = v_m \pm \sigma \quad \text{Equação 1}$$

$$v_m = \frac{\sum v}{n} \quad \text{Equação 2}$$

onde, v é a velocidade de vento registrada, v_m é a velocidade média do vento, $\sum v$ é o somatório de todas as velocidades obtidas no intervalo supracitado, n é o número de medidas obtidas no intervalo e σ o desvio padrão atrelado à medida da velocidade.

Visando aumentar a eficiência do sistema, foram implementados ímãs ao protótipo experimental, visto que esta técnica é indicada pelos autores supracitados. Assim, foi realizada a inserção destes, de modo que fosse possível operar o sistema sob influência magnética. Para tal, foi fixado um ímã circular de dimensões 10x4mm na parte central do cilindro e, utilizando estruturas auxiliares, posicionou-se dois ímãs circulares de dimensões 20x3mm na parte frontal do aparato. Os ímãs auxiliares, indicados na Figura 9, foram alocados no sentido de repulsão entre eles, podendo ser ajustados de acordo com a distância de oscilação desejada, para atuar como limitadores e harmonizadores dos movimentos realizados pelo cilindro. De modo similar, os componentes magnéticos podem ser retirados do sistema realizando uma rotação no eixo de sustentação dos mesmos.

Figura 9 - (a) Sistema com influência do campo magnético; (b) Sistema sem influência do campo magnético.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Com a finalidade de extrair dados de tensão gerados pelo TP, foi utilizado um osciloscópio digital modelo Gwinstek GDS 1072A-u. Neste, as leituras dos sinais elétricos foram realizadas com o objetivo de analisar a intensidade e estabilidade do mesmo, quando exercidos diferentes estímulos mecânicos externos, tais como: velocidade do vento, influencia magnética e distância entre os ímãs. Para tal, foi selecionado 3 diferentes distâncias entre os ímãs, realizando em cada uma a aferição dos resultados quando comparado com o sistema sem influência magnética.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE DAS VELOCIDADES EXPERIMENTAIS

Ao iniciar os procedimentos experimentais foram analisadas as velocidades de vento (VV), sendo estas calculadas conforme disposto na equação 1 e 2. Com as três distintas VV, trouxeram resultados diferentes em cada uma das situações apresentadas, visto que a intensidade do fenômeno de formação de vórtices sofre variações, ao passo que se altera a velocidade do fluido através do objeto cilíndrico (KAERCHER, 2007).

Tendo em vista que o anemômetro ficou posicionado na parte frontal do protótipo, a velocidade do vento em cada uma das posições de velocidade do ventilador variava de acordo com o exposto na Tabela 2. Assim, retirando uma amostra destas variações, obteve-se uma média acompanhada do desvio padrão para a posição 1 (P1) de $(5,16 \pm 0,07)$ m/s, $(4,12 \pm 0,12)$ m/s para posição 2 (P2) e $(3,49 \pm 0,08)$ m/s para posição 3 (P3).

Tabela 2 - Oscilações na VV em cada posição seguido da velocidade média

	Velocidade do vento P1 (m/s)	Velocidade do vento P2 (m/s)	Velocidade do vento P3 (m/s)
	5,07	4,25	3,35
	5,19	4,36	3,53
	5,10	4,04	3,54
	5,15	4,18	3,47
	5,22	4,04	3,60
	5,23	4,12	3,57
	5,01	4,20	3,51
	5,17	4,06	3,47
	5,11	4,08	3,38
	5,26	3,93	3,44
	5,20	4,05	3,55
Média ± Sd	5,16 ± 0,07	4,12 ± 0,12	3,49 ± 0,08

