



# **UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA - PROFFÍSICA**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA - DCET - POLO 60**

**ISMÁLIA SANTOS ALVES**

**ENSINO DO FENÔMENO DA INDUÇÃO  
ELETROMAGNÉTICA USANDO A TURBINA EÓLICA  
VERTICAL COMO RECURSO DIDÁTICO**

Salvador - BA

2023

**ISMÁLIA SANTOS ALVES**

**ENSINO DO FENÔMENO DA INDUÇÃO  
ELETROMAGNÉTICA USANDO A TURBINA EÓLICA  
VERTICAL COMO RECURSO DIDÁTICO**

Dissertação apresentada ao Polo 60 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade do Estado da Bahia (UNEB) como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Ensino de Física.

Orientador: Dr. Prof. Dr. Edson Mascarenhas Santos

Coorientador: Prof. Dr. José Carlos Oliveira

Salvador - BA

2023

FICHA CATALOGRÁFICA  
Biblioteca Professor **Edivaldo Machado Boaventura - UNEB – Campus I**  
**Bibliotecária: Célia Maria da Costa CRB5/918**

A474e Alves, Ismália Santos  
Ensino do fenômeno da indução eletromagnética usando a turbina eólica vertical como recurso didático / Ismália Santos Alves. – Salvador, 2023.  
163 f.: il.

Orientador: Edson Mascarenhas Santos.  
Coorientador: José Carlos Oliveira.  
Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade do Estado da Bahia.  
Departamento de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física – PROFFÍSICA, Campus I. 2023.

Contém referências.

1. Indução Eletromagnética. 2. Física – Estudo e ensino – Salvador (BA).  
3. Energia eólica 4. Física - Prática de ensino – Salvador (BA). 5. Energia elétrica.  
I. Santos, Edson Mascarenhas. II. Oliveira, José Carlos. III. Universidade do Estado da Bahia. Departamento de Ciências Exatas e da Terra. Campus I. IV. Título.

CDD: 622.154

**ISMÁLIA SANTOS ALVES**

**ENSINO DO FENÔMENO DA INDUÇÃO  
ELETROMAGNÉTICA USANDO A TURBINA EÓLICA  
VERTICAL COMO RECURSO DIDÁTICO**

Dissertação apresentada ao Polo 60 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade do Estado da Bahia (UNEB) como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Ensino de Física.

Aprovada em 18 de dezembro de 2023.

**BANCA EXAMINADORA**

-

---

Prof. Dr. Edson Mascarenhas Santos – Orientador  
Universidade do Estado da Bahia – UNEB

---

Prof. Dr. Marido Geraldête Pereira – Examinador 1  
Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS

---

Prof. Dr. José Vicente Cardoso Santos – Examinador 2  
Universidade do Estado da Bahia - UNEB

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta dissertação, primeiramente a Deus, à minha família e a todos, que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus que foi a minha força e meu sustento em todo o tempo, por essas e tantas outras razões que eu faço questão de dizer muito obrigada.

Quero poder agradecer, também, a toda minha família que esteve comigo, em especial a minha mãe Odete.

Não poderia deixar de mencionar, também, os amigos que tive a chance de conhecer já no meio do curso de mestrado. Não cabe mencionar nomes porque são muitos e poderia correr o risco de esquecer alguém. Mas sei que eles certamente se identificarão com o que falo. Quero poder agradecer ao Sr. Osmar Kauark que muito contribuiu para o desenvolvimento do projeto, aos trabalhos em conjunto que tiveram provocaram discussões acerca dos conteúdos, as trocas de mensagens tirando dúvidas. Todos vocês tiveram papel fundamental nessa minha conquista.

Agradeço também a todos os professores que me deram todo o alicerce para que eu pudesse, agora, apresentar a minha dissertação de mestrado. Em especial, ao meu professor e orientador Edson Mascarenhas e co-orientador José Carlos Oliveira que se mostraram sempre disponíveis e preocupados com o andamento deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

Obrigada a todos!

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”

Cora Coralina

## RESUMO

Esse projeto tem o objetivo de desenvolver uma sequência didática utilizando um experimento montado em um laboratório didático de Física como estratégia para estimular os estudantes da Educação Profissional e Tecnológica a explorar o fenômeno da indução eletromagnética. Para tanto, planeja-se realizar atividades experimentais demonstrativas com o intuito de despertar o interesse e curiosidade dos estudantes na disciplina de Física, que possam contribuir para a aprendizagem dos conceitos físicos. Para consolidar esse objetivo adota-se uma metodologia lastreada em uma revisão de literatura de cunho documental e histórico e com fulcro nas produções da Sequência Didática (SD) planejada, pois a mesma é parte integrante do produto educacional desenvolvido da Dissertação de Mestrado, apresentada à Universidade do Estado da Bahia - UNEB no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), e foi aplicada em uma Escola da Rede Pública do Estado da Bahia na cidade de Salvador, em uma turma do Curso Subsequente (PROSUB) de Técnico em Eletrotécnica com o objetivo de contextualizar a conversão da energia renovável gerada a partir da força dos ventos em energia elétrica. Expecta-se no apoio na teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel, uma vez que busca da interação cognitiva entre o novo conhecimento, adquirido após o processo de assimilação, e os conhecimentos prévios, perpassam por eficácia no processo de ensino com uma aprendizagem cada vez mais significativa e criação de subsunçores cada vez mais de efeitos permanentes.

**Palavras-chave:** Indução Eletromagnética, Energia Eólica, Energia Elétrica.

## ABSTRACT

The aim of this project is to develop a didactic sequence using an experiment set up in a physics teaching laboratory as a strategy to encourage vocational and technological education students to explore the phenomenon of electromagnetic induction. To this end, it is planned to carry out demonstrative experimental activities with the aim of arousing students' interest and curiosity in the subject of Physics, which can contribute to the learning of physical concepts. In order to consolidate this objective, a methodology based on a literature review of a documental and historical nature and based on the productions of the planned Didactic Sequence (DS) was adopted, since it is an integral part of the educational product developed for the Master's Dissertation, presented to the State University of Bahia - UNEB in the National Professional Master's Degree in Physics Teaching (MNPEF), and was applied in a Public School in the State of Bahia in the city of Salvador, in a class of the Subsequent Course (PROSUB) of Electrotechnical Technician with the aim of contextualizing the conversion of renewable energy generated from wind power into electrical energy. It is expected to be supported by David Ausubel's theory of meaningful learning, since the search for cognitive interaction between new knowledge, acquired after the assimilation process, and previous knowledge, leads to effectiveness in the teaching process with increasingly meaningful learning and the creation of subsumers with increasingly permanent effects.

**Keywords:** Electromagnetic induction, Wind energy, Electrical energy.

**LISTAS DE DIAGRAMAS**

**DIAGRAMA 1 - TIPOS DE APRENDIZAGEM ..... 30**

**LISTAS DE QUADROS**

|  |            |
|--|------------|
| <b>QUADRO 1 – ETAPAS DA APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....</b> | <b>140</b> |
|--|------------|

**LISTAS DE TABELAS**

|   |            |
|---|------------|
| <b>TABELA 1 - LEVANTAMENTO DE TRABALHOS PARA ANÁLISE.....</b>   | <b>36</b>  |
| <b>TABELA 2 - AS EQUAÇÕES DE MAXWELL .....</b>  | <b>73</b>  |
| <b>TABELA 3 - RUGOSIDADE DE CADA TIPO DE TERRENO (z0) PARA CÁLCULO DA VELOCIDADE<br/>DO VENTO .....</b> | <b>97</b>  |
| <b>TABELA 4 - COORDENADAS GEOGRÁFICAS DO CENTRO DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL.....</b>                       | <b>138</b> |

**LISTAS DE GRÁFICOS**

|  |            |
|--|------------|
| <b>GRÁFICO 1 - ELEMENTOS DA CAMADA-LIMITE TERRESTRE.....</b>                                     | <b>96</b>  |
| <b>GRÁFICO 2 - VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO NO INVERNO EM SALVADOR .....</b>                        | <b>100</b> |
| <b>GRÁFICO 3 - GRÁFICO REPRESENTATIVO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA EM 2022 (EM<br/>GW).....</b> | <b>105</b> |
| <b>GRÁFICO 4 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA - 2022 (GW).....</b>                             | <b>106</b> |
| <b>GRÁFICO 5 - RESPOSTAS DO QUESTIONÁRIO - SUB ELETRO II.....</b>                                | <b>142</b> |
| <b>GRÁFICO 6 - RESPOSTAS DO QUESTIONÁRIO - SUB ELETRO III.....</b>                               | <b>143</b> |

## LISTAS DE FIGURAS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>FIGURA 1 - OS SISTEMAS-CHAVE DE MEMÓRIA DO CÉREBRO INTERAGEM QUANDO ESTAMOS APRENDENDO.....</b> | <b>33</b> |
| <b>FIGURA 2 - PARTÍCULA EM MOVIMENTO CIRCULAR.....</b>   | <b>40</b> |
| <b>FIGURA 3 - MOVIMENTO DE UMA PARTÍCULA.....</b>  | <b>41</b> |
| <b>FIGURA 4 - PARTÍCULA SE MOVENDO COM VELOCIDADE ANGULAR <math>\omega</math> .....</b>            | <b>42</b> |
| <b>FIGURA 5 - COMPONENTE TANGENCIAL.....</b>   | <b>43</b> |
| <b>FIGURA 6 - ACELERAÇÃO - MOVIMENTO CIRCULAR.....</b>   | <b>44</b> |
| <b>FIGURA 7 - ESQUEMA DE DUAS POLIAS ACOPLADAS ATRAVÉS DE UMA CORREIA .....</b>                    | <b>46</b> |
| <b>FIGURA 8 - ESQUEMA DE DUAS POLIAS ACOPLADAS POR UMA CORREIA.....</b>                            | <b>47</b> |
| <b>FIGURA 9 - TRANSMISSÃO DE TORQUE EM POLIAS .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>FIGURA 10 - CAMPO DE ESCOAMENTO POTENCIAL DE UM PERFIL AERODINÂMICO.....</b>                    | <b>52</b> |
| <b>FIGURA 11 - CAMPO DE VELOCIDADES NUM ESCOAMENTO INTERNO .....</b>                               | <b>53</b> |
| <b>FIGURA 12 - AEROFÓLIO - FLUXO DE AR .....</b>   | <b>54</b> |
| <b>FIGURA 13 - AEROFÓLIO - FORÇAS ATUANTES .....</b>   | <b>54</b> |
| <b>FIGURA 14 - AEROFÓLIO - CAMADA LIMITE .....</b>   | <b>55</b> |
| <b>FIGURA 15 - FLUIDO EM ESCOAMENTO .....</b>  | <b>55</b> |
| <b>FIGURA 16 - FORÇA ATUANDO SOBRE UM BLOCO .....</b>  | <b>57</b> |
| <b>FIGURA 17 - FORÇA EM FUNÇÃO DE X .....</b>  | <b>58</b> |
| <b>FIGURA 18 - ÁREA SOBRE A CURVA .....</b>  | <b>59</b> |
| <b>FIGURA 19 - FORÇA RESULTANTE E DESLOCAMENTO DE UMA PARTÍCULA .....</b>                          | <b>60</b> |
| <b>FIGURA 20 - TRÊS POSSÍVEIS RECURSOS DE INTEGRAÇÃO ENTRE DOIS PONTOS A E B .....</b>             | <b>62</b> |
| <b>FIGURA 21 - FORÇAS ENTRE CARGAS ELÉTRICAS.....</b>  | <b>64</b> |
| <b>FIGURA 22 - FORÇAS ENTRE CARGAS ELÉTRICAS.....</b>  | <b>65</b> |
| <b>FIGURA 23 - LOCALIZAÇÃO PONTO FONTE E PONTO DE OBSERVAÇÃO.....</b>                              | <b>66</b> |
| <b>FIGURA 24 - INTERAÇÃO ENTRE CARGAS ELÉTRICAS.....</b>   | <b>67</b> |
| <b>FIGURA 25 - SISTEMAS DE N CARGAS PONTUAIS .....</b>   | <b>68</b> |
| <b>FIGURA 26 - VETORES DE SEPARAÇÃO ENTRE CARGAS ELÉTRICAS .....</b>                               | <b>69</b> |
| <b>FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO CONTÍNUA DE CARGAS.....</b>  | <b>70</b> |
| <b>FIGURA 28 - CARGA VOLUMÉTRICA P .....</b>   | <b>70</b> |
| <b>FIGURA 29 - LINHAS DE CAMPO ELÉTRICO DEVIDO A CARGAS PONTUAIS .....</b>                         | <b>71</b> |
| <b>FIGURA 30 - JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879) .....</b>   | <b>72</b> |
| <b>FIGURA 31 - VETORES DO CAMPO ELÉTRICO .....</b>   | <b>74</b> |
| <b>FIGURA 32 - FLUXO ATRAVÉS DE UMA SUPERFÍCIE .....</b>   | <b>75</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>FIGURA 33 - CARGAS DENTRO E FORA DE UMA SUPERFÍCIE .....</b>  | <b>75</b>  |
| <b>FIGURA 34 - SUPERFÍCIE GAUSSIANA .....</b>  | <b>76</b>  |
| <b>FIGURA 35 - CAMPO MAGNÉTICO DEVIDO A UMA CORRENTE .....</b>   | <b>80</b>  |
| <b>FIGURA 36 - LEI DA GAUSS PARA O MAGNETISMO .....</b>  | <b>81</b>  |
| <b>FIGURA 37 - SUPERFÍCIE FECHADA ENVOLVENDO CARGAS ELÉTRICAS.....</b>   | <b>82</b>  |
| <b>FIGURA 38 - O EXPERIMENTO DE FARADAY: UM ÍMÃ É PASSADO ATRAVÉS DE UMA BOBINA.<br/>.....</b>   | <b>83</b>  |
| <b>FIGURA 39 - INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....</b>  | <b>84</b>  |
| <b>FIGURA 40 - LEI DE LENZ APLICADA A UM ÍMÃ EM MOVIMENTO PRÓXIMO A UMA ESPIRA. (A)<br/>ÍMÃ SE APROXIMA DA ESPIRA, E É REPELIDO. (B) ÍMÃ SE AFASTA DA ESPIRA, E É<br/>ATRAÍDO.....</b> | <b>85</b>  |
| <b>FIGURA 41 - PRINCÍPIO BÁSICO DE UM GERADOR ELÉTRICO .....</b>   | <b>88</b>  |
| <b>FIGURA 42 - SUBSIDÊNCIA .....</b>   | <b>92</b>  |
| <b>FIGURA 43 - CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA .....</b>  | <b>93</b>  |
| <b>FIGURA 44 - GRADIENTE DE VELOCIDADE DO VENTO EM FUNÇÃO DA ALTURA E TIPO DE<br/>COBERTURA DO SOLO .....</b>  | <b>94</b>  |
| <b>FIGURA 45 - PERFIL VERTICAL DA VELOCIDADE DO VENTO DA SUPERFÍCIE ATÉ A ALTURA DO<br/>VENTO GEOSTRÓFICO.....</b>   | <b>94</b>  |
| <b>FIGURA 46 - TROPOFERA DIVIDIDA EM DUAS PARTES.....</b>  | <b>95</b>  |
| <b>FIGURA 47 - GEOMETRIA DA TURBINA EÓLICA DO ESTUDO .....</b>   | <b>98</b>  |
| <b>FIGURA 48 - MOINHOS DE VENTO TÍPICO DA HOLANDA.....</b>   | <b>102</b> |
| <b>FIGURA 49 - PRINCIPAIS MARCOS DO DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA EÓLICA NO PERÍODO<br/>DO SÉCULO XI AO SÉCULO XIX.....</b>   | <b>103</b> |
| <b>FIGURA 50 - CRONOLOGIA TÉCNICA DE APROVEITAMENTO DO VENTO.....</b>  | <b>104</b> |
| <b>FIGURA 51 - CRONOLOGIA TÉCNICA DAS TURBINAS EÓLICAS.....</b>  | <b>107</b> |
| <b>FIGURA 52 - DISTRIBUIÇÃO GERAL DOS VENTOS .....</b>   | <b>108</b> |
| <b>FIGURA 53 - POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO .....</b>   | <b>108</b> |
| <b>FIGURA 54 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA TURBINA EÓLICA MODERNA.....</b>  | <b>109</b> |
| <b>FIGURA 55 - ESQUEMA GERAL DE FUNCIONAMENTO DE UM AEROGERADOR. ....</b>  | <b>110</b> |
| <b>FIGURA 56 - AÇÃO POR IMPULSO SOBRE A SUPERFÍCIE DE UM CORPO IMERSO EM UM<br/>ESCOAMENTO .....</b>   | <b>111</b> |
| <b>FIGURA 57 - AÇÃO POR REAÇÃO SOBRE A SUPERFÍCIE DE UM CORPO IMERSO EM UM<br/>ESCOAMENTO .....</b>  | <b>111</b> |
| <b>FIGURA 58 - TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL (TEEH).....</b>   | <b>112</b> |

|   |     |
|---|-----|
| <b>FIGURA 59 - TIPOS DE TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL (TEEV)</b> .....                                | 113 |
| <b>FIGURA 60 - COMPONENTES DO AEROGERADOR.</b> .....  | 114 |
| <b>FIGURA 61 - MERCADO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE NO BRASIL.</b> .....                           | 116 |
| <b>FIGURA 62 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DE SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE CONECTADO À REDE.</b> .....      | 116 |
| <b>FIGURA 63 - SIGURD JOHANNES SAVONIUS</b> .....   | 117 |
| <b>FIGURA 64 - CAPA DA PATENTE FINLANDESA DO ROTOR SAVONIUS, ABRIL/1926</b> .....                       | 117 |
| <b>FIGURA 65 - ROTOR DE SAVONIUS DE DUAS CONCHAS</b> .....  | 118 |
| <b>FIGURA 66 - VISTA LATERAL E VISTA DE CIMA DO ROTOR DE SAVONIUS</b> .....                             | 118 |
| <b>FIGURA 67 - ESBOÇO DE FLUXO UM ROTOR SAVONIUS</b> .....  | 119 |
| <b>FIGURA 68 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM ROTOR SAVONIUS</b> .....                                | 119 |
| <b>FIGURA 69 - VARIANTES DOS ROTORES SAVONIUS</b> .....   | 120 |
| <b>FIGURA 70 - TURBINA SAVONIUS E TURBINA BACH</b> .....  | 121 |
| <b>FIGURA 71 - ROTOR SAVONIUS DUAS PÁS.</b> .....   | 122 |
| <b>FIGURA 72 - PRODUTO EDUCACIONAL</b> .....  | 123 |
| <b>FIGURA 73 - TURBINAS COM UM (ESQUERDA) E DOIS (DIREITA) ESTÁGIOS</b> .....                           | 125 |
| <b>FIGURA 74 - COMPORTAMENTO DO VENTO NAS PÁS DE UMA TURBINA SAVONIUS</b> .....                         | 125 |
| <b>FIGURA 75 - FLUXO DE AR ATRAVÉS DE UMA SEÇÃO TRANSVERSAL</b> .....                                   | 128 |
| <b>FIGURA 76 - TUBO DE BETZ.</b> .....  | 130 |
| <b>FIGURA 77 - PERDAS DE VELOCIDADE DO VENTO NA PASSAGEM POR UM CONJUNTO DE PÁS</b> .....               | 131 |
| <b>FIGURA 78 - FORÇAS ATUANTES NAS PÁS DO AEROGERADOR</b> .....   | 133 |
| <b>FIGURA 79 - PLACAS DE EXTREMIDADES - DETALHES</b> .....  | 134 |
| <b>FIGURA 80 - RELAÇÃO H/D NO ROTOR SAVONIUS</b> .....  | 135 |
| <b>FIGURA 71 - ROTOR SAVONIUS DUAS PÁS</b> .....  | 135 |
| <b>FIGURA 81 - LOCALIZAÇÃO DO CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL LUIZ PINTO DE CARVALHO</b> ..... | 138 |
| <b>FIGURA 82 - LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA ELÉTRICA (LOCAL DAS AULAS)</b> .....                           | 139 |
| <b>FIGURA 83 - SIMULAÇÃO TURBINA EÓLICA</b> .....   | 141 |
| <b>FIGURA 84 - LEVANTAMENTO DE CONHECIMENTOS PRÉVIOS</b> .....  | 144 |
| <b>FIGURA 85 - APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DA TURBINA EÓLICA</b> .....                                    | 147 |
| <b>FIGURA 86 - ALUNOS OBSERVANDO A TURBINA EM FUNCIONAMENTO</b> .....                                   | 148 |
| <b>FIGURA 87 - VERIFICANDO O ALTERNADOR DA TURBINA</b> .....  | 150 |
| <b>FIGURA 88 - TELA DO PHET SIMULATION - LEI DE FARADAY</b> .....                                       | 152 |

