

AERONAR: AEROGERADOR PARA ÁREAS URBANAS UTILIZANDO SUCATA DE AR-CONDICIONADO

VICTOR DE ANDRADE GOMES 

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Salvador, BA, Brasil, 40301-015, victor.drad.g@gmail.com

EMERSON SILVA DA ROCHA 

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Salvador, BA, Brasil, 40301-015, e.silva.rocha1234@gmail.com

VITOR LEÃO FILARDI 

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Salvador, BA, Brasil, 40301-015, vitorleao@ifba.edu.br

RESUMO

A energia eólica é pouco explorada como fonte de energia sustentável em áreas urbanas. O Brasil é o 4º maior país em descarte inadequado de plástico. Com base nessa temática foi desenvolvido e aprimorado um aerogerador utilizando sucata de ar-condicionado que aproveita o fluxo laminar de vento em edificações nas áreas urbanas. O aparato desenvolvido possui 6 modos de instalação, tornando-o adaptável a diversos perfis de vento além de contar com um sistema multiplicador de rotações na razão 1:3,5. A potência máxima atual é de 1,8 W, atingida com rotação de 600 rpm, suficiente para carregar um aparelho de celular convencional. A potência máxima anterior, de 1,1 W era alcançada com rotação 2,5 vezes maior. Sendo assim, as melhorias aplicadas tornam o AERONAR ainda mais atrativo e viável do ponto de vista técnico para geração de energia limpa em áreas urbanas e ainda contribui para a reciclagem de material plástico.

Palavras-chave: Aerogerador. Fluxo Laminar. Reciclagem.

AERONAR: WIND TURBINE FOR URBAN ZONES USING AIR-CONDITIONER SCRAPS

ABSTRACT

Wind energy is not yet commonly used in urban areas



as a clean energy resource. Brazil is the 4th country on the improper plastic disposal ranking. Based on this scenario, a wind turbine was developed and improved using air conditioning scraps that take advantage of the accelerated wind zone in the buildings. The developed system has six different installation modes, making the prototype more adaptable for different wind conditions, and a gearbox system with a 1:3.5 gear ratio. AERONAR is capable to generate 1.8 W with 600 rpm, sufficient energy to charge a cellphone. The maximum power of the previous version was 1.1W and it needed a rotation speed 2.5 times higher. Therefore, both efficiency and versatility upgrades contributed to making the developed wind turbine even more attractive and technically viable for generating clean energy in urban areas and for promoting plastic recycling.

Keywords: Wind Turbine. Laminar Flow. Recycling.

INTRODUÇÃO

A quantidade de resíduos plásticos produzidos cresce em larga escala. O Brasil é o 4º maior produtor de lixo plástico no mundo e apenas 1,28% desta quantidade é reciclada (WORLD Wide Fund for Nature, 2019). Prevê-se que, até 2050, 25 bilhões de toneladas de resíduo plástico serão gerados, e apenas 10 milhões serão reciclados (GEYER; JAMBECK; RAW, 2017), como evidenciado no gráfico da Figura 1.

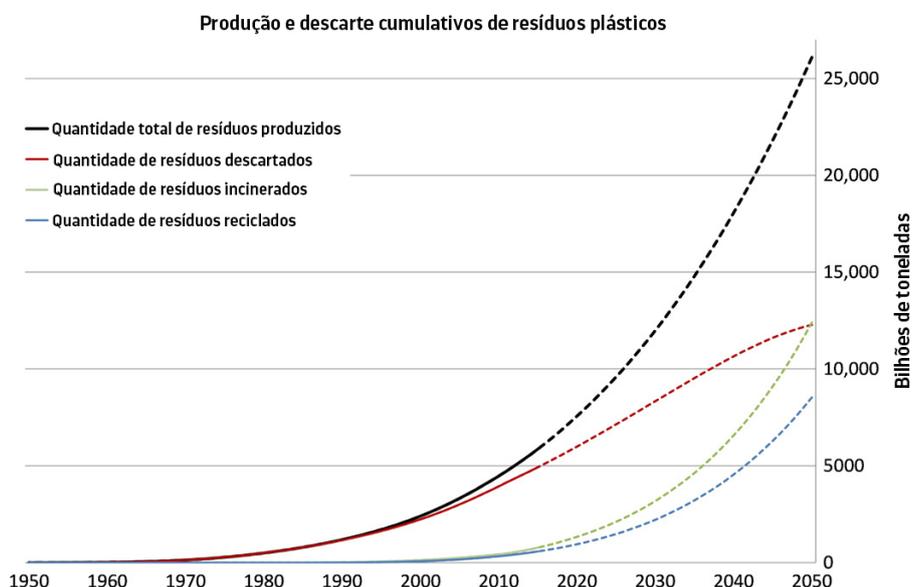


figura 1. Produção e descarte de resíduos plásticos acumulado ao longo dos anos.

Fonte: Adaptado de Geyer, Jambeck e Raw, 2017, p. 3.

Em contrapartida, a busca por alternativas sustentáveis para a geração de energia elétrica cresce progressivamente em todo o mundo. Dentre as diversas possibilidades, a utilização da energia eólica torna-se cada vez mais expressiva no Brasil. Em 2018, 72 novas fazendas eólicas foram implementadas, totalizando 583 plantas com capacidade total de 14,71



GW, representando um crescimento de 15% em relação a 2017 (ABEEólica, 2018).

A consolidação da energia eólica na matriz energética brasileira torna oportuno o desenvolvimento de novas tecnologias que englobam regiões onde sua utilização não é expressiva, como em ambientes urbanos. Devido à necessidade de grandes estruturas de instalação e a poluição sonora e visual causadas pela maioria das turbinas eólicas disponíveis no mercado, estes modelos tornam-se inadequados para instalação em zonas urbanas.

Portanto, o principal objetivo do presente artigo é relatar o processo de desenvolvimento de um protótipo conceitual de um aerogerador feito a partir de material reciclado capaz de aproveitar o fluxo laminar de vento incidente em prédios para geração de energia elétrica. Para isso, fez-se necessário analisar o perfil de vento da região de instalação; construir um sistema de aquisição e tratamento de dados, testar o conceito inicial de aproveitamento do fluxo laminar; analisar pontos de aprimoramento do protótipo; utilizar recursos como softwares de modelagem 3D e simulações para a aumentar a versatilidade e eficácia do projeto; e construir gráficos característicos de aerogeradores tais como curva de potência para avaliar sua viabilidade.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

FORMAÇÃO DAS CORRENTES DE AR

A formação das correntes de ar se dá pelo fenômeno do aquecimento não uniforme da superfície terrestre, conseqüentemente gerando zonas de baixa e alta pressão. Esse fenômeno é responsável por forçar a movimentação do ar pela atmosfera. A diferença da temperatura incidente é influenciada por fatores como altitude, relevo, orientação dos raios solares e o movimento de rotação da Terra (DUTRA, 2008). Devido à inclinação natural do planeta, de aproximadamente $23,5^\circ$, os raios solares não o atingem de maneira igual, de modo que regiões próximas à Zona do Equador são mais aquecidas que as regiões polares. Por conseguinte, o ar quente tende a fluir para as regiões polares, e o ar frio em direção aos trópicos (DUTRA, 2008). Este deslocamento das massas de ar formam os ventos, como demonstrado na Figura 2.

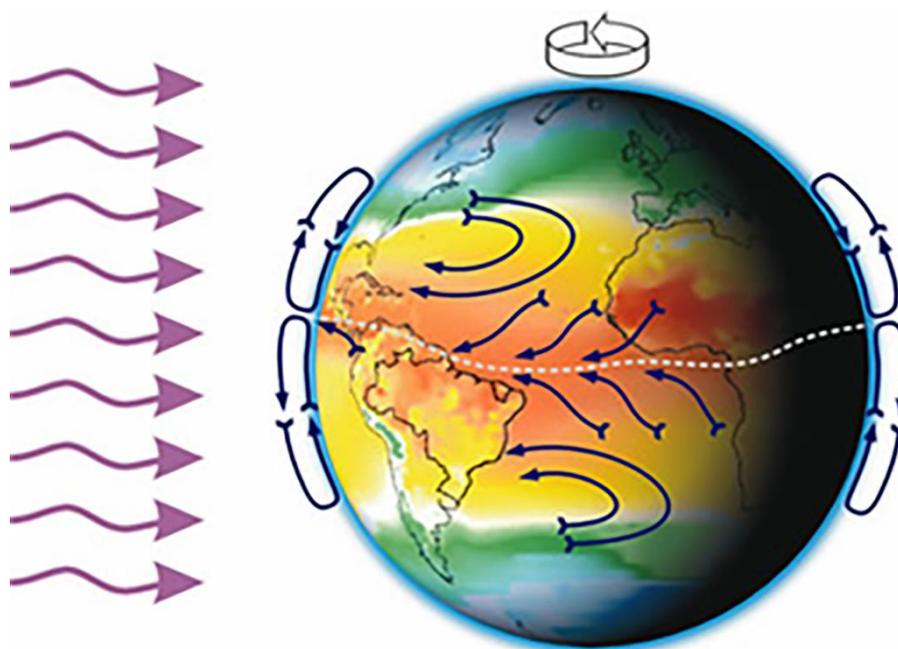


figura 2. Formação dos ventos em decorrência do deslocamento das massas de ar.

