

Tecnologia Educacional Aplicada à Energia Eólica: Protótipo de Anemômetro com Hélices Horizontais Assistido por Arduino

Mailson Piedade dos Santos¹, Helen Santos do Espirito Santo¹, Maiana Brito de Matos¹

¹Instituto de Ciência, Tecnologia e Inovação – Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Rua do Telégrafo, S/N, Centro - Camaçari - BA - Brasil

{mailson.piedade,helenses,maiana.matos}@ufba.br

Abstract. *The work aims to develop a teaching kit, a horizontal propeller anemometer, to assist in teaching wind energy to high school students. To this end, the propellers were modeled and designed using the Tinkercad tool and printed on a 3D printer. The project uses the Hall effect sensor module, through a magnetic field, to infer the rotations originating from the shells in relation to the wind speed and Arduino Uno R3 to interpret the calculations and represent them on the 16x2 LCD display in km/h and m/s. As a result, the objective is to also address, in an interdisciplinary way, contents of physics, basic electronics and programming, which are relevant to the prototype, in order to solidify the learning process in technological solutions.*

Resumo. *O trabalho visa o desenvolvimento do kit didático, anemômetro de hélices horizontais, com o intuito de auxiliar no ensino em energia eólica, para alunos do ensino médio. Para tal, as hélices foram modeladas e projetadas utilizando a ferramenta Tinkercad e impressas em impressora 3D. O projeto utiliza o módulo sensor de efeito Hall, através de campo magnético, para inferir as rotações oriundas das conchas diante da velocidade do vento e Arduino uno R3, para interpretar os cálculos e representá-las no display LCD 16x2 em km/h e m/s. Como resultado objetiva-se, de forma interdisciplinar, também abordar conteúdos da física, eletrônica básica e programação, que são pertinentes ao protótipo, de modo a tornar sólido o processo de aprendizagem em soluções tecnológicas.*

1. Introdução

Noorellahi, Yousefi e Mohammadi (2015) destacam que os dados anemométricos do vento são fundamentais para avaliar a viabilidade de projetos eólicos, pois fornecem informações essenciais sobre o potencial eólico da região. Além disso, ao integrar esses dados com sistemas de informação geográfica (GIS), é possível analisar conjuntamente as características do vento e as condições do terreno, o que auxilia na determinação do posicionamento ideal das turbinas e na otimização do planejamento do parque eólico, contribuindo para a redução de riscos técnicos e impactos ambientais.

A utilização de dados anemométricos configura-se como etapa basilar no planejamento e na viabilidade técnico-operacional de projetos eólicos, ao permitir a caracterização precisa do regime eólico local. A instrumentação utilizada compreende sensores como anemômetros de copo, hélice, fio quente, pressão e ultrassônicos, cada qual apropriado a distintas condições de medição. Os anemômetros de hélice, por sua

vez, destacam-se por captar a componente vertical do vento, sendo especialmente úteis na análise de turbinas de eixo vertical (VAWTs), ao fornecerem uma leitura tridimensional do fluxo atmosférico.

Nesse contexto, a concepção da infraestrutura de parques eólicos, sejam onshore ou offshore, deve contemplar as especificidades do vento, da morfologia do terreno e do uso do solo. Conforme argumentam Pereira et al., (2023), a estimativa da contribuição das fontes eólicas no planejamento energético exige a consideração de variáveis como densidade de potência eólica, disponibilidade do recurso e capacidade de integração sistêmica. A escolha entre arranjos onshore e offshore envolve critérios técnicos, econômicos e ambientais, sendo que o segundo, embora mais oneroso, apresenta maior potencial instalado e menor interferência visual.

Outrossim, a articulação entre medições anemométricas de alta acurácia e decisões tecnológicas assertivas é determinante para o desempenho global dos projetos. Suárez e Ramírez (2016) ressaltam que as turbinas de eixo vertical (TEVs) operam autonomamente quanto à direção do vento, dispensando mecanismos de orientação, o que as tornam adequadas para áreas urbanas e ventos turbulentos. Em contraste, turbinas de eixo horizontal (HAWTs), movidas por forças de sustentação (lift) e forças de arrasto (drag), são mais eficientes sob regime laminar e, portanto, preferíveis em contextos de campo aberto (Gomes da Silva, 2014, p. 8).