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|         |  |
|---------|--|
| a.C.    | Antes de Cristo  |
| ANEEL   | Agência Nacional de Energia Elétrica   |
| BNCC    | Banco Nacional Comum Curricular  |
| CEPEL   | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica  |
| CLA     | Camada limite Atmosférica  |
| CNRC    | Conselho Nacional de Investigação do Canadá                                    |
| CRESESB | Centro de Referencia para Energia Solar e Energia Eólica Sergio de Salvo Brito |
| ENEM    | Exame Nacional do Ensino Médio   |
| FEM     | Força Eletromotriz   |
| GEE     | Gases do Efeito Estufa   |
| GEE     | Gases de Efeito Estufa   |
| ISA     | Atmosfera Padrão Internacional   |
| MAPP    | Mercado de Aerogeradores de Pequeno Porte                                      |
| MNPEF   | Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física                             |
| MW      | Mega Watt  |
| PhD     | Philosophy Doctor  |
| PROINFA | Programa de Incentivo a Fontes Alternativas                                    |
| SD      | Sequência Didática   |
| TAS     | Teoria da Aprendizagem Significativa   |
| TEC     | Teorema da Energia Cinética  |
| TEC     | Teorema da Energia Cinética  |
| TEEH    | Turbina Eólica de Eixo Horizontal  |
| TEEV    | Turbina Eólica de Eixo Vertical  |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>22</b> |
| <b>2 EIXO TEÓRICO EDUCACIONAL.....</b>                               | <b>26</b> |
| 2.1.    A TEORIA DE APRENDIZAGEM DE DAVID AUSUBEL .....              | 26        |
| 2.2.    ESTRUTURA COGNITIVA .....                                    | 27        |
| 2.3.    APRENDIZAGEM.....  | 28        |
| 2.3.1.    Aprendizagem Significativa .....                           | 28        |
| 2.3.2.    Aprendizagem Mecânica .....                                | 29        |
| 2.4.    TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA (TAS).....              | 29        |
| 2.5.    OS ORGANIZADORES PRÉVIOS .....                               | 31        |
| 2.6.    O ENSINO DE FÍSICA.....                                      | 32        |
| 2.7.    TEORIA DE APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E A TURBINA EÓLICA..... | 34        |
| 2.8.    METODOLOGIA: revisão bibliográfica.....                      | 36        |
| <b>3 ELEMENTOS DE FÍSICA.....</b>                                    | <b>39</b> |
| 3.1    MECÂNICA.....   | 39        |
| 3.2    MECÂNICA NEWTONIANA .....                                     | 39        |
| 3.2.1    Movimento Circular .....                                    | 39        |
| 3.2.2    Movimento Circular Uniforme (MCU) .....                     | 40        |
| 3.2.3    Deslocamento Angular .....                                  | 41        |
| 3.2.4    Velocidade Angular .....                                    | 42        |
| 3.2.5    Velocidade e Aceleração no MCU .....                        | 43        |
| 3.2.6    Aceleração .....  | 44        |
| 3.2.7    Polias, Correias e Transmissão de Potência. ....            | 46        |
| 3.2.8    Relação de Transmissão nas Polias .....                     | 46        |
| 3.3    MECÂNICA DOS FLUIDOS .....                                    | 49        |
| 3.3.1    Hidrostática.....   | 49        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.3.2    | Hidrodinâmica .....  | 50        |
| 3.3.3    | Escoamentos .....  | 53        |
| 3.3.4    | Condição de Não-Escorregamento .....                               | 55        |
| 3.3.5    | O Conceito de Camada Limite .....                                  | 56        |
| 3.4      | TRABALHO E ENERGIA .....   | 56        |
| i.       | Energia Cinética ( $E_c$ ) .....                                   | 59        |
| iv.      | Trajectoria de uma Partícula e o Teorema do Trabalho-Energia ..... | 60        |
| iv.      | Energia Potencial e a Lei da Conservação da Energia mecânica ..... | 62        |
| 3.5.     | CARGA ELÉTRICA .....   | 63        |
| 3.6.     | FORÇA ELÉTRICA .....   | 64        |
| 3.7.     | CAMPO ELÉTRICO.....  | 67        |
| 3.7.1.   | As Linhas de Campo .....   | 71        |
| 3.8.     | AS EQUAÇÕES DE MAXWELL.....  | 72        |
| 3.8.1    | Fluxo Elétrico .....   | 73        |
| 3.8.2    | A Lei de Gauss .....   | 75        |
| 3.9      | ELETRICIDADE E MAGNETISMO.....                                     | 79        |
| 3.10     | LEI DE GAUSS DO MAGNETISMO.....                                    | 81        |
| 3.11     | INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA .....                                      | 82        |
| 3.11.1   | Força Eletromotriz Induzida.....                                   | 82        |
| 3.11.2   | Lei de Faraday .....   | 83        |
| 3.11.3   | Lei de Faraday-Lenz.....   | 84        |
| 3.11.4   | Lei de Faraday na forma diferencial e integral.....                | 86        |
| 3.12     | GERADOR DE ELETRICIDADE.....                                       | 88        |
| <b>4</b> | <b>A ENERGIA EÓLICA.....</b>                                       | <b>89</b> |
| 4.1.     | INTRODUÇÃO.....  | 89        |
| 4.2.     | FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL.....                                   | 89        |
| 4.3.     | UTILIZAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA .....                               | 90        |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.4.    | O VENTO.....   | 91  |
| 4.5.    | CLIMATOLOGIA - CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA.....               | 91  |
| 4.6.    | HISTÓRIA .....   | 100 |
| 4.6.1.  | Aproveitamento da Força do Vento.....                    | 100 |
| 4.6.2   | As Cruzadas e as Grandes Navegações .....                | 101 |
| 4.6.2.  | O Moinho de Vento .....                                  | 102 |
| 4.7.    | ENERGIA EÓLICA NO BRASIL.....                            | 105 |
| 4.8.    | O POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO.....                       | 107 |
| 4.9.    | TURBINAS EÓLICAS .....                                   | 109 |
| 4.10.   | TIPOS E CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS .....         | 110 |
| 4.10.1. | Classificação quanto à ação do vento .....               | 110 |
| 4.10.2. | Classificação quanto à posição do eixo .....             | 111 |
| 4.11.   | COMPONENTES DO AEROGERADOR VERTICAL.....                 | 113 |
| 4.12.   | A HISTÓRIA DAS TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL .....   | 114 |
| 4.13.   | MERCADO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE NO BRASIL .... | 115 |
| 4.13.1. | Resolução Aneel n° 482.....                              | 116 |
| 4.13.2. | Lei 14.300/2022 .....                                    | 116 |
| 4.14.   | SIGURD JOHANNES SAVONIUS .....                           | 117 |
| 4.15.   | TURBINA EÓLICA DO TIPO SAVONIUS.....                     | 118 |
| 4.16.   | CARACTERIZAÇÃO DA TURBINA EÓLICA SAVONIUS .....          | 121 |
| 4.17.   | PARÂMETROS FÍSICOS DAS TURBINAS EÓLICAS .....            | 125 |
| 4.17.1  | Energia e Potência Extraída do Vento.....                | 126 |
| 4.18    | LEI DE BETZ.....   | 129 |
| 4.19.   | PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....                        | 130 |
| 4.20.   | APROVEITAMENTO TEÓRICO .....                             | 132 |
| 4.21.   | COEFICIENTE DE POTÊNCIA .....                            | 132 |
| 4.22    | FORÇAS AERODINÂMICAS .....                               | 133 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.23.    | PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DA TURBINA SAVONIUS ..... | 134        |
| 4.23.1.  | Placas de Extremidades .....                      | 134        |
| 4.24.    | VARIANTES DO ROTOR SAVONIUS .....                 | 136        |
| <b>5</b> | <b>APLICAÇÃO DO RECURSO DIDÁTICO .....</b>        | <b>137</b> |
| 5.1.     | INTRODUÇÃO .....                                  | 137        |
| 5.2.     | OBJETIVOS .....                                   | 137        |
| 5.3.     | APLICAÇÃO DO RECURSO DIDÁTICO .....               | 137        |
| 5.4.     | DESCRIÇÃO DOS ENCONTROS .....                     | 139        |
| 5.4.1.   | Primeiro Encontro .....                           | 141        |
| 5.4.2.   | Segundo Encontro .....                            | 147        |
| 5.4.3.   | Terceiro Encontro .....                           | 149        |
| 5.4.4.   | Quarto Encontro .....                             | 151        |
| 5.4.5.   | Quinto Encontro .....                             | 153        |
| <b>5</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                 | <b>154</b> |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                          | <b>156</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo desses quatro anos, desde a minha graduação em Licenciatura em Física no Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Bahia - IFBA, Campus Salvador, em 2019, tenho lecionado a disciplina de Física em Escolas da Rede Pública e Privada, e, desde então, venho me deparando com muitos desafios para levar o conhecimento desta ciência aos discentes. Dessa experiência, surgiram inquietações que motivaram a proposição deste trabalho. Em especial, destaco a pressão exercida pelas escolas sobre o professor, para que o mesmo explore em sala de aula os conteúdos programáticos, bem como as atividades e exercícios propostos, prescritos nos livros didáticos referenciais disponibilizados para as séries, limitando o Ensino de Física aos materiais instrucionais. Para Moreira (2000, p.95), ensino e aprendizagem são interdependentes, por melhor que sejam os materiais instrucionais, do ponto de vista de quem os elabora, a aprendizagem não é uma consequência natural. Sobre o ensino de Física no Brasil, baseado ou referenciado por livros de texto, Moreira faz uma retrospectiva e traz as seguintes informações: Por falar em livros, é claro que eles sempre existiram e cabe destacar, entre os atuais, pela ótima qualidade, o Curso de Física, de Alvarenga e Máximo (1997) e o do GREF (Grupo de Reelaboração do Ensino de Física, 1993). Mas, definitivamente, não é, ou não deveria ser época de ensinar Física sob a abordagem de um único texto. Digo “não deveria”, porque, agora me referindo apenas à realidade brasileira, muito do Ensino de Física em nossas escolas secundárias está, atualmente, outra vez referenciado por livros, porém de má qualidade - com muitas cores, figuras; ensina-se o que cai no vestibular e adota-se o livro com menos texto para ler.

Nesse sentido, entende-se que a pesquisa em ensino de Física é uma iniciativa importante, pois pode resultar no desenvolvimento de materiais didáticos de apoio às aulas de Física, cuja metodologia pode contribuir positivamente para o processo de ensino e aprendizagem, trazendo benefícios para o discente e contribuindo para a assimilação dos conteúdos apresentados nos livros didáticos. Conforme Moreira (2000, p.95), a pesquisa em física tem seus méritos e limitações, logo não se pode esperar que a mesma aponte soluções milagrosas, ou panaceias, para o ensino em sala de aula, mesmo porque boa parte dela é básica e não visa aplicabilidade em sala de aula.

Longe de querer apresentar soluções milagrosas para o Ensino de Física, mas com o intuito de tornar as aulas de Física mais dinâmicas e atrativas, o presente trabalho traz uma proposta para o ensino do fenômeno da indução eletromagnética com a utilização do protótipo de uma turbina eólica de pequeno porte. Logo, planeja-se usar este protótipo como material

didático de apoio às aulas de Física, para isso foi criada uma Sequência Didática (SD) apoiada na Teoria de Aprendizagem de Significativa de David Ausubel. Nesta perspectiva, Blandes (2018, p.15) faz a seguinte observação:

“A utilização de atividades experimentais voltadas para o ensino de Física em sala de aula favorece a assimilação dos conceitos apresentados nos livros didáticos, haja vista que a experimentação proporciona ao aluno uma visão mais ampla do objeto em estudo, facilitando, dessa forma, o melhor entendimento acerca dos fenômenos da natureza envolvidos nesse processo”.

Nota-se que, normalmente, o ensino da disciplina de Física nas escolas está atrelado à prática da memorização, em especial a resolução de listas de exercícios, além disso, existe outro agravante que é o fato dos estudantes focarem seus estudos nos exames de acesso às universidades. Isso acontece porque o sistema educacional brasileiro tem como prerrogativa preparar o estudante para o Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) e vestibulares, criando uma cultura escolar em que a Física se tornou uma matéria onde apenas se decora fórmulas para fazer provas, um estudo mecanicista que fecha as portas para o método científico. Dessa forma, a pressão exercida sobre os estudantes faz com que a sua visão seja focada na preparação para os exames de acesso às universidades, segundo Ricardo & Freire (2007, p.1):

O ensino médio é o nível escolar que mais sente essa pressão social, pois sua conclusão coincide com a idade em que os jovens estarão ingressando no mercado de trabalho, embora alguns já o tenham feito, ou darão prosseguimento em seus estudos, vislumbrando uma profissão técnica ou de nível superior. Isso faz com que permaneça no ensino médio dicotomias que a LDB/96 pretende superar, a saber: preparação para o vestibular vs. Formação ao profissional; ou ensino propedêutico vs. ensino profissionalizante.

Com esse cenário, a motivação para a realização deste trabalho é o desenvolvimento de um produto educacional que possa contribuir para o processo de ensino e aprendizagem, apresentando a disciplina de Física em uma abordagem diferente da tradicional, de forma a torná-la mais interessante, inovadora e participativa; em um esforço para melhorar o ensino de Física na escola, levando aos estudantes uma melhor compreensão do mundo; além da tentativa de aproximá-los um pouco mais de um mundo sustentável, estabelecendo uma relação entre os seres humanos e a sustentabilidade de forma harmoniosa. Nessa perspectiva, os conteúdos ensinados em sala de aula podem ser mais fáceis de serem assimilados se forem associados às tarefas realizadas pelos alunos, pois as atividades podem estimular o educando a experimentar e pensar por si mesmo, uma vez que a experimentação proporciona uma visão ampla do objeto em estudo, favorecendo o melhor entendimento dos fenômenos da natureza envolvidos no processo. De acordo com Moreira (2004, p.1), “a educação em ciências tem por objetivo fazer com que o aluno venha a compartilhar significados no contexto das ciências, ou

seja, interpretar o mundo desde o ponto de vista das ciências, manejar alguns conceitos, leis e teorias científicas, abordar problemas raciocinando cientificamente, identificar aspectos históricos, epistemológicos, sociais e culturais das ciências”.

A proposta de ensino de física desenvolvida neste estudo tem como base a Teoria de Aprendizagem Significativa (TAS) do representante do cognitivismo David Ausubel. Assim, no sentido de contribuir para uma aprendizagem significativa, neste trabalho apresenta-se o método experimental voltado para o ensino de Física na Educação Profissional e Tecnológica, abordando o tema Energia Eólica, usando como estratégia significativa uma fonte de energia renovável, caracterizada como protótipo da Turbina Eólica de Eixo Vertical, desenvolvida e montada em um laboratório didático, com o intuito de explorar o conceito físico da indução eletromagnética. Com isso, espera-se conduzir uma aula experimental, usando a TAS para desenvolver uma maior interação entre docentes-educandos e também entre educandos-educandos e, conseqüentemente, promover a motivação dos alunos para o estudo dos conteúdos relacionados ao tema proposto.

Assim, o objetivo geral deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma sequência didática utilizando um protótipo de uma turbina eólica vertical como estratégia para estimular os estudantes a explorar o fenômeno da indução eletromagnética. Os objetivos específicos são: realizar atividades experimentais demonstrativas com o intuito de despertar o interesse e curiosidade dos estudantes na disciplina de Física, possibilitar uma melhor aprendizagem dos conceitos físicos e proporcionar a troca de saber entre alunos.

Para isso, será apresentada a geometria desta turbina eólica, a descrição dos seus aspectos constitutivos em dois semicilindros com um formato de “S”, fixados entre dois discos horizontais dispostos na posição vertical. O estudo está direcionado para a indução eletromagnética, com a variação do campo magnético nas proximidades de um condutor. Dessa forma, será feita a abordagem do tema Energia Eólica com vistas ao conteúdo do fenômeno da indução eletromagnética, promovendo uma visão geral e introdutória que trata da energia eólica como fonte alternativa sustentável para a produção de energia elétrica. Para tanto, será utilizada a teoria de aprendizagem significativa, buscando identificar os subsunçores que estão presentes na estrutura cognitiva dos educandos, dando ênfase aos conhecimentos prévios relacionados ao processo de produção de eletricidade a partir de uma fonte de energia renovável.

O presente trabalho está estruturado em capítulos, articulando os conteúdos que possuem ligação direta com o tema desenvolvido, neste caso, o estudo, desenvolvimento e montagem de uma turbina eólica de eixo vertical caracterizada como turbina de pequeno

porte, cujo princípio de funcionamento se baseia no fenômeno da indução eletromagnética, com a sua metodologia de aplicação.

O segundo capítulo, intitulado “*Eixo Teórico Educacional*”, aborda a fundamentação teórica, tendo como destaque o Ensino por Aprendizagem Significativa que embasa essa dissertação, fazendo uma análise de atividades em grupo, a utilização de um protótipo como recurso didático para o ensino de conceitos básicos do fenômeno da indução eletromagnética através de uma sequência didática.

O terceiro capítulo, intitulado “*Elementos de Física*”, trabalha especificamente do estudo dos principais elementos da Mecânica Newtoniana, da Mecânica dos Fluidos, da Eletricidade e do Magnetismo, relacionados ao tema energia eólica.

O quarto capítulo, intitulado “*A Energia Eólica*”, trabalha especificamente o uso da energia elétrica, história e evolução da energia eólica, a energia eólica como fonte alternativa de energia, panorama da energia eólica, formação do vento e suas principais características, a turbina eólica de pequeno porte com ênfase na turbina eólica de eixo vertical, apresentando o seu princípio de funcionamento, os conceitos físicos abordados e as equações envolvidas.

O quinto, intitulado “*Aplicação do Recurso Didático*”, apresenta um quadro com as etapas da aplicação da sequência didática e faz uma descrição dos encontros, relatando a dinâmica em sala de aula durante a aplicação do recurso didático.

O conteúdo intitulado “*Considerações Finais*”, faz uma abordagem geral da aplicação do recurso didático, dando ênfase aos objetivos propostos e alcançados, analisando o impacto, bem como as contribuições deste estudo no processo de ensino e aprendizagem, uma vez que se buscou a elaboração de uma proposta pedagógica com o intuito de tornar a aprendizagem mais significativa, engajadora e eficaz para os alunos.

## 2 EIXO TEÓRICO EDUCACIONAL

Neste capítulo, apresentaremos a base teórica que embasa esta dissertação de mestrado, focando no Ensino por Aprendizagem Significativa. Destacaremos a importância das atividades em grupo e da utilização de um protótipo de uma turbina eólica de eixo vertical como recurso didático para o ensino de conceitos básicos do fenômeno da indução eletromagnética através de uma sequência didática.

### 2.1. A TEORIA DE APRENDIZAGEM DE DAVID AUSUBEL

Representante do cognitivismo, David Paul Ausubel nasceu no ano de 1918 e cresceu no Brooklyn, na cidade de Nova York, Estados Unidos da América, e faleceu em julho de 2008 em Nova York. Ausubel frequentou a Universidade da Pensilvânia, onde fez o pré-médico, especializando-se em Psicologia. Após a sua formatura na Faculdade de Medicina da Universidade de Middlesex, o Teórico completou o estágio rotativo no Hospital Gouveneur, Departamento de Hospitais da cidade de Nova York, localizado no Lower East Side de Manhattan, incluindo Italy e Chinatown de 1944. Sendo que, ele obteve o PhD em Psicologia do Desenvolvimento pela Universidade de Columbia. Além desse PhD, Ausubel obteve uma série de cátedras de psicologia em diversas escolas de educação, como a Universidade de Illinois, a Universidade de Toronto e as universidades européias de Berna, a Universidade Salesiana de Roma e o Colégio de Treinamento de Oficiais de Munique. Entre os anos de 1957 e 1958, recebeu uma bolsa de pesquisa Fulbright para fazer um estudo comparativo da motivação vocacional de Maoris<sup>1</sup> e Europeus.

Em 1973, Ausubel se aposentou da vida acadêmica, pois planejou se dedicar em tempo integral à sua prática psiquiátrica. Na área da psiquiatria, seus principais interesses eram psicopatologia geral, desenvolvimento do ego, dependência de drogas e psiquiatria forense. Em 1994, aos 75 anos, retirou-se da vida profissional para se dedicar em tempo integral à escrita, essa dedicação resultou em quatro livros. No intuito de auxiliar os processos de ensino aprendizagem, Ausubel apresentou pela primeira vez a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) no livro “*The psychology of meaningful verbal learning (A psicologia da aprendizagem verbal significativa)*” em 1963. Segundo Lemos (2012), Ausubel voltou a escrever sobre a TAS, em 1968, no livro “*Educational Psychology: a cognitive view*

---

<sup>1</sup> Os Maoris são o povo indígena da Nova Zelândia, eles são Polinésios e compreendem cerca de 14 por cento da população do País. Maoritanga é o idioma nativo, que está relacionado ao Taitiano e o Havaiano. Acredita-se que o Maori da Nova Zelândia migrou da Polinésia em canoas por volta do século 9 ao século 13 d.C.

(*Psicologia da Educação: uma visão cognitiva*)” com a participação de Joseph Novak e Helen Hanesian.

## 2.2. ESTRUTURA COGNITIVA

Uma das mais importantes contribuições de Ausubel para a psicologia é o conceito de estrutura cognitiva, que se refere à organização da informação na mente do indivíduo. Segundo o Teórico, a aprendizagem significativa ocorre quando novas informações são integradas aos conhecimentos prévios existentes na estrutura cognitiva do aprendiz.

A psicologia cognitiva de Ausubel tem como ideia central a aprendizagem de novos conceitos e proposições através da assimilação, considerando os conceitos já existentes na estrutura de conhecimentos do aprendiz. Para Ausubel, esta estrutura de conhecimento do aprendiz corresponde à estrutura cognitiva do indivíduo. Segundo o Teórico, a estrutura cognitiva é o conjunto de conhecimentos, ideias, conceitos e proposições que um indivíduo possui sobre um determinado assunto, logo, esta estrutura cognitiva pertence a cada aprendiz e possui uma hierarquia, sendo bastante organizada, ou seja, existe uma relação estabelecida entre as estruturas das diversas ideias formadas. Essa estrutura é organizada de forma hierárquica, com conceitos mais gerais no topo e conceitos mais específicos na base. Sendo assim, é nesta mesma estrutura que os novos conceitos e as novas ideias se ancoram e se reordenam, fazendo o indivíduo progressivamente internalizar e aprender, dessa forma "A relação entre a nova informação e a já existente na estrutura cognitiva do aprendiz é o fator mais importante no processo de aprendizagem significativa." (Ausubel, 1978).

A necessidade de relacionar a nova informação ao conhecimento prévio dos alunos para promover uma assimilação mais profunda e duradoura do conteúdo, enfatiza a importância da estrutura cognitiva no processo de aprendizagem. Assim, para Ausubel (2000) "A organização da estrutura cognitiva é fundamental para a compreensão e retenção do conhecimento. Quanto mais organizada e interconectada for essa estrutura, maior será a capacidade do aprendiz de assimilar novas informações de forma significativa". Logo, quando um indivíduo aprende algo novo, ele precisa relacionar essa informação com sua estrutura cognitiva existente. Se a nova informação for consistente com a estrutura cognitiva, ela será aprendida de forma significativa.

Nos seus estudos, David Ausubel identificou dois tipos de aprendizagem significativa: a aprendizagem por recepção e a aprendizagem por descoberta. Na aprendizagem por recepção, o indivíduo adquire conhecimento através da exposição a informações apresentadas de forma estruturada e organizada pelo professor, enfatiza a importância de fornecer materiais

de aprendizagem claros e bem estruturados para facilitar a compreensão e a aquisição de novos conceitos. Nesse processo, o aluno é um receptor passivo de conhecimento, que é transmitido de forma direta e explícita, dessa forma o indivíduo relaciona o novo conhecimento com sua estrutura cognitiva pré-existente, construindo significados e entendimentos mais profundos. Por outro lado, na aprendizagem por descoberta, o aprendiz é encorajado a explorar, investigar e descobrir conceitos por conta própria, muitas vezes através de experiências práticas e experimentação. Nesse tipo de aprendizagem, o aluno desempenha um papel mais ativo na construção do conhecimento, relacionando novas informações com seu conhecimento prévio e tirando conclusões por meio de descobertas pessoais, assim o aprendiz é estimulado a descobrir novos conceitos e relações por conta própria, através da exploração e resolução de problemas.

A estrutura cognitiva é um conceito importante na teoria da aprendizagem de Ausubel, pois é o ponto de partida para a aprendizagem significativa e pode ser facilitada por meio de estratégias de ensino adequadas.

### 2.3. APRENDIZAGEM

Para Ausubel, a aprendizagem é um processo de construção de significados a partir da interação entre a nova informação e a estrutura cognitiva do indivíduo. A estrutura cognitiva é o conjunto de conhecimentos, ideias, conceitos e proposições que um indivíduo possui sobre um determinado assunto. Essa estrutura é organizada de forma hierárquica, com conceitos mais gerais no topo e conceitos mais específicos na base. Sendo que, a incorporação de novas ideias na estrutura cognitiva do aprendiz contribui para ampliação desta estrutura, sendo a aprendizagem uma consequência deste processo. Dependendo da relação estabelecida entre as ideias preexistentes nesta estrutura cognitiva, e as novas que vão se internalizando pouco a pouco, pode ocorrer um aprendizado, sendo que este vai se alternando entre o aprendizado mecânico e o aprendizado significativo. Assim, para que a aprendizagem ocorra de forma significativa, a nova informação deve ser relevante para a estrutura cognitiva do indivíduo. Isso significa que a nova informação deve ser capaz de se relacionar com conceitos já existentes na estrutura cognitiva.

