



.....

Danielle Cristina Teles Ferreira^{1,#}
Renan Souza Moura²
Marcelo Augusto Costa Vilano²
Vinicius Pedro Damasceno Lima²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Formiga, Formiga, MG, Brasil.

RESUMO

Problemas ambientais incentivam a busca por fontes de energia renováveis e limpas. É fundamental que, na escola, além de meramente apresentar essa discussão, proponha aos estudantes a criação e a imaginação de possíveis soluções para esse problema. Neste artigo, é apresentada uma proposta educacional a fim de discutir com alunos do Ensino Médio o tema geração de energia eólica, uma fonte de energia renovável. Para isso, é considerado o contexto da geração de energia eólica por meio do deslocamento de massas de ar provocado por veículos em vias de alta velocidade. Por ser um assunto cujo formalismo matemático foge do domínio de estudantes de Ensino Médio, simplificações da abordagem são utilizadas de forma que o tema possa ser ministrado em sala de aula, como um assunto interdisciplinar, envolvendo as áreas de física, matemática e eletricidade. A proposta pedagógica pode ser utilizada quando há dados experimentais disponíveis. Demonstrações da proposta pedagógica são realizadas por meio de exemplos. Por fim, as perspectivas para elaboração de projetos futuros sobre o tema são apresentadas.

Palavras-chave: ensino de física; geração de energia eólica; veículos

.....

1. Introdução

É usual que projetos pedagógicos de cursos técnicos deixem de abordar determinados assuntos por serem muito complexos, pela inexistência de uma metodologia pedagógica eficiente ou por não estarem contemplados no perfil profissional de conclusão indicado no Catálogo Nacional de Cursos Técnicos [1]. Normalmente, tais assuntos estão relacionados às novas tecnologias, como automação, inteligência artificial, uso de energias renováveis, entre outras [2], o que está em ressonância com propostas da Base Nacional Comum Curricular (2018). No entanto, essas abordagens requerem um maior tempo e esforço para que o corpo docente possa inseri-los dentro da sala de aula, já que os livros didáticos nem sempre estão devidamente atualizados ou abordam com rigor tais temas.

Dentro deste contexto, este artigo demonstrará, para educadores da área de física, formas de abordar o tema geração de energia eólica, considerando, como diferencial, que as massas de ar são provenientes da movimentação de veículos em estradas. É um tema que pode ser ministrado, dentro de uma disciplina de física, nas subáreas de hidrodinâmica, magnetismo e eletricidade.

Embora a obtenção de energia elétrica por meio de geradores eólicos não seja uma novidade, pois boa parte da energia consumida no território brasileiro é oriunda deste tipo [3]. O seu uso

em menor escala na forma de geração distribuída ou sistema isolado [4,5], que é o foco deste artigo, é um assunto que pode resolver problemas energéticos locais [6–9].

O modelo matemático apresentado neste artigo contém simplificações de forma que o conteúdo possa ser ministrado em sala de aula. Tais simplificações foram motivadas pelos trabalhos [10,11] que demonstraram como ensinar assuntos complexos de astrogeologia e física médica, respectivamente.

Todas as sugestões pedagógicas utilizadas neste artigo foram baseadas nas Teorias da Aprendizagem Significativa de Ausubel [12]. Ausubel defende uma aprendizagem por meio de experimentos científicos que possibilita a ampliação do conhecimento prévio, criando-se, assim, uma

aprendizagem de fato, ou seja, significativa.

Somado a isso, este artigo busca promover o desenvolvimento de uma abordagem pedagógica envolvendo Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). Nessa proposta, “os conceitos são sempre abordados em uma perspectiva relacional, de maneira a evidenciar as diferentes dimensões do conhecimento estudado” [13]. Algo bastante propício ao abordar uma nova proposta pra geração de energia eólica, já que ela permite o estudo de uma ciência, mais especificamente a hidrodinâmica e a eletricidade, relacionada com a tecnologia envolvida no processo de geração de energia eólica, e possibilitando um de-

Este artigo busca promover o desenvolvimento de uma abordagem pedagógica envolvendo Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). Nessa proposta, “os conceitos são sempre abordados em uma perspectiva relacional, de maneira a evidenciar as diferentes dimensões do conhecimento estudado”

#Autora de correspondência. E-mail: danielle.teles@ifmg.edu.br.

bate sobre um tema de grande impacto na sociedade e em evidência diante da atual crise energética vivenciada no Brasil [14].

Além do mais, a resolução nº 3, de 21 de novembro de 2018, que atualiza as diretrizes curriculares nacionais para o Ensino Médio, defende que o conjunto de unidades curriculares com o objetivo de proporcionar aos estudantes conhecimentos que os integrem à sociedade, de modo a capacitá-los para elaborar soluções para problemas presentes nela, devem utilizar metodologias que se organizem diante de um ou mais dos eixos estruturantes a seguir.