Fonte: Amarante, Zack e Sá, 2001, p. 23.

AÇÃO DOS VENTOS EM EDIFICAÇÕES

Ao se chocar com um edifício, a corrente de ar cria zonas de sobre-pressão, isto é, com intensidade acima da pressão atmosférica, e zonas de sucção, com intensidade inferior à da pressão atmosférica (NASCIMENTO, et al., 2016). Este fenômeno pode ser visualizado na Figura 3, onde as indicações “+” representam as áreas de sobre-pressão e as indicações “-” as áreas de sucção. É denominada barlavento a região onde o vento incide (lateral esquerda do prédio), e sotavento a região oposta à região de barlavento (ARAGÃO; LEÃO, 2013).

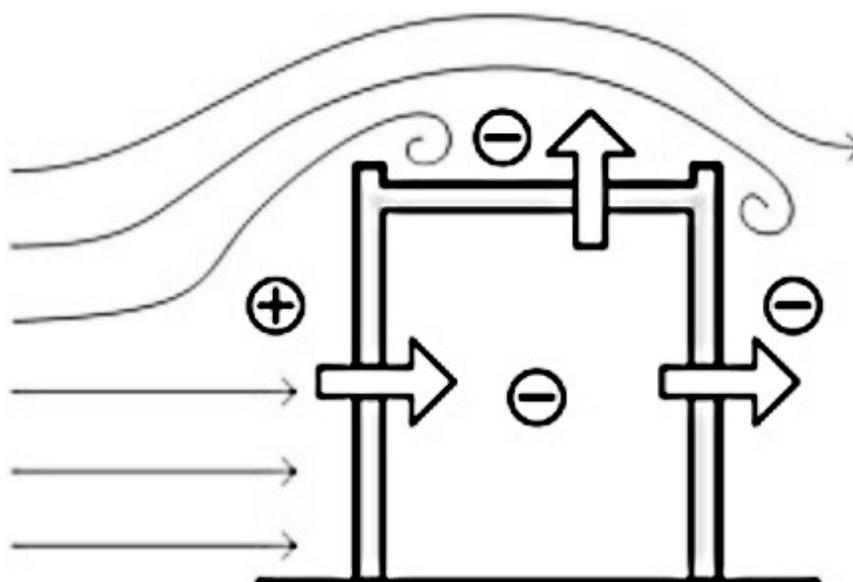


figura 3. Ação dos ventos em edificações.

Fonte: Aragão e Leão, 2013, p. 10.



Também chamado de Efeito Venturi, o fenômeno de afunilamento (Figura 4) ocorre devido à presença de duas ou mais edificações que tornam o caminho de passagem do vento mais estreito. Devido à diminuição da área de passagem, a velocidade do vento aumenta nesta região bem como a pressão nas paredes das edificações (NASCIMENTO, et al., 2016, apud GONÇALVES et al., 2007).

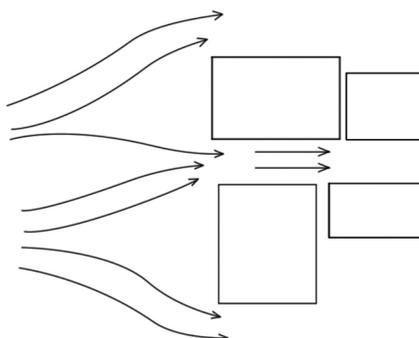


figura 4. Efeito Venturi nas edificações.

Fonte: Adaptado de Nascimento, et al., 2016, p. 42.

Os aerogeradores desenvolvidos com objetivo de operar na zona acelerada de vento decorrente do choque com edificações são inseridos na categoria de *Architectural Wind Microturbines (AWM)* e são instalados no parapeito dos prédios (AeroVironment, 2008). Por serem de pequeno porte, é possível a instalação de vários desses equipamentos em cadeia, maximizando assim o potencial energético. A ideia foi trazida pela empresa AeroVironment e o modelo foi instalado no *Logan International Airport*, localizado na cidade de Boston, Estados Unidos. De acordo com dados da empresa, o aproveitamento da zona acelerada de vento potencializa em 30% a geração de energia elétrica (GRAHAM, 2008).

POTÊNCIA E EFICIÊNCIA DAS TURBINAS

Como visto em Schubel e Crossley (2012), a potência disponível (P) de uma turbina está relacionada com a sua velocidade linear (V) como mostra a Equação (1), onde ρ representa a massa específica do ar em kg/m^3 e A a área da turbina em m^2 .

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

Para obter a velocidade linear das turbinas durante o funcionamento do aerogerador é necessário conhecer, além de suas dimensões físicas, sua velocidade de rotação (f) no dado instante. Como visto em Lazzarini (1998), tal velocidade de rotação pode ser calculada caso o período (T) de rotação das turbinas seja conhecido, como demonstra a Equação (2), que



relaciona as duas variáveis.

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

Como o raio (r) é conhecido, e por estar em movimento circular uniforme, a velocidade linear (V) da turbina pode ser calculada, como visto em Monteiro (2016), pela Equação (3).

$$V = 2\pi r f \quad (3)$$

Utilizando essas equações é possível definir a curva de potência, que relaciona a energia gerada com a velocidade do vento ou velocidade de rotação das turbinas. Outro fator importante para atestar a eficiência dos aerogeradores é o coeficiente de potência (C_p), que relaciona a potência produzida pelo aerogerador com a potência total disponível para ser utilizada. Devido às limitações físicas, o máximo coeficiente de potência (Equação 4) possível para qualquer aerogerador, de acordo com a Lei de Betz, é de 59,3% (SCHUBEL; CROSSLEY, 2012). Por aproveitada entende-se a energia elétrica produzida pelo aerogerador por unidade de tempo, e $P_{disponível}$ a potência total capaz de ser aproveitada, calculada pela Equação (1). Como a eficiência do aerogerador varia conforme sua velocidade de giro, o C_p também é variável.

$$C_p = \frac{P_{aproveitada}}{P_{disponível}} \quad (4)$$

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

Os materiais escolhidos para compor o aerogerador foram definidos com base na relação entre custo, benefício e disponibilidade dos componentes na instituição de ensino dos autores do presente artigo. O Quadro 1 contém informações sobre todos os materiais utilizados para a versão mais atual do protótipo, incluindo descrição funcional, quantidade adquirida e custo.

#	Aquisição	Peça	Descrição	Qtde.	Custo do Projeto	Preço Caso Comprada
a.	Reciclado	Turbinas Plásticas	Retirada de condicionadores de ar tipo split system. Responsável por captar a energia eólica e convertê-la em energia cinética de rotação. Possui comprimento de 955 mm, raio de 53,5 mm e peso de aproximadamente 1kg.	2	R\$ 0,00	R\$ 250,00



#	Aquisição	Peça	Descrição	Qtde.	Custo do Projeto	Preço Caso Comprada
b.	Fornecido pela instituição de ensino	Perfil de alumínio estruturado	Compõe a base de sustentação do protótipo e além de possuir fácil utilização, é resistente a oxidação. Possui altura de 100 mm e base de 30x30 mm.	3	R\$ 0,00	R\$ 46,40
c.	Reciclado	Motor elétrico DC	Responsável por converter a energia cinética de rotação em energia elétrica. O motor elétrico de corrente contínua utilizado foi retirado de uma impressora antiga. Por ser do tipo ímã permanente, facilita a rotação das turbinas devido ao baixo torque.	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
d.	Fornecido pela instituição de ensino	Rolamento revestido em nylon	Transmite o movimento das turbinas para o motor. Escolhido pois estava disponível na instituição de ensino. Possui comprimento de 60 mm e 15 mm de raio.	3	R\$ 0,00	R\$ 35,25
e.	Fornecido pela instituição de ensino	Acoplamento flexível de alumínio	Une o dínamo ao eixo metálico das turbinas captadoras, e devido ao material que é constituído, apresenta a resistência mecânica necessária. Possui diâmetro de 19 mm e comprimento de 24,5 mm.	1	R\$ 0,00	R\$ 22,90
f.	Comprado	Acoplamento metálico	Fixa as turbinas captadoras aos rolamentos, realizando a junção de ambos. Possui comprimento 60 mm de comprimento e raio de 14 mm.	2	R\$ 70,00	R\$ 70,00