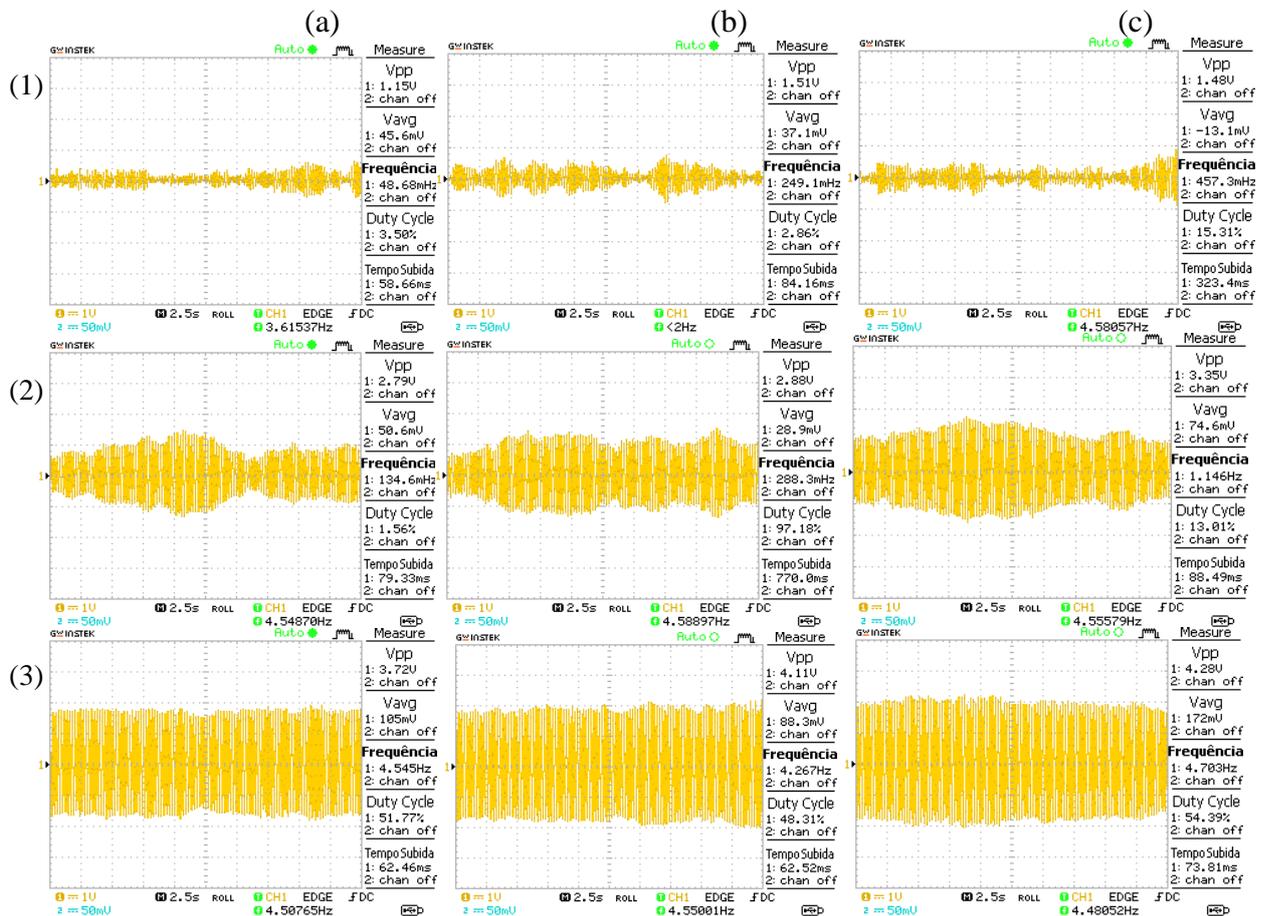
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022

5.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO PROTÓTIPO

Com os experimentos realizados, foram verificadas situações em que as saídas de sinais de tensão foram mais intensas, sendo o principal fator envolvido nestas variações de saída de tensão a velocidade do fluxo de ar. Concomitante a isso, o intervalo de distância entre os ímãs, bem como a própria influência magnética, mostram-se relevantes no desempenho do sistema. Para cada velocidade analisada, foram designados 3 diferentes espaçamentos entre os ímãs, sendo estes de 12 cm, 15 cm e 19 cm. A Figura 10 mostra as

imagens gráficas capturadas diretamente do osciloscópio para as saídas de tensão em função do tempo e, nestes pode-se notar o efeito da distância para cada velocidade.