- I – Investigação científica: supõe o aprofundamento de conceitos fundamentais das ciências para a interpretação de ideias, fenômenos e processos para serem utilizados em procedimentos de investigação voltados ao enfrentamento de situações cotidianas e demandas locais e coletivas, e a proposição de intervenções que considerem o desenvolvimento local e a melhoria da qualidade de vida da comunidade;
- II – Processos criativos: supõem o uso e o aprofundamento do conhecimento científico na construção e na criação de experimentos, modelos, protótipos para a criação de processos ou produtos que atendam a demandas para a resolução de problemas identificados na sociedade;
- III – Mediação e intervenção sociocultural: supõem a mobilização de conhecimentos de uma ou mais áreas para mediar conflitos, promover entendimento e implementar soluções para questões e problemas identificados na comunidade;
- IV – Empreendedorismo: supõe a mobilização de conhecimentos de diferentes áreas para a formação de organizações com variadas missões voltadas ao desenvolvimento de produtos ou prestação de serviços inovadores com o uso das tecnologias (Resolução CNE/CEB nº 3/2018, Art. 12, § 2º) [15].

Além disso, a presente proposta pode até ser trabalhada de maneira interdisciplinar, junto à disciplina de matemática, tendo em vista que a BNCC, corroborando com a resolução exposta anteriormente, define como competência específica para a disciplina de matemática:

Utilizar estratégias, conceitos, definições e procedimentos

matemáticos para interpretar, construir modelos e resolver problemas em diversos contextos, analisando a plausibilidade dos resultados e a adequação das soluções propostas, de modo a construir argumentação consistente [16, p. 531].

Este artigo está dividido da seguinte forma: após uma breve introdução, a seção 2 será responsável por apresentar os conceitos teóricos fundamentais, sendo apresentadas as demonstrações para as fórmulas da velocidade do vento gerada pelo movimento de veículos e da potência de uma turbina eólica. Estas simplificações matemáticas permitem abordar o tema em sala de aula, conforme demonstrado posteriormente na seção 3. Por fim, considerações finais e trabalhos futuros são discutidos na seção 4.

2. Modelo proposto para o estudo de deslocamento de massas de ar por veículos em estradas utilizando geradores eólicos

Ao avaliar a possibilidade de apresentar esse assunto a estudantes do Ensino Médio técnico de maneira quantitativa e não apenas qualitativa, um docente de física pode se deparar com muitos desafios, tais como modelar matematicamente a geometria de um carro; a turbulência do ar; a sobreposição de movimentos de veículos na mesma direção e em direções opostas; efeitos da velocidade do vento que independem do movimento do veículo, efeitos da massa de ar refletida da turbina; e eficiência. Além do mais, entender de maneira analítica o escoamento de fluidos viscosos ainda hoje é um grande desafio para a matemática. Haja vista que a solução analítica da Equação de Navier-Stokes, que rege esses fenômenos, ainda é um problema de fronteira que não foi transposto.

Sendo assim, é proposta uma solução analítica simplificada do problema, cujo resultado final poderia ser explorado por docentes em aulas sobre o tema. Para tal, considere o deslocamento de uma esfera imersa em um fluido ideal, conforme ilustrado na Fig. 1.

Considerar o escoamento de um fluido como ideal pressupõe que o escoamento é incompressível, irrotacional e com viscosidade nula. Para efeitos práticos, todas essas considerações são adequadas ao problema, como melhor explicado nos parágrafos a seguir.

O escoamento é incompressível, o que pressupõe que há pouca ação da compressão dos fluidos no escoamento. Considera-se incompressível um escoamento ocorrido a uma velocidade de até 1/3 da velocidade do som neste fluido [17,18]. A velocidade do som no ar é 343 m/s e 1/3 desse

valor é aproximadamente 408 km/h. Logo, a aproximação do escoamento incompressível é uma boa aproximação para esse problema já que nenhum carro em qualquer via do mundo atingirá a velocidade de 408 km/h. A consequência desse tipo de escoamento é o divergente da velocidade ($\nabla \cdot u$) ser nulo e a densidade (ρ) do fluido ser constante.