#	Aquisição	Peça	Descrição	Qtde.	Custo do Projeto	Preço Caso Comprada
g.	Recicladas	Polias dentadas	O sistema como um todo possui a função de multiplicar a rotação da turbina na relação de 1:3,5. Retiradas da sucata de uma máquina de lavar danificada. A polia maior possui espessura de 19 mm e raio de 50,25 mm. A polia menor possui espessura de 15 mm e raio de 17,5 mm.	2	R\$ 0,00	R\$ 75,00
h.	Reciclado	Eixo metálico da polia maior	Transmite o movimento da turbina para o sistema de multiplicação de rotações. Retirado do mesmo equipamento das polias dentadas. Possui comprimento de 8,2 mm e raio de 5 mm.	1	R\$ 0,00	R\$ 5,00
i.	Comprado	Correia	Transmite a rotação da polia dentada maior para a polia dentada menor. Espessura de 19 mm e 140 mm de diâmetro.	1	R\$ 70,00	R\$ 70,00
j.	Comprado	Suporte metálico em L	Prende o perfil de alumínio à superfície de instalação. Escolhido o alumínio como material pois possui a resistência mecânica necessária, além de resistência a oxidação. Suas medidas são 80x80x80 mm.	13	R\$ 68,25	R\$ 68,25
k.	Reciclado	Chapa de aço inoxidável	Estrutura de fixação dos sistemas de multiplicação e geração de energia elétrica. Escolhido aço inoxidável pela alta resistência mecânica. Possui 1,5 mm de espessura, 220 mm de altura e 104 mm de altura.	1	R\$ 0,00	R\$ 17,00
l.	Fornecido pela instituição de ensino	Fita metálica perfurada	Fixa os rolamentos ao perfil estruturado de alumínio. Possui 17 mm de largura, 150 mm de comprimento e furos com 4 mm de raio.	3	R\$ 0,00	R\$ 5,75



#	Aquisição	Peça	Descrição	Qtde.	Custo do Projeto	Preço Caso Comprada
m.	Fornecido pela instituição de ensino	Módulo ESP32 DEVKIT V1	Microcontrolador de baixo custo, compacto e possui as tecnologias WiFi e Bluetooth integradas à placa, facilitando a implementação de um futuro sistema de monitoramento on-line.	1	R\$ 0,00	R\$ 85,00
n.	Reciclado	Sensor de corrente ACS712-5A	O circuito desenvolvido realiza a medição da corrente elétrica que percorre o circuito de carga. Reaproveitado de outros projetos anteriormente desenvolvidos.	1	R\$ 0,00	R\$ 16,00
o.	Fornecido pela instituição de ensino	Resistores de 3,3 e 6 Mega Ohm	Compõem o divisor resistivo confeccionado para medir a tensão produzida pelo motor. A tensão de entrada possui faixa de 0-12V e é enviada para o ESP32 na faixa de 0-3,3V. A ordem de grandeza (106 Ohm) limita a corrente no divisor resistivo a valores praticamente nulos, preservando a integridade do circuito.	1	R\$ 0,00	R\$ 1,00
p.	Fornecido pela instituição de ensino	Sensor de efeito hall S41 605-LF	Utilizado para medir o período de rotação das turbinas.	1	R\$ 0,00	R\$ 3,00
q.	Comprado	Capacitor de ventilador de teto	Atenua a desaceleração das turbinas em caso de diminuição da velocidade do vento. Por não possuir polaridade, pode ser utilizado independente do sentido de giro das turbinas. Capacitância de 10 uF.	1	R\$ 25,00	R\$ 25,00
TOTAL					R\$ 273,25	R\$ 835,55

quadro 1. Relação de custos e quantidade de materiais do aerogerador.

Das peças reaproveitadas, todas foram inspecionadas visualmente a fim de que nenhum equipamento com defeito expressivo pudesse ser utilizado e assim impactar negativamente no desempenho do aerogerador. Desta forma, deu-se preferência a peças cujo descarte havia sido recente.



Ao todo, as duas turbinas plásticas apresentam 7 aletas danificadas, porém quando comparado ao total geral, de 720 aletas, a razão é inferior a 1%.

MODELAGEM 3D DO PRIMEIRO PROTÓTIPO

Para evitar inconsistências de montagem e, por consequência, gastos desnecessários de material e tempo, optou-se por projetar o aerogerador em 3D utilizando o software SolidWorks 2019 SP1 por seu amplo uso na área de engenharia. Assim, também foi possível ter uma melhor noção de materiais a serem utilizados. A Figura 5 mostra o modelo 3D do primeiro protótipo desenvolvido.



figura 5. Primeiro protótipo em 3D.

ESCOLHA DO LOCAL DE INSTALAÇÃO

O local de instalação foi definido com base na altura do prédio, facilidade de instalação e direção e velocidade média do vento. Devido à presença de outra edificação ao lado, o edifício escolhido encontra-se na região de afunilamento descrita na seção 2.2. Portanto, torna-o propício para o aproveitamento do fluxo acelerando do vento para a geração de energia elétrica. A velocidade do vento na região foi medida utilizando o termo-anemômetro digital da marca Homis modelo H811-012 em diferentes horários no período da manhã e tarde durante 1 semana. As informações referentes ao local que apresentou a melhor relação entre os quatro fatores podem ser vistas na Tabela 1. A altura em relação ao nível do mar foi coletada a partir de dados encontrados na plataforma *Google Earth*.

Altura do prédio em relação ao solo (m)	6 m
Altura do prédio em relação ao nível mar (m)	63 m
Direção do vento	Nordeste
Velocidade média do vento (m/s)	4 m/s

tabela 1. Perfil do vento no local de instalação.

MONTAGEM E TESTE AERODINÂMICO



Com o modelo 3D finalizado e todas as peças disponíveis, o primeiro protótipo foi construído. Como esperado, nenhuma alteração construtiva foi necessária, visto que durante a modelagem 3D as incongruências evidenciadas foram resolvidas.

O primeiro teste foi realizado em ambiente controlado e teve por objetivo atestar a captação da energia eólica por parte das turbinas. Durante um período de 10 minutos, o aerogerador foi exposto a uma corrente de ar controlada e com pressão variável de 0,4 a 2,5 psi originada de um compressor de ar. A partir do giro das turbinas plásticas, foi possível comprovar que as aletas faltantes não influenciaram na rotação do sistema geral. A próxima etapa consistiu em atestar a captação da energia eólica proveniente de correntes de ar naturais. O aerogerador foi colocado ao nível do chão em um local próximo ao prédio definido como local de instalação de modo a testá-lo sob uma condição mais próxima do real.

INSTALAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO

O aerogerador foi instalado na posição horizontal e no parapeito do prédio pela facilidade em montar, desmontar ou realizar qualquer intervenção que fosse necessária. Embora a posição vertical de instalação trouxesse mais benefícios, como aproveitar o vento vindo de qualquer direção, para a instalação nesse formato, seria necessário a montagem de andaimes, além de pessoal capacitado e habilitado, o que impactaria no avanço do projeto caso fosse necessário reparar algum componente ou remover o aerogerador do local. Além disso, o terreno ao redor do edifício é irregular, tornando a montagem de qualquer estrutura mais onerosa. Por esses motivos, o AERONAR foi instalado como mostra a Figura 6.



figura 6.
Aerogerador
instalado.



A construção de um sistema de aquisição se mostrou indispensável para facilitar o registro dos dados (tensão, corrente e rotação), como também para posterior avaliação da viabilidade e eficiência do sistema desenvolvido.