Figura 10 - Desempenho de tensão observado para velocidades de vento de (1) 5,16; (2) 4,12; (3) 3,49 m/s de acordo com as distâncias (a) 12 cm, (b) 15 cm, (c) 19 cm.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

De maneira geral, percebe-se que o principal fator de influência sobre o sistema é o fluxo de ar. Entretanto, um fato curioso observado revelou que ocorre maior taxa de oscilação, e consequentemente maior TS, para VV mais baixas, além haver uma harmonização do sistema. Este fenômeno pode ser observado quando confrontamos os resultados visualizados no Figura 10.

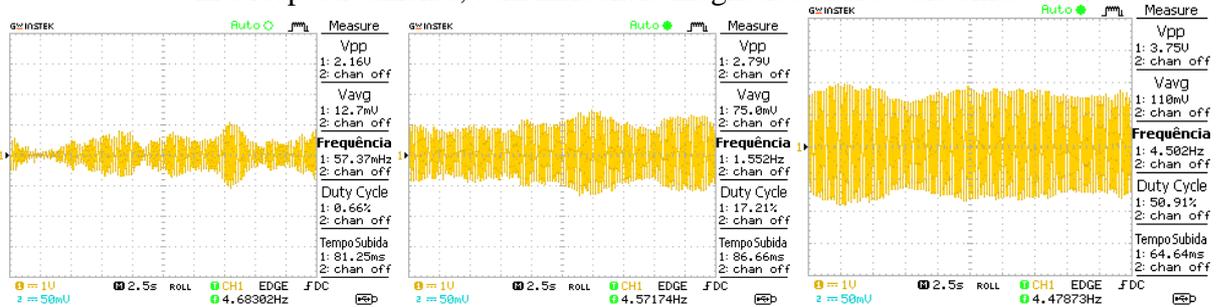
As tensões se mostram mais uniformes e mais intensas conforme é aumentada a DEI. Porém, para maiores VV, a partir de 5 m/s, as vibrações ocorreram de maneira totalmente aleatórias, onde, nas DEI estudadas, não foi verificado a existência de um comportamento padrão. Em contrapartida, para menores VV e, especialmente em 3,49 m/s, foi alcançado o melhor desempenho, com características bastante uniformes, e com oscilações longas e

constantes. Nesta faixa é onde foi determinado a maior TS, com 4,28 Vpp, indicando assim, um melhor acoplamento entre o sistema e a VV gerada.

Do ponto de vista da contribuição magnética no aparato, a principal influência observada quando as DEI foram alteradas foi a amplitude de deformação exercida sobre a haste. Visto que tal exercício mecânico é transmitido diretamente ao TP, o mesmo exercerá maior desempenho elétrico. Assim, pode ser explicado o motivo pelo qual maiores DEI combinado com baixa VV, mostraram-se mais atrativos em termos de aproveitamento energético.

Em faixa de VV mediana (4,12 m/s), as oscilações ainda se mostram com maiores instabilidades, não sendo uniformes ao longo do tempo. Entretanto, percebe-se que a força magnética exerce determinada influência, de modo que, ao estender a DEI há um certo “alargamento” da faixa gráfica, observada no Figura 10 (2). Tal informação revela, que nas DEI estudadas, há uma significativa influência dos ímãs apenas para um regime de escoamento de fluido (ar) menos turbulento, não sendo possível determinar como é afetado o sistema sob situações extremas.

Figura 11 - Desempenho de tensão observado para velocidades de vento de 5,16; 4,12; 3,49 m/s respectivamente, sem influência magnética sobre o sistema.