#### 2.3.1. Aprendizagem Significativa

Para Ausubel, a aprendizagem significativa se estabelece, quando o indivíduo atribui significados a um conhecimento partindo da interação dos seus conhecimentos já existentes,

independente desses significados serem aceitos no contexto deste indivíduo. Logo, quando a nova informação é relacionada com a estrutura cognitiva existente, o indivíduo compreende o seu significado. Nesse sentido, ocorre a aprendizagem significativa, uma vez que as novas ideias se relacionaram de forma não arbitrária e substantiva com as ideias já existentes. Entende-se por não arbitrariedade a existência de uma relação lógica e explícita entre a nova ideia e alguma outra já existente na estrutura cognitiva do indivíduo. Além de não arbitrária, para ser significativa, a aprendizagem também precisa ser substantiva, ou seja, quando um determinado conteúdo é aprendido, o indivíduo conseguirá explicá-los com as suas próprias palavras. Isto significa que o indivíduo conseguiu apreender o sentido, como também o significado do que foi a ele ensinado, dessa forma o aprendiz pode explicar este significado com suas próprias palavras, diversificando no uso das palavras. Esta diversificação se torna de extrema relevância para o ensino, pois a aprendizagem significativa proporciona ao aprendiz o uso de novos conceitos, independente do contexto em que este conteúdo foi inicialmente aprendido.

### 2.3.2. Aprendizagem Mecânica

A aprendizagem mecânica ocorre de forma oposta à aprendizagem significativa, ou seja, ocorre quando a nova informação é simplesmente memorizada, sem relação com a estrutura cognitiva existente, pois as novas ideias não se relacionam de forma clara e interativa com as ideias preexistentes na estrutura cognitiva do sujeito, uma vez que elas são frutos de um processo de memorização. Desta forma, as novas ideias são armazenadas arbitrariamente na memória do aprendiz, de forma volátil, o que não garante flexibilidade e nem longevidade no seu uso. Logo, o aprendiz não é capaz de expressar o novo conteúdo com suas próprias palavras. Com isso, percebe-se que o indivíduo não aprendeu o significado e nem o sentido das novas informações, mas apenas decorou a sequência das palavras. Apesar de Ausubel ter enfatizado o quão importante é a aprendizagem significativa, ele também compreendia que, em algumas circunstâncias do processo ensino e aprendizagem, era inevitável o uso da aprendizagem mecânica.

## 2.4. TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA (TAS)

A Teoria de Aprendizagem Significativa (TAS) de Ausubel foi proposta em 1963 no seu livro *“The psychology of meaningful verbal learning”*. De acordo com a TAS, uma nova informação se ancora em conceitos relevantes, os chamados subsunçores, que se encontram presentes na estrutura cognitiva do aprendiz. Ausubel, Novak e Hanesian (1980, p.137)

destacam as estruturas cognitivas como estruturas hierárquicas de conceitos que correspondem a representações de experiências vivenciais do indivíduo, segundo os teóricos:

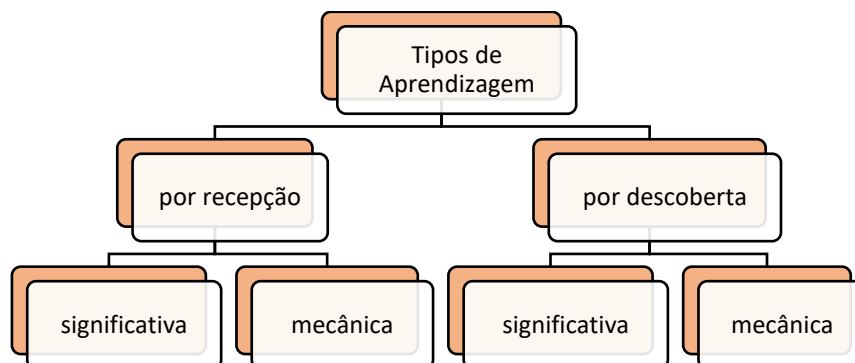
... Se quiséssemos reduzir a psicologia educacional em um único princípio este seria: O fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já conhece. Descubra o que sabe e baseie nisso seus ensinamentos.

Segundo a Psicologia Educacional dos teóricos Ausubel, Novak e Hanesian (1980, p,34) “a aprendizagem significativa envolve a aquisição de novos significados e estes, por sua vez, são produtos da aprendizagem significativa”. Com isso, entendemos que a manifestação de novos significados no aprendiz ajuíza o complemento de um processo de aprendizagem significativa. Dessa forma, os resultados das experiências de aprendizagem de uma pessoa estão organizados em blocos hierarquizados de conhecimentos.

A ocorrência da aprendizagem significativa resulta na ampliação e modificação dos conceitos relevantes (subsunçores). A partir de um conceito mais amplo que se direciona aos específicos, o conhecimento pode ser construído de modo a se relacionar com novos conceitos, facilitando a compreensão das novas informações, o que dá significado real ao conhecimento adquirido. Na concepção de Ausubel, os organizadores prévios consistem em informações e recursos introdutórios que devem ser apresentados aos estudantes antes dos conteúdos curriculares específicos, para servir de ponte entre o que eles já sabem e o que irão aprender de forma significativa.

A tarefa de aprendizagem proposta na teoria da Aprendizagem Significativa é que ela seja por recepção ou por descoberta, devendo se relacionar, de forma não arbitrária e substantiva (não literal), a uma nova informação e a outros conceitos relevantes já existentes na estrutura cognitiva do educando. Dessa forma, com base na Teoria de Ausubel, Jesus (1999) esquematizou os tipos de aprendizagem, conforme apresentado no Diagrama 1.

**Diagrama 1 - Tipos de Aprendizagem**



Fonte: Adaptado JESUS, 1999.

Dessa forma, em contraponto à aprendizagem significativa, está a aprendizagem mecânica que vai ocorrer se a tarefa consistir de associações puramente arbitrárias, quando falta ao aluno o conhecimento prévio relevante necessário para tornar a tarefa potencialmente significativa. (Ausubel, Novak e Hanesian, 1980). Assim, a aprendizagem se inicia a partir da observação de eventos e, conseqüentemente, da localização desses eventos na estrutura cognitiva de forma relevante, coerente e lógica. Ausubel define o conhecimento preexistente como sendo o conhecimento prévio, onde o mesmo adquire novos significados e se expande, onde há ancoragem do novo saber na estrutura cognitiva do aprendiz. Dessa forma, novos conhecimentos só podem ser realmente adquiridos quando existe uma conexão com âncoras conceituais já existentes. São essas âncoras que dão sentido e significado ao novo conteúdo, construindo uma aprendizagem significativa.

Logo, a teoria da aprendizagem de Ausubel propõe a valorização dos conhecimentos prévios do aprendiz para que possam construir estruturas mentais utilizando, como meio, mapas conceituais que permitem descobrir e redescobrir outros conhecimentos, caracterizando, assim, uma aprendizagem prazerosa e eficaz. Nesse sentido, o uso de atividades experimentais em sala de aula, potencializa o engajamento do aluno, pois proporciona aos mesmos um ambiente onde é possível testar as hipóteses por eles levantadas, as curiosidades e indagações acerca da experimentação, além de fazer uso da sua criatividade para resolver possíveis situações-problemas que venham a ocorrer durante as atividades práticas. Proporcionando, dessa forma, a esse aprendiz experiências investigativas e interativas, levando em consideração o seu universo, explorando seu conhecimento prévio e respeitando o seu ritmo de aprendizagem.

## 2.5. OS ORGANIZADORES PRÉVIOS

Para atingir os objetivos propostos na sua Teoria de Aprendizagem Significativa, Ausubel propõe que seja elaborada pelo educador uma estratégia na qual o conteúdo seja apresentado de forma a manipular deliberadamente a estrutura cognitiva do aprendiz, onde o novo conceito seja formado a partir de conceitos já existentes. Este recurso didático é chamado por Ausubel de “*Organizadores Prévios*”, onde a estratégia dele é apresentar o novo conceito a partir de uma informação mais geral que, posteriormente, será detalhada e retornada ao conceito geral sempre que for necessário. Segundo pesquisas, Ausubel defende o uso de Organizadores Prévios porque esses organizadores provavelmente facilitam a assimilação e duração dos novos materiais na estrutura cognitiva do aprendiz.

Um organizador prévio é uma estratégia de aprendizagem proposta por David Ausubel que visa facilitar a aprendizagem significativa, são materiais introdutórios apresentados antes do material de aprendizagem em si. Eles têm como objetivo servir de ponte entre o que o aprendiz já sabe e o que ele precisa saber para que o novo material possa ser aprendido de forma significativa.

Os Organizadores Prévios são utilizados quando nos deparamos com situações em que o educando não tem os subsunçores adequados. Outra situação característica para o uso desses organizadores ocorre quando trabalhamos com um quantitativo grande de aprendizes no qual existe uma variação dos subsunçores, impossibilitando, dessa forma, um trabalho individualizado. Os organizadores prévios são importantes porque eles podem ajudar os aprendizes a identificar subsunçores relevantes para o novo conhecimento. Eles também podem ajudar os aprendizes a compreender como o novo conhecimento se relaciona com o conhecimento que eles já possuem, servindo como uma estratégia eficaz para facilitar a aprendizagem significativa e promover a compreensão conceitual. Exemplos de Organizadores Prévios:

- a) **Mapas Conceituais:** Representam graficamente os conceitos e suas relações hierárquicas, facilitando a visualização e compreensão da estrutura do conhecimento.
- b) **Quadros Sinópticos:** Organizam as informações de forma tabular, destacando os pontos principais e suas subdivisões.
- c) **Linhas do Tempo:** Apresentam eventos em sequência cronológica, permitindo a compreensão da evolução de um tema ao longo do tempo.
- d) **Imagens e Gráficos:** Ilustram conceitos abstratos e facilitam a assimilação de informações.
- e) **Histórias e Analogias:** Relacionam o novo conhecimento a situações familiares ou experiências vividas pelo aluno, tornando a aprendizagem mais significativa.

## 2.6. O ENSINO DE FÍSICA

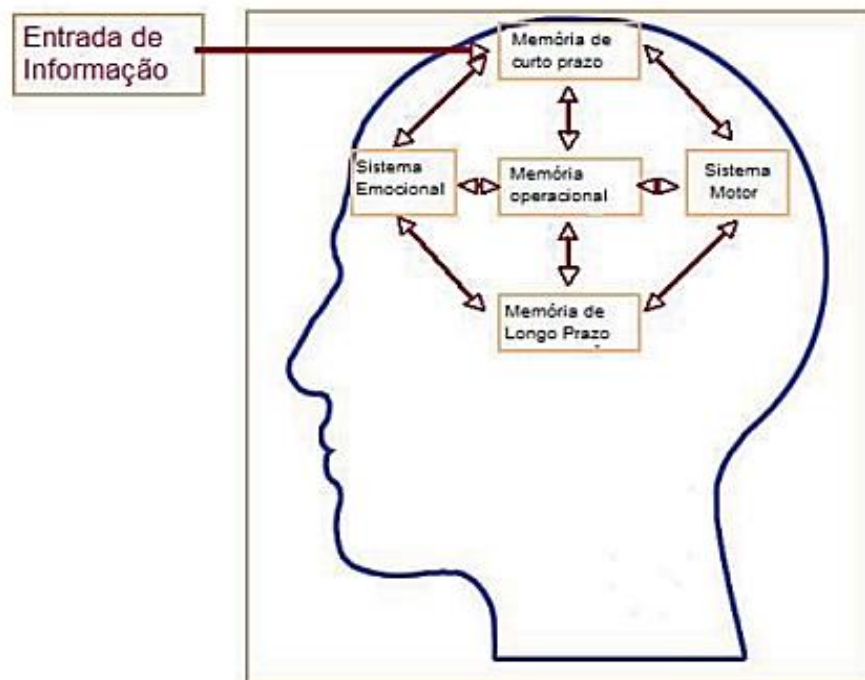
A Física é uma ciência cujos conceitos estão presentes em nosso cotidiano, porém, em sala de aula, essa relação é pouco explorada, prevalecendo o ensino tradicional, com o uso de cálculos matemáticos complexos, fórmulas, memorização de conceitos, etc. Nesse sentido, Souza et al (2009, p.2) destaca a seguinte situação:

Já há algum tempo o ensino de Ciências vem sendo questionado no mundo todo. As causas são de diversa ordem, contudo, vale a pena citar o desencanto dos jovens para estudar as Ciências, especialmente a disciplina de física, percebida como difícil, excessivamente abstrata e aparentemente “desencarnada” das situações da vida cotidiana.

Podemos observar essa mesma situação nas disciplinas de Química, Biologia, dentre outras. Um ponto importante a ser destacado no ensino da disciplina de Física é o fato de muitas escolas valorizarem a prática da memorização do conteúdo, ou seja, a memorização de fórmulas e conceitos, bem como os cálculos da resolução das listas de exercícios, o que se configura como sendo uma aprendizagem mecânica ou memorística.

A memória é muito importante no processo de aprendizagem, pois é a forma como armazenamos as informações e os conhecimentos adquiridos, nos ajudando a recuperá-los quando necessário. Outro fato, é que ela contribui para a consolidação dos conhecimentos novos com os conhecimentos antigos, porém requer muita atenção, uma vez que a memória não é um arquivo que faz simplesmente o armazenamento de dados, é preciso construir o conhecimento a partir do entendimento das informações. Os sistemas-chaves da memória são apresentados na Figura 1, a seguir.

**Figura 1 - Os sistemas-chave de memória do cérebro interagem quando estamos aprendendo**



Fonte: NOVAK & CAÑAS (2010)

Diferentemente da aprendizagem mecânica que valoriza a memorização, a aprendizagem significativa foca na construção do conhecimento, de forma a tornar o conteúdo realmente relevante para o aluno. Para os teóricos Novak e Cañas:

É preciso acrescentar que a retenção de informações aprendidas mecanicamente ainda se dá na memória de longo prazo, assim como a informação aprendida significativamente; a diferença é que na aprendizagem mecânica há pouca ou nenhuma integração do novo conhecimento ao conhecimento existente, resultando

em duas consequências negativas. Em primeiro lugar, o conhecimento aprendido mecanicamente tende a ser rapidamente esquecido, a não ser que seja muito repetido. Em segundo lugar, a estrutura de conhecimento ou estrutura cognitiva do aprendiz não é aprimorada ou modificada para esclarecer ideias incorretas. Assim, as concepções erradas persistirão e o conhecimento aprendido tem pouco ou nenhum potencial de ser usado em situações de aprendizagem e/ou resolução de problemas no futuro. (TEORIA SUBJACENTE AOS MAPAS CONCEITUAIS E COMO ELABORÁ-LOS E USÁ-LOS, Novak & Cañas, 2010, p. 13).

A desconexão entre o conhecimento escolar e a realidade do aluno, impedem que os educando construam um significado profundo para o que estão aprendendo, limitando assim a aprendizagem significativa. O modelo de ensino tradicional, muitas vezes, coloca o professor como detentor do conhecimento, não estimulando a participação ativa do aluno na construção do seu próprio aprendizado. Outro ponto importante relativo à aprendizagem, é o tempo disponibilizado pelos educandos ao estudo da disciplina, uma vez que, na maioria das vezes, a dedicação aos assuntos da Física acontece apenas quando se trata da realização de atividades avaliativas com o intuito de obter notas. Dessa forma, Bonadiman e Nonenmacher (2007, p.196) definem a imagem da Física da seguinte forma:

(...) para muitas pessoas, após cursarem o Ensino Médio, falar em Física significa avivar recordações desagradáveis. Tanto isso é verdade, que não se esquece facilmente um professor de Física e, geralmente, por motivos pouco lisonjeiros, sendo até muito comum ouvirmos expressões como “Física é coisa para louco!”, reveladoras da imagem que os estudantes formam da Física na escola.

Em função de ter tido a oportunidade de conhecer a proposta do ensino de Física com a utilização de atividades significativas durante a graduação no Curso de Licenciatura em Física, aliado ao fato de elaborar uma proposta para enriquecimento da metodologia empregada para desenvolvimento de uma sequência didática, tomamos como pressuposto teórico a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. Logo, objetiva-se valorizar os conhecimentos prévios presentes na estrutura cognitiva do aprendiz, para isso é necessário resgatar esses conhecimentos prévios, fazer a sua ampliação, bem como atualizar as informações adquiridas inicialmente, atribuindo, dessa forma, novos significados aos conhecimentos dos educandos. Com isso, busca-se o fortalecimento do processo de ensino e aprendizagem, desmistificando a imagem da Física como uma disciplina complexa e difícil de aprender.

## 2.7. TEORIA DE APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E A TURBINA EÓLICA

O uso de protótipos no ensino de conceitos complexos, como os relacionados ao fenômeno da indução eletromagnética, pode facilitar a compreensão dos alunos. Os protótipos, ao representarem de forma concreta os conceitos abstratos, tornam o aprendizado mais palpável e visual, estimulando a experimentação e a investigação por parte dos estudantes. Dessa

forma, os protótipos se tornam ferramentas eficazes para a contextualização e aplicação prática da teoria, além de despertar o interesse dos alunos e tornar as aulas mais dinâmicas e interativas.

As atividades em grupo são fundamentais para promover a interação entre os alunos, favorecer a troca de experiências e estimular a construção coletiva do conhecimento. Por meio do trabalho em equipe, os estudantes têm a oportunidade de desenvolver habilidades sociais, como a comunicação, a colaboração e o respeito mútuo. Além disso, as atividades em grupo possibilitam a diversificação de ideias e abordagens, enriquecendo o processo de aprendizagem.

A teoria de aprendizagem significativa, desenvolvida por David Ausubel, afirma que o aprendizado é mais eficaz quando os novos conhecimentos se conectam com os conhecimentos prévios do aluno. No caso da turbina eólica, o aluno pode conectar seus conhecimentos prévios sobre física, meteorologia e energia para entender como a turbina funciona. Por exemplo, o aluno pode saber que o vento é uma forma de energia cinética, que é a energia do movimento. Ele também pode saber que a turbina eólica é um dispositivo que converte a energia cinética do vento em energia elétrica. Ao conectar esses conhecimentos, o aluno pode construir uma compreensão significativa da turbina eólica. Ele pode entender que a turbina funciona usando a força do vento para girar as pás, que são ligadas a um gerador que produz eletricidade. A aprendizagem significativa é importante porque pode ajudar os alunos a construir conhecimentos sólidos e duradouros. Ao usar conceitos científicos como turbinas eólicas, os professores podem ajudar os alunos a aprender de forma significativa.

Ausubel (1973, p. 25), define o subsunçor como sendo uma “estrutura específica na qual uma nova informação pode se agregar ao cérebro humano, que é altamente organizado e detentor de uma hierarquia conceitual, que armazena experiências prévias do sujeito”. Além disso, Ausubel, Novak e Hanesian, (1980, p.32) explica que “existem dois pontos básicos para que a aprendizagem significativa seja concretizada, sendo eles: 1) O material a ser aprendido deve ser potencialmente significativo e 2) O aluno precisa manifestar uma predisposição para aprender”. Nesse sentido, o conceito de velocidade, por exemplo, poderá ter significado para o estudante se o mesmo for relacionado com outro conteúdo já existente na sua estrutura cognitiva, nesse caso, as unidades de medidas, podendo esse conteúdo servir de subsunçor para novas informações referentes ao conceito de velocidade. Além disso, o conceito de velocidade também poderá ser relacionado com o trânsito, pois é algo presente na rotina do estudante, além de ser de relevância social.

## 2.8. METODOLOGIA: revisão bibliográfica

Para consolidar os objetivos do trabalho, adotou-se uma metodologia lastreada em uma revisão de literatura de cunho documental e histórico e com fulcro nas produções da Sequência Didática (SD) planejada, pois a mesma é parte integrante do produto educacional que embasa esta dissertação. Nesse sentido, serão apresentados nesta seção alguns artigos, dissertações da área do ensino de ciências, livros, como também trabalhos científicos sobre energia eólica. Dessa forma, selecionamos os que de alguma forma tinham convergência temática com a proposta deste trabalho. Após analisar os artigos, dissertações, livros e trabalhos, selecionados, construímos uma tabela com informações que julgamos ser importantes para apresentar nesta seção.

Além dos temas que abordam o ensino de física, separamos trabalhos que abordam a área de energia eólica e temas diversos dentro da Física. A tabela a seguir, apresenta uma amostragem aproximada deste estudo. Vale ressaltar que o estudo desenvolvido tem temas variados, como, por exemplo, mecânica dos fluidos, circulação atmosférica e meio ambiente.

**Tabela 1 - Levantamento de trabalhos para análise**

| AUTORES   | TÍTULO   | ANO  | FONTE  |
|---|--|------|--|
| <b>Elio C. Ricardo e Janaína C.A. Freire.</b>   | A concepção dos alunos sobre a física do ensino médio: um estudo exploratório.                               | 2007 | Revista Brasileira de Ensino de Física v. 29, n. 2, p. 251-266, (2007).                        |
| <b>Marcus Venícius Juliano de Souza; Valter Assis Dantas, J. Rufino de Freitas Filho e Maria Angela Vasconcelos de Almeida.</b> | Utilização de situação de estudo como forma alternativa para o ensino de Física.                             | 2009 | Revista Ensaio, vol. 11, nº 1, p. 1-15, 2009.  |
| <b>Hélio Bonadiman e Sandra E. B. Nonenmacher.</b>  | O gostar e o aprender no ensino de física: uma proposta metodológica.  | 2007 | Cad. Bras. Fís., v. 24, n. 2: p. 194-223, ago. 2007.   |
| <b>Joseph D. Novak e Alberto J. Canas.</b>  | A teoria subjacente aos mapas conceituais e como elaborá-los e usá-los                                       | 2010 | Florida Institute for Human and Machine Cognition (IHMC).                                      |
| <b>Marco Antônio Moreira.</b>   | Pesquisa básica em educação em ciências: uma visão pessoal.  | 2004 | Instituto de Física, UFRGS.  |
| <b>Fabio Sarmiento Blandes.</b>   | Uma proposta do tema energia eólica no ensino fundamental II através da investigação                         | 2018 | Dissertação de Mestrado em Ensino de Física, UFOPA.  |
| <b>Marcos A. S Jesus.</b>   | Jogos na educação matemática: análise de uma proposta para a 5ª Série do ensino fundamental                  | 1999 | Dissertação de Mestrado em Psicologia da Educação Matemática. Universidade Campinas. Campinas. |
| <b>Felipe Fernandes Lopes; Suyara Santos e Vinícius Fonseca da Silva.</b>   | Pré-Modelagem de um Aerogerador de Eixo Vertical.  | 2017 | IFMG, Campus Arcos.  |
| <b>Luis Reyes Rosales Montero; Vanessa Rosales Bezerra; Keila Machado de Medeiros e Carlos Antônio Pereira de Lima.</b>         | Proposta do aproveitamento do potencial da microgeração eólica na zona rural, urbana e litorânea brasileira. | 2021 | Congresso nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências - V CONAPESC.                              |
| <b>Luerles Silva Purificação e Rodrigo</b>  | Estudo de turbinas eólicas verticais   |      | Centro Tecnológico   |

|   |  |      |  |
|---|--|------|--|
| <b>Borges Della Fonte.</b>  | com exemplo de dimensionamento de uma turbina eólica darrieus para aplicação em edifícios.   | 2012 | Departamento de Engenharia Mecânica – UFES.  |
| <b>Evelyse dos Santos Lemos.</b>  | Reflexões a Luz da Teoria da Aprendizagem Significativa.   | 2012 | Aprendizagem Significativa em Revista, Porto Alegre, v. 2, n.2, p. 23-41, 2012.  |
| <b>Marco Antônio Moreira.</b>   | Ensino de Física no Brasil: Retrospectiva e Perspectivas.  | 2000 | Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, n.º 1, Março, 2000. Instituto de Física, UFRGS.   |
| <b>Ana Paula Pícolo; Alexandre J. Röhler e Giuliano Arns Rampinelli.</b>                      | Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de física clássica.  | 2014 | Artigos Gerais, Ver. Bras. Ensino de Fis. 36.  |
| <b>Emerson Izidoro dos Santos; Luís Paulo de Carvalho Piassi e Norberto Cardoso Ferreira.</b> | Atividades Experimentais de Baixo Custo como Estratégia de Construção da Autonomia de Professores de Física: Uma Experiência em Formação Contínua. | 2004 | Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, 9. Jaboticatubas.  |
| <b>Cassiana Barreto Rippel.</b>   | Uma estratégia para aprendizagem significativa: estudo das propriedades da luz através de experimentos de baixo custo para o ensino médio.         | 2020 | Dissertação de Mestrado do MNPEF, 2020, UFSC.  |
| <b>David Ausubel, Joseph D. Hanesian.</b>   | Psicologia Educacional   | 1980 | Livro.   |
| <b>Juliano Barros de Carvalho.</b>  | Seqüência didática para o ensino da indução eletromagnética a partir da energia eólica.  | 2021 | Dissertação de Mestrado do MNPEF, 2021, UFSCar.  |
| <b>Francisco Leonardo Lopes da Silva.</b>   | Construindo um balão de ar quente: uma seqüência didática para a aprendizagem significativa  | 2021 | Dissertação de Mestrado Nacional Profissional Em Ensino de Física - MNPFEEF, Polo 47, Universidade Federal do Maranhão - UFMA, 2021.                             |
| <b>Fabiana Andrade da Costa Vieira.</b>   | Ensino por Investigação e Aprendizagem Significativa Crítica: análise fenomenológica do potencial de uma proposta de ensino                        | 2012 | Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, Universidade Estadual Paulista. Bauru, São Paulo.  |
| <b>Marco Antônio Moreira.</b>   | Unidades de Ensino Potencialmente Significativas - UEPS  | 2011 | Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).  |
| <b>Sani de Carvalho Rutz da Silva e Ana Cristina Schirlo.</b>                                 | Teoria de Aprendizagem Significativa de Ausubel: Reflexões para o Ensino de Física Ante a Nova Realidade Social                                    | 2014 | Imagens da Educação, v. 4, n. 1, p. 36-42, 2014.   |
| <b>Joabson Guimarães da Silva.</b>  | O Alcance da Aprendizagem Significativa sobre Energia Elétrica, com Estudantes do Terceiro Ano do Ensino Médio, em Escolas do Sudoeste da Bahia.   | 2018 | Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação Multi-Institucional e Multidisciplinar em Difusão do Conhecimento, sediado na Universidade Federal da Bahia, 2018. |
| <b>R.T. da Silva e H.B. de Carvalho</b>   | A indução eletromagnética: análise conceitual e fenomenológica.  | 2012 | Rev. Bras. Ensino Fís. 34 (4).   |
| <b>Araújo, M. S. T. de, &amp; Müller, P. (2002).</b>  | Uma aplicação do eletromagnetismo. Caderno Brasileiro de Ensino de Física.   | 2002 | “Levitação magnética”: 19(1), 115-120.   |

A partir da análise dos trabalhos descritos na Tabela 1, foi possível obter uma visão mais ampla para o direcionamento da elaboração da sequência didática. O objetivo desta análise foi verificar os trabalhos que possuíam relação com o tema proposto, uma vez que o eixo teórico já estava definido com a escolha da Teoria de Aprendizagem Significativa de Ausubel. Logo, deu-se início à construção da SD a ser trabalhada em sala de aula.