Durante 3 dias da semana, foi realizada a inspeção visual da integridade das partes mecânicas do aerogerador e medição da tensão fornecida pelo gerador elétrico. Durante os demais dias, o seu funcionamento era monitorado à distância pelo prédio ao lado. O período de monitoramento teve duração total de 6 semanas. Decorrido este tempo, o aerogerador foi desmontado para inspeção de suas peças mecânicas. Embora tenha se mostrado eficaz no aproveitamento do fluxo laminar acelerado do vento, e assim comprovado a possibilidade de utilização de turbinas de condicionadores de ar para geração de energia eólica, alguns aspectos construtivos não atenderam às expectativas de vida útil e eficiência. Os pontos considerados insatisfatórios foram reunidos e tratados em reuniões entre os autores, onde um plano de melhorias foi definido e executado. Dentre os aspectos observados, destacaram-se:

a) O rápido desgaste das partes mecânicas (Figura 7), que contribuiu para a perda de energia cinética de rotação durante a transmissão do movimento. Por meio de inspeção visual, constatou-se que a conexão entre o eixo das turbinas e os acoplamentos flexíveis havia se deteriorado. A folga entre ambas as peças implicou na rotação descoordenada das duas turbinas.

b) O mal dimensionamento do gerador elétrico, visto que a velocidade de vento necessária para que o aerogerador iniciasse a rotação (também conhecida como velocidade de corte) estava acima da velocidade média de vento da região. Portanto, a geração de energia além de ocorrer apenas em momentos específicos, durava pouco tempo e era de baixa intensidade, isto é, abaixo de 1W.



figura 7.
Acoplamento
flexível desgastado.

Como estratégia de resolução, foi decidido modelar novas peças mecânicas e trocar seu material constituinte, agora em liga de alumínio. A fim de possibilitar o melhor aproveitamento possível da energia eólica independente do regime de ventos da região, também foi imaginada a criação de novas peças mecânicas que permitissem modificar a disposição das turbinas para que melhor se encaixassem para diversos locais diferentes. O motor foi substituído por um de menor torque, porém com potencial de geração de energia elétrica similar. Anteriormente o sistema multiplicador de rotação era em conjunto com o gerador, e, devido aos problemas apresentados, optou-se pela construção de um sistema multiplicador de rotações por correia de forma separada do gerador elétrico e dimensionado especificamente para o aerogerador.

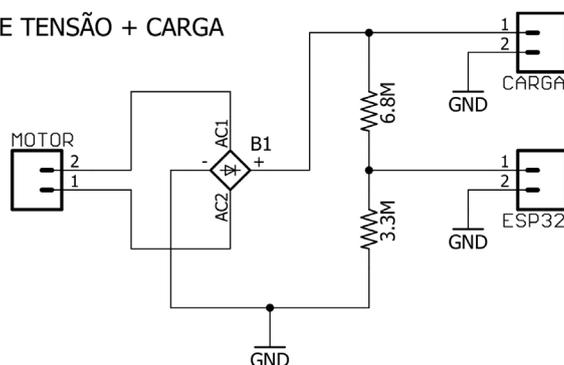
DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Em substituição ao uso do multímetro digital para realização da leitura dos parâmetros do aerogerador, principalmente por não ser possível realizar a armazenagem dos dados lidos para posterior processamento, foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados que captura as informações de tensão, corrente e rotação da turbina. Esse sistema de aquisição foi implementado em um microcontrolador ESP32, modelo DEVKIT V1. Para compatibilizar a tensão medida com a entrada analógica do microcontrolador, foi montado um divisor resistivo em paralelo com a conexão para a carga. Foi introduzido ao circuito uma ponte retificadora para

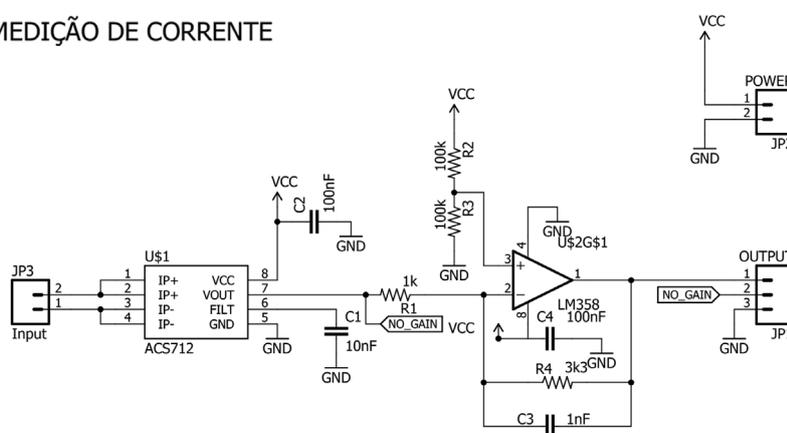


que a tensão produzida pelo gerador elétrico não tenha sua polaridade invertida quando a rotação da turbina alterar de sentido, assim evitando danos ao equipamento conectado. A medição da corrente fornecida foi realizada pelo sensor ACS712-5A em série com o circuito de carga. Sendo assim, seu valor só é mensurado quando houver uma carga conectada ao sistema. O valor lido é convertido em um sinal de tensão proporcional à intensidade da corrente elétrica. Um circuito amplificador de sinal com ganho de 3,3 foi acoplado à saída do sensor para melhorar a relação sinal/ruído. O diagrama de todos os circuitos utilizados pode ser visualizado na Figura 8.

DIVISOR DE TENSÃO + CARGA



MEDIÇÃO DE CORRENTE



SENSOR DE ROTAÇÃO

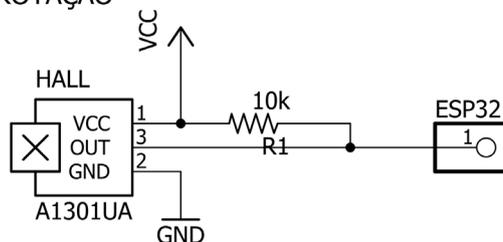


figura 8. Diagrama dos circuitos de medição.

O circuito divisor de tensão junto à conexão da carga foi confeccionado em uma placa universal. O circuito medidor de corrente foi feito em



máquinas especializadas para confecção de placas de circuito impresso, conforme pode ser visto na Figura 9.

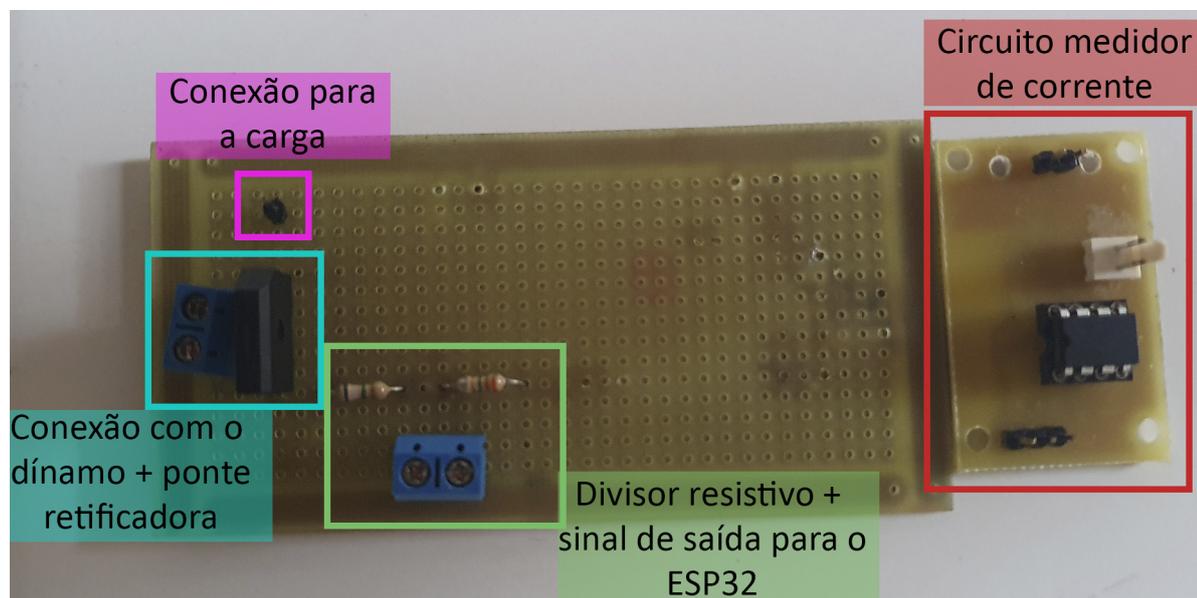


figura 9. Circuitos de Medição de Tensão e Corrente Confeccionados.

A calibração dos sensores foi realizada utilizando uma fonte de bancada e um multímetro calibrado e certificado da marca Keysight modelo U1233A. Os dados adquiridos foram ajustados para uma equação de reta por apresentarem um padrão linear de dispersão. Com o auxílio do *software* Origin 7.0, foi possível obter os valores de calibração de tensão (Equação 5) e da corrente (Equação 6), onde x representa o valor de contagem do A/D do ESP32.

$$V = 0,00313x + 1,94906 \quad (5)$$

$$A = 0,47781x - 1307,69951 \quad (6)$$

O sistema desenvolvido para medir a rotação da turbina é composto por um sensor de efeito hall modelo S41 605-LF, fixado na caixa azul acoplada à estrutura mecânica do aerogerador e um ímã acoplado na borda da turbina (Figura 10).