Já o escoamento irrotacional ocorre quando as partículas de um fluido, numa certa região, não apresentarem rotação em relação a um eixo qualquer. A consequência desse tipo de escoamento é o rotacional da velocidade u ser nulo

O desafio do docente de física ao abordar os problemas deste artigo de maneira quantitativa reside em como abordar a modelagem matemática, a geometria de um carro, a sobreposição de movimentos de veículos na mesma direção e em direções opostas e a eficiência do processo, dentre outros

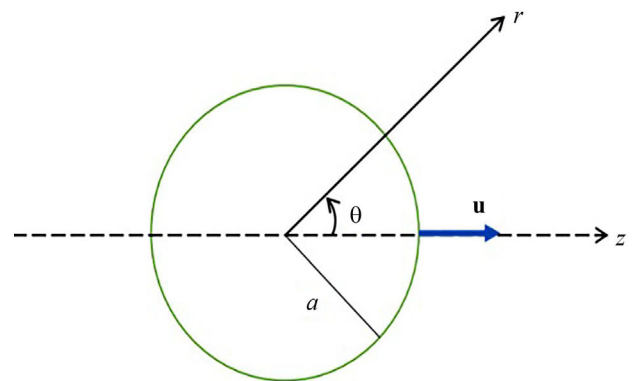


Figura 1 - Esfera de raio a e de velocidade U na direção z deslocando em um fluido ideal.

($\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$). Embora os valores do Coeficiente Reynolds (Re) sejam altos para o deslocamento de veículos em estradas (aproximadamente 10^6), a vorticidade em um fluido só não é nula apenas numa fina camada limite próxima ao objeto, como também no sulco atrás dele. Com isso, pode-se considerar o escoamento irrotacional.

É válido considerar a viscosidade nula, pois a viscosidade dinâmica e cinética do ar em pressão e temperatura ambiente são muito inferiores que 1, logo implica na desconsideração de seus efeitos no escoamento.

Assim, o escoamento potencial segue a Equação de Laplace de um fluido ideal. Desenvolveu-se o equacionamento de modo a satisfazer o laplaciano em coordenadas esféricas, possibilitando obter a velocidade do vento de acordo com a velocidade do objeto (veja o Apêndice 1).

$$\mathbf{u} = \frac{a^3}{r^3} U \cos \theta \mathbf{r} + \frac{a^3}{r^3} U \sin \theta \boldsymbol{\theta}, \quad (1)$$

onde \mathbf{u} é a velocidade do vento, U é a velocidade do objeto, θ é o ângulo do centro do objeto até a turbina, r é a distância do veículo até a turbina e a é a largura do veículo.

De modo a facilitar a interpretação da fórmula obtida, o professor deve sugerir que os alunos utilizem o seu módulo, Eq. (2):

$$|\mathbf{u}| = \frac{a^3}{r^3} U. \quad (2)$$

Além disso, será necessário utilizar a fórmula da potência de uma turbina eólica, Eq. (3).

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

Segue abaixo a demonstração da fórmula da potência da turbina eólica.

Para entender o modelo da potência gerada por uma turbina eólica, são utilizados conceitos de força, impulso, quantidade de movimento, fluxo de massas, energia cinética e potência.

Dessa forma é conhecido que todo corpo em movimento está sob ação de uma força, que pode variar durante certo tempo. A força é dada por

$$F_r = ma,$$

onde a é a aceleração e m a massa do objeto. A aceleração é a variação da velocidade em relação à variação do tempo.

Logo, tem-se que

$$F_r = m \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

A variação da velocidade pode ser encontrada subtraindo a velocidade final menos a inicial

$$\begin{aligned} F_r &= m \left(\frac{V_2 - V_1}{\Delta t} \right), \\ \Rightarrow F_r \Delta t &= m(V_2 - V_1), \\ \Rightarrow F_r \Delta t &= mV_2 - mV_1. \end{aligned}$$

Outra relação que existe é o impulso, sendo caracterizado como a variação de força de um objeto em movimento:

$$I_r = F_r \Delta t.$$

A quantidade de movimento pode ser dada como:

$$Q = mv,$$

onde m é a massa e v a velocidade.

Como o impulso é a variação de força de um objeto e a força é dada em relação à massa e à velocidade, obtém-se

$$\begin{aligned} I_r &= Q_2 - Q_1, \\ \Rightarrow I_r &= \Delta Q. \end{aligned}$$

A turbina eólica atua a partir da variação da velocidade do vento que passa por suas hélices. Então, pode-se escrever

$$\frac{I_r}{\Delta t} = \dot{m}(u - V_\omega),$$

onde \dot{m} é o fluxo de massas.

A energia cinética é dada como

$$K = \frac{1}{2} m v^2.$$

A variação da energia cinética em relação ao tempo pode ser relacionada à variação do impulso (I_r). Desta forma

$$\frac{\Delta K}{t} = \dot{m} \frac{(u^2 - V_\omega^2)}{2}.$$

A potência da turbina pode ser escrita como

$$P = \dot{m}(u - V_\omega)V_\alpha.$$

No qual u é a velocidade inicial, V_ω a velocidade final e V_α a velocidade que passa pela turbina. A potência pode ser escrita também como a variação da

energia cinética,

$$\frac{\Delta K}{t} = P.$$

Igualando as seguintes equações

$$\begin{aligned} \dot{m} \frac{(u^2 - V_\omega^2)}{2} &= \dot{m}(u - V_\omega)V_\alpha, \\ \frac{[(u + V_\omega)(u - V_\omega)]}{2} &= (u - V_\omega)V_\alpha, \\ \frac{(u + V_\omega)}{2} &= V_\alpha. \end{aligned}$$

Assim, tem-se a velocidade presente na turbina dada por V_α .