O projeto é pautado na prática experimental e visa aplicar os conceitos quanto ao funcionamento do anemômetro, peça fundamental utilizada em aerogeradores para medir a velocidade e o sentido da direção do vento. Para isso, auxiliando no ensino de energia eólica nas escolas, ensino médio, de forma interdisciplinar, o protótipo aborda conceitos da física, matemática, eletrônica básica e programação. Ademais, possibilita a medição da velocidade dos ventos, utilizando módulo sensor de efeito Hall, diante as rotações das conchas e variação do campo magnético, contudo, interpretado pelo Arduino para realizar os cálculos em rotações por minuto (RPM) e representar no display (LCD) 16x2 em km/h e m/s. Portanto, vale ressaltar que empregar a prática experimental juntamente com a teoria, tem um impacto assertivo no ensino.

2. Metodologia

Para construção do protótipo, oriundo no kit didático do anemômetro, baseado no monitoramento em tempo real da velocidade do vento, foram utilizados os materiais conforme relacionados na (Tabela 1):

Tabela 1. Lista de materiais para construção do projeto

Qtd	Material	Qtd	Material	Qtd	Material	Qtd	Material	Qtd	Material	Qtd	Material
01	Rolamento 6004-2RS 20mm x 42mm x 12mm	01	Tubo de PVC 20 mm x 25 cm	02	Cap de 20 mm PVC	01	Tê de 20mm PVC	02	Joelhos 20 mm 90° PVC	04	Tubo de PVC 20 mm x 6 cm
01	Placa Arduino Uno R3	01	Protoboard	02	Resistores 150 Ω	02	LEDs	01	Potenciômetro Linear 10 K Ω	01	Display LCD 16X2 (verde)
01	Módulo Sensor de Efeito Hall 3144	01	Imã Neodímio	01	Hélices com 3 conchas	01	Hélices com 4 conchas	01	Fita dupla face de isopor	01	Caixa MDF 20x20 cm

Os materiais supracitados são de baixo custo, o que torna a montagem do protótipo acessível e de fácil aplicação em escolas da rede pública-privada, para auxiliar na compreensão acerca dos conceitos aplicados em energia eólica, além de propor conceitos físicos, matemáticos, eletrônica e programação, possibilitando o aprendizado interdisciplinar.

3. Procedimento de Montagem

Na sequência, foi realizado o procedimento de montagem do anemômetro rotacional, que é um dos mais simples quanto sua montagem, pois possui suas conchas anexadas em eixos horizontais que giram conforme os ventos agem sobre elas obtendo-se rotações (Pinto, 2006).

A estrutura do protótipo (Figura 1), tem um tamanho pequeno que facilita no manuseio e transporte, fixado perpendicular à sua base em formato da letra “Z” que garante uma maior estabilidade quando em utilização. Deste modo, o anemômetro é dividido em três partes, no qual são os captadores de vento, que chamamos de “conchas” pelo seu formato que assemelha-se a tal material, o suporte conectado no rolamento e a base.

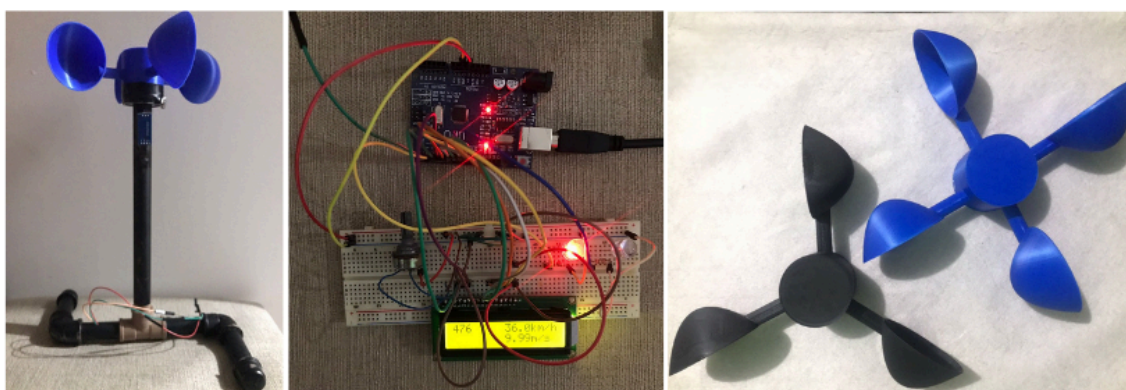


Figura 1. Anemômetro e suas configurações. Fonte: Autoria própria

Para modelar os captadores de vento, foi utilizado a ferramenta CAD (Tinkercad) com base nas seguintes dimensões: diâmetro 60 mm, altura de 28 mm, espessura de 3 mm e profundidade 25 mm, bem como confeccionados mediante impressão 3D. O suporte que está acoplado no rolamento tem diâmetro de 44 mm e altura de 45 mm. Contudo, os eixos têm diâmetro 10 mm e comprimento 35 mm, no