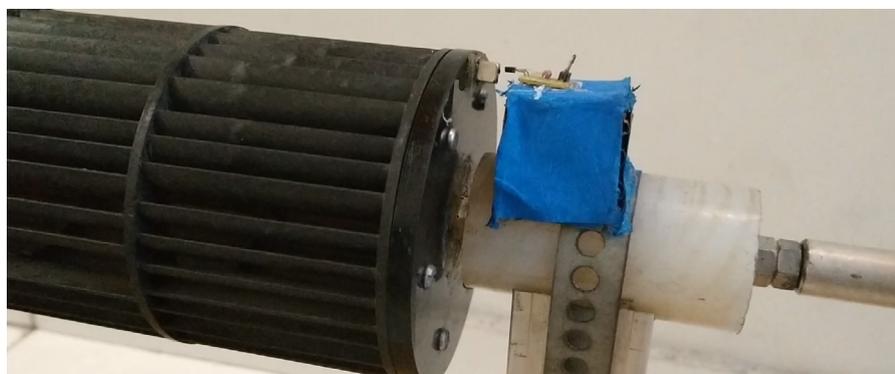


figura 10. Sistema de medição da velocidade de rotação da turbina.



A visualização dos dados adquiridos foi realizada através do recurso monitor serial da plataforma Arduino IDE (*Integrated Development Environment*). A Tabela 2 apresenta as informações adquiridas exemplificando as medições feitas no local de instalação.

Horário	Potência (mW)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Velocidade de Rotação (rpm)	Velocidade Linear (cm/s)
12:12:31,813	0,00	0,00	0,00	86,21	48,30
12:12:31,850	0,00	0,00	0,00	86,21	48,30
12:12:32,380	0,00	0,00	1,00	111,11	62,25
12:12:32,415	0,00	0,00	0,00	111,11	62,25
12:12:32,907	0,00	0,00	0,05	125,79	70,47
12:12:32,907	0,00	0,00	0,05	125,79	70,47
12:12:33,364	0,00	0,00	0,53	133,33	74,70
12:12:33,399	0,00	0,00	0,53	133,33	74,70
12:12:33,781	0,00	0,00	2,44	145,99	81,79
12:12:33,815	0,00	0,00	2,44	145,99	81,79
12:12:34,169	0,00	0,00	5,30	164,84	92,35
12:12:34,203	0,00	0,00	5,30	164,84	92,35
12:12:34,518	7,63	1,97	3,87	187,50	105,04
12:12:34,518	7,63	1,97	3,87	187,50	105,04
12:12:34,839	3,00	2,03	1,48	202,02	113,18
12:12:34,839	3,00	2,03	1,48	202,02	113,18
12:12:35,119	5,08	2,08	2,44	212,01	118,78
12:12:35,119	5,08	2,08	2,44	212,01	118,78
12:12:35,405	0,00	2,13	0,00	219,78	123,13
12:12:35,405	0,00	2,13	0,00	219,78	123,13
12:12:35,689	0,00	2,20	0,00	229,01	128,30
12:12:35,689	0,00	2,20	0,00	229,01	128,30
12:12:35,971	0,00	2,19	0,00	229,89	128,79
12:12:35,971	0,00	2,19	0,00	229,89	128,79
12:12:36,250	0,00	2,12	0,00	223,05	124,96
12:12:36,250	0,00	2,12	0,00	223,05	124,96



Horário	Potência (mW)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Velocidade de Rotação (rpm)	Velocidade Linear (cm/s)
12:12:36,528	0,00	2,09	0,00	216,61	121,35
12:12:36,528	0,00	2,09	0,00	216,61	121,35
12:12:36,813	0,00	2,11	0,00	212,77	119,20
12:12:36,850	0,00	2,11	0,00	212,77	119,20
12:12:37,128	0,00	2,05	0,00	206,19	115,51

tabela 2.
Estruturação dos dados lidos utilizando a IDE Arduino.

Após a realização dos testes, os dados são salvos e posteriormente importados para o software Excel para tratamento, cálculo e criação dos gráficos característicos de aerogeradores.

MODELAGEM DE MELHORIAS E SIMULAÇÕES DE FLUXO

Antes de confeccionar os equipamentos previstos no plano de melhorias, foi feita a modelagem 3D utilizando o software SolidWorks 2019 SP1. Uma das melhorias planejadas é o aumento da versatilidade de instalação do aerogerador, tornando-o adaptável a diversos perfis de vento. Para tal, foi projetado um rearranjo da disposição das turbinas no formato série ou paralelo (Figura 11). Além disso, as características construtivas do sistema de fixação do protótipo permitiram instalar as turbinas captadoras nas posições vertical ou horizontal.

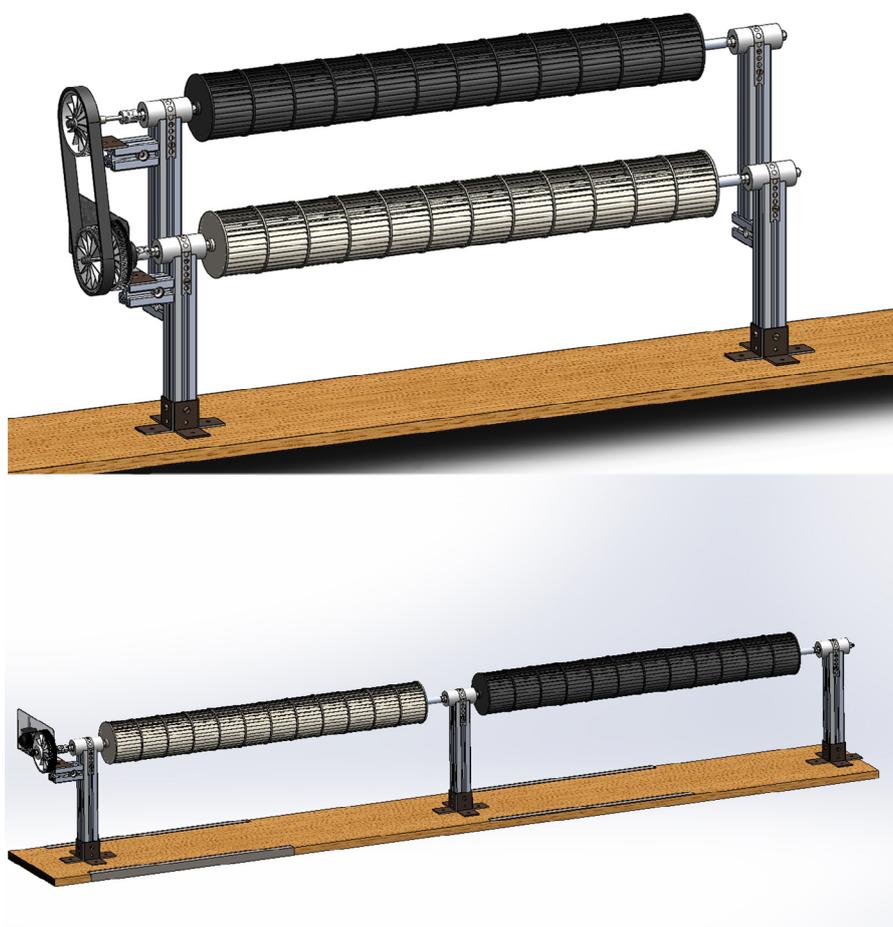


figura 11.
Aerogerador nos
arranjos série
e paralelo.

Com o protótipo finalizado, fez-se a modelagem do edifício escolhido como local de instalação e a simulação da dinâmica dos ventos na região. Os dados coletados durante a etapa de escolha do local de instalação foram utilizados para configurar o perfil de vento no simulador. Demais informações tais como umidade e pressão foram definidas com base nos dados disponíveis do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Através da simulação, foi possível estimar as zonas de alta pressão e a altura em relação ao parapeito que apresenta o fluxo de ar mais intenso. Como pode ser visualizado na Figura 12, o local atual, embora se encontre em uma zona satisfatória de pressão, está acima do fluxo de maior intensidade. Portanto, antes de realizar a construção, já foi possível projetar novas melhorias, como a regulação de altura das turbinas em relação ao parapeito.