O fluxo de massa na turbina, \dot{m} é dado por

$$\dot{m} = \rho A V_\alpha,$$

em que ρ é a densidade do ar, A é a área da turbina e V_α é a velocidade do ar na turbina.

Manipulando as equações da velocidade do ar na turbina (V_α), o fluxo de massa (\dot{m}) e a potência da turbina (P), é possível obter a relação

$$P = \frac{1}{4} \rho A u^3 \left[1 + \frac{V_\omega}{u} \right] \left[1 - \frac{V_\omega^2}{u^2} \right].$$

Substituindo os valores de V_α e do fluxo de massa \dot{m} em P , tem-se

$$\begin{aligned} P &= \dot{m}(u - V_\omega)V_\alpha, \\ P &= \rho A V_\alpha (u - V_\omega) \left(\frac{u + V_\omega}{2} \right), \\ P &= \rho A \left(\frac{u + V_\omega}{2} \right) (u - V_\omega) \left(\frac{u + V_\omega}{2} \right), \\ P &= \rho A (u - V_\omega) \left[\frac{(u + V_\omega)}{2} \right]^2, \\ P &= \rho A \frac{1}{4} [uV_\omega^2 + 2u^2V_\omega + u^3 - V_\omega^3 - 2uV_\omega^2 - u^2V_\omega], \\ P &= \rho A \frac{1}{4} [-uV_\omega^2 + u^2V_\omega + u^3 - V_\omega^3], \\ P &= \rho A \frac{1}{4} u^3 \left[-\frac{V_\omega^2}{u^2} + \frac{V_\omega}{u} + 1 - \frac{V_\omega^3}{u^3} \right], \\ P &= \rho A \frac{1}{4} u^3 \left[1 + \frac{V_\omega}{u} \right] \left[1 - \frac{V_\omega^2}{u^2} \right], \\ P &= \frac{1}{4} \rho A u^3 \left[1 + \frac{V_\omega}{u} \right] \left[1 - \frac{V_\omega^2}{u^2} \right]. \end{aligned}$$

Para encontrar a potência máxima de geração, é necessário derivar a equação. Para isso, pode-se assumir que $\left[\frac{V_\omega}{u} \right] = x$. Logo

$$P = \frac{1}{4} \rho A u^3 [1 + x][1 - x^2],$$

$$\frac{dP}{dx} = P_{max}.$$

Para resolver a derivada acima, a equa-

ção P será reescrita.

$$P = \frac{1}{4}\rho Au^3[1+x][1-x^2],$$

$$P = \frac{1}{4}\rho Au^3[1+x][1+x][1-x],$$

$$P = \frac{1}{4}\rho Au^3[1+x]^2[1-x],$$

$$P = \frac{1}{4}\rho Au^3[1+2x+x^2][1-x].$$

Usando a regra do produto para a solução da derivada, tem-se que

$$\frac{dP}{dx} = \frac{1}{4}\rho Au^3\{[0+2+2x][1-x] + [1+2x+x^2][-1]\}.$$

Resolvendo os termos entre as chaves ({}), obtém-se

$$\frac{dP}{dx} = \frac{1}{4}\rho Au^3(1-3x^2-2x).$$

Para o ponto máximo de uma derivada, é necessário igualar o resultado a 0 e aplicar o Teorema de Bhaskara.

$$\frac{1}{4}\rho Au^3(1-3x^2-2x) = 0,$$

$$\frac{[\frac{1}{4}\rho Au^3(1-3x^2-2x)]}{\frac{1}{4}\rho Au^3} = \frac{0}{\frac{1}{4}\rho Au^3},$$

$$(1-3x^2-2x) = 0.$$

Ao resolver a equação quadrática acima, encontram-se as seguintes raízes, $x = -1$ e $x = \frac{1}{3}$.

Substituindo agora o valor de $\frac{1}{3}$ na equação da potência máxima

$$P = \frac{1}{4}\rho Au^3[1+x][1-x^2],$$

$$P = \frac{1}{4}\rho Au^3\left[1+\frac{1}{3}\right]\left[1-\left(\frac{1}{3}\right)^2\right],$$

$$P = \frac{1}{4}\rho Au^3\frac{32}{27},$$

$$P = \frac{8}{27}\rho Au^3,$$

$$P = \frac{1}{2}\rho Au^3C_p,$$

onde P é a potência da turbina eólica, ρ é a densidade do ar, A é a área da turbina, u é a velocidade do vento e C_p é o coeficiente de potência da turbina. Tal coeficiente é resultado da Lei de Betz, que afirma que nenhuma turbina consegue aproveitar mais que 59,3% da energia cinética do vento, na qual certas quantidades de energia são perdidas nas engrenagens, nos rolamentos e no carregamento mecânico na turbina eólica.