## 3 ELEMENTOS DE FÍSICA

### 3.1 MECÂNICA

Mecânica é a área da Física que estuda os movimentos e possui quatro grandes campos: Mecânica Clássica (Newton), que estuda os movimentos do cotidiano; Relatividade Especial (Einstein), que faz a análise dos corpos que se movimentam com velocidades próximas à velocidade da luz; Mecânica Quântica (Bohr, Heisenberg, Schrödinger et al), que se dedica ao desenvolvimento do estudo dos movimentos dentro do átomo; e a Teoria Quântica de Campo (Dirac, Pauli, Feynman, Schwinger et al), responsável por introduzir a quantização do campo eletromagnético.

Segundo GRIFFITHS (2011) as diferenças entre a mecânica newtoniana, mecânica relativista e a mecânica quântica se tornaram bastante significativas, pois para corpos que eram muito rápidos e muito pequenos (algo muito comum na moderna física de partículas), era extremamente necessária uma mecânica que combinasse a relatividade e os princípios quânticos, sendo assim, essa mecânica quântica relativística ficou conhecida como a teoria quântica de campo, tendo sido elaborada nas décadas de 1930 e 1940.

### 3.2 MECÂNICA NEWTONIANA

A mecânica newtoniana estuda a relação casual entre força, massa e movimento. Isaac Newton, filósofo e cientista do século XVII, desenvolveu um conjunto de princípios universais com o intuito de dar a sua contribuição para explicar e prever o movimento dos objetos no mundo natural, além de analisar o quanto esses objetos mudavam de movimento relativo na interação com as forças externas.

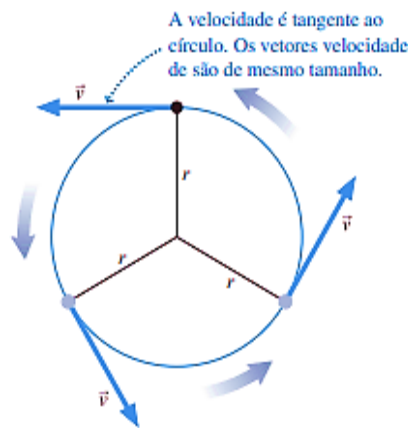
#### 3.2.1 Movimento Circular

Do ponto de vista da dinâmica, Isaac Newton foi o primeiro a entender o movimento circular. Para este feito, Newton analisou o movimento da Lua, uma vez que a trajetória da Lua é praticamente circular, permitindo a ele entender que o movimento circular uniforme é, de fato, acelerado. Com base nesse estudo, Newton estabeleceu as bases para a Teoria da Gravitação Universal (MARQUES, Gil, USP/Univesp).

### 3.2.2 Movimento Circular Uniforme (MCU)

O movimento circular uniforme (MCU) é um tipo de movimento de trajetória circular em que o módulo da velocidade, ou simplesmente velocidade escalar, é constante. Neste tipo de movimento, a velocidade escalar não varia, porém a partícula está acelerada, uma vez que a direção e o sentido do vetor velocidade variam com o tempo. Esta aceleração é denominada aceleração centrípeta, tem magnitude constante, sendo que a mesma está direcionada, o tempo inteiro, em direção ao eixo de rotação. A aceleração é produzida por uma força centrípeta, que também tem magnitude constante e também está direcionada para o eixo de rotação. A Figura 2 apresenta uma partícula em MCU, que se move com velocidade constante em um círculo de raio  $r$ , onde o vetor velocidade  $\vec{v}$  é tangente ao círculo descrito, e a velocidade  $v$  da partícula é constante, logo o vetor tem o mesmo tamanho.

**Figura 2 - Partícula em movimento circular.**



Fonte: Randall D. Knight, Física: Uma abordagem estratégica, vol. 1, Bookman, Porto Alegre, 2009.

O Período do movimento é o intervalo de tempo que a partícula leva para completar uma volta do círculo, completando uma revolução, sendo representado pelo símbolo  $T$ . Vamos imaginar um ponto em uma roda girando, nesta situação o período é o tempo que esse ponto leva para voltar à mesma posição inicial. No movimento circular uniforme, a partícula se move com velocidade constante tanto em módulo quanto em direção. A relação entre o período ( $T$ ) e a velocidade linear ( $v$ ) da partícula pode ser determinada considerando que, em um período, a partícula percorre a circunferência completa do círculo. Da cinemática, sabe-se que a velocidade de um corpo é a distância que ele percorre na unidade de tempo:

$$v = \frac{\text{distância}}{\text{tempo}} \quad (3.1)$$

A distância percorrida em um círculo é dada pelo comprimento da circunferência ( $2\pi r$ ), onde  $r$  é o raio do círculo, logo a velocidade  $v$  da partícula será expressa pela relação:

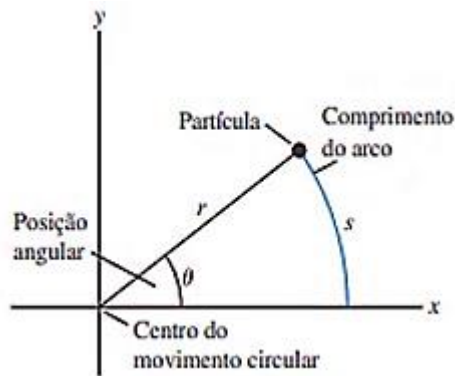
$$v = \frac{1 \text{ circunferência}}{1 \text{ período}} = \frac{2\pi r}{T} \quad (3.2)$$

Portanto, o período é inversamente proporcional à velocidade linear. Quanto maior a velocidade, menor o tempo necessário para completar uma volta. Além da velocidade linear, outra grandeza importante no movimento circular é a velocidade angular ( $\omega$ ), que representa a variação do ângulo por unidade de tempo.

### 3.2.3 Deslocamento Angular

A posição de uma partícula em movimento circular é definida por sua distância ao centro do círculo, que é o raio ( $r$ ), e pelo ângulo  $\theta$  que o segmento de reta que liga o centro do círculo à partícula forma com o semi-eixo positivo das abscissas (eixo  $x$ ). Esse ângulo  $\theta$ , também conhecido como posição angular, é medido em radianos e aumenta no sentido anti-horário, conforme ilustrado na figura abaixo:

**Figura 3 - Movimento de uma partícula.**



Fonte: Randall D. Knight, Física: Uma abordagem estratégica, vol. 1, Bookman, Porto Alegre, 2009.

O vetor posição da partícula é um vetor que parte da origem (centro do círculo) e chega até a partícula. Seu módulo é igual ao raio do círculo ( $r$ ) e forma um ângulo  $\theta$  com o eixo  $x$ . A direção e o sentido do vetor posição indicam a posição da partícula no círculo. Para calcular o ângulo  $\theta$  apresentado na Figura 3, vamos utilizar a definição de radiano.

$$\theta \text{ (radianos)} \equiv \frac{s}{r} \quad (3.3)$$

Um radiano é o ângulo central de uma circunferência que subtende um arco cujo comprimento é igual ao raio da circunferência, sendo que a unidade radiano é a unidade de ângulo no SI (Sistema Internacional) que foi abreviada para rad. A equação para um comprimento de arco correspondente a uma volta completa no círculo ( $2\pi r$ ) será:

$$\theta_{\text{círculo completo}} = \frac{2\pi r}{r} = 2\pi \text{ rad} \quad (3.4)$$

A relação estabelecida na Equação (3.4) é base para os seguintes fatores de conversão:

$$1 \text{ volta completa no círculo} = 360^\circ = 2\pi \text{ rad}$$

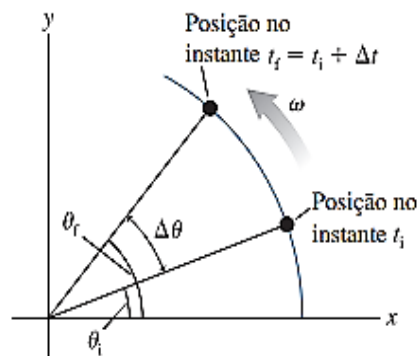
Para um comprimento de arco correspondente a um ângulo  $\theta$  em rad, podemos reescrever a Equação (3.3) da seguinte forma:

$$S = r \theta \quad (3.5)$$

### 3.2.4 Velocidade Angular

A Figura 4 mostra uma partícula movendo-se em um círculo a partir de uma posição angular inicial no instante  $t_i$  para uma posição angular final em um instante posterior  $t_f$ . A variação é chamada de deslocamento angular.

**Figura 4 - Partícula se movendo com velocidade angular  $\omega$**



Fonte: Randall D. Knight, *Física: Uma abordagem estratégica*, vol. 1, Bookman, Porto Alegre, 2009.

Considerando uma partícula se movendo em um círculo (Figura 4) a partir da posição angular inicial  $\theta_i$  no instante  $t_i$  para uma posição angular final  $\theta_f$  em um instante posterior  $t_f$ , nesta situação o deslocamento angular ( $\Delta\theta$ ) é medido em radianos e é calculado pela diferença entre a posição angular final ( $\theta_f$ ) e a posição angular inicial ( $\theta_i$ ),  $\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$ .

A velocidade angular média é uma grandeza física que nos informa a rapidez com que um objeto está girando em torno de um eixo fixo, ou seja, a taxa com que um ângulo está variando ao longo do tempo. Em termos mais simples, ela nos diz quantas voltas completas um objeto dá em média a cada segundo. Para calcular a velocidade angular média ( $\omega_m$ ), dividimos o deslocamento angular ( $\Delta\theta$ ) pelo intervalo de tempo ( $\Delta t$ ):

$$\omega_m = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (3.6)$$

Quando o intervalo de tempo  $\Delta t$  se torna muito pequeno,  $\Delta t \rightarrow 0$ , chega-se, então, à definição de velocidade angular instantânea:

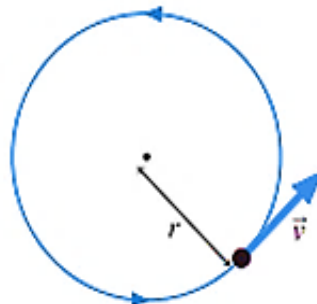
$$\omega \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{velocidade angular}) \quad (3.7)$$

No SI, a unidade de velocidade angular é rad/s.

### 3.2.5 Velocidade e Aceleração no MCU

Ao considerar uma partícula em movimento circular uniforme descrito pela Figura 5, nota-se que o vetor velocidade  $\vec{v}$  é sempre tangente ao círculo, ou seja, o vetor velocidade possui apenas uma componente tangencial  $v_t$ . Esta componente vetorial  $v_t$  corresponde à taxa  $\frac{ds}{dt}$  com a qual a partícula se move em um círculo, sendo  $s$  o comprimento de arco medido a partir do semi-eixo positivo de  $x$ .

**Figura 5 - Componente tangencial.**



Fonte: Randall D. Knight, Física: Uma abordagem estratégica, vol. 1, Bookman, Porto Alegre, 2009.

O componente tangencial de velocidade  $v_t$  é a taxa  $\frac{ds}{dt}$  com a qual a partícula se move em um círculo, onde  $s$  é o comprimento de arco medido a partir do semi-eixo positivo de  $x$ .

Da Equação (3.5), sabemos que o comprimento de arco  $S$  é dado por  $S = r \cdot \theta$ . Derivando a relação, obtemos a seguinte relação:

$$v_t = \frac{ds}{dt} = \frac{d\theta}{dt} r \quad (3.8)$$

Mas,  $\frac{d\theta}{dt}$  é a velocidade angular  $\omega$ . Logo, a velocidade tangencial e a velocidade angular estão relacionadas pela seguinte equação:

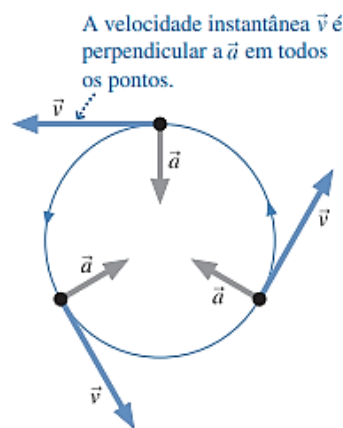
$$v_t = \omega \cdot r \quad (3.9)$$

Onde, a velocidade tangencial  $v_t$  é positiva para o movimento no sentido anti-horário e negativa no sentido horário, com  $\omega$  dado em rad/s.

### 3.2.6 Aceleração

A aceleração angular é definida como a taxa por unidade de tempo pela qual a velocidade angular muda com o tempo. A Figura 6 ilustra uma partícula que se move em MCU, onde a velocidade instantânea é tangente ao círculo, de modo que  $\vec{v}$  e  $\vec{a}$  são mutuamente perpendiculares em todos os pontos do círculo, ou seja, o vetor velocidade instantânea ( $\vec{v}$ ) é sempre tangente à trajetória circular, enquanto o vetor aceleração ( $\vec{a}$ ) aponta para o centro da curvatura da trajetória. A aceleração do movimento circular uniforme é chamada de aceleração centrípeta ou radial, um termo com raiz grega que significa “*o que procura o centro*”.

**Figura 6 - Aceleração - movimento circular.**



A aceleração centrípeta é originada pela variação da direção do vetor velocidade de um móvel, característico de movimentos curvilíneos ou circulares, sendo que a velocidade é uma grandeza vetorial que tem módulo, direção e sentido. Por definição, sabe-se que a aceleração média é a variação da velocidade em relação ao tempo, ou seja:

$$\vec{a}_m = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (3.10)$$

Para que tenhamos, efetivamente, um movimento circular uniforme, é necessário que a aceleração mude continuamente, ou seja, quando o intervalo de tempo  $\Delta t$  se torna muito pequeno,  $\Delta t \rightarrow 0$ , então chega-se à definição de aceleração no MCU:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (3.11)$$

No MCU, a única componente da aceleração existente na direção do centro da trajetória, responsável pelo movimento, é a aceleração centrípeta. A aceleração tangencial pode afetar o módulo da velocidade, mas não a sua direção. Entretanto, a aceleração centrípeta não pode afetar o módulo da velocidade, mas afeta continuamente a sua direção. Assim, a relação funcional entre a aceleração centrípeta e as variáveis do movimento (velocidade e raio do círculo) está descrita da seguinte forma:  $\Delta v = v \Delta \theta$  e  $\Delta r = r \Delta \theta$ . Isolando-se  $\Delta \theta$ , chega-se à seguinte relação:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta r}{r} \quad (3.12)$$

Da Equação (3.10) temos que a aceleração é dada por  $\vec{a}_m = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ , portanto:

$$\vec{a}_m = \frac{v \Delta r}{r \Delta t} = \frac{v}{r} \cdot \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{v^2}{r} \quad (3.13)$$

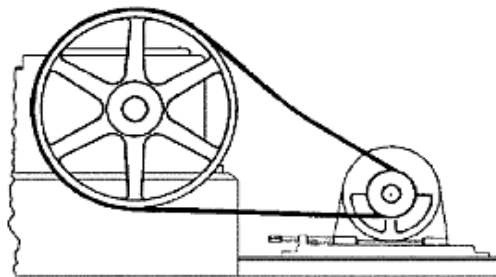
Onde utilizamos  $\Delta r / \Delta t = v$ . Logo a relação final obtida para a aceleração centrípeta está descrita da seguinte forma:

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad (3.14)$$

### 3.2.7 Polias, Correias e Transmissão de Potência.

As polias são peças cilíndricas, movimentadas pela rotação do eixo do motor e pelas correias. Os tipos de polia são determinados pela forma da superfície na qual a correia se assenta, sendo que a polia que transmite movimento e força é a polia motora ou condutora. Polia que recebe movimento e força é a polia movida ou conduzida.

**Figura 7 - Esquema de duas polias acopladas através de uma correia.**



Fonte: Lino (2013)

Correias são elementos de máquinas que transmitem movimento de rotação entre dois eixos por intermédio de polias. Elas são empregadas quando se pretende transmitir potência de um veio para o outro a uma distância em que o uso de engrenagens é inviável. Sendo a transmissão de potência, a transmissão de força e velocidade de um eixo a outro, uma vez que a potência é igual ao produto da força pela velocidade de deslocamento (Lino, 2013).

$$P = F v \quad (3.15)$$

Onde:

$P$ : Potência (em watts, W);

$F$ : Força aplicada (em newtons, N);

$v$ : Velocidade do objeto na direção da força (em metros por segundo, m/s).

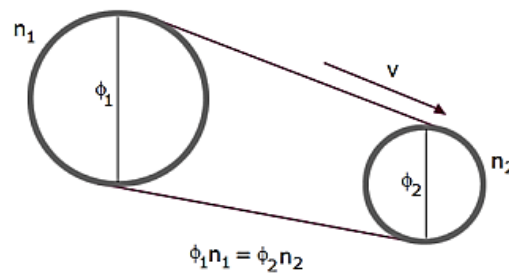
### 3.2.8 Relação de Transmissão nas Polias

- Períodos, Frequências e Relação de Transmissão.

Segundo LINO (2013), a velocidade linear  $v$  de uma correia que executa um movimento circular (Figura 8) é a mesma para todos os pontos periféricos, pois não há escorregamento.

$$v_1 = r_1 \omega_1 = \frac{2r_1}{2} \cdot \frac{n_1 \pi}{30} = \frac{\phi_1 n_1 \pi}{60} \quad (3.16)$$

**Figura 8 - Esquema de duas polias acopladas por uma correia**



Fonte: Lino (2013)

Onde,

$r_1$  = raio da polia motora;

$\phi_1$  = diâmetro da polia motora;

$\omega_1$  = velocidade angular da correia, em rad/s;

$n_1$  = velocidade angular da correia, em RPM;

$r_2$  = raio da polia movida;

$\phi_2$  = diâmetro da polia movida;

$\omega_2$  = velocidade angular da correia, em rad/s;

$n_2$  = velocidade angular da correia, em RPM.

Analogamente, para a polia movida, podemos utilizar a seguinte relação para o cálculo da velocidade linear  $v$ :

$$v_2 = r_2 \omega_2 = \frac{2r_2}{2} \cdot \frac{n_2 \pi}{30} = \frac{\phi_2 n_2 \pi}{60} \quad (3.17)$$

Como a velocidade linear de uma correia em movimento circular é constante em todos os pontos periféricos, então, podemos concluir que:

$$v_1 = v_2 \quad (3.18)$$

Combinando as equações (3.16) e (3.17) com a equação (3.18), obtemos a relação raio versus velocidade angular, cuja unidade no SI está em rad/s:

$$r_1\omega_1 = r_2\omega_2 \quad (3.19)$$

Sabendo que a velocidade angular ( $\omega$ ) pode ser escrita como função da frequência, obtém-se a Eq.(3.20).

$$2\pi f_1 r_1 = 2\pi f_2 r_2 \quad (3.20)$$

E por fim pode-se obter a relação entre as frequências e os raios, matematicamente expressa da seguinte forma:

$$f_1 r_1 = f_2 r_2 \quad (3.21)$$

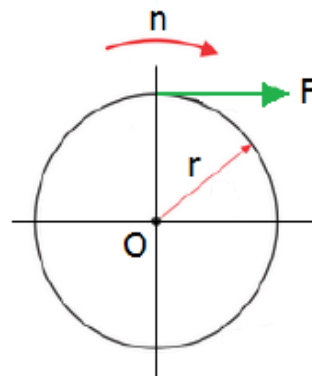
Com base na Eq.(3.21), conclui-se que para que haja um aumento da frequência da polia e conseqüentemente da velocidade angular, é necessário que a polia motora, aquela que fornece o movimento, tenha um raio maior do que a polia movida que recebe o movimento.

- Transmissão do Torque.

O Torque ( $M$ ) é uma grandeza vetorial da física associada às forças que produzam rotação em um corpo.

$$M = F \cdot r \quad (3.22)$$

**Figura 9 - transmissão de torque em polias**



Fonte: Lino (2013)

Considerando a figura acima, vamos supor um motor de potência  $P$  com rotação  $n$  medida em  $rpm$ . Se acoplarmos uma polia de raio  $r_1$ , sua rotação será  $n_1 = n$ . Deduzindo uma expressão para a força tangencial  $F_t$  na extremidade da polia acoplada ao motor, chega-se à seguinte expressão:

$$P = F_t \cdot v = F_t \omega r_1 = F_t \cdot \frac{30n_1}{\pi} \cdot r_1 \quad (3.23)$$

Isolando a força tangencial  $F_t$ , a expressão (3.23) tomará a seguinte forma:

$$F_t = \frac{\pi P}{30n_1 r_1} \quad (3.24)$$

### 3.3 MECÂNICA DOS FLUIDOS

De acordo com Fox et al (2017), Mecânica dos Fluidos é uma área da Física que estuda o comportamento estático e dinâmico dos fluidos, trata das leis de forças e movimentos dos materiais que podem fluir como líquidos e gases e está dividida em duas grandes áreas: a hidrostática e a hidrodinâmica.