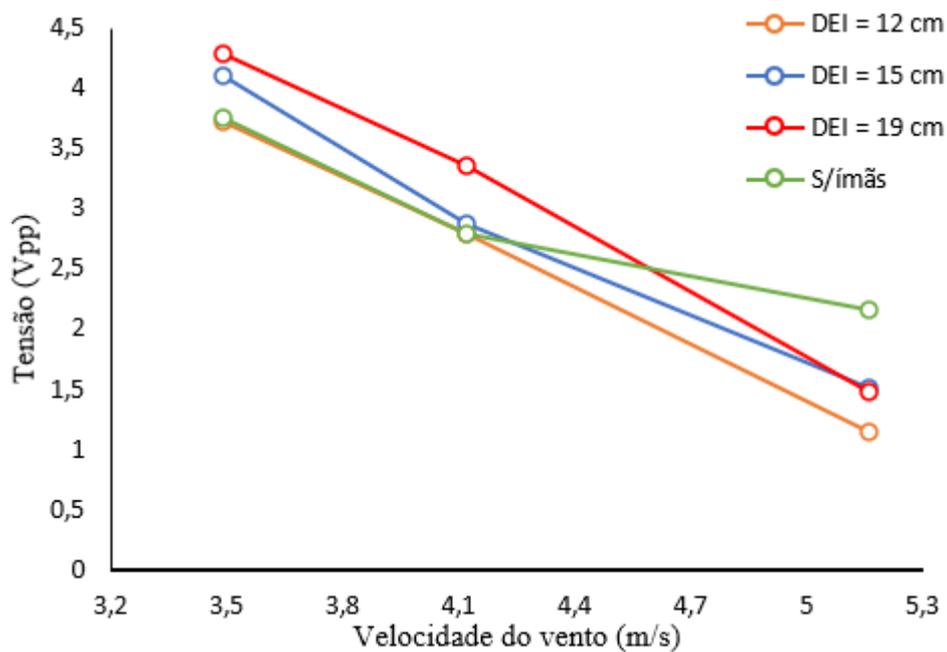
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Quando analisado o sistema com ausência da influencia magnética, demonstrado pelo Figura 11, fica perceptível que, para VV de 3,49 m/s, ocorre maiores oscilações no sistema quando sob a mesma VV combinada com DEI de 15 e 19 cm. Acredita-se que nestas distâncias elencadas, a influência magnética consegue, de maneira branda, intensificar e harmonizar as oscilações transversais provocadas pela formação de vórtices. Em VV de 4,12 m/s, é notório que o aumento mais expressivo na TS fica restrito a 15 e 19 cm. Assim, vale mencionar que estas DEI se mostraram mais atrativas, em termos de eficiência, para as condições estabelecidas no estudo. Entretanto, para VV na faixa de 5,16 m/s sem a presença

de ímãs, apesar de baixo o desempenho geral, ainda assim houve relativo acréscimo de TS para estas condições, quando contraposto com o cenário visualizado na Figura 10 (1).

Em busca de uma visão geral do desempenho nas diferentes situações colocadas à prova, a Figura 10, traz um compilado de informações que relaciona TS em Vpp e VV em m/s. Neste é possível observar, de maneira dinâmica, o acréscimo na performance do protótipo, o qual foi mencionado ao longo do texto. Assim, fica evidente que as circunstâncias experimentais estabelecidas, a VV de 3,49 m/s combinado com DEI de 15 e 19 cm podem ser consideradas superiores em termos de rendimento energético.

Gráfico 1 – Disposição do desempenho geral nas 4 diferentes situações estudadas



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022

Neste estudo fez-se uso de um TP o qual não foi utilizado na literatura consultada. Desse modo, torna-se complexo realizar uma comparação relevante entre os autores. Entretanto, quando analisada junto ao principal autor motivador deste estudo, ZHOU et al. (2021), nota-se que a TS obtida no presente estudo é inferior ao descrito pelo autor em sua pesquisa. Para fins de dados numéricos, o melhor desempenho alcançado pelo autor foi de aproximadamente 8 Vpp a uma velocidade de vento de 5 m/s, enquanto que, na pesquisa aqui apresentada, o desempenho máximo se deu em velocidade de 3,49 m/s e DEI de 19 cm gerando 4,28 Vpp.