3. Aplicações em sala de aula do tema geração eólica através do deslocamento de massas de ar de veículos em estradas

Esta proposta pedagógica tem como objetivo promover a compreensão dos alunos do Ensino Médio com relação aos conceitos físicos e matemáticos relacionados a uma alternativa para o processo de geração de energia eólica, mais especificamente sobre a utilização do vento ocasionado pelo deslocamento de veículos em rodovias de alta velocidade.

Para isso, preconiza-se que o professor inicie uma discussão em sala de aula acerca da matriz energética brasileira e sua dependência relacionada, principalmente, às hidrelétricas e às termoeletricas e ao impacto ambiental associado a elas. Desse modo, o professor pode prosseguir o assunto incentivando os alunos a realizar um debate a respeito de novas fontes de energias renováveis que estão em desenvolvimento.

A partir disso, o professor pode introduzir a ideia de utilizar o vento produzido pelo deslocamento de veículos para gerar energia eólica, apresentando exemplos implementados ao redor do mundo.

Partindo do ponto em que os valores experimentais estão disponíveis, podendo esta informação ser obtida em trabalhos científicos como o da Ref. [19], a intenção desta proposta pedagógica é ensinar os alunos como determinar as equações que melhor se adequam a estes valores. Além disso, por meio de tais equações, que se adequaram aos dados experimentais, a proposta visa demonstrar que é possível calcular quaisquer outros valores de potência gerada.

Utilizando as Tabelas 1 e 2 presentes na Ref. [19] e reproduzidas nas Tabelas 1 e 2 a seguir, indicando a variação da velocidade do vento de acordo com a velocidade do veículo, o professor pode, com os alunos, realizar uma análise dos valores encontrados. É possível observar que as tabelas fornecem valores que relacionam a velocidade de dois tipos de veículos, um carro e um ônibus, com a velocidade do vento deslocada por ele. Tais valores são diretamente proporcionais, visto que, à medida que a velocidade do veículo aumenta, a velocidade do vento também tende a aumentar.

A fim de verificar uma relação possível mais específica entre os valores, o

Tabela 1: Variação da velocidade do vento de acordo com a velocidade do carro na altura determinada de 3,3 m.

Velocidade do carro (km/h)	Velocidade do vento (m/s)
80	13,52
110	20,94
120	23,03
130	26,43
140	29,67
150	32,12

Fonte: Ref. [19, p. 5].

Tabela 2: Variação da velocidade do vento de acordo com a velocidade do ônibus na altura determinada de 5,5 m.

Velocidade do ônibus (km/h)	Velocidade do vento (m/s)
100	23,981
110	26,837
120	30,912
130	33,868
140	36,117
150	38,331

Fonte: Ref. [19, p. 5].

professor pode propor uma atividade de construção de gráficos com esses dados utilizando o software Excel (Microsoft®). Já ocorrendo a inserção dos dados de cada tabela no programa, o professor deve orientar os alunos nos seguintes passos para construir os gráficos: selecionar os dados das colunas de uma tabela, ir à aba *inserir* com os dados selecionados e escolher a opção *gráfico de dispersão*. Fica a cargo do aluno inserir título e descrições dos eixos nos gráficos gerados.

Desse modo, com o gráfico criado e os pontos dispostos no plano, o professor pode introduzir uma outra ferramenta do Excel, utilizada para modelar os valores inseridos. Ou seja, ao selecionar um dos pontos dispostos no gráfico, o docente poderá solicitar aos alunos que insiram a linha de tendência, o que possibilita uma análise da proximidade da linha com tais valores, e, posteriormente, selecionar a opção *exibir a equação do gráfico*. Pode-se ressaltar que, quanto mais próximo os pontos estiverem da linha de tendência, mais preciso será seu equacionamento.

As equações obtidas por esse método são apresentadas nas Figs. 2 e 3.