#### 3.3.1 Hidrostática

A hidrostática é a parte da mecânica dos fluidos que estuda os fluidos em repouso, descrevendo as forças que atuam sobre esses fluidos, bem como as suas propriedades. Os principais conceitos da hidrostática são:

- a) **Pressão:** é a força exercida por uma unidade de área. A pressão é medida em pascal (Pa), que é equivalente a uma força de um newton (N) aplicada por uma área de um metro quadrado ( $m^2$ ) no SI.
- b) **Densidade:** é a massa de uma unidade de volume. A densidade é medida em quilogramas por metro cúbico ( $kg/m^3$ ).
- c) **Empuxo:** é a força que atua sobre um corpo imerso em um fluido, na direção oposta ao peso do corpo. O empuxo é igual ao volume do corpo vezes a densidade do fluido, vezes a aceleração da gravidade.

A hidrostática é uma área fundamental da física, pois é a base para a compreensão de muitos fenômenos naturais e tecnológicos. Ela é aplicada em diversas áreas, como engenharia, arquitetura, transporte e esportes. As leis da hidrostática são princípios que descrevem as forças que atuam nos fluidos em repouso.

- a) **Lei de Pascal:** a pressão exercida em um fluido confinado é transmitida uniformemente em todas as direções.
- b) **Teorema de Stevin:** a pressão em um fluido é proporcional à profundidade do fluido.
- c) **Lei de Arquimedes:** estabelece que a força de empuxo é diretamente proporcional ao volume do fluido deslocado e à densidade do fluido. Essa força é fundamental para explicar por que alguns objetos afundam e outros flutuam.

### 3.3.2 Hidrodinâmica

A hidrodinâmica é a parte da mecânica dos fluidos que estuda os fluidos em movimento. É uma área fascinante que nos ajuda a compreender o mundo que nos cerca. As leis da hidrodinâmica são princípios que descrevem as forças que atuam nos fluidos em movimento.

- a) **Lei de Torricelli:** a velocidade de um fluido que escoar de um orifício em um recipiente aberto é igual à raiz quadrada da altura do fluido acima do orifício. Em termos matemáticos:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Onde,

$v$ : velocidade do fluido ao sair do orifício (m/s);

$g$ : aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$h$ : altura do fluido acima do orifício (m).

- b) **Lei de Darcy-Weisbach:** a perda de energia de um fluido em movimento é proporcional à resistência do fluido ao movimento. Em termos matemáticos:

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Onde,

$hf$ : perda de carga (m);

$f$ : fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional);

- $L$ : comprimento do conduto (m);  
 $D$ : diâmetro interno do conduto (m);  
 $V$ : velocidade média do fluido no conduto (m/s);  
 $g$ : Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

- c) **Lei de Bernoulli**: a soma da pressão, da energia cinética e da energia potencial de um fluido é constante ao longo de uma linha de corrente. Em termos matemáticos:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante}$$

Onde,

- $P$ : pressão do fluido;  
 $\rho$ : densidade do fluido;  
 $v$ : velocidade do fluido;  
 $g$ : aceleração da gravidade;  
 $h$ : altura do fluido em relação a um plano de referência.

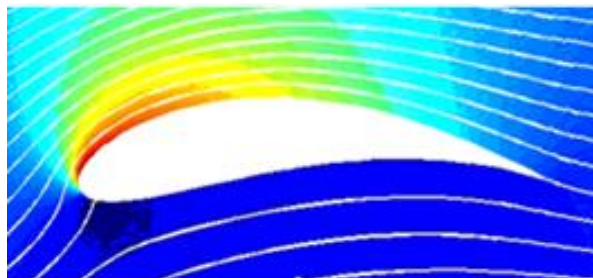
O número de aplicações dos fluidos na engenharia é enorme, pois muitos desses estudos deram origem a máquinas, como a bomba hidráulica, elevador hidráulico, ventiladores, turbinas, aviões, navios, moinhos de vento, tubos, mísseis, motores, filtros, jatos, aspersores, etc. Além disso, quase toda energia elétrica que consumimos é gerada do escoamento de água ou do escoamento de vapor através de turbinas geradoras, dessa forma, nas questões ligadas ao meio ambiente, ela tem sua aplicação através da utilização de fontes de energia renováveis para geração de eletricidade, na qual são utilizadas turbinas para extrair energia de um fluido na forma de trabalho (ou potência). Para as turbinas eólicas, especificamente, o fluido de trabalho é o “*ar atmosférico*”.

Qualquer tensão de cisalhamento aplicada a um fluido, não importa quão pequena ela seja, resultará em movimento desse fluido. De acordo com Fox et al (2017), um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (tangencial), não importando o quão pequeno seja o seu valor; e tendem a escoar quando interagimos com eles, sendo que há duas classes de fluidos, os líquidos e os gases. No presente estudo, o fluido é o ar atmosférico, sendo assim o escoamento acontece quando ocorre a interação por atrito do ar com as pás dos aerogeradores. Um líquido, sendo composto por moléculas relativamente agrupadas com forças coesivas fortes, tende a manter seu volume

e formar uma superfície livre em um campo gravitacional, se não estiver confinado na parte superior (White, 2011).

Os fluidos são formados por moléculas em constante movimento e com ocorrência de colisões entre elas, porém a mecânica dos fluidos adota uma abordagem estatística, considerando o comportamento médio de um grande número de moléculas. Essa abordagem permite descrever o movimento do fluido em termos de grandezas como velocidade, pressão e densidade, que são propriedades macroscópicas. A representação dos parâmetros dos fluidos em função das coordenadas espaciais denomina-se campo de escoamento (Alé, 2011). Logo, os campos de escoamentos que trabalham com fluidos considerados *não viscosos*, situação ideal; e fluidos *incompressíveis*, ou seja, fluidos cuja densidade sempre permanece constante com o tempo; utilizam soluções analíticas que permitem descrever o campo de escoamento apresentando o comportamento das linhas de corrente. Com tal informação, pode-se descrever o campo de velocidades e de pressões. Um exemplo típico é solução do escoamento potencial de perfil aerodinâmico como o apresentado na figura a seguir.

**Figura 10 - Campo de escoamento potencial de um perfil aerodinâmico**



Fonte: Alé (2011)

A densidade do ar, uma propriedade fundamental da atmosfera, está intimamente ligada às leis da física. A lei dos gases ideais, por exemplo, estabelece uma relação entre a pressão, o volume, a temperatura e a quantidade de matéria de um gás. Essa lei explica por que a densidade do ar diminui com o aumento da altitude, onde a pressão atmosférica é menor. A variação da densidade do ar é a base para muitos fenômenos atmosféricos. O ar quente, menos denso, tende a subir, enquanto o ar frio, mais denso, tende a descer. Essa diferença de densidade gera as forças que impulsionam os ventos e as grandes circulações atmosféricas. A umidade também influencia a densidade do ar, pois o vapor d'água é menos denso que o ar seco. A densidade do ar é um parâmetro crucial em diversas áreas, como meteorologia, aviação e indústria. A compreensão da densidade do ar é essencial para modelar o clima, projetar aeronaves e otimizar processos industriais. A densidade é uma propriedade da matéria que relaciona a massa de um objeto com o volume que ele ocupa. Em outras palavras, a densidade nos

diz o quão "compacto" um material é. Para calcular a densidade de um corpo, utilizamos a seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.25)$$

Onde,

$\rho$  = representa a densidade (geralmente medida em  $\text{kg/m}^3$  no SI);

$m$  = representa a massa (medida em kg);

$v$  = representa o volume (medido em  $\text{m}^3$ ).

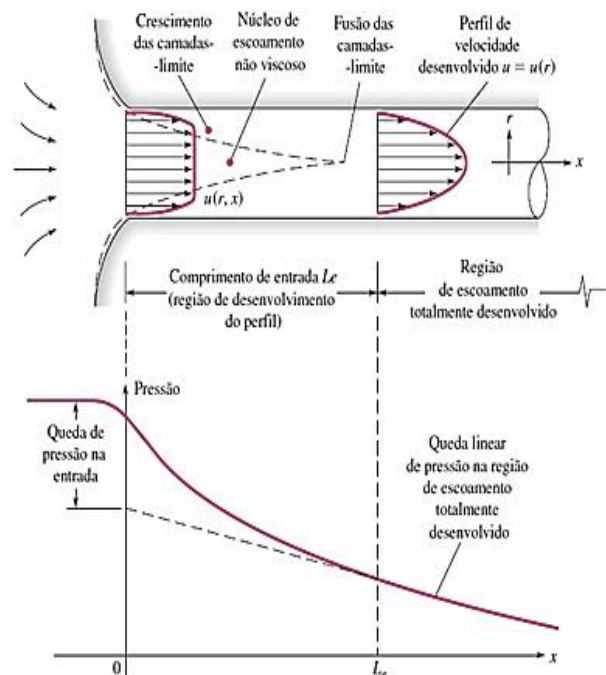
A ISA (Atmosfera Padrão Internacional) considera que ao nível do mar e a temperatura de  $15^\circ\text{C}$ , o ar tem uma densidade de cerca de  $1,225 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.3.3 Escoamentos

#### a) Escoamentos Internos

Nos escoamentos internos o fluido é restringido por paredes limítrofes e escoado limitado por superfícies sólidas, como por exemplo, os escoamentos em dutos e tubos. O campo de velocidades num escoamento interno pode ser visto na Figura 11, pois esta mostra um escoamento interno em um duto longo, onde é possível verificar perfis de velocidade em desenvolvimento e variações de pressão na entrada do escoamento em um duto.

**Figura 11 - Campo de velocidades num escoamento interno**

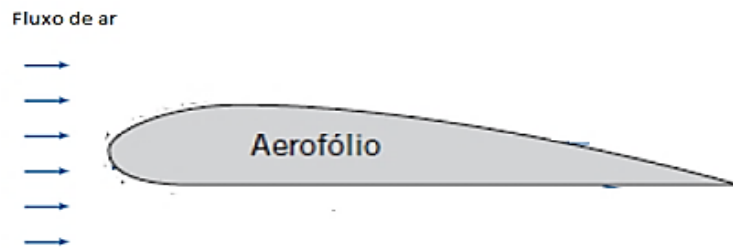


Fonte: White (2011)

### b) Escoamentos Externos

Durante o escoamento externo, o fluido encontra um obstáculo, sendo que para o presente trabalho esse obstáculo é um aerofólio. A Figura 12 ilustra essa condição.

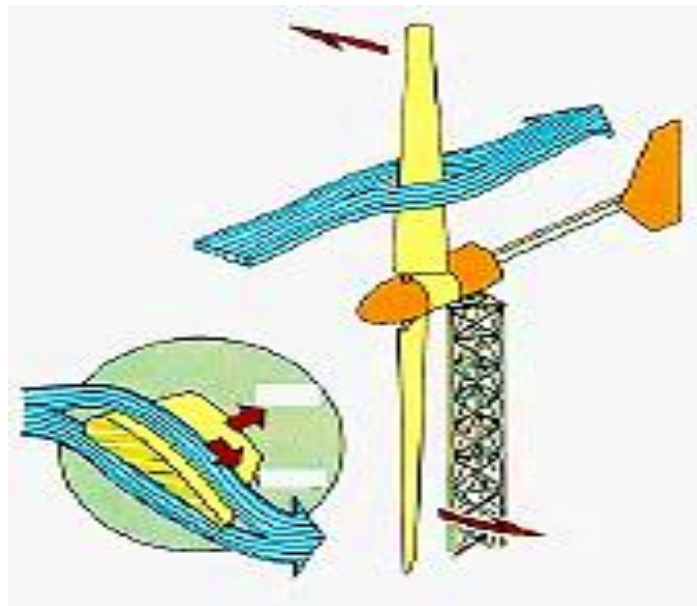
**Figura 12 - Aerofólio - Fluxo de ar**



Fonte: Adaptado, fig 9.1, Fox et al (2017)

De acordo com Alé (2011), na aerodinâmica o escoamento sobre asas de avião, pás de helicópteros, escoamento de mísseis e foguetes, e escoamento numa turbina eólica são casos típicos de escoamentos externos.

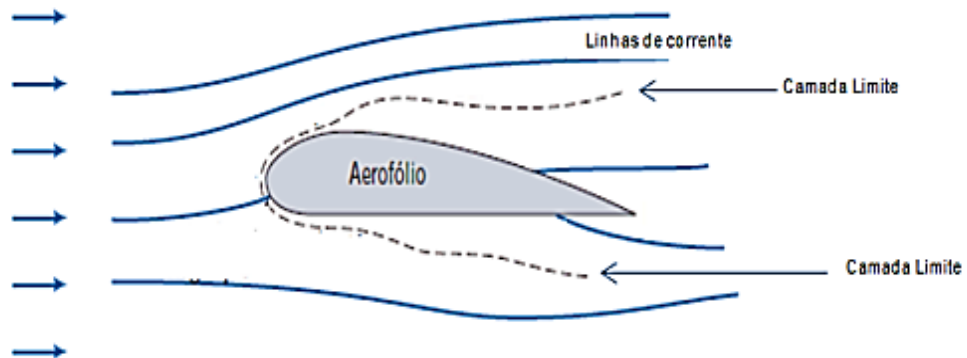
**Figura 13 - Aerofólio - Forças atuantes**



Fonte: Alé (2011)

Dessa forma, no escoamento externo o fluido vai escoar por fora do aerofólio, conforme mostra as linhas de corrente ilustradas na Figura 14, sendo que as linhas de corrente são linhas tangentes aos vetores velocidade de um escoamento.

**Figura 14 - Aerofólio - Camada Limite**

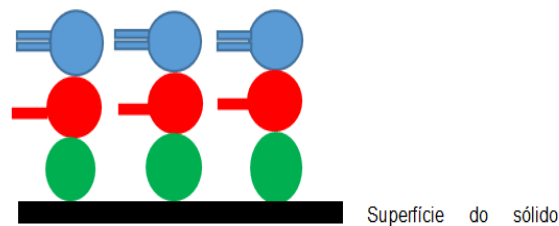


Fonte: Adaptado, fig 9.1, Fox et al (2017)

### 3.3.4 Condição de Não-Escorregamento

É a condição de velocidade nula em relação às fronteiras (paredes) limitando o escoamento. Suponha um fluido em contato direto com um sólido (Figura 15) que possui uma superfície impermeável, nesta situação o fluido “gruda” nessa superfície se deslocando junto a ela devido aos efeitos viscosos, sendo assim não há escorregamento.

**Figura 15 - Fluido em escoamento**



Fonte: Próprios Autores

Portanto, a velocidade do fluido vai ser igual a velocidade da superfície do sólido, ou seja  $V_{\text{superfície}} = V_{\text{fluido na superfície}} = 0$ . Este fato é conhecido como “*condição de não escorregamento*”, responsável pelo desenvolvimento do perfil da velocidade que varia de acordo com a viscosidade do fluido. A camada de fluido que gruda sobre a superfície desacelera a camada de fluido adjacente devido às forças viscosas existentes entre as camadas do fluido. Sendo assim, a região adjacente à parede na qual os efeitos viscosos são significativos é chamada de “*camada limite*” (Figura 14).

### 3.3.5 O Conceito de Camada Limite

Foi então, no ano de 1904, que o engenheiro alemão, Ludwig Prandtl (1875-1953), um estudioso da aerodinâmica, publicou talvez o mais importante artigo sobre mecânica dos fluidos, introduzindo o conceito de camada limite e unificando finalmente as abordagens hidrodinâmicas e de hidráulica, que serviram como elo entre a teoria e a prática, principalmente por ter sido introduzida a possibilidade teórica do arrasto. Anteriormente à inovação histórica de Prandtl, a ciência da Mecânica dos Fluidos vinha se desenvolvendo em duas direções bem distintas: a hidrodinâmica e a hidráulica, logo o conceito de camada-limite forneceu a ligação que estava faltando entre a teoria à prática. Por este feito, Prandtl é geralmente aceito como o fundador da Mecânica dos Fluidos moderna. Prandtl observou que os escoamentos de fluidos com baixa viscosidade, como os escoamentos de água e de ar, podem ser divididos em uma camada viscosa delgada, ou camada-limite, próxima às superfícies sólidas e interfaces, ligada a uma camada externa que pode ser considerada não viscosa, em que são válidas as equações de Euler e Bernoulli. A teoria da camada-limite mostrou ser uma ferramenta muito importante na moderna análise de escoamento (WHITE, 2011).

## 3.4 TRABALHO E ENERGIA

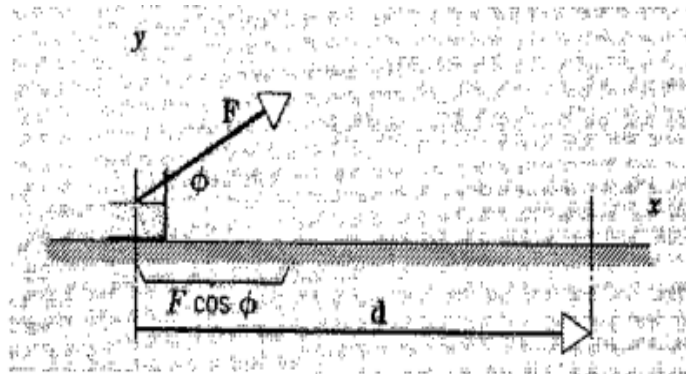
O termo energia é comumente usado no nosso cotidiano, embora, muitas vezes, esse uso seja de forma vaga. Na Física, a energia é uma grandeza fundamental que se manifesta de inúmeras maneiras. Seja na forma de movimento, calor, luz ou eletricidade, a energia está presente em todos os fenômenos naturais. Uma característica marcante da energia é sua capacidade de se transformar de uma forma em outra, como a energia potencial gravitacional de uma pedra no alto de uma montanha se convertendo em energia cinética ao cair. No entanto, a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada, seguindo o princípio da conservação da energia.

A energia obedece a um princípio fundamental: a conservação. Em qualquer processo físico, a quantidade total de energia permanece constante, transformando-se apenas de uma forma para outra. A unidade (sistema internacional) para medir a energia e o trabalho realizado é o *joule*, o qual possui o símbolo J. Para Gonçalo & Toscano (2003, p.226):

“O trabalho de uma força é uma maneira de medir a quantidade de energia transferida, ou transformada, de um sistema para outro ou, em certos casos, a quantidade de energia transformada dentro de um mesmo sistema.” Trabalho Realizado por uma Força Constante.

Considerando uma partícula sobre a qual atua uma força, na situação em que essa força  $F$  é constante e o movimento da partícula é retilíneo e no sentido da força, define-se o trabalho realizado por uma força como sendo o produto da força pelo deslocamento.

**Figura 16 - Força atuando sobre um bloco**



Fonte: Halliday (1983)

Como a força e o deslocamento são grandezas vetoriais, matematicamente, o trabalho ( $\tau$ ) realizado por uma força constante ( $F$ ) sobre um objeto que se desloca a uma distância ( $d$ ) na mesma direção da força é dado por:

$$\tau = F d \cos \phi \quad (3.26)$$

Onde,

$\tau$  = trabalho realizado sobre o corpo (J);

$d$  = deslocamento do corpo (m);

$\phi$  = ângulo formado entre os vetores  $F$  e  $d$  (em grau).

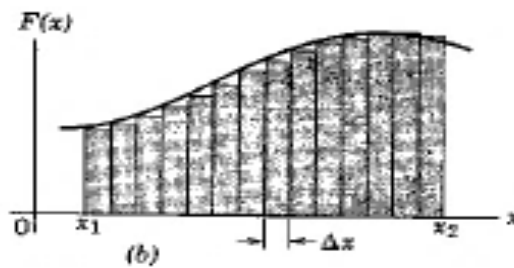
Nesta situação, estamos nos referindo apenas ao trabalho realizado sobre a partícula pela força  $F$ . O *trabalho realizado sobre a partícula* pelas outras forças deve ser calculado separadamente. O trabalho total realizado é a soma dos trabalhos feitos por cada uma das forças.

Quando o ângulo  $\phi$  entre vetores  $F$  e  $d$  é igual a  $0^\circ$ , o objeto recebe o máximo de energia mecânica (trabalho positivo denominado motor). Quando o ângulo vale  $180^\circ$ , o objeto perde o máximo de energia mecânica (trabalho negativo denominado resistente) e para este temos como exemplo o trabalho da força de atrito cinético.

**i. Trabalho Realizado por uma Força Variável (Unidimensional).**

Na Figura 17 está representada a força  $F$  em função de  $X$ , logo ao dividir o deslocamento total de  $x_1$  e  $x_2$  em maior número de intervalos iguais, obteremos um  $\Delta x$  menor e, conseqüentemente, o valor de  $F$  no início de cada intervalo será mais típico de seus valores dentro do intervalo.

**Figura 17 - Força em função de  $x$**



**Fonte:** Halliday (1983)

Assim, obteremos o valor exato do trabalho realizado pela força  $F$  se fizermos  $\Delta x$  aproximar-se de zero e o número de intervalos tender para infinito. Nessa situação, teremos como resultado a seguinte relação:

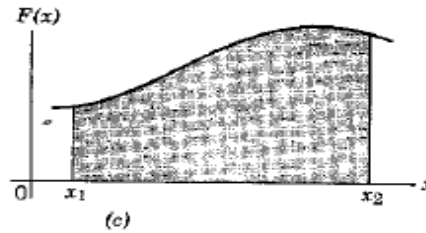
$$\tau_{1-2} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_{x_1}^{x_2} F \Delta x \quad (3.27)$$

A relação (3.28) define a integral de  $F$  em relação à  $x$ , de  $x_1$  a  $x_2$ .

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_{x_1}^{x_2} F \Delta x = \int_{x_1}^{x_2} F dx \quad (3.28)$$

Numericamente, esta grandeza é exatamente igual à área compreendida entre a curva que representa a força e o eixo  $OX$ , entre os limites  $x_1$  e  $x_2$  (Figura 18).

Figura 18 - Área sobre a curva



Fonte: Halliday (1983)

Portanto, geometricamente, uma integral pode ser interpretada como uma área e pode ser vista como uma soma contínua de infinitos elementos infinitesimais. Logo, podemos escrever o trabalho total realizado por  $F$ , ao deslocar o corpo de  $x_1$  a  $x_2$ , como:

$$\tau_{1-2} = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx$$

(3.29)

### i. Energia Cinética ( $E_c$ )

De acordo com o Teorema da energia Cinética (TEC), o trabalho total das forças atuantes numa partícula é igual à variação da energia cinética dessa partícula (HALLIDAY, 1983). Para acelerar um objeto, devemos aplicar uma força, sendo que aplicar uma força requer que façamos um trabalho. Dessa forma, após a realização do trabalho, a energia foi transferida para o objeto, e o objeto estará se deslocando em uma nova velocidade escalar constante. A energia transferida é conhecida como *energia cinética* e depende da massa e velocidade escalar alcançadas.