Ainda, cabe avaliar o conceito físico pelo qual o melhor desempenho se deu em baixa

velocidade. Segundo PINTO (2008) e BAI & BAI (2005), o desprendimento de vórtices se inicia, ao passo que a frequência natural do sistema e a frequência de oscilação livre se aproximam. Entretanto, quando estas tornam-se iguais, o sistema tende a iniciar um processo vibratório (no sentido da corrente de fluido), impedindo assim a ocorrência de oscilações livres e de maneira dinâmica. De modo geral, as oscilações no sentido transversal à corrente ocorrem em baixas velocidades. Perante tal perspectiva, este fenômeno pode ser atribuído ao melhor desempenho do protótipo em VV mais baixas, o que indica que, nesta faixa, as frequências citadas encontravam-se em aproximação. Porém à medida que se aumentou a VV, tais frequências tenderam a se aproximar mais, a ponto de torná-las muito próximas, ocorrendo apenas o fenômeno vibratório detectado para velocidade de 5,16 m/s.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De maneira geral, o estudo apresentou quatro diferentes perspectivas para avaliar o desempenho do protótipo usando o princípio piezoelétrico com o objetivo de extrair a energia mecânica a partir da formação de vórtices em um cilindro. Desse modo, após concluído todas as análises sobre o processo de captação de energia vibracional do vento, pode-se chegar a determinadas conclusões. O princípio apresentado é um mecanismo de buscar extrair pequenas parcelas de energias disponíveis ao entorno do meio físico. Deste modo, o conteúdo exposto ao longo do presente trabalho revela que até mesmo baixas velocidades de vento pode conter potencial energia para utilizar, mesmo que em pequena escala e de maneira descentralizada.

Como considerações gerais acerca do estudo, é possível afirmar que, para este mecanismo apresentado, VV de baixas magnitudes se mostraram mais eficazes para a performance do sistema. Ainda neste aspecto, conclui-se que o ângulo de deslocamento transversal do cilindro com maior grau de abertura é um fator de relevância considerável para o aumento na TS, visto que ocorre maior taxa de deformação no TP liberando assim, maiores níveis de tensão. Esta afirmação é válida, pois foi verificado que os maiores níveis de tensão obtidos foram de 4,11Vpp e 4,28Vpp, para VV de 3,49 m/s e para DEI de 15 e 19 cm respectivamente.

Perante tais concepções definidas e dialogadas ao longo do estudo, fica evidente que o mérito ambiental é um grande motivador para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas as energias limpas, visto que geração em pequena escala pode contribuir de maneira significativa quando administradas corretamente. Para tal, mais estudos como o aqui apresentado devem ser pauta no campo da engenharia para fins de alcançar melhores desempenhos no setor. Portanto, vale ressaltar que, para estudos futuros, experimentos mais amplos sobre este tema devem ser realizados, visando maior propriedade e conhecimentos mais aprofundados sobre este assunto. Percebeu-se que algumas questões ficaram duvidosas, de certo modo. Assim, como sugestão para estudos futuros, conduzir experimentos visando faixas de velocidades mais amplas, seleção de outros materiais para testes, variação do diâmetro do cilindro, entre outros aspectos a serem considerados, podem ser de relevância para o assunto abordado.