A partir da obtenção das equações presentes no gráfico das Figs. 2 e 3, o docente pode prosseguir com a atividade. Assim, cabe a ele propor aos alunos

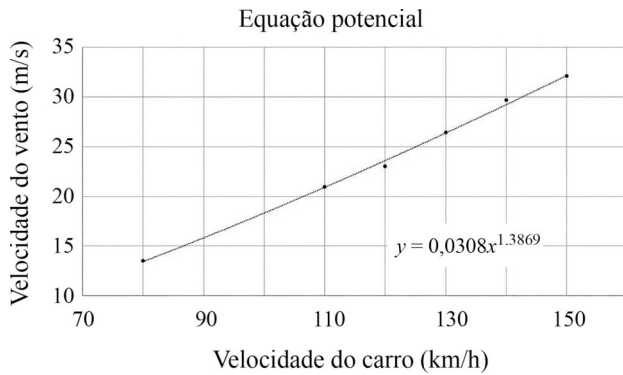


Figura 2 - Equação referente aos dados da Tabela 1.

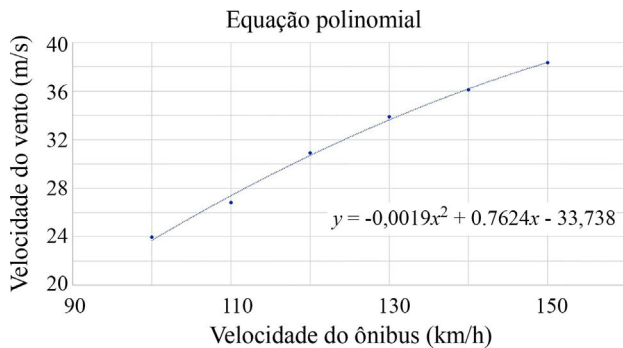


Figura 3 - Equação referente aos dados da Tabela 2.

substituir o valor da velocidade nas equações obtidas de modo a respeitarem os intervalos dos gráficos.

Por exemplo, considere que se deseja obter a velocidade do vento produzido por um veículo a 90 km/h. Utilizando as equações obtidas nas Figs. 2 e 3, as correspondentes velocidades dos veículos tipo carro ($V_{\text{vento do carro}}$) e ônibus ($V_{\text{vento do ônibus}}$) são, respectivamente:

$$\begin{aligned} V_{\text{vento do carro}} &= 0,0308 \times 90^{1,3869} \\ &= 15,808 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \\ V_{\text{vento do ônibus}} &= -0,0019 \times 90 \\ &\quad - 33,738 = 19,488 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \end{aligned}$$

Após encontrar os valores das velocidades do vento ocasionadas pelo deslocamento dos veículos, o professor pode prosseguir com a atividade expondo a Eq. (3), a fim de encontrar a correspondente potência eólica gerada. Nesse momento, o professor pode, se desejar, apresentar a demonstração realizada na seção 2 para a Eq. (3), evidenciando os conceitos matemáticos com uma breve apresentação do que seria a potência nas definições físicas.

Seria interessante nesse momento pedir aos alunos que pesquisem algumas variáveis, como a densidade do ar na cidade onde moram, e a área de

uma turbina eólica, pois, assim, desenvolveriam o senso crítico e analítico, assim como a autonomia, tornando a proposta mais próxima da realidade dos discentes.

Como os valores encontrados não são iguais devido ao fato de se utilizarem equações diferentes que representam veículos diferentes, sugere-se ao professor que faça uma discussão dos resultados e alerte a turma sobre os erros existentes dentro da metodologia proposta. Alguns erros comuns presentes nos cálculos por parte dos estudantes do Ensino Médio são a aproximação incorreta de valores, substituição de incógnitas e erros de interpretação.

Após as considerações realizadas com os alunos, o professor deverá apresentar a Eq. (2) e discutir a sua aplicação, a fim de que eles reconheçam a ciência de uma nova alternativa do processo de geração de energia eólica. Dependendo da disponibilidade de tempo, o responsável pela turma pode abordar o fato da dinâmica de fluidos turbulentos ser um problema complexo, tendo em vista a existência de uma solução para a Equação de Navier-Stokes, que modela tal tema, ser um dos problemas do milênio da matemática. Além do mais, pode ser discutido uma possível fragilidade dessa solução para a questão de produção de energia em sala, já que, para movimentar as turbinas, os carros podem gastar mais combustível, uma vez que parte da massa de ar movimentada por ele pode ser refletida pela turbina (dependendo do modelo e do posicionamento da turbina na estrada) e, assim, atuar como um dificultador do movimento do carro.

Nessa sequência, o docente deveria analisar o impacto de cada variável da Eq. (2), buscando propor questões como: o que ocorre na velocidade do vento quando a largura do veículo é maior do que um carro tradicional, por exemplo, um caminhão; qual é a influência da distância do veículo até a turbina na velocidade do vento; entre outros.

Assim, o professor poderia tentar,

com os alunos, encontrar valores reais para as demais variáveis, além da velocidade do veículo presente na Eq. (2), ou seja, a área frontal do veículo e sua distância até a turbina. Dessa forma, para encontrar a área do veículo, pode propor aos discentes que pesquisem diferentes tipos de modelos de veículos, de modo que pudessem analisar a sua influência na Eq. (2) para diferentes distâncias do veículo até a turbina e nas velocidades do veículo. É importante salientar que, por ser um problema complexo, o objeto de estudo utilizado para modelar a Eq. (2) foi uma esfera. Assim, a largura do veículo (a) deve ser igualada à fórmula referente à área do círculo.