De acordo com o SI - Sistema Internacional, a energia cinética é uma grandeza física escalar, medida em joules, que está relacionada aos corpos em movimento. Todo corpo que tem massa e velocidade tem energia cinética. A energia cinética pode ser transferida entre objetos e transformada em outras formas de energia. Por exemplo, um pássaro que está voando pode colidir com um pássaro em repouso. Após a colisão, parte da energia cinética inicial do pássaro que estava voando pode ter sido transferida para o pássaro que estava em repouso ou transformada em outra forma de energia. O semiproduto da massa de um corpo

pelo quadrado de sua velocidade é denominado *energia cinética* do corpo ( $E_c$ ), essa energia pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (3.30)$$

Onde,

$E_c$  = energia cinética do corpo (em Joules, J);

$m$  = massa do corpo (em quilograma, kg);

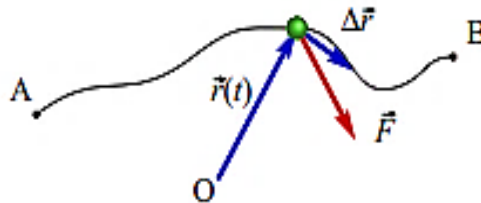
$v$  = velocidade (em metros por segundo, m/s).

Segundo HALLIDAY (1983), o trabalho realizado pela força resultante que atua sobre uma partícula é igual à variação da energia cinética da partícula.

#### iv. Trajetória de uma Partícula e o Teorema do Trabalho-Energia

A trajetória de uma partícula é definida por meio do vetor de posição  $\vec{r}$ , em função do tempo (Figura 19).

Figura 19 - Força resultante e deslocamento de uma partícula



Fonte: Villate, Jaime (2015)

A relação entre força e trajetória é apresentada pela segunda lei de Newton, portanto:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = m \frac{d^2\vec{r}(t)}{dt^2} \quad (3.31)$$

De acordo com Villate, Jaime (2015), para o caso de campos de força,  $\vec{F}$  é uma função da posição, logo, nesta situação, inicia-se o cálculo pela velocidade da partícula. Assim, integrando-se os dois lados descritos na relação (3.31) em função do deslocamento vetorial  $d\vec{r}$  ao longo de um percurso qualquer entre os pontos A e B (Figura 19), obtêm-se as seguintes integrais:

$$\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = m \int_A^B \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot d\vec{r} \quad (3.32)$$

Podemos escrever o termo  $\frac{d\vec{v}}{dt} \cdot d\vec{r}$  somente, em função da velocidade da seguinte forma:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} \cdot d\vec{r} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{v} \cdot \Delta\vec{r}}{\Delta t} = \vec{v} \cdot d\vec{v} = \frac{1}{2} d(v^2) \quad (3.33)$$

Assim, a integral de linha (3.32) pode ser calculada em função da velocidade escalar do seguinte modo:

$$\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = m \int_A^B \vec{v} \cdot d\vec{v} = \frac{1}{2} m v_B^2 - \frac{1}{2} m v_A^2 \quad (3.34)$$

Logo, o trabalho realizado por uma força variável pode ser calculado através da integral definida da força em relação ao deslocamento do seguinte modo:

$$\tau_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad (3.35)$$

Sabendo que a energia cinética está definida pela Eq. 3.30 e considerando o trabalho realizado por uma força variável (3.35), obtêm-se o chamado teorema do trabalho e da energia:

$$\tau_{AB} = E_c(B) - E_c(A) \quad (3.36)$$

Logo, o trabalho realizado por uma força sobre uma partícula, ao longo de uma trajetória, é igual ao aumento da energia cinética da partícula.

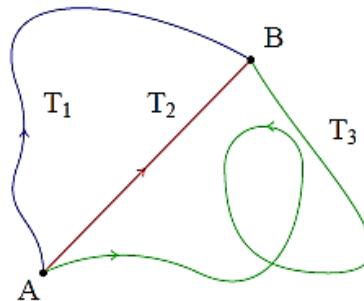
#### iv. Energia Potencial e a Lei da Conservação da Energia mecânica

A lei da conservação da energia mecânica afirma que a energia mecânica total de um sistema isolado (onde não há atuação de forças externas dissipativas) permanece constante ao longo do tempo. Em outras palavras, a energia mecânica pode ser transformada de uma forma para outra, mas a quantidade total de energia mecânica no sistema permanece inalterada. A energia mecânica é a soma da energia cinética e da energia potencial de um objeto.

Energia potencial é uma forma de energia relacionada à posição ocupada por um corpo, além disso, toda energia potencial pode ser armazenada no corpo. Existem diversas naturezas de energia potencial, entretanto, no estudo da mecânica, concentramo-nos no estudo da energia potencial gravitacional e da energia potencial elástica.

A Figura 20 apresenta três possíveis recursos de integração entre dois pontos A e B, quaisquer no espaço. Assim, independentemente da trajetória, se o trabalho que se realiza entre A e B é o mesmo, então, diz-se que a força é conservativa. Logo, é possível definir uma função  $E_p$  para cada ponto do espaço.

Figura 20 - Três possíveis recursos de integração entre dois pontos A e B



Fonte: Villate, Jaime (2015)

Definindo-se, arbitrariamente, a função  $E_p(A)$  num ponto A e a função  $E_p(B)$  num ponto B qualquer; define-se a partir da função  $\tau_{AB}$ , o trabalho realizado pela força entre os pontos A e B da seguinte forma:

$$\tau_{AB} = E_p(A) - E_p(B) \quad (3.37)$$

Como o trabalho não depende do percurso de integração, então, no ponto B, a função  $E_p(B)$  é consistente, sendo considerada a energia potencial associada à força conservativa.

Desse modo, ao combinar as Equações (3.36) e (3.37), obtêm-se a lei da conservação da energia mecânica:

$$E_c(A) + E_p(B) = E_c(B) + E_p(B) \quad (3.38)$$

Todo corpo que tem massa e encontra-se a certa altura com relação ao chão está dotado de energia potencial gravitacional, uma vez que foi necessário consumir certa quantidade de energia para elevá-lo a tal altura. A energia potencial gravitacional corresponde ao trabalho necessário para elevar um corpo de massa  $m$  a uma altura  $h$ , em uma região onde aceleração da gravidade vale  $g$ . Para calcular a energia potencial gravitacional fazemos uso da seguinte fórmula:

$$E_{Pg} = mgh \quad (3.39)$$

Onde,

$E_{Pg}$  = energia potencial gravitacional do corpo (J);

$m$  = massa do corpo (kg);

$h$  = altura (m).

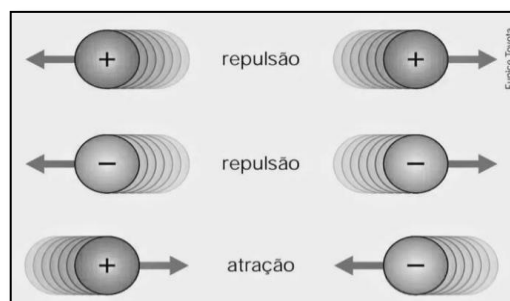
### 3.5. CARGA ELÉTRICA

Desde a Antiguidade, os fenômenos relacionados à eletricidade eram conhecidos pelo homem. Em 600 a. C., o Filósofo grego, Tales de Mileto, já tinha conhecimento sobre um fenômeno provocado pela propriedade de uma resina vegetal fósil, amarelada e translúcida, proveniente de árvores de madeira macia, conhecida como *âmbar*, que, ao ser atritado, atraía pequenos objetos, como palha, pedaços de lã sementes, etc. Assim, devido a essa propriedade, o âmbar foi considerado o material adequado para a produção do efeito de eletrificação. Contudo, durante séculos esse fenômeno não foi incluído em nenhum campo de estudo da ciência, somente cerca de 2.000 anos mais tarde, por volta do ano de 1600, William Gilbert (1544-1603), físico e médico da corte na Inglaterra, fez observações sistemáticas relacionadas ao assunto ao publicar seu tratado "*De magnete*" onde menciona outros corpos que se eletrizam por atrito, sendo o primeiro pesquisador a usar o termo *elétrico*. Porém, em 1733, o pesquisador francês Charles Du Fay demonstrou que essa interação elétrica pode ser tanto atrativa como repulsiva. Ele propôs a existência de dois diferentes tipos de cargas, sendo que duas cargas de mesmo material se repelem enquanto que duas cargas de materiais diferentes se atraem.

Chama-se de carga elétrica elementar, a carga presente em um próton (carga positiva) e um elétron (carga negativa). Esse tipo de carga é conhecido por ser a menor quantidade de

carga que existe na natureza, cujo valor é  $1,6 \times 10^{-19}$  C. A unidade de medida Coulomb (C) foi estabelecida pelo Sistema Internacional (SI) em homenagem ao físico francês Charles Augustin de Coulomb, em reconhecimento aos seus estudos sobre eletricidade. Assim, ao se realizar cálculos utilizando as cargas elétricas, é necessário usar a unidade de medida Coulomb (C). Entretanto, a grandeza de referência para a medida de corrente elétrica é o Ampère (A). Quando o valor de Coulomb é utilizado, na verdade, estamos fazendo referência à corrente elétrica de 1 ampère, ou seja, o Coulomb da carga elétrica é a medida de 1 ampère relacionado com o intervalo de tempo equivalente a 1 segundo (s).

**Figura 21 - Forças entre Cargas Elétricas**



**Fonte:** Conhecimento Científico

Disponível em: <https://conhecimentocientifico.r7.com/carga-eletrica/>

Da mesma forma que a *massa*, a carga elétrica é uma propriedade física fundamental da matéria. Estas duas propriedades geram dois dos quatro tipos de Forças fundamentais na Física: a força gravitacional que está associada a qualquer massa, e a força elétrica ou, simplesmente, força eletromagnética, que está associada à carga elétrica. Na Natureza, existem quatro tipos de forças fundamentais, assim, além das forças gravitacional e eletromagnética, acima citadas, temos também: força forte, que liga as partículas fundamentais da matéria conhecida como quarks, para formar partículas maiores; e a força fraca associada à interação, responsável pelo decaimento das partículas, que acontece quando uma delas se transforma em outra.

### 3.6. FORÇA ELÉTRICA

Toda carga elétrica gera, mas também pode sofrer a ação de um tipo fundamental de força, a força elétrica, que, em última análise, é responsável por unir os átomos para formar moléculas, e estas, por sua vez, formar todas as estruturas vivas. A força elétrica depende da

distância entre as cargas, de modo que a força elétrica entre corpos eletrizados diminui quando a distância entre eles aumenta, contudo a relação quantitativa estabelecida entre a força  $F$  (que uma carga pontual exerce sobre outra) e a distância  $r$  entre as cargas foi feito por Coulomb durante as suas experiências com a balança de torção. Sabe-se que o fenômeno da força elétrica é extremamente relevante em nossa vida, sendo muito bem descrito pela Lei de Coulomb. De acordo com GRIFFITHS (2011), a localização de um ponto em três dimensões pode ser descrita listando-se suas coordenadas cartesianas. O vetor que parte da origem de um sistema de coordenadas e se estende até determinado ponto (Figura 22) é chamado de **vetor posição**, sendo este representado por suas componentes nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . O vetor posição de um ponto  $P$  com coordenadas  $(x, y, z)$  é dado por:

$$\mathbf{r} \equiv x \hat{\mathbf{x}} + y \hat{\mathbf{y}} + z \hat{\mathbf{z}} \quad (3.40)$$

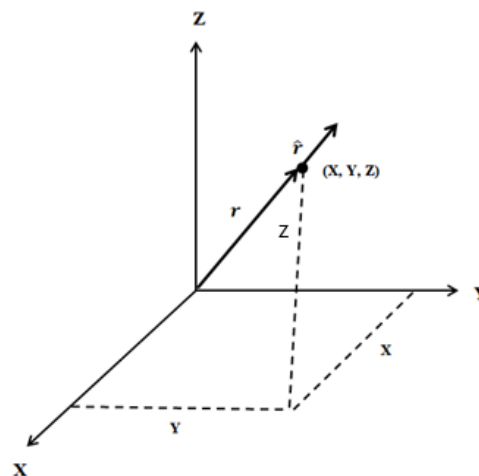
Onde:

$\mathbf{r}$  = vetor posição

$\hat{\mathbf{x}}$ ,  $\hat{\mathbf{y}}$  e  $\hat{\mathbf{z}}$  = vetores unitários nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente.

$x$ ,  $y$  e  $z$  = componentes do vetor posição nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

**Figura 22 - Forças entre Cargas Elétricas**



Fonte: Adaptado Griffiths (2011)

A magnitude do vetor posição, também chamada de **módulo** ou **norma** do vetor, representa o **comprimento** ou **tamanho** desse vetor. Em outras palavras, é a distância entre a origem do sistema de coordenadas e o ponto no espaço que o vetor indica. Para calcular a

magnitude de um vetor posição em um espaço tridimensional, utilizamos o Teorema de Pitágoras generalizado, que resulta na seguinte fórmula:

$$\|r\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3.41)$$

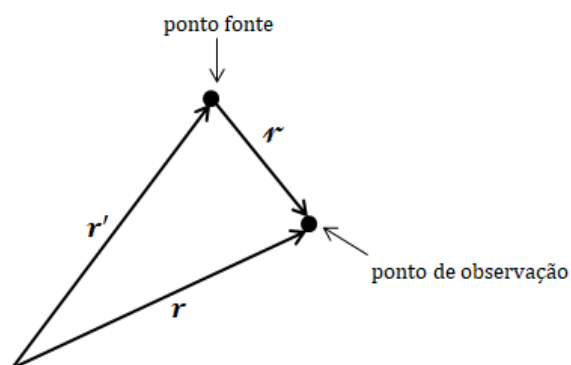
O vetor  $\hat{r}$  é um vetor unitário que aponta radialmente para fora, representado matematicamente por:

$$\hat{r} = \frac{\mathbf{r}}{\|r\|} = \frac{x \hat{\mathbf{x}} + y \hat{\mathbf{y}} + z \hat{\mathbf{z}}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (3.42)$$

Na eletrodinâmica encontramos casos que envolvem um **ponto fonte**,  $r'$ , onde uma carga elétrica está localizada, e um **ponto de observação**,  $r$ , no qual se está calculando o campo elétrico ou magnético (Figura 23). Assim, para o estudo em questão, usaremos uma notação abreviada para o **vetor deslocamento** entre o ponto fonte e o ponto de observação, neste caso, usaremos a letra  $\mathcal{r}$ , assim:

$$\mathcal{r} \equiv r - r' \quad (3.43)$$

**Figura 23 - Localização ponto fonte e ponto de observação**



Fonte: Adaptado Griffiths (2011)

Nesta situação, a magnitude de  $\mathcal{r}$  pode ser expressa matematicamente por:

$$|\mathcal{r}| = |r - r'| \quad (3.44)$$

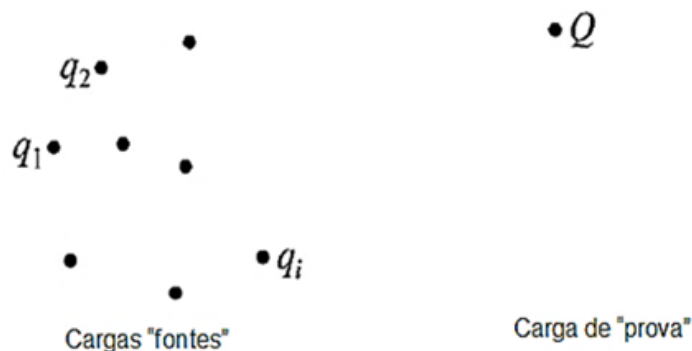
Para obter o vetor unitário de  $\mathbf{r}$  na direção de  $r'$  a  $r$  a partir de um vetor  $v$  qualquer, basta dividi-lo por seu módulo:

$$\hat{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \quad (3.45)$$

### 3.7. CAMPO ELÉTRICO

Uma partícula carregada cria à sua volta um campo elétrico ( $E$ ) que é uma grandeza vetorial. Se uma segunda partícula está nas proximidades da primeira, ela é submetida a uma força eletrostática que depende do módulo e da orientação do campo elétrico no ponto em que a partícula se encontra.

Figura 24 - Interação entre cargas elétricas



Fonte: Griffiths (2011)

Pelo princípio da superposição, o qual diz que a interação entre duas cargas quaisquer não é modificada pela presença de outras, sabe-se que os efeitos das interações entre duas ou mais cargas elétricas no vácuo se sobrepõem. Assim, a força resultante em  $Q$  (Figura 24), que está fixada no ponto  $P$ , é a soma vetorial (resultante) de suas interações com todas as demais cargas, obtidas aplicando a cada par a lei de Coulomb. Assim, a força sobre a carga  $Q$  é dada por:

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 + \dots = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1 Q}{r_1^2} \mathbf{r}_1 + \frac{q_2 Q}{r_2^2} \mathbf{r}_2 + \dots \right) \\ &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1 \mathbf{r}_1}{r_1^2} + \frac{q_2 \mathbf{r}_2}{r_2^2} + \frac{q_3 \mathbf{r}_3}{r_3^2} + \dots \right) \end{aligned}$$

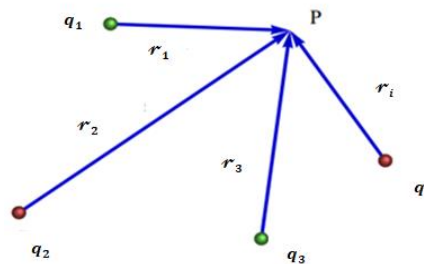
$$F = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_i \quad (3.46)$$

Segundo GRIFFITHS (2011), o campo elétrico incidente em uma cara  $Q$  de prova devida a uma única carga  $q$  que está em *repouso* a uma distância  $r$  é dada pela Lei de Coulomb:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (3.47)$$

A força é proporcional ao produto das cargas e é inversamente proporcional ao quadrado da distância de separação. Sendo  $\mathbf{r}$  o vetor separação entre  $r'$  (a localização da carga  $q$ ) e  $r$  (a localização da carga  $Q$ ), ou seja:  $\mathbf{r} \equiv r - r'$ . Como também,  $r$  é a magnitude e  $\hat{\mathbf{r}}$  a sua direção. A constante  $\epsilon_0$  é chamada de permissividade do espaço livre. Em unidades do SI, com força em newtons (N), distância em metros (m) e carga em coulombs (C), a constante de permissividade do espaço livre equivale a:  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N.m^2}$ .

**Figura 25 - Sistemas de n cargas pontuais**



Fonte: Adaptado Villate, Jaime (2015)

Considerando várias cargas várias cargas pontuais  $q_1, q_2, \dots, q_i$ , às distâncias  $r_1, r_2$  e  $r_i$  de  $Q$ , ilustrada pela Figura 25, a força total sobre  $Q$  está descrita pela Eq.(3.46):

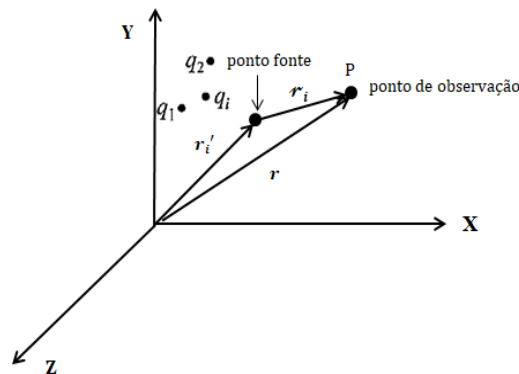
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

Onde,

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r} \quad (3.48)$$

Fisicamente,  $E$  representa a força por unidade de carga que seria exercida sobre uma carga de prova que fosse colocada em um ponto  $P$ . Nesse caso,  $E$  é chamado de campo elétrico das cargas fontes, sendo que os vetores de separação  $r_i$  dependem da localização do ponto de observação, logo esse campo elétrico é uma função da posição ( $r$ ), Figura 26. Ressalta-se que, neste caso,  $r_i$  é o vetor entre a carga fonte  $q_i$  e o ponto de observação  $P$ .

**Figura 26 - Vetores de separação entre cargas elétricas**



Fonte: Adaptado Griffiths (2011)

As Cargas fontes são as partículas ou objetos que geram o campo elétrico, assim " $E$ " é chamado de campo elétrico das cargas fontes. Essas cargas podem ser positivas ou negativas e, ao serem colocadas em um meio, criam uma perturbação nesse meio, que se manifesta como um campo elétrico. Portanto, a força total sobre  $Q$ , será representada da seguinte forma:

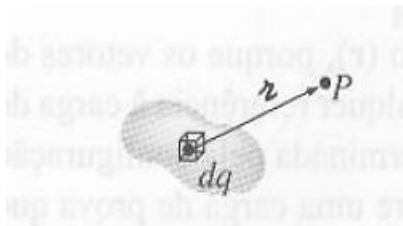
$$F = Q \cdot E \quad (3.49)$$

O campo elétrico é uma quantidade vetorial que varia de um ponto a outro e que é determinada pela configuração das cargas fontes. Logo, o campo elétrico definido pela Eq. 3.48 assume que a fonte do campo é uma série de cargas pontuais discretas  $q_i$ . Contudo, para

o caso em que a carga é distribuída continuamente sobre uma determinada região (Figura 27), a soma será da pela integral:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{1}{r^2} \hat{r} dq \quad (3.50)$$

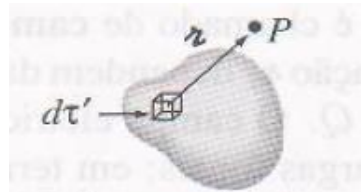
**Figura 27 - Distribuição contínua de cargas**



Fonte: Griffiths (2011)

Mas, para o caso em que a carga preenche um determinado volume (Figura 28), com carga-por-unidade de volume  $\rho$ , então,  $dq = \rho d\tau'$ , onde  $d\tau'$  é um elemento de volume.

**Figura 28 - Carga volumétrica  $\rho$**



Fonte: Griffiths (2011)

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{1}{r^2} \hat{r} dq \quad (3.51)$$

Então, o campo elétrico de uma distribuição volumétrica de carga é:

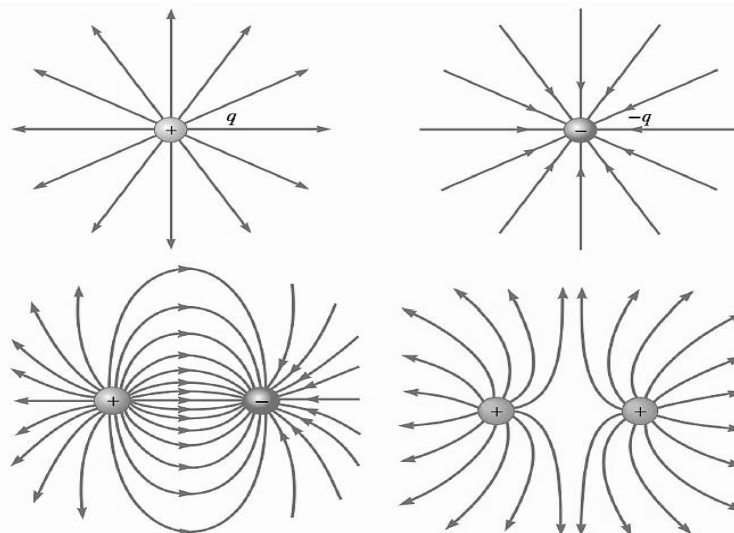
$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(r')}{r^2} \hat{r} d\tau' \quad (3.52)$$

A Eq.(3.52) é frequentemente chamada de “*lei de Coulomb*”, pois está muito próxima da equação original, neste caso a Eq.(3.50) e também porque a distribuição volumétrica de carga é, em certo sentido, o caso mais geral e realista.