qual usamos 5 mm fixo no suporte do rolamento. O apoio perpendicular que conecta-se ao rolamento tem 25 cm e a base, de uma extremidade a outra, contém 24 cm.

Os captadores têm volume de aproximadamente $12,32 \text{ cm}^3$ cada. Para realizar o cálculo do volume do sólido de revolução, utilizou-se o método dos discos. Considerando-se a função sendo $f(x) = \sqrt{x}$ e x variando de 0 a 2,8, rotacionando a curva \sqrt{x} em torno do eixo x , obtém-se o volume. Para o volume, utilizando o método dos discos, tem-se a equação (1):

$$V = \Pi \int_a^b f(x)^2 dx \quad (1)$$

Utilizando a função \sqrt{x} na equação (1) e os limites de variação em x de (0 a 2,8), que refere-se a altura da concha em cm, tem-se a relação:

$$V = \Pi \int_0^{2,8} (\sqrt{x})^2 dx \quad (2)$$

Simplificando a equação (2), obtém-se a equação (3):

$$V = \Pi \int_0^{2,8} x dx \quad (3)$$

Nesse sentido, calculando a primitiva de x , temos:

$$V = \Pi \frac{x^2}{2} \Big|_0^{2,8} \Rightarrow \Pi \left(\frac{2,8^2}{2} - \frac{0^2}{2} \right) \Rightarrow \Pi(3,92 - 0) \quad (4)$$

De acordo com a equação (4), tem-se que o volume das conchas obtidas são:

$$V = 3,92\Pi \text{ u. v} = 12,32 \text{ cm}^3 \quad (5)$$

Com a estrutura do anemômetro montada e todas as conexões estabelecidas, acoplou-se o ímã neodímio no captador de vento. Quando o módulo sensor de Efeito Hall, fixado no apoio vertical, identificar o ímã no rolamento perante o campo magnético produzido, obtém-se uma diferença de potencial proporcional à intensidade do campo magnético (Young; Freedman, 2015). Para além, com a variação no campo magnético, o sensor Hall atuante na presença do ímã, apresenta o estado lógico 0, interpretado pelo Arduino Uno, aciona o LED azul de 10 mm de diâmetro e, por outro lado, na ausência do campo magnético, o sensor apresenta o estado lógico 1, acendendo o LED vermelho (Soares et al., 2021). Conforme as rotações das conchas e variação do campo magnético, são calculados os RPMs (rotações por minuto) e apresentado em tempo real a velocidade do vento em km/h e m/s no display LCD 16x2 conectado ao Arduino.

4. Resultados

Apresentam-se a seguir os dados experimentais obtidos com os anemômetros de três e quatro conchas, submetidos a distintos estágios de velocidades do ventilador. De acordo com a Tabela 2, no modelo com quatro conchas, as velocidades médias aferidas foram de 1,86 m/s, 2,02 m/s e 3,03 m/s nos três estágios de ventilação, com baixos desvios padrão, o que indica estabilidade e reprodutibilidade das medições.

Tabela 2. Velocidade do Vento (Anemômetro) - 4 Conchas

Sequência	RPM	Tempo (s)	Distância do ventilador até o anemômetro (m)	Velocidade do vento (m/s)	Velocidade do vento (km/h)	Média (m/s)	Desvio Padrão (σ)	Estágio de velocidade do ventilador
1	78	60 \pm 0,01	0,77 \pm 0,0005	1,65	5,97	1,86	0,21	1
2	98	60 \pm 0,01	0,67 \pm 0,0005	2,07	7,48			
3	76	60 \pm 0,01	0,77 \pm 0,0005	1,61	5,82	2,02	0,41	2
4	115	60 \pm 0,01	0,67 \pm 0,0005	2,43	8,76			
5	124	60 \pm 0,01	0,77 \pm 0,0005	2,62	9,44	3,03	0,41	3
6	163	60 \pm 0,01	0,67 \pm 0,0005	3,43	12,3			

Em contraste, a partir da Tabela 3, o anemômetro de três conchas apresentou valores médios superiores — 5,52 m/s, 6,72 m/s e 9,67 m/s — acompanhados de maiores dispersões, sugerindo maior responsividade ao fluxo de ar, porém com menor constância.