Tomando como exemplo a área frontal do automóvel Chevrolet Onix LTZ 1.4 como $2,14 \text{ m}^2$, para encontrar a largura que será aplicada na Eq. (2), deve-se realizar a seguinte igualdade

$$\begin{aligned} \pi a^2 &= 2,14, \\ a &= \sqrt{\frac{2,14}{\pi}}, \\ a &= 0,8255 \text{ m}. \end{aligned}$$

Já para descobrir a distância do veículo até a turbina (r), os discentes podem realizar uma pesquisa para descobrirem a largura de uma pista de rolamento. Diante disso, o professor pode afirmar que a turbina se localiza, por exemplo, a 1 m de distância da lateral da faixa de rolamento. Como a distância deve ser contada do centro do veículo que se encontra centralizada na pista, o valor da largura da pista deve ser dividido por 2 e acrescido por mais 1 metro. Logo, para uma pista de rolamento de 4 m de largura, a distância entre o centro do veículo até a turbina será de

$$r = \frac{4}{2} + 1 = 3 \text{ m}$$

.Adiante, com os valores da área frontal do veículo e de sua distância até a turbina, o docente pode propor uma velocidade viável e ótima para seu deslocamento. Assim, caso o carro esteja a uma velocidade de 100 km/h, ou seja, $27,7778 \text{ m/s}$, a velocidade do vento produzida será

$$\begin{aligned} |\mathbf{u}| &= \frac{a^3}{r^3} U, \\ |\mathbf{u}| &= \frac{0,8255^3}{3^3} 27,7778, \\ |\mathbf{u}| &= 0,5787 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \end{aligned}$$

Diante da velocidade do vento encon-

Apêndice 1

Segue abaixo a demonstração da Eq. (1):

$$\nabla^2 \varphi(r, \theta) = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \right] \varphi(r, \theta) = 0.$$

A solução geral dessa equação diferencial tem a seguinte forma

$$\varphi(r, \theta) = \sum_n (A_n^+ \varphi_n^+ + A_n^- \varphi_n^-) \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots$$

onde: $\varphi_n^+ = r^n P_n(\cos \theta)$ e $\varphi_n^- = r^{-(n+1)} P_n(\cos \theta)$, $P_n(\cos \theta)$ é a n -ésima função de Legendre para os cossenos, A_n^+ e A_n^- são determinadas pelas condições de contorno do problema.

Condição de contorno do problema:

Muito longe da esfera, a velocidade do fluido será nula: $u(r \rightarrow \infty) = 0$

Se $\varphi(r, \theta) = \sum_n (A_n^+ r^n P_n(\cos \theta) + A_n^- r^{-(n+1)} P_n(\cos \theta))$

Então, tem-se que: $A_n^+ = 0 \forall n$.

Na origem, a velocidade será a velocidade da esfera. Assim: $u(r \rightarrow a) = U$.

Se

$$\varphi(r, \theta) = \sum_n (A_n^- r^{-(n+1)} P_n(\cos \theta)),$$

Então

$$A_n^- = 0 \forall n \neq 1,$$

logo

$$\varphi(r, \theta) = A_1^- \frac{\cos \theta}{r^2}.$$

Para determinar a constante A_1^- , usa-se $\mathbf{u} = \nabla \varphi$, lembrando que, na superfície da esfera e na direção de z , a velocidade da esfera é U

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \varphi(r, \theta) \Big|_{r=a, \theta=0} &= U, \\ \frac{\partial}{\partial r} \left[A_1^- \frac{\cos \theta}{r^2} \right] \Big|_{r=a, \theta=0} &= \left[-2A_1^- \frac{\cos \theta}{r^3} \right] \Big|_{r=a, \theta=0} = U, \\ A_1^- &= \frac{-a^3 U}{2}, \\ \varphi(r, \theta) &= \frac{-a^3 U \cos \theta}{2 r^2}. \end{aligned}$$

Por fim, para o cálculo de \mathbf{u} , deve-se encontrar o campo de velocidades. Para isso, utiliza-se:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \nabla \varphi, \\ \mathbf{u} &= \nabla \varphi(r, \theta) = \left[\frac{\partial}{\partial r} \mathbf{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \boldsymbol{\theta} \right] \varphi(r, \theta), \\ \mathbf{u} &= \left[\frac{\partial}{\partial r} \mathbf{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \boldsymbol{\theta} \right] \frac{-a^3 U \cos \theta}{2 r^2}, \\ \mathbf{u} &= \frac{a^3}{r^3} U (\cos \theta) \mathbf{r} + \frac{a^3}{r^3} U (\sin \theta) \boldsymbol{\theta}. \end{aligned}$$

trada, o aluno pode substituí-la na Eq. (3) para encontrar a potência de uma turbina eólica.