### 3.7.1. As Linhas de Campo

As linhas de força do campo elétrico são linhas imaginárias, desenvolvidas para auxiliar a visualização quanto à direção do campo elétrico. Seu conceito foi introduzido no século XIX pelo físico experimental inglês de grande renome, Michael Faraday, com a finalidade de representar o campo elétrico produzido por cargas em repouso através de diagramas. Conforme Nussenzveig (1997), uma linha de força é definida como uma curva tangente em cada ponto à direção do campo neste ponto, logo, dada uma linha de força, é possível, imediatamente, determinar a direção do campo em cada um dos seus pontos, para isso basta traçar a tangente à curva, e pode-se também obter o sentido do campo, indicando uma orientação sobre cada linha. A Figura 29 mostra as linhas de força para uma carga pontual e para um par de cargas pontuais, respectivamente.

**Figura 29 - Linhas de campo elétrico devido a cargas pontuais**



Fonte: Lima, Marcos (4320292)

Na Figura 29, é possível observar que as linhas saem de cargas positivas em direção às cargas negativas, pelo fato das linhas de campo elétrico serem direcionais, orientadas no sentido de sair das cargas positivas e entrar nas cargas negativas. Além disso, em cada ponto do espa-

ço, essas linhas têm a mesma direção e sentido do campo elétrico resultante naquele ponto e, naturalmente, a densidade de linhas é maior próximo às cargas; e o número de linhas que atravessam uma superfície  $S$  normal às linhas em determinado ponto do espaço, é proporcional à intensidade do campo elétrico nesse ponto.

A representação gráfica do campo elétrico no espaço é tais que o campo elétrico  $B$  é sempre tangente à linha de campo, a densidade de linhas é proporcional à intensidade do campo e as linhas de campo não se cruzam, pois o campo é único em um ponto.

### 3.8. AS EQUAÇÕES DE MAXWELL

As denominadas equações de Maxwell foram descritas por James Clerk Maxwell (1831-1879), um físico e matemático escocês, considerado por muitos o cientista do século XIX que mais influenciou a física do século XX. Este grupo de equações juntamente com a lei de Lorentz, compõe a base do eletromagnetismo clássico, sendo fundamentais na explicação dos fenômenos elétricos e magnéticos.

**Figura 30 - James Clerk Maxwell (1831-1879)**



Fonte: Villate, Jaime (2015)

As leis de Ampère e Gauss tratavam de forma isolada os fenômenos magnéticos e elétricos, assim, ao descrever a existência de um campo magnético ao redor de um fio por onde passa uma corrente elétrica, Michael Faraday se tornou o primeiro cientista a mostrar uma conexão entre os fenômenos elétricos e magnéticos.

Usando argumentos de simetria, James Clerck Maxwell (1831-1879) acreditou que a variação do fluxo de campo magnético produz um campo elétrico induzido. Acreditando nesta simetria e manipulando as equações de Ampère, Gauss, Faraday e Lenz, Maxwell sintetizou as quatro equações do eletromagnetismo que, hoje receberam seu nome - “equações de

Maxwell” (Siqueira, 2021). Em seus estudos, Maxwell agrupou na forma de equações a Lei de Gauss, a Lei de Gauss para o magnetismo e a Lei de Ampère. Graças ao cálculo vetorial e aos trabalhos Oliver Heaviside e Willard Gibbs, as equações de Maxwell a partir de 1884 tomaram a forma mais simples, sendo dessa maneira conhecida atualmente. A Tabela 2 apresenta as quatro equações de Maxwell formuladas na forma integral e diferencial. Sendo que, a forma integral pode ser particularmente útil quando lidamos com distribuições simétricas de cargas e correntes. Contudo, a forma diferencial é comumente utilizada em situações menos simétricas.

**Tabela 2 - As Equações de Maxwell**

| Forma Diferencial   | Forma Integral   | Nomenclatura                          |
|---|--|---------------------------------------|
| $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$  | $\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$   | Lei de Gauss                          |
| $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$  | $\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$  | Lei de Gauss para o magnetismo        |
| $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  | $\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt}$   | Lei de Faraday                        |
| $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$ | $\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$ | Lei de Ampère com correção de Maxwell |

Na tabela 2, observa-se a chamada Lei de Gauss, que é a equação que descreve a relação entre um campo elétrico e as cargas que dão origem a esse campo. É possível observar também a denominada Lei de Faraday, que é a equação que descreve o fenômeno da indução eletromagnética, conhecida como equação de Maxwell-Faraday ou simplesmente lei de Faraday.

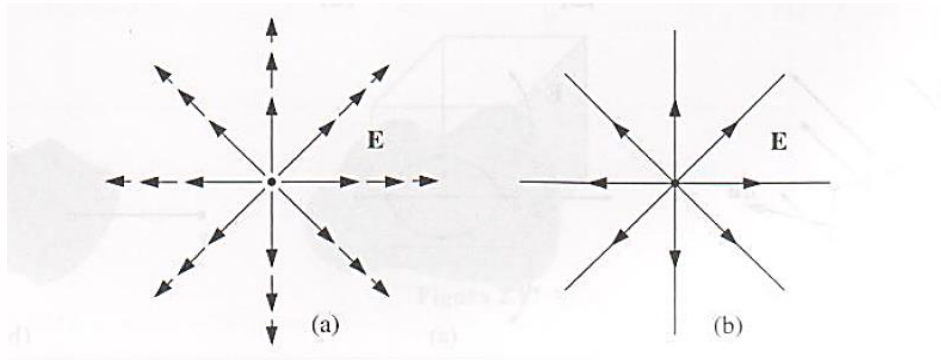
### 3.8.1 Fluxo Elétrico

Para enunciar a lei de Gauss para a eletricidade, inicialmente, vamos introduzir o conceito de fluxo elétrico. Considerando-se o caso simples mais possível, ou seja, uma única carga pontual  $q$ , localizada na origem:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (3.53)$$

Desse modo, os vetores representativos esboçados na Figura 31, vão contribuir para a verificação desse campo elétrico.

Figura 31 - Vetores do campo elétrico

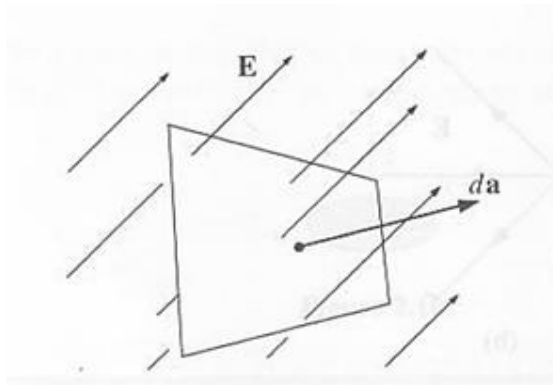


Fonte: Griffiths (2011)

De acordo com a Eq.(3.53), o campo elétrico diminui com  $1/r^2$ , neste sentido os vetores esboçados na Figura 31(a) ficam mais curtos à medida que se afastam da origem e sempre apontam para fora. Porém, podemos representar esse mesmo campo de outra forma, ou seja, conectando as setas para formar linhas, conforme mostrado na Figura 31(b). Assim, a magnitude do campo é indicada pela densidade das linhas de campo, pois ele é mais forte perto do centro onde as linhas de campo estão mais próximas umas das outras, diminuindo-se com a distância, quando elas ficam mais separadas. Neste modelo, o fluxo elétrico  $E$  que atravessa uma superfície  $S$  é uma medida do número de linhas de campo que passam através de  $S$ , sendo dado por:

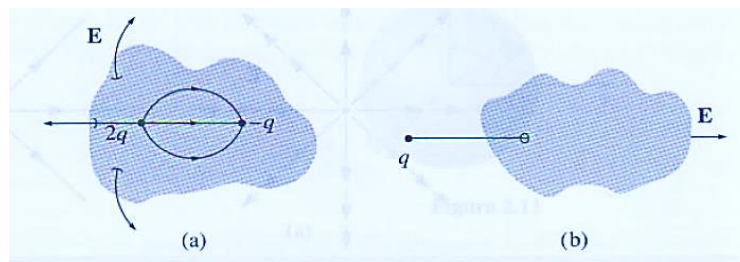
$$\Phi \equiv \int_S E \cdot da \quad (3.54)$$

Assim, para certa *taxa de amostragem*, o fluxo é proporcional ao número de linhas desenhadas, pois a intensidade do campo é proporcional à densidade das linhas de campo (o número por unidade de área), e, portanto, o produto escalar  $E \cdot da$  é proporcional ao número de linhas que atravessam a área infinitesimal  $da$ . A Figura 32 mostra que este produto escalar seleciona a componente de  $da$  ao longo da direção do campo elétrico  $E$ .

**Figura 32 - Fluxo através de uma superfície**

Fonte: Adaptado Griffiths (2011)

Segundo Griffiths (2011), isto sugere que o fluxo através de qualquer superfície *fechada* é uma medida da carga total no seu interior, uma vez que as linhas de campo que tem origem em uma carga positiva devem passar através da superfície ou terminar em uma carga negativa no interior da superfície, conforme ilustrado na Figura 33(a). De outra forma, uma carga externa à *superfície* não contribuirá para o fluxo total, já que suas linhas de campo entram por um lado e saem pelo outro, conforme ilustrado na Figura 33(b). Portanto, essa é a essência da lei Gauss.

**Figura 33 - Cargas dentro e fora de uma superfície**

Fonte: Griffiths (2011)

### 3.8.2 A Lei de Gauss

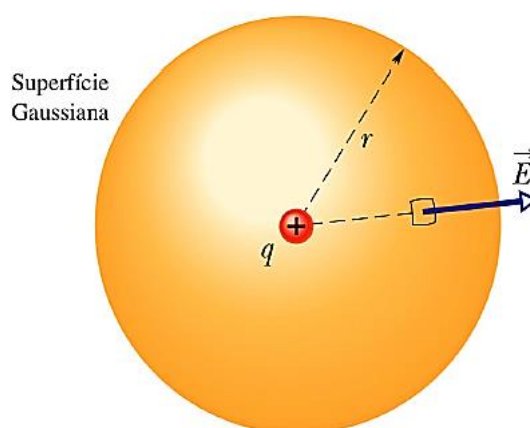
Carl Friedrich Gauss (1777-1855) matemático, astrônomo e físico alemão, considerado um dos maiores matemáticos de todos os tempos, nasceu na Alemanha, e desde cedo mostrou grande habilidade para a matemática. Deu diversas contribuições nos campos da teoria dos números, dos números complexos, da geometria e da álgebra. Em conjunto com o físico

Wilhelm Weber, a partir do ano de 1831, desenvolveu o estudo teórico e experimental do eletromagnetismo.

A lei de Gauss estabelece a relação entre o fluxo elétrico ( $\Phi_E$ ) do campo elétrico ( $\mathbf{E}$ ) que atravessa uma superfície fechada (gaussiana) com a carga elétrica  $q$  envolvida pela superfície, afirmando que o fluxo elétrico total através de qualquer superfície fechada (a superfície interna de um volume definido) é proporcional à carga elétrica total (líquida) existente no interior da superfície. A lei de Gauss é a primeira das quatro equações de Maxwell, tendo sido elaborada originalmente por Gauss em 1835, contudo somente foi publicada após 1867. Estabelecendo-se uma relação entre a quantidade de linhas que atravessa a superfície gaussiana, é possível convencionar que se existem mais linhas de campo elétrico saindo da superfície do que entrando, o fluxo elétrico através da superfície é positivo e se existem mais linhas de campo elétrico entrando na superfície do que saindo da mesma, então o fluxo é negativo. Contudo, se o número de linhas de campo elétrico que entra na superfície é igual ao número de linhas de campo elétrico que sai da superfície, então o fluxo através da superfície é nulo.

Para verificar a lei de Gauss na forma diferencial, vamos considerar uma superfície gaussiana representada por  $\vec{S}$ , como sendo uma esfera de raio  $r$  que está envolvendo uma carga  $q$  localizada no seu centro, conforme ilustrado na Figura 34.

**Figura 34 - Superfície Gaussiana**



Fonte: Lima, Marcos (4320292)

O fluxo elétrico é independente do raio  $R$  da esfera, dependendo apenas da carga  $q$  existente no interior da esfera. Portanto, para uma carga pontual  $q$  localizada na origem, o fluxo elétrico  $E$  através de uma esfera de raio  $r$  é dado por:

$$\oint E \cdot da = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q}{r^2} \hat{r} \right) \cdot (r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \, \hat{r}) = \frac{1}{\epsilon_0} q \quad (3.55)$$

Na Eq.(3.55) é possível observar que o raio ( $r$ ) da esfera se cancela enquanto a área de superfície aumenta com o  $r^2$ , o campo diminui como  $1/r^2$ , e, portanto o produto é constante. Agora, para uma única carga na origem, tem-se uma porção de cargas espalhadas em torno da origem. Assim, de acordo com o princípio da superposição, o campo elétrico total é dado pela soma (vetorial) de todos os campos individuais:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (3.56)$$

Portanto, o fluxo elétrico através de uma superfície que contém todas as cargas é dado por:

$$\oint E \cdot da = \sum_{i=1}^n (\oint E_i \cdot da) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\epsilon_0} q_i \right) \quad (3.57)$$

Para qualquer superfície fechada, a forma quantitativa da lei de Gauss é dada por:

$$\oint_S E \cdot da = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{enc} \quad (3.58)$$

Onde  $Q_{enc}$  representa a carga total encerrada pela superfície.

A lei de Gauss (Eq. 3.54) é uma equação integral, porém é possível transformá-la em uma equação diferencial aplicando o teorema do divergente:

$$\oint_S E \cdot da = \int_V (\nabla \cdot E) dr \quad (3.59)$$

Ao reescrever a carga total encerrada pela superfície ( $Q_{enc}$ ), em termos da densidade de carga  $\rho$ , obtemos a seguinte equação:

$$Q_{enc} = \int_v \rho \, dr \quad (3.60)$$

Portanto, a lei de Gauss torna-se:

$$\int_v (\nabla \cdot E) \, dr = \int_v \left( \frac{\rho}{\epsilon_0} \right) \, dr \quad (3.61)$$

Como a Eq.(3.61) é verdadeira para qualquer volume, então os integrando devem ser iguais, logo:

$$\nabla \cdot E = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (3.62)$$

Portanto, a Eq.(3.62), apresenta a lei de Gauss na forma diferencial.

Do campo elétrico de uma distribuição volumétrica de carga, sabe-se que:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_v \frac{\rho(r')}{r^2} \hat{r} \, d\tau' \quad (3.63)$$

Originalmente, a integração seria sobre o volume ocupado pela carga, porém na região exterior a carga-por-unidade de volume ( $\rho$ ) é igual à zero. Logo, a integração será estendida para todo o espaço. Assim, calculando-se o divergente do campo elétrico  $E$  diretamente da Eq.(3.63) para todo o espaço tem-se:

$$E(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\text{todo o espa\c{c}o}} \frac{\hat{r}}{r^2} \rho(r') d\tau' \quad (3.64)$$

Observa-se que a depend\ec{e}ncia em  $r$  est\aa contida em  $\mathbf{r} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$ , ent\aa a Eq.(3.64) fica:

$$\nabla E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \nabla \cdot \left( \frac{\hat{r}}{r^2} \right) \rho(r') d\tau' \quad (3.65)$$

De forma mais geral, o divergente de  $\left( \frac{\hat{r}}{r^2} \right)$  define a fun\c{c}\~ao delta de Dirac, ent\aa:

$$\nabla \cdot \left( \frac{\hat{r}}{r^2} \right) = 4\pi\delta^3(\mathbf{r})$$

Onde  $\mathbf{r}$  \u00e9 o vetor separa\c{c}\~ao, ou seja,  $\mathbf{r} \equiv r$ .

Assim,

$$\nabla E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int 4\pi\delta^3(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \rho(r') d\tau' = \frac{1}{\epsilon_0} \rho(\mathbf{r})$$

$$\nabla E = \frac{1}{\epsilon_0} \rho(\mathbf{r}) \quad (3.66)$$

Portanto, a Eq.(3.66), traz a mesma mensagem da Eq.(3.62) \u00e9 a lei de Gauss na forma diferencial.

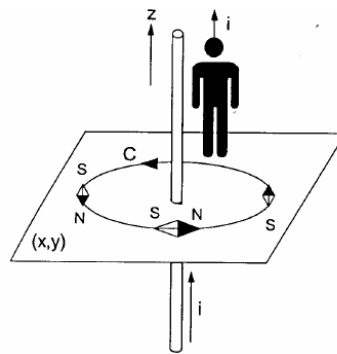
### 3.9 ELETRICIDADE E MAGNETISMO

No s\u00e9culo XIX, os cientistas do mundo inteiro acreditavam que os fen\u00f4menos el\u00e9tricos e magn\u00e9ticos eram completamente independentes um do outro. No entanto, ao realizar diversas experi\ec{e}ncias, o f\u00edsico dinamarqu\u00eas Hans Christian Oersted notou que isso n\aa era verdade. Em 1819, Oersted colocou uma b\u00fassola (agulha imantada) perpendicular a

um fio retilíneo por onde passava uma corrente, com a intenção de procurar se uma corrente elétrica atuaria sobre o imã, porém ele não observou nenhum efeito. Entretanto, Oersted descobriu que a bússola sofria uma deflexão, acabando por orientar-se perpendicular ao imã quando era colocada paralelamente ao fio.

Conseqüentemente, *uma corrente produz* um campo magnético e, para um fio retilíneo que transporta corrente, as linhas de força magnéticas são círculos que estão insertos em planos perpendiculares ao fio (Figura 35). Dessa forma, o cientista comprovou que a eletricidade e o magnetismo poderiam interagir.

**Figura 35 - Campo magnético devido a uma corrente**



Fonte: Nussenzveig (1987)

Em 1820, os resultados do experimento de Oersted foram apresentados em uma reunião da Academia de Ciências da França, em Paris. Dentre os presentes que assistiram à apresentação, estava o jovem físico francês André Marie Ampère, que, imediatamente, deu início a uma série de experiências, postulando corretamente que todos os fenômenos magnéticos são decorrentes de cargas elétricas. Assim da mesma forma que Ampère e outros cientistas, o físico experimental Michael Faraday também se dedicou ao estudo, tentando explicar a interação entre eletricidade e magnetismo.

Mais tarde, no ano de 1831, Faraday observou que efeitos magnéticos produziam corrente elétrica, concluindo que a eletricidade e o magnetismo não poderiam ser considerados assuntos separados, pois se tratava de dois aspectos de um único assunto, o *Eletromagnetismo*. Maxwell e Lorentz também deram suas contribuições para este estudo, porém quando eles deram os seus toques finais a essa teoria, a eletricidade e o magnetismo já estavam entrelaçados de forma indissolúvel.

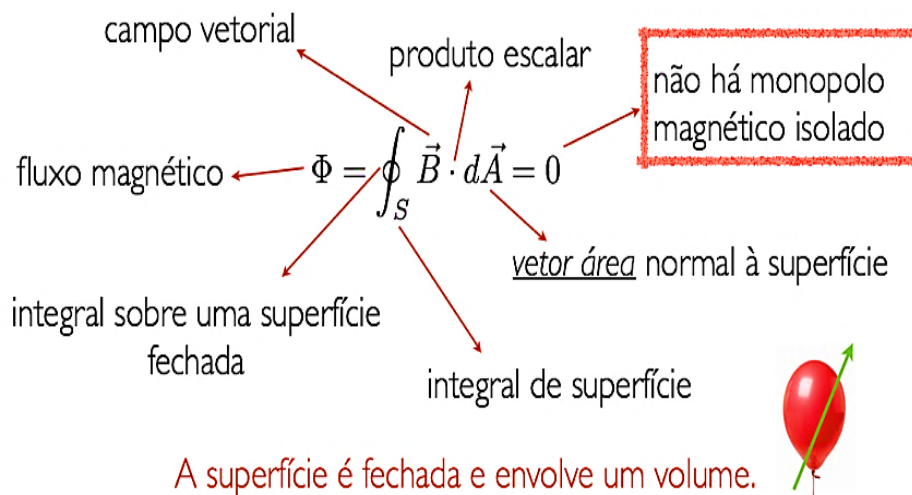
### 3.10 LEI DE GAUSS DO MAGNETISMO

Em física e demais ciências, magnetismo é o conjunto de fenômenos relacionados à atração ou repulsão entre determinados objetos, que interagem através de campos magnéticos, que são regiões do espaço sob a influência de correntes elétricas, uma vez estes campos cercam materiais em correntes elétricas e são detectados pela força que exercem sobre materiais magnéticos ou cargas elétricas em movimento. A lei de Gauss para campos magnéticos é a segunda das quatro equações de Maxwell, formando a base da eletrodinâmica clássica. Esta lei estabelece que o fluxo do campo magnético  $\Phi_B$  através de uma superfície fechada  $S$ , envolvendo certo volume do espaço, é nulo. Assim:

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.67)$$

A Figura 36 detalha a integral de linha do fluxo do campo magnético, onde:

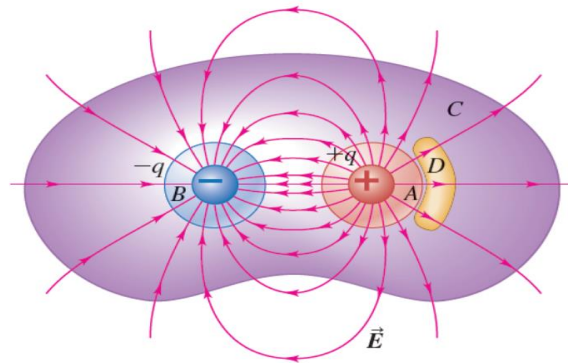
**Figura 36 - Lei da Gauss para o magnetismo**



Fonte: <https://pessoal.ect.ufrn.br/~ronai/Principal/PFE2014-2/Aulas/S25/5.html>  
(acesso em 19/09/2023)

O número total de linhas de campo que atravessam uma superfície fechada é proporcional à carga elétrica total existente no interior da superfície (Figura 37).

**Figura 37 - Superfície fechada envolvendo cargas elétricas**



Fonte: livro Física III - Eletromagnetismo, por Young & Freedman, Sears & Zemansky, 14 ed, pág. 54

Assim, as linhas de um campo magnético  $\vec{B}$  diferem das linhas de campo elétrico  $\vec{E}$ , pois as linhas de um campo magnético formam curvas fechadas, enquanto as linhas de um campo elétrico começam e terminam em cargas elétricas positivas ou negativas, conforme ilustrado na Figura 37. A lei de Gauss para os campos magnéticos diz que o fluxo magnético através de qualquer superfície fechada gaussiana é sempre zero porque a superfície não pode envolver uma “carga magnética ou monopólio magnético uma vez que essa entidade não existe”.

### 3.11 INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Michael Faraday (1791-1867), um físico britânico, fez diversas contribuições para a Física, dentre estas, podemos citar a descoberta do fenômeno da indução eletromagnética, que revolucionou o estudo do Eletromagnetismo, bem como a sociedade industrial, tornando possível o uso da energia elétrica em larga escala. A descoberta deste fenômeno possibilitou a construção de dínamos, que são aparelhos cujo funcionamento tem como base o fenômeno da indução eletromagnética, além disso, esses aparelhos têm a capacidade de transformar a energia mecânica em energia elétrica. No processo da indução eletromagnética uma corrente pode ser induzida a fluir devido a uma variação no campo magnético, sendo que esse fenômeno é descrito por duas leis: a Lei de Faraday e a lei de Faraday-Lenz.