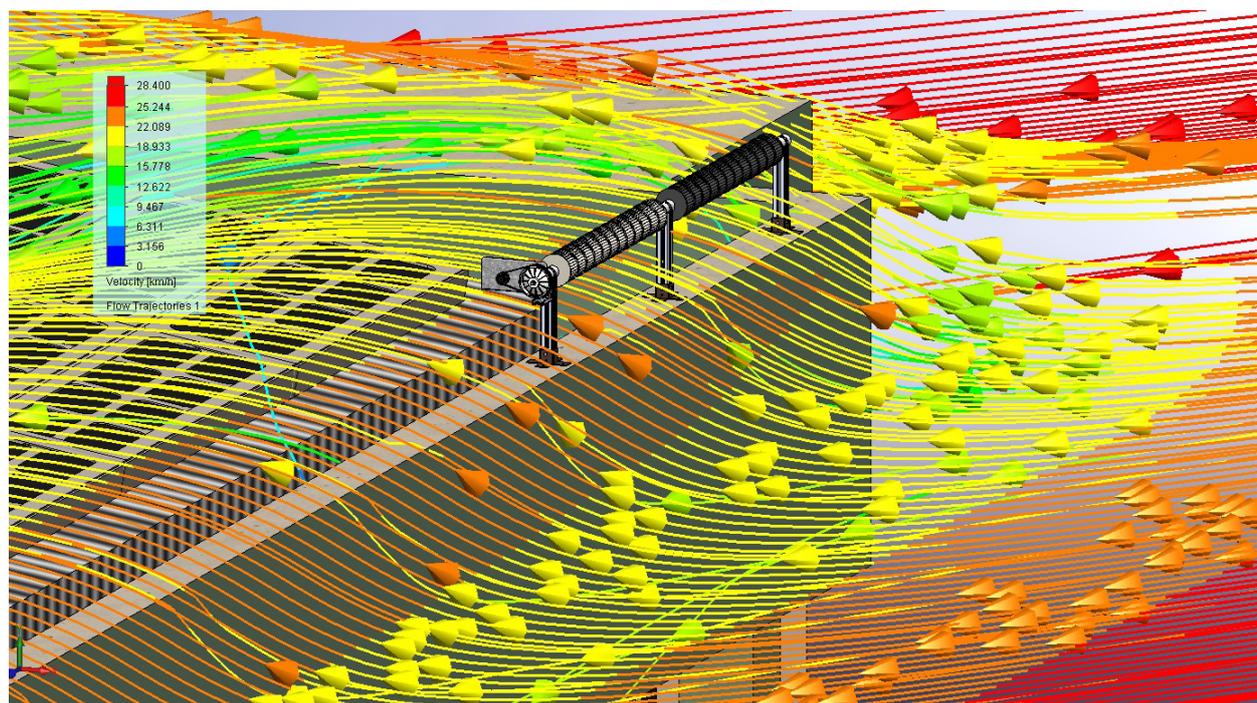


figura 12. Simulação da ação do vento no local de instalação do aerogerador.

INSTALAÇÃO DE MODIFICAÇÕES E TESTES DE DESEMPENHO

O acoplamento rígido em alumínio foi feito em um torno mecânico, também utilizado para realizar pequenos ajustes na polia dentada menor do sistema multiplicador de rotações, a fim de que se adequasse ao novo motor elétrico. Os sistemas de multiplicação e conversão de energia foram integrados e fixados à chapa de aço inoxidável e posteriormente fixada na estrutura do suporte. O protótipo finalizado pode ser visto na Figura 13.

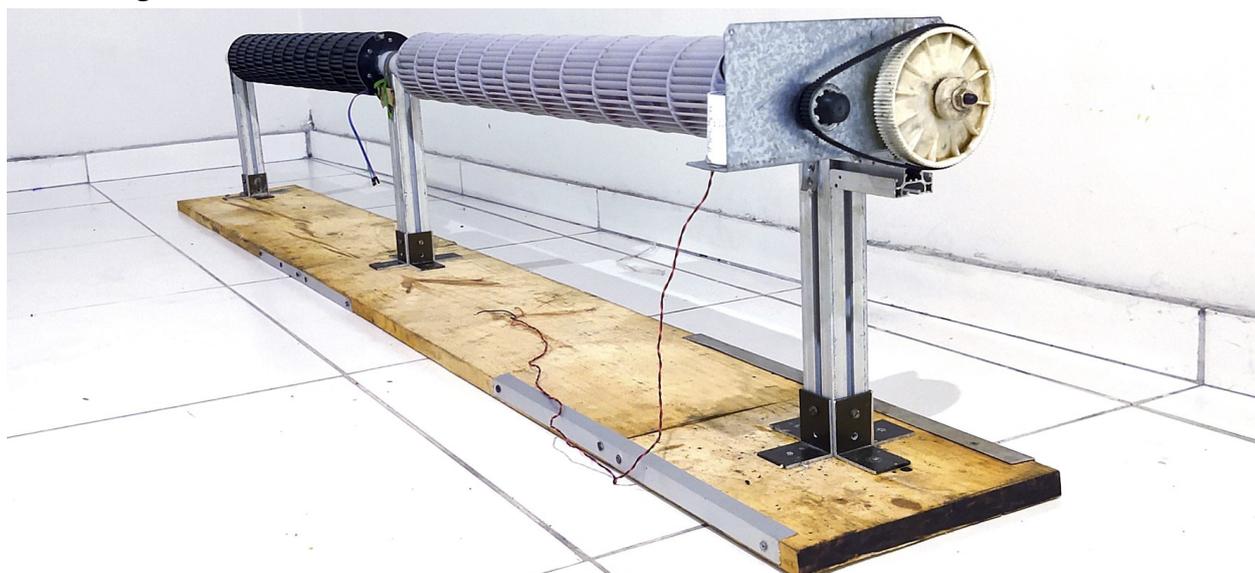


figura 13. Segunda versão do aerogerador montada.



Após finalizar a montagem e verificar a integridade estrutural do protótipo, foram iniciados os testes em ambiente controlado. Uma furadeira foi acoplada ao eixo das turbinas captadoras para testar os acoplamentos mecânicos e o sistema de geração de energia.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

RESULTADOS DO MODELO ATUAL

A potência máxima atingida nos testes foi de 1,8 W, com velocidade de rotação das turbinas de 600 rpm, o que equivale a uma velocidade linear de 3,4 m/s. A energia fornecida pelo sistema foi capaz de carregar um aparelho celular convencional e acender uma trilha de 29 LEDs de alto brilho, com potência individual de aproximadamente 6mW. O resultado geral dos testes em ambiente controlado está representado no gráfico da Figura 14, que relaciona a potência gerada e o coeficiente de potência com a respectiva velocidade de rotação da turbina.

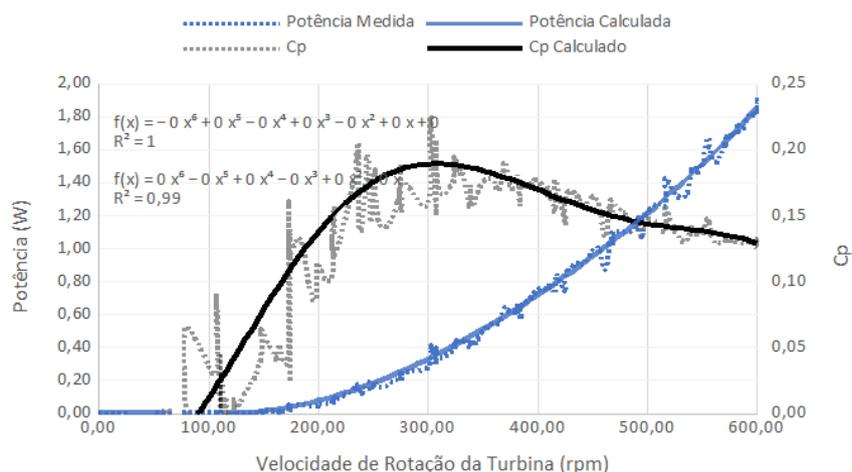


figura 14. Curva de potência e Cp do novo aerogerador.

O máximo valor do coeficiente de potência, desconsiderando os picos, foi de 19%, atingido com $P_{turbina} = 3,38$ W e $P_{gerador} = 0,64$ W. Em comparação com o gráfico da Figura 15, que representa a curva padrão de desempenho de aerogeradores comerciais, percebe-se a similaridade de comportamento dos dois aerogeradores, demonstrando que a curva de potência do protótipo desenvolvido está dentro do esperado. Vale ressaltar que o AERONAR não possui limitador de velocidade, portanto não apresenta a faixa fixa de potência após um certo valor de rotação das turbinas como um aerogerador convencional possui.