Considerando a densidade do ar (ρ) igual a $1,225 \text{ kg/m}^3$, que se encontra ao nível do mar e a $15 \text{ }^\circ\text{C}$, a área da turbina igual a $1,43 \text{ m}^2$ e o coeficiente de potência igual a (C_p) igual a $0,59$. A potência eólica gerada para a velocidade do vento encontrada acima é igual a:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \rho A u^3 C_p, \\ P &= \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 1,43 \cdot 5,787^3 \cdot 0,59, \\ P &= 0,1 \text{ W}. \end{aligned}$$

4. Conclusões

A implementação de novos conceitos físicos relacionados à geração de energia eólica é uma das formas de proporcionar aos alunos uma compressão melhor do processo de geração de energia, além de uma noção dos cálculos que estão presentes em todo o processo. Somado a isso, proporcionar aos discentes uma atividade dinâmica instiga-os a trabalhar em equipe, autonomia e responsabilidade, por se tratar de uma proposta pedagógica que há necessidade de pesquisas e dimensionamentos.

Ademais, evidenciar a necessidade da elaboração de novas fontes de energia no país, em razão da alta demanda energética, traz para a sala de aula uma discussão a respeito de tais temas, de modo a motivarem os alunos a se interessarem pela temática e a procurarem soluções para tal problema complexo, desenvolvendo, assim, seu senso crítico e criativo em sala de aula, de modo a contribuir para a formação dos estudantes como cidadãos conscientes dentro da sociedade.

Recebido em: 29 de Novembro de 2021

Aceito em: 28 de Fevereiro de 2022

Referências

- [1] A.C.B.M. Costa, E.P. da Silva, M. Santos, M.M. dos Santos, M.N.L. Pereira, N. Schroeder e cols, *CNCT-Catálogo Nacional de Cursos Técnico* (Ministério da Educação, Brasília, 2014), v. 3.
- [2] M.A. Pimenta, R. Gazzinelli, V. Almeida, G. Medeiros, G.B. Menezes, G.C Cerqueira e cols, *Novas Tecnologias Sara o Século XXI* (Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, 2018).
- [3] <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>, acessado em 9 de junho de 2021.
- [4] A.G. Lira, *Energia Eólica: Princípios e Operação* (Saraiva Educação SA, São Paulo, 2019), v. 1.
- [5] J.R.S. Moreira, *Energia Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética* (Editora LTC, Rio de Janeiro 2021), v. 1.
- [6] A. Bavchakar, P. Ketan, N. Chougale, S.S. Belanekar, S.P. Rane, N.B. Sawant, in: *International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication*, Chennai, India, 2018, p. 135-139.
- [7] S. Qusai, S. Esraa, R. Aseel, in: *12th International Renewable Engineering Conference*, Amã, 2021, p. 1-5.

- [8] F. Han, A.W. Bandarkar, Y. Sozer, in: *Energy Conversion Congress and Exposition* (IEEE, Baltimore, 2019), p. 974-978.
- [9] A. Iqbal, V. Chitturi, K.V.L. Narayana, in: *Power and Advanced Computing Technologies* (University of Malaya, Vellore, 2019), p. 1-5.
- [10] Bruno L. do Nascimento-Dias, *A Física na Escola* **16**(1), 19 (2018).
- [11] Ricardo Andrade Terini, *A Física na Escola* **18**(1), 1 (2020).
- [12] D.P. Ausubel, *A Aprendizagem Significativa: A Teoria de David Ausubel* (Editora Hucitec, São Paulo, 1995), v. 1.
- [13] W.L.P dos Santos, E.F. Mortimer, *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências* **2**, 133 (2000).
- [14] <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-58404181> acessado 11/04/2021.
- [15] Ministério da Educação, Conselho Nacional de Educação; Câmara de Educação Básica. *Resolução nº 3, de 21 de novembro de 2018* (Diário Oficial da União, Brasília, 2018).
- [16] Ministério da Educação, *Base Nacional Comum Curricular* (Diário Oficial da União, Brasília, 2018).
- [17] J.H. Spurk, N. Aksel, *Fluid Mechanics* (Springer, Darmstadt, 2020), v. 1.
- [18] C. Fang, *An Introduction to Fluid Mechanics* (Springer, Cham, 2019)
- [19] S.S. Hegde, A. Thamban, S.P.M Bhai, A. Ahmed, M. Upadhyay, A. Joishy, e cols. in: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (ASME, Arizona, 2016), p. V06BT08A043.