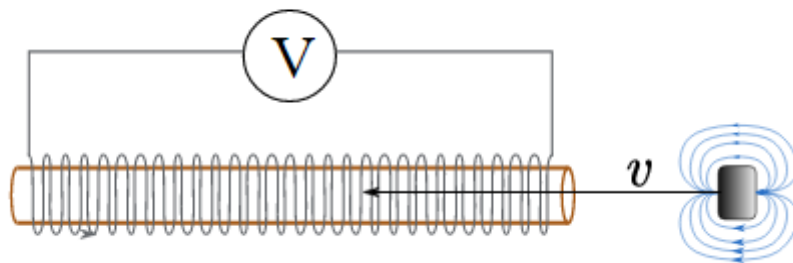
#### 3.11.1 Força Eletromotriz Induzida

A força eletromotriz, ou simplesmente “fem”, refere-se à diferença de potencial ao redor da espira descarregada, ou seja, quando a resistência no circuito é alta. Na prática,

podemos pensar na fem ( $\varepsilon$ ) como uma tensão, visto que tanto a tensão como a fem ( $\varepsilon$ ) são medidas que usam a mesma unidade, que é o “volt”.

O experimento chave que levou Michael Faraday a determinar a sua Lei foi bem simples. Devido a essa simplicidade, este experimento pode ser replicado com o uso de um pouco mais dos materiais que possuímos em nossas casas. Para realizar este experimento, Faraday usou um tubo de papel com fio isolado enrolado ao redor para formar uma bobina. Um voltímetro foi conectado ao redor da bobina e a fem ( $\varepsilon$ ) induzida foi lida enquanto um ímã era passado através da bobina, conforme mostra a figura abaixo.

**Figura 38 - O experimento de Faraday: um ímã é passado através de uma bobina.**



Fonte: Khan Academy, Lei de Faraday.

A f.e.m induzida é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3.68)$$

Onde,

$\vec{E}$  = Intensidade do campo magnético medida em Tesla [T];

$d\vec{l}$  = comprimento do fio condutor medido em metros (m)

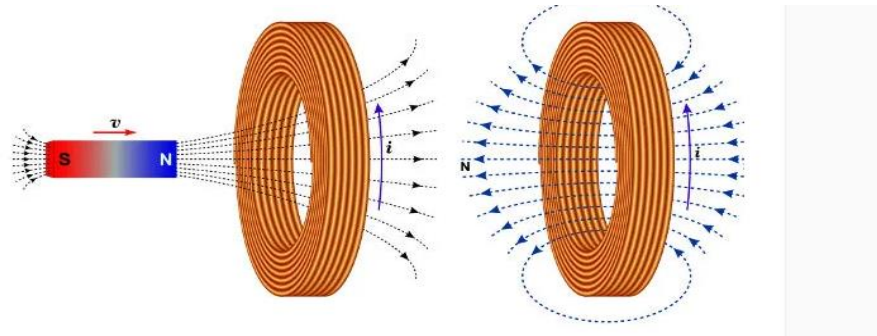
### 3.11.2 Lei de Faraday

A primeira lei do processo de indução eletromagnética se chama “Lei de Faraday”, em homenagem a Michael Faraday. Esta lei relaciona a taxa de variação do fluxo magnético através de uma espira com a magnitude da força eletromotriz  $\varepsilon$  induzida nela. Essa relação é expressa da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{d\phi_B}{dt} \quad (3.69)$$

Onde  $d\phi_B$  é a variação do fluxo através de uma superfície aberta, observada no intervalo de tempo  $dt$ .

Figura 39 - Indução eletromagnética.



Fonte: <https://app.planejativo.com/estudar/323/resumo/fisica-lei-de-faraday-e-variacao-do-fluxo-magnetico>.

Acesso em 25/09/2023

Logo, o fluxo magnético através de uma superfície aberta é dado pela seguinte equação:

$$\Phi_{\vec{B}} = \iint \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (3.70)$$

Para fazer variar o fluxo magnético, pode-se variar a geometria da superfície ( $d\vec{s}$ ), porém existe outra forma, por exemplo, variando a intensidade do campo magnético ( $\vec{B}$ ).

### 3.11.3 Lei de Faraday-Lenz

A segunda lei do processo de indução eletromagnética se chama “*Lei de Faraday-Lenz*”. Faraday descobriu que a variação do fluxo em relação ao tempo causava o aparecimento da fem ( $\varepsilon$ ) induzida, mas não conseguiu estabelecer o processo para definir o sentido da fem ( $\varepsilon$ ) e, portanto, da corrente induzida em circuitos fechados. A questão foi resolvida em 1834 por Heinrich Lenz.

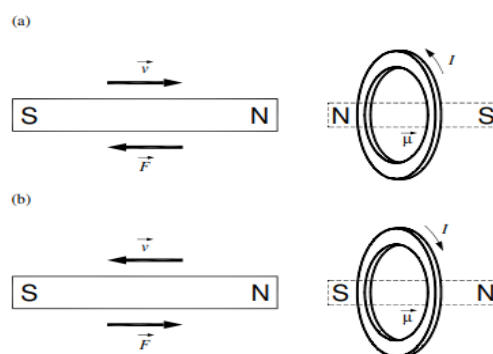
Sendo assim, a segunda lei para o processo pelo qual uma corrente pode ser *induzida* a fluir devido a uma variação no campo magnético ficou conhecida como “*Lei de Lenz*”, sendo

uma consequência da conservação da energia aplicada à indução eletromagnética, a qual pode ser assim enunciada: “*O sentido da corrente elétrica em um circuito condutor fechado é aquele que dá origem a um fluxo magnético induzido que sempre se opõe à variação do fluxo que lhe deu origem*”. Em outras palavras, podemos dizer que: a corrente induzida em um circuito condutor fechado aparecerá sempre no sentido contrário ao das causas que lhe deram origem. O sinal negativo da lei de Faraday expressa essa oposição (BONJORNO et al, 2016).

Para verificação da lei de Lenz como uma consequência da conservação de energia, considera-se uma espira circular e um ímã com seus eixos alinhados, com o polo norte do ímã voltado para a espira, conforme ilustrado na Figura 40. Quando o ímã se aproxima da espira (Figura 40a), é induzida uma corrente no sentido anti-horário da espira (vista a partir do ímã). Assim, a espira passa a atuar como uma espécie de eletroímã, com o polo norte voltado para o ímã, logo a força entre eles é de repulsão. Na outra situação, quando o ímã se afasta (Figura 40b), a corrente é induzida no sentido horário, logo o polo sul está voltado para o ímã, e a força entre eles é de atração.

Portanto, em qualquer uma destas situações, a força é contrária ao movimento. Caso contrário, um pequeno movimento em qualquer sentido geraria uma força no mesmo sentido, sendo que a velocidade e, conseqüentemente a energia cinética, iriam aumentar indefinidamente, contudo, isto é incompatível com a conservação de energia.

**Figura 40 - Lei de Lenz aplicada a um ímã em movimento próximo a uma espira. (a) ímã se aproxima da espira, e é repelido. (b) ímã se afasta da espira, e é atraído.**



Após Faraday descobrir a lei de indução, Lenz propôs uma regra para determinar o sentido da corrente induzida em uma espira. Dessa forma, a lei de Lenz foi incorporada à lei de Faraday com o indicativo de um sinal de menos (Eq. 3.71).

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.71)$$

Assim, enquanto a lei de Faraday nos revela a magnitude da fem ( $\varepsilon$ ) produzida, a lei de Lenz nos revela a direção do fluxo da corrente. Devido às contribuições de Neumann e Lenz, a lei da indução, que é uma das equações básicas do eletromagnetismo, pode ser chamada de lei de Faraday, lei de Faraday-Lenz ou lei de Faraday-Neumann-Lenz.

#### 3.11.4 Lei de Faraday na forma diferencial e integral

A Eq.(3.64) apresenta o fluxo magnético através de uma superfície aberta, logo esta equação diz que:

$$\Phi_{\vec{B}} = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (3.72)$$

Assim, substituindo-se as expressões: Eq.(3.60) da fem induzida e a Eq.(3.64) do fluxo magnético, na Eq.(3.63) lei de Faraday-Lenz, temos que:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (3.73)$$

Em geral, o campo magnético  $\vec{B}$  e a geometria  $d\vec{S}$  podem mudar com o tempo. Contudo, vamos admitir que a geometria ( $d\vec{S}$ ) não muda, ou seja, vamos considerar que temos uma espira fixa e apenas  $\vec{B}$  vai variar com o tempo. Dessa maneira, a expressão da lei de Faraday-Lenz para uma única espira ficará da seguinte forma:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (3.74)$$

Nesta situação, é possível observar que temos uma integral de linha do lado esquerdo e uma integral de superfície do lado direito. Logo, fazendo uso do Teorema de Stokes, pois este teorema na geometria diferencial estabelece uma relação entre uma integral de superfície com uma integral em torno da curva dada pela fronteira da superfície de integração. Em cada ponto da superfície podemos ter um campo vetorial que é um rotacional do campo elétrico, pois este campo está sendo gerado pela variação do fluxo, e pode ter um rotacional não nulo. Portanto, de acordo com o Teorema de Stokes:

$$\iint (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{s} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3.75)$$

Assim, na Eq.(3.66) vamos substituir a integral de linha do campo elétrico  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$  pela integral de superfície do rotacional do campo elétrico  $\iint (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{s}$ , assim temos que:

$$\iint (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{s} = - \iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (3.76)$$

Igualando os integrandos, temos:

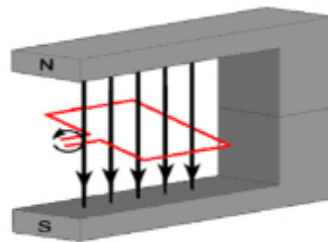
$$(\nabla \times \vec{E}) = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.77)$$

Portanto a Eq.(3.69) é a lei da Faraday na forma diferencial ou, simplesmente, a terceira lei de Maxwell.

### 3.12 GERADOR DE ELETRICIDADE

Um gerador de eletricidade tem a função básica de converter a energia mecânica em energia elétrica, sendo que o seu princípio de funcionamento se baseia em uma lei fundamental da Física, que é a Lei de Faraday (Halliday; Resnick; Walker, 1996). Resumidamente, na Lei de Faraday quando a corrente elétrica é passada para o condutor, ela produz um campo magnético. O princípio básico de funcionamento de um gerador consiste em uma turbina que produz um movimento de rotação em uma espira. Sendo que essa espira gira em torno de um eixo perpendicular à direção das linhas de força de um campo magnético que pode ser gerado por ímãs ou bobinas. Isso faz com que o fluxo do campo magnético através da espira varie com o tempo, dessa forma é produzida uma força eletromotriz induzida  $fem$ , que é resultante do movimento relativo que há entre a espira e o campo magnético.

**Figura 41 - Princípio básico de um gerador elétrico**



Fonte: Rampinelli (2014, fig. 9).

## 4 A ENERGIA EÓLICA

### 4.1. INTRODUÇÃO

O termo “*Eólico*” vem do latim *Aeolicus*, pertencente ou relativo à *Éolo*. Conforme a etimologia, *Eólica* é uma palavra com raiz em um personagem da mitologia grega cujo nome era “*Eólo*”, uma divindade que controlava o vento, por isso era chamado de *Senhor dos Ventos*, residia em *Eólia*, região atualmente ocupada pelo território da Turquia. O nome *Éolo* provém do Grego *Aíolos*, que significa vivo, rápido, ágil, veloz. Logo, “*Eólica*” é a energia obtida através do movimento do ar/vento, sendo uma forma de energia cinética.

A energia eólica envolve um campo de estudo amplo e contempla diversos temas dentro da física com a formação dos ventos, energia cinética, a energia mecânica produzida pelo vento e a transformação dessa energia em energia elétrica, tendo como aliado os recursos naturais favoráveis para possibilitar o processo de produção de eletricidade a partir de uma fonte de energia alternativa, limpa e renovável.

### 4.2. FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL

As energias renováveis são formas de fontes de energia coletadas de recursos renováveis como o Sol, vento, geotermia, marés, dentre outros, que são continuamente restabelecidos pela natureza, dessa forma, essas energias renováveis não incluem recursos energéticos obtidos, por exemplo, a partir de combustíveis fósseis e produtos residuais de fontes fósseis. Há milhões de anos, o homem depende de carvão, petróleo e gás natural, que são combustíveis fósseis, uma vez que estes não são completamente renováveis. Além disso, o processo de extração e queima de combustíveis fósseis causa poluição do ar, da água e do solo, pois há liberação de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e outros gases de efeito estufa que provocam o aumento do calor na atmosfera terrestre.

Algumas fontes de energia como a energia hidráulica (aproveitamento das águas dos rios), fotovoltaica (sol), eólica (ventos), biomassa, dentre outras, são consideradas fontes de energia renovável, pois não geram grandes impactos ao meio ambiente e seus recursos naturais envolvidos no processo de geração de energia não se esgotam. Segundo o Atlas Eólico Bahia (2013, p.29):

A geração de energia eólica é reconhecidamente a fonte que menos agride o meio ambiente dentre todas as formas de geração atuais, principalmente em função de ser praticamente livre de emissão de Gases do Efeito Estufa - GEE durante sua operação.

Dessa forma, a fonte eólica tem características aliada ao conceito de sustentabilidade, pois o vento é uma fonte de energia inesgotável disponível em todo o planeta. Em função do aumento da demanda energética mundial, houve grandes investimentos no setor eólico, transformando a energia eólica em uma fonte alternativa viável de geração de energia elétrica.

#### 4.3. UTILIZAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA

Desde os primórdios, o homem vem buscando formas para tornar e manter o seu habitat um local agradável e confortável para sua sobrevivência. Dentre os diversos tipos de confortos, está o uso de energia elétrica. Em consequência disso, o ser humano tornou-se dependente da energia elétrica, sendo quase que impossível sobreviver sem ela, dessa forma a energia elétrica tornou-se indispensável à sua sobrevivência. O desenvolvimento tecnológico, desde o uso doméstico ao industrial, culminou no avanço de uma diversidade de equipamentos elétricos e eletrônicos que fazem o uso da energia elétrica para o seu funcionamento, tornando a energia elétrica essencial para o progresso tecnológico e sobrevivência do homem.

Nessa perspectiva, para suprir a demanda energética mundial, se intensificou a busca por fontes renováveis de energia, uma vez que essas fontes estão sempre disponíveis para utilização, não se esgotam e não causam grandes impactos ambientais. Dentre as diversas fontes renováveis de energia, encontra-se a energia eólica, que é uma fonte alternativa de energia limpa e renovável, sendo uma opção viável e complementar às fontes de energia convencional. A utilização de energias alternativas é um tema que vem sendo discutido há algum tempo, transformando a questão energética em um tema de extrema importância na atualidade, resultando em pesquisas e, conseqüentemente, investimentos no setor de energia, provocando a procura por fontes de energia novas e renováveis para substituir as fontes de energia convencionais.

A energia dos ventos é uma fonte de energia renovável, abundante, limpa e disponível em todos os lugares; resultante dos raios solares que incidem sobre o planeta Terra. Dessa forma, os ventos são gerados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera terrestre, logo essa diferenciação no aquecimento da atmosfera, pode ser explicada pela orientação dos raios solares e pelos movimentos da Terra. Por receber quase que perpendicularmente os raios solares, as regiões tropicais são mais aquecidas do que as regiões polares. Em consequência disso, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares.

A utilização desta fonte energética para a geração de eletricidade em escala comercial teve início há pouco mais de 40 anos com a evolução rápida dos equipamentos para geração de energia eólica, onde se salienta a contribuição dos conhecimentos da indústria aeronáutica. Atualmente, o processo de produção de energia elétrica em usinas eólicas é muito utilizado. O processo de produção de energia elétrica a partir de uma fonte de energia renovável ocorre da seguinte forma:

A geração eólica ocorre pelo contato do vento com as pás do cata-vento, elementos integrantes da usina. Ao girar, essas pás dão origem à energia mecânica que aciona o rotor do aerogerador, que produz a eletricidade. A quantidade de energia mecânica transferida - e, portanto, o potencial de energia elétrica a ser produzida - está diretamente relacionada à densidade do ar, à área coberta pela rotação das pás e à velocidade do vento.(ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, Aneel, 2008, p.81).

Segundo Montero et al, 2021, “o uso da energia eólica é uma tendência mundial por ser caracterizada como uma forma de energia com poucos impactos, que contribui para a preservação do meio ambiente”. Não requer água para a sua produção e nem gera gases de efeito estufa, por isso tem sido vista como a fonte de energia renovável mais promissora para a produção de energia elétrica, em curto prazo, sendo no Brasil uma fonte de energia de custo menor que o gás natural e a biomassa. Por isso, essa fonte de energia sustentável segue em expansão, trazendo melhorias ao setor e potencializando seu crescimento.

#### 4.4. O VENTO

O vento, atmosfera em movimento, tem sua origem na associação entre a energia solar e a rotação planetária. Todos os planetas envoltos por gases em nosso sistema solar demonstram a existência de distintas formas de circulação atmosférica e apresentam ventos em suas superfícies. Trata-se de um mecanismo solar-planetário permanente; sua duração é mensurável na escala de bilhões de anos. O vento é considerado fonte renovável de energia. (CEPEL, 2001).

#### 4.5. CLIMATOLOGIA - CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA

Segundo o Atlas Eólico Bahia (2013), a origem do vento provém do aquecimento diferenciado da superfície terrestre, sendo que as variações de aquecimentos sobre essa superfície são originadas pela grande variedade de tipos de cobertura dessa superfície (e.g. gelo, florestas dos mais variados tipos, areia e massas de água) aliada aos ciclos temporais de exposição ao Sol (dia-noite e estações do ano). O vento circula de uma área de alta pressão, onde a temperatura está mais baixa e o ar mais denso, para uma área de baixa pressão, onde a

temperatura está mais alta e o ar menos denso; descrevendo o movimento de subsidência do ar, ou seja, um fluxo de ar de cima para baixo. A subsidência (Figura 42) traz para a superfície o ar seco dos níveis mais elevados da atmosfera; e acontece quando um sistema de alta pressão atua sobre uma região, de forma que quando a alta pressão é forte, este movimento de ar de cima para baixo é mais intenso.

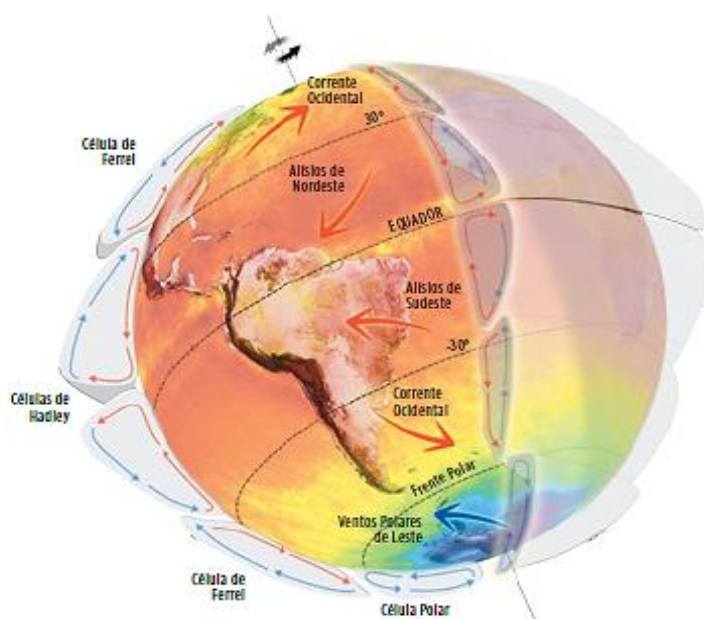
**Figura 42 - Subsidência**



Fonte: Climatempo

Ainda, de acordo com o Atlas Eólico Bahia (2013), especialmente, a variação do vento em escala global (macroescala) é resultado do aquecimento desigual entre o Equador e os Polos e; aliado aos efeitos causados pela rotação da Terra (e.g. Coriolis), geram o que chamamos de vento geostrófico. A Figura 43, a seguir, apresenta as células de circulação do vento. Porém, em escala regional (mesoescala), a variação é resultante das diferenças de temperatura entre cordilheiras e vales (ventos catabáticos) ou entre o mar e a terra (brisa marítima); e na escala local (microescala) as variações do vento ocorrem devido a vários fatores, dentre eles a presença de chapadas e morros, a variação da cobertura vegetal e até mesmo esteiras de aerogeradores.

**Figura 43 - Circulação atmosférica**



Fonte: Atlas Eólico Bahia (2013)

O Atlas Eólico Bahia (2013), informa que a velocidade do vento apresenta flutuações temporalmente, variando desde a turbulência atmosférica, caracterizada pelos movimentos giratórios do vento em intervalos de tempo inferiores a um minuto, até intervalos de regimes sazonais, caracterizados em anos ou décadas. A turbulência atmosférica tem caráter fortemente aleatório, enquanto que os regimes sazonais seguem tendências que são bem definidas para um determinado local, além de possuir baixa variabilidade, o que possibilita a previsão da velocidade média do vento de longo prazo em locais para onde existem medidas.

#### Influência da Altura

Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos, entre os quais se destacam a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo. Os ventos de interesse para a geração de energia estão próximos da superfície terrestre, são influenciados pelo atrito com a superfície terrestre e desaceleram quando estão mais próximos do solo. Dessa forma, é gerada a função, a qual foi denominada como “*perfil de camada-limite*”, cuja forma depende da rugosidade do terreno e da estabilidade térmica vertical. Diferentes perfis de camada-limite e a estratificação da atmosfera próxima da superfície terrestre são apresentados na Figura 44 a seguir.

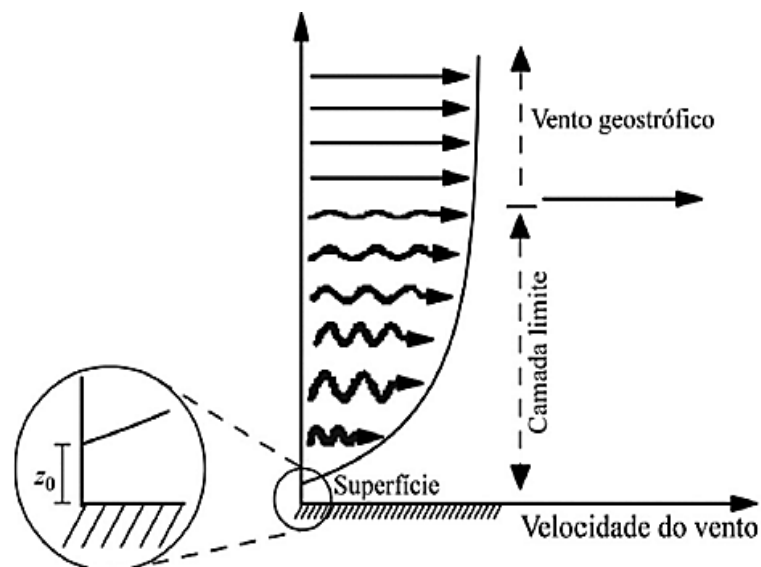
**Figura 44 - Gradiente de velocidade do vento em função da altura e tipo de cobertura do solo**



Fonte: Atlas Eólico Bahia (2013)

O comprimento da rugosidade  $z_0$  próximo à superfície terrestre é a altura onde a velocidade é nula. Acima dele, encontra-se a camada limite atmosférica (CLA) que representa uma região com uma altura variável entre 100 e 2000 m de altura e que sofre as interações superfície-atmosfera. O vento adiante de alguns quilômetros da superfície que, teoricamente, não sofre influência do atrito da superfície, é chamado de vento geostrófico (Rampinelli et al, 2014). O perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico é apresentado na Figura 45.

**Figura 45 - Perfil vertical da velocidade do vento da superfície até a altura do vento geostrófico**