7 REFERÊNCIAS

- AKAYDIN, H.D., ELVIN, N., ANDREOPOULOS, Y. Despertar de um cilindro: um paradigma para captação de energia com materiais piezoelétricos. **Experiments in Fluids**, v. 49, n. 1, pág.291-304, 2010. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00348-010-0871-7>>. Acesso em: 06 de set. 2021.
- ARNAU, A. et al. (Ed.). **Piezoelectric transducers and applications**. Berlin: Springer, 2004. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-05361-4.pdf>> acesso em: 21 de jan. 2022.
- BAI, Y., BAI, Q. Subsea Pipelines and Risers, Part IV, Riser Engineering Chapter 24, VIV and Wave Fatigue of Risers, 2005, Ed. Elsevier.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, BEN, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>> Acesso em: 18 de set. 2021.
- FARIAS, Leonel M.; SELLITTO, Miguel A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras, Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, jan./jun. 201. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Use-da-energia-ao-longo-da-hist%C3%B3ria%3A-evolu%C3%A7%C3%A3o-e-Farias-Sellitto/4874d26077245cbb8a29fbfaa8ca90c5d7301f62>> Acesso em: 27 de set. 2021.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J., **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 8ª. Edição, LTC Editora, 2014.
- FRANCIS, S.; UMESH, V.; SHIVAKUMAR, S. Design and Analysis of Vortex Bladeless Wind Turbine. **Materials Today: Proceedings**, 2021.
- GALLEGO-JUAREZ, J. A. Cerâmica piezoelétrica e transdutores ultrassônicos. **Journal of Physics E: Instrumentos Científicos**, v. 22, n. 10, pág. 804, 1989.
- HARSHITH K., FERNANDES B. S., SHREERAMA, P. R., RAJ, T. Bladeless Wind Power Generation, **International Journal for Scientific Research & Development**, Vol. 4, Issue 03, 2016.
- HUYNH, B. H., TIAHJOWIDODO, T., ZHONG, Z. W., WANG, Y., & SRIKANTH, N. Design and experiment of controlled bistable vortex induced vibration energy harvesting systems operating in chaotic regions. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 98, p. 1097-1115, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088832701730314X?casa_token=V8OWPM_JnuYAAAAA:0FhsFd34q94V2uaP79qHTLsNaf5LQ4YmEKqCc5sTD1yKLarbko1qwVWn2uXNg0ql0fJA84ctzJR3sg>. Acesso em: 28 de ago. 2021.
- JORDAN, T.L., OUNAIES, Z. **Caracterização de cerâmicas piezoelétricas**. Instituto para aplicações de computador em ciência e engenharia hampton va, 2001.

KAERCHER, A.L. **Estudo de vibrações induzidas por vórtices em estruturas cilíndricas submetidas a escoamento permanente**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2007.

LEITE, D. B.; SOUZA, E. P. de. Tendências do cenário energético brasileiro: a energia de fonte eólica e o olhar dos atingidos. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria (RS), v. 37, n. 4, p. 243 – 250, set./dez. 2015.

LELLIS, M. M. **Fontes alternativas de energia elétrica no contexto da matriz energética brasileira: meio ambiente, mercado e aspectos jurídicos**. Itajubá, 2007, 134f. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia – Universidade Federal de Itajubá.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, p. 1304.1-1304.13, 2008.

MASSONE, A. C. C.; DE OLIVEIRA R. S.; VIOLA, F. M. Colheita de energia vibracional utilizando materiais piezoelétricos. **Conhecimento & Diversidade**, v. 11, n. 25, p. 63-80, 2020.

MASSONE, A. C. C.; DE OLIVEIRA R. S.; VIOLA, F. M. Colheita de energia vibracional utilizando materiais piezoelétricos. **Conhecimento & Diversidade**, v. 11, n. 25, p. 6380, 2020. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/conhecimento_diversidade/article/view/6394>. Acesso em 10 de set. 2021.

NASCIMENTO, A. C. V. D. Sistema de Energy Harvesting empregado a estruturas bioinspiradas usando dispositivo Piezoelétrico PVDF. Cerro Largo, 2019. **Trabalho de Conclusão de Curso**, Universidade Federal da Fronteira Sul.

NASCIMENTO, T. C.; MENDONÇA, A. T. B. B.; CUNHA, S. K. **Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil**. Cadernos EBAPE.BR [online]. 2012, v. 10, n. 3 [Acessado 10 setembro 2021], pp. 630- 651. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1679-39512012000300010>>.