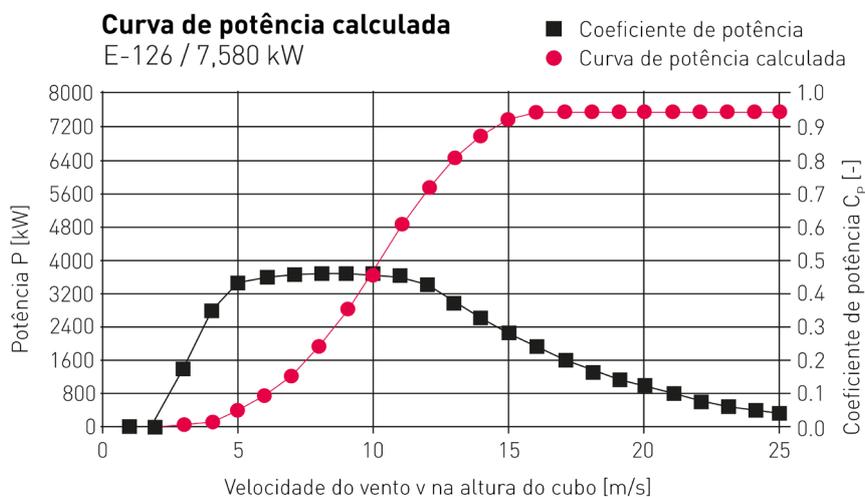


figura 15. Curva de potência e C_p de um aerogerador comercial.

Por serem compactos, é possível instalar múltiplos aerogeradores em um só edifício. Como visto na Figura 16, apenas uma das laterais do prédio escolhido como local de instalação é capaz de comportar 8 aerogeradores, aumentando a potência máxima de 1,8 W para 14,4 W. Além disso, devido ao seu design discreto, não causa poluição visual.

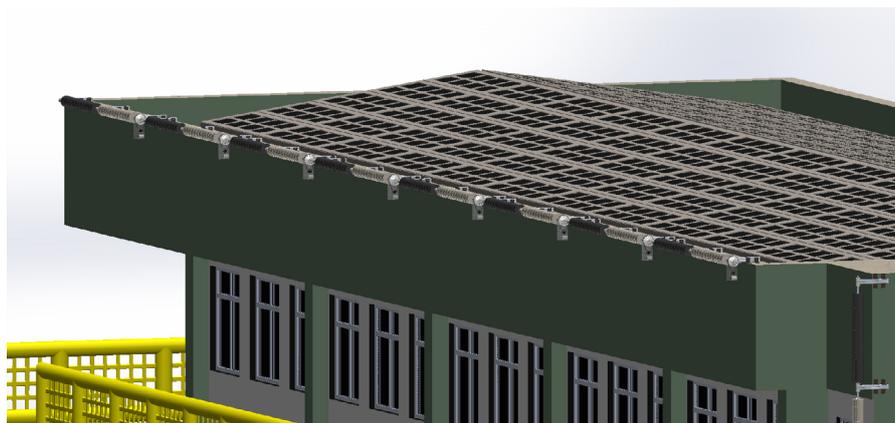


figura 16. Aerogeradores em cadeia ao longo do prédio.

Como o protótipo permite 6 modos diferentes de instalação, torna-se adaptável para diferentes perfis de vento, facilitando sua instalação em diferentes regiões, como visto na Figura 17.

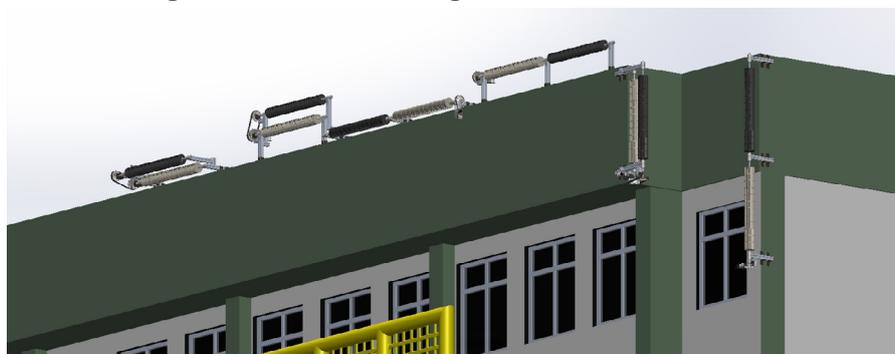


figura 17. Diferentes modos de instalação do aerogerador.



COMPARAÇÕES COM O MODELO ANTERIOR

A versão anterior do aerogerador produzia uma potência máxima de 1,2 W, e para isso necessitava de uma rotação de 1250 rpm, equivalente a uma velocidade linear da turbina de 7 m/s. A velocidade do vento necessária para atingir essa velocidade foi 20 m/s, estimada com base no coeficiente de potência geral calculado para a versão anterior. Devido às políticas de isolamento social em decorrência da doença de COVID-19, uma infecção respiratória causada pelo Coronavírus da Síndrome Respiratória Aguda Grave (SARS-CoV-2), ainda não foi possível realizar os testes do aerogerador no local real de instalação. No dia 11 de março de 2020, por conta da sua alta taxa de transmissão, a Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou a COVID-19 como uma pandemia (PEREIRA, et al., 2020 apud SCHUCHMANN et al., 2020). Com a implementação de políticas de quarentena visando reduzir o contágio pelo vírus, o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Campus de Salvador, teve suas atividades presenciais suspensas, assim impossibilitando o acesso aos materiais necessários e demais recursos que os autores do presente artigo poderiam dispor para efetuar novas modificações no protótipo. Sendo assim, a versão atual não pode ser instalada no prédio escolhido. Portanto, não foi possível estimar a velocidade de vento necessária para atingir a potência máxima do aerogerador.

O modelo atual, além de ter apresentado um ganho de aproximadamente 167% na potência máxima, atingiu o valor anterior, de 1,2 W, com 504 rpm, ou seja, aproximadamente 2,5 vezes menor que a rotação necessária anteriormente. A Figura 18 mostra a comparação entre as duas versões e a potência gerada por cada uma. A diferença entre a inclinação das curvas torna notório o impacto dos aprimoramentos no aumento da eficiência do protótipo.

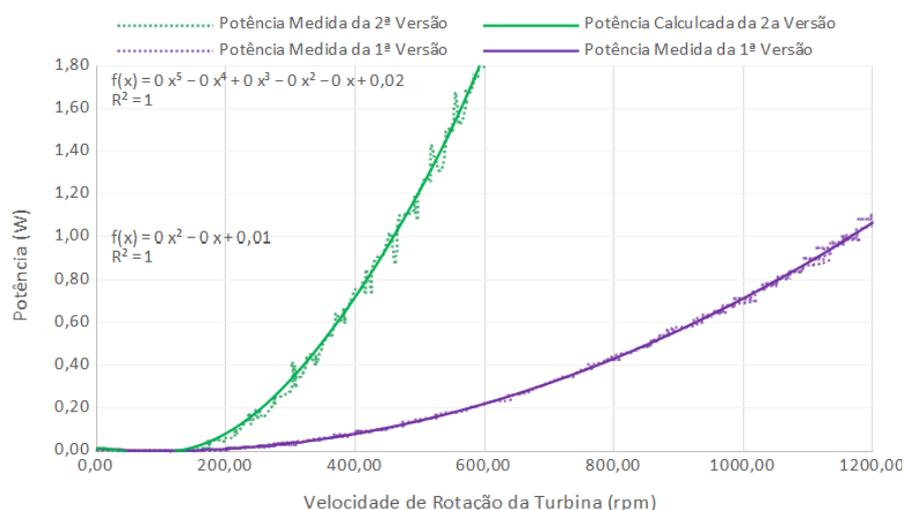
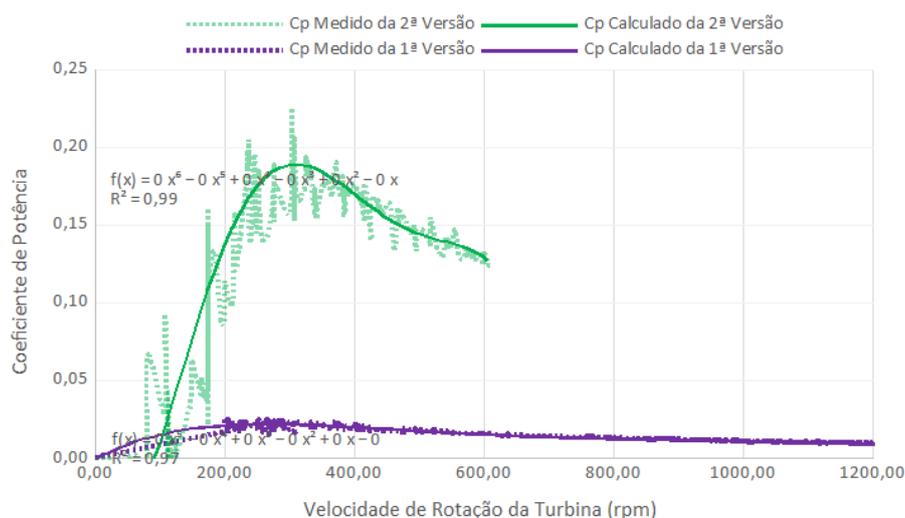


figura 18. Comparação da curva de potência entre as duas versões do aerogerador.