Tabela 3. Velocidade do Vento (Anemômetro) - 3 Conchas

Sequência	RPM	Tempo (s)	Distância do ventilador até o anemômetro (m)	Velocidade do vento (m/s)	Velocidade do vento (km/h)	Média (m/s)	Desvio Padrão (σ)	Estágio de velocidade do ventilador
1	64	60 \pm 0,01	0,77 \pm 0,0005	1,36	4,91	5,52	0,61	1
2	80	60 \pm 0,01	0,67 \pm 0,0005	1,70	6,12			
3	74	60 \pm 0,01	0,77 \pm 0,0005	1,57	5,66	6,72	1,06	2
4	102	60 \pm 0,01	0,67 \pm 0,0005	2,16	7,78			
5	112	60 \pm 0,01	0,77 \pm 0,0005	2,37	8,53	9,67	1,14	3
6	142	60 \pm 0,01	0,67 \pm 0,0005	2,99	10,80			

Portanto, a análise dos dados evidencia correlação direta entre o aumento da rotação (RPM) e a elevação da velocidade do vento, influenciada também pela redução da distância entre o ventilador e o anemômetro. Entretanto, infere-se que a geometria do anemômetro impacta significativamente seu desempenho: enquanto o modelo de três conchas oferece maior sensibilidade, o de quatro conchas assegura maior regularidade, validando ambos como instrumentos eficazes para fins didáticos e experimentais.

5. Considerações Finais

Este presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um kit didático voltado à instrução aprofundada dos princípios da energia eólica, por meio da concepção e instrumentação de anemômetros com configurações de três e quatro conchas, projetados em ambiente CAD e fabricados por impressão 3D. A proposta visa proporcionar uma experiência prática e interdisciplinar a estudantes do ensino médio, integrando

conhecimentos de física, eletrônica e programação. O sistema é composto por um módulo sensor de efeito Hall acoplado ao microcontrolador Arduino Uno R3, responsável pela captação das rotações das hélices e pela conversão em dados de velocidade anemométrica. Alinhado às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), o projeto promove uma aprendizagem contextualizada e significativa, estimulando o pensamento crítico e a compreensão dos fundamentos da geração eólica. Dessa forma, busca-se não apenas transmitir conteúdos técnicos, mas também formar sujeitos capazes de atuar em contextos tecnológicos e sustentáveis, contribuindo para a educação voltada às energias renováveis.

6. Agradecimentos

Agradecemos a FAPESB - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia e a UFBA pelo apoio no âmbito da outorga/convênio - PIE 0008/2022 INCITE - Instituto de Ciência, Inovação e Tecnologia do Estado da Bahia.

7. Referência Bibliográfica

GOMES DA SILVA, Eduardo Ribeiro Rei. Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal. 2014. 66 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

NOORELLAHI, Y.; YOUSEFI, H.; MOHAMMADI, M.; Multi-criteria Decision Support System for Wind Farm Site Selection Using GIS. ELSEVIER – Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2015.

PEREIRA, Paula Monteiro; PONTE, Gustavo Pires da; XIMENES, Josina Saraiva; MORAES, Anderson da Costa. Eólicas onshore e offshore no planejamento energético: como estimar a contribuição das fontes. EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2023.

PINTO, Mauro Sérgio Silva. Especificações de Projeto para Medição de Velocidade de Vento Utilizando Anemômetro Ultrasônico com o Método de Diferença de Fase. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, MA, Brasil. 2006.

SOARES, Antonio Augusto et al. Polaridade magnética e sensor Hall: uma proposta de experimento para os ensinos fundamental e médio. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 43, p. e20210185, 2021.

SUÁREZ, Willmari; RAMIREZ, Ramiro G. Estudo analítico do desempenho de uma turbina de eixo vertical de pás móveis. 2016.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física III: eletromagnetismo. 14. ed. São Paulo. Pearson Education do Brasil, 2015. 470 p.