NETO N. A., **Custos logísticos dos equipamentos dos parques eólicos: estudo de caso**. Dissertação de mestrado, Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://bibliotecatede.uninove.br/handle/tede/1505>>. Acesso em: 04 de set. 2021.

ONU, Organização das Nações Unidas. 17 Objetivos Para Transformar Nosso Mundo. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/>>. Acesso em 23 de set. de 2021.

PINTO, L. C. Análise por simulação numérica do desprendimento de vórtice em um cilindro circular em movimento forçado. **Dissertação de mestrado**, Universidade Federal Do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2008.

SANTOS, D., GULYURTLU, I., CABRITA, I. Materiais e energia: Conversão termoquímica de combustíveis. **Revista Corrosão e Protecção de Materiais**, p. 78-90, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/1182>>. Acesso em: 15 de set. 2021.

SILVA, A. M., VIEIRA, R. M. F. Energia eólica: conceitos e características basilares para uma possível suplementação da matriz energética brasileira. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 6, n. 2, 2016. Disponível em: <<http://ucs.br/etc/revistas/index.php/direitoambiental/article/view/3975>> Acesso em: 11 de set. de 2021

SILVA, J. L. C.; FERNANDES, M. W.; ALMEIDA, R. L. F. **Matemática estatística e probabilidade**. 3ª edição, Fortaleza: Ed. UECE, 2015. Disponível em: <<https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/554261/2/Livro%20Estatistica%20e%20Probabilidade%20.pdf>> Acesso em: 05 de fev. 2022.

SOUSA, F. C., Energia eólica: desenvolvimento energético e os conflitos socioambientais inerentes à modalidade energética. **Revista Semiárido De Visu**, v. 5, n. 3, p. 180-191, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ifsertao-pe.edu.br/ojs2/index.php/semiariidodevisu/article/view/378>>. Acesso em: 10 de set. 2021.

TERCIOTE, R. Análise da eficiência de um sistema eólico isolado. **Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas**, 2002.

VILLARREAL, D.J. Y.; SL, Vortex Bladeless. Geradores eólicos ressonantes VIV. **vol**, v. 2, p. 1-6, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/David-J-Yanez/publication/331345449_VIV_resonant_wind_generators/links/5c74f3c3299bf1268d25c051/VIV-resonant-wind-generators.pdf> . Acesso em: 16 de jun. de 2021.

VISHNU. M. R., AKASH. A., AKHIL R. R., GOPI K., S., JISHNU J. M. Design and Fabrication of Bladeless Windmill. **International Journal for Scientific Research & Development**, Volume 9 Issue No. 6. 2019. Disponível em: <[https://ijesc.org/upload/dda9846ccc1b1023c40074a72998e2ce.Design%20and%20Fabrication%20of%20Bladeless%20Windmill%20\(3\).pdf](https://ijesc.org/upload/dda9846ccc1b1023c40074a72998e2ce.Design%20and%20Fabrication%20of%20Bladeless%20Windmill%20(3).pdf)> Acesso em: 15 de jul. 2021.

XU-XU, J.; BARRERO-GIL, A.; VELAZQUEZ, A. Dual mass system for enhancing energy extraction from Vortex-Induced Vibrations of a circular cylinder. **International journal of marine energy**, v. 16, p. 250-261, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214166916300546?casa_token=19EZrKYfMqQA AAAA:LouGDdDRUcjbE1rPfkDIj8Ny0LU6ZWx5ullUVEJVF aAhqONfPC9sGwx JYCFf6hYcPsHKvvMFSUR-A> Acesso em: 28 de ago. 2021.

ZHOU, Z., QIN, W., ZHU, P., & DU, W. Harvesting more energy from variable-speed wind by a multi-stable configuration with vortex-induced vibration and galloping. **Energy**, v. 237, p. 121551, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221017990>>. Acesso em: 10 de ago. 2021.

8 ANEXO I

Link para visualização do funcionamento do protótipo em laboratório. Segue o link para o Youtube: <<https://youtu.be/wwbWzljpbBk>>