Em relação ao coeficiente de potência, o modelo anterior possuía eficiência máxima de 2%, referente apenas ao aproveitamento da potência disponível na turbina. Como visto na seção 4.1, o C_p máximo dessa etapa aumentou para 19%. No gráfico da Figura 19 é apresentada a comparação entre as duas versões do aerogerador conforme o aumento da rotação das turbinas. É possível perceber que mesmo a uma velocidade de rotação baixa, isto é, inferior a 200 rpm, o novo aerogerador já ultrapassa o valor máximo do coeficiente de potência do protótipo anterior.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por impactar diretamente na redução do descarte indevido do plástico e no desenvolvimento do setor de energias renováveis, o protótipo está em consonância com a geração de energia limpa e acessível e o desenvolvimento de cidades e comunidades sustentáveis, ambos objetivos do desenvolvimento sustentável da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2021).

É notório que através das melhorias implementadas, houve um ganho expressivo na eficiência do aerogerador, tornando sua implementação mais viável. Além disso, o uso de peças recicladas não demonstrou impactar no desempenho do modelo. O desenvolvimento desse protótipo, principalmente pelo fato de explorar um fenômeno pouco utilizado para geração de energia eólica, que é o fluxo laminar ao redor dos prédios, contribui para a popularização de modelos de aerogeradores especialmente para áreas urbanas, principalmente pela possibilidade de instalar diversos destes em um só prédio ou residência, apresentar baixo ruído e não poluir visualmente o ambiente. O sistema de medição de variáveis demonstrou eficiência e se tornou crucial para o monitoramento do desempenho dos protótipos desenvolvidos. Como continuidade deste



trabalho de pesquisa, pretende-se desenvolver um conversor analógico-digital externo ou desenvolver uma etapa de condicionamento de sinal antes da entrada analógica do microcontrolador ESP32 para melhorar ainda mais a relação sinal/ruído.

Dando continuidade ao processo de melhoria contínua, novos pontos de aprimoramento estão sendo pensados, como, por exemplo, o desenvolvimento de um gerador elétrico a partir de motores de ventiladores de teto, por apresentarem maior potencial de geração elétrica e menor torque. Também se planeja o desenvolvimento de uma interface web que irá fornecer os valores das variáveis monitoradas e assim possibilitar a consulta dos dados do aerogerador em tempo real.

Espera-se que a utilização deste aerogerador, em larga escala e que a longo prazo, poderá beneficiar diversas famílias ao possibilitar uma redução da conta de energia fornecida pela concessionária local além de contribuir na reciclagem de plástico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEEÓlica. **Boletim Anual de Geração Eólica de 2018**. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf> Acesso em: 02 jun. 2020.
- AEROVIRONMENT. **AeroVironment Awarded Patents for Architectural Wind(R) Building-Integrated Energy Generation System**. Disponível em: <<https://investor.avinc.com/news-releases/news-release-details/aerovironment-awarded-patents-architectural-windr-building>>. Acesso em: 19 jul. 2020.
- ARAGÃO, Moniz de; LEÃO, Marcelo. **Forças devidas ao vento em edificações**, 2013. 47 slides. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/metallica/estruturas_metalicas_2013_3.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2020.
- AMARANTE, Odilon; ZACK, Michael; SÁ, Antonio. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: CEPEL, 2001. 47 p. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2020.
- DUTRA, Ricardo. **Energia Eólica: Princípios e tecnologias**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2020.
- ENERCON. **E-82 Wind Turbine**. Disponível em: <<https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-82/>>. Acesso em: 03 jun. 2020.



GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna; LAW, Kara. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, jul. 2017. Disponível em: <https://advances.sciencemag.org/content/3/7/e1700782>. Acesso em: 02 jun. 2020.

GRAHAM, Michael. **Urban Modular Architectural Wind Power Microturbines!** Disponível em: <<https://www.treehugger.com/sustainable-product-design/urban-modular-architectural-wind-power-microturbines.html>> Acesso em: 03 jun. 2020.

LAZZARINI, Victor. **Elementos de Acústica**. Apostila do Departamento de Artes da UEL, Londrina, 1998. Disponível em: <https://www.fisica.net/ondulatoria/elementos_de_acustica.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2020.

MONTEIRO, Marco Aurélio (org.). **Ciências da Natureza: Física**. 2. ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2016. Disponível em: <https://www2.unesp.br/Home/servico_ses/caderno_fisica.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2020.

NASCIMENTO, Breno Matias et al. Abordagem didática e prática da ação do vento em edificações. In: **Anais do Sétimo Congresso Latino-Americano da Construção Metálica**. São Paulo: ABCEM, 2016. p. 29-50. Disponível em: <<https://www.abcem.org.br/construmetal/downloads/Anais-do-7-Constumetal2016-EBook.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2020.

ORGANIZAÇÃO das Nações Unidas. **Os ODS**. Disponível em: http://www.agenda2030.org.br/os_ods/. Acesso em: 27 fev. 2021.

PEREIRA, Maria, et al. The COVID-19 pandemic, social isolation, consequences on mental health and coping strategies: an integrative review. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, e652974548, 2020. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4548>.

SCHUBEL, Peter; CROSSLEY, Richard. Wind Turbine Blade Designs. **Energies**, v. 5, n. 9, p. 3425-3449, set. 2012. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/5/9/3425>. Acesso em: 03 jun. 2020.

WORLD Wide Fund for Nature. **Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico**. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>> Acesso em: 02 jun. 2020.



VICTOR DE ANDRADE GOMES

Cursou o Técnico em Automação Industrial Integrado ao Ensino Médio no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Campus de Salvador (2016-2020). Membro do Grupo de Pesquisa em Sistemas Embarcados, Controle e Eficiência Energética (GSECEE) também do IFBA, onde desenvolveu projetos científicos na área de robótica e energias sustentáveis. Atualmente, é estagiário técnico na área de Instrumentação Industrial na Braskem S/A.

EMERSON SILVA DA ROCHA

Cursou o Técnico em Automação Industrial Integrado ao Ensino Médio no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Campus de Salvador (2016-2020). Membro do Grupo de Pesquisa em Sistemas Embarcados, Controle e Eficiência Energética (GSECEE) também do IFBA, onde desenvolveu projetos científicos na área de robótica e energias sustentáveis. Atualmente cursa Engenharia Elétrica Industrial, também no IFBA – Campus de Salvador, (2020-2026) e atua como técnico de instrumentação na Unigel.

VITOR LEÃO FILARDI

Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica pela Escola de Engenharia de Lins (2001) e mestrado e doutorado em Engenharia Mecatrônica pela Universidade Federal da Bahia (2006) e (2016), respectivamente. Foi professor e coordenador de Engenharia Mecatrônica da Faculdade de Ciência e Tecnologia (2008). Foi professor da Universidade Estadual de Feira de Santana (2009). Atualmente é pesquisador da Universidade Federal da Bahia pelo LaPO (Laboratório de Propriedades Óticas) e Professor DE no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), onde é líder do Grupo de Pesquisa em Sistemas Embarcados, Controle e Eficiência Energética (GSECEE).

- submetido** 31.07.2020 **Contribuição de autoria.** Victor de Andrade Gomes e Emerson Silva da Rocha participaram da elaboração do estudo, da investigação de dados, do levantamento bibliográfico e da redação do artigo. Vitor Leão Filardi orientou todas as etapas e participou da revisão final e da edição do artigo.
- reapresentado** 31.10.2020 **Licença de uso.** Este artigo está licenciado sob a Licença Creative Commons CC-BY. Com essa licença você pode compartilhar, adaptar, criar para qualquer fim, desde que atribua a autoria da obra.
- aprovado** 20.12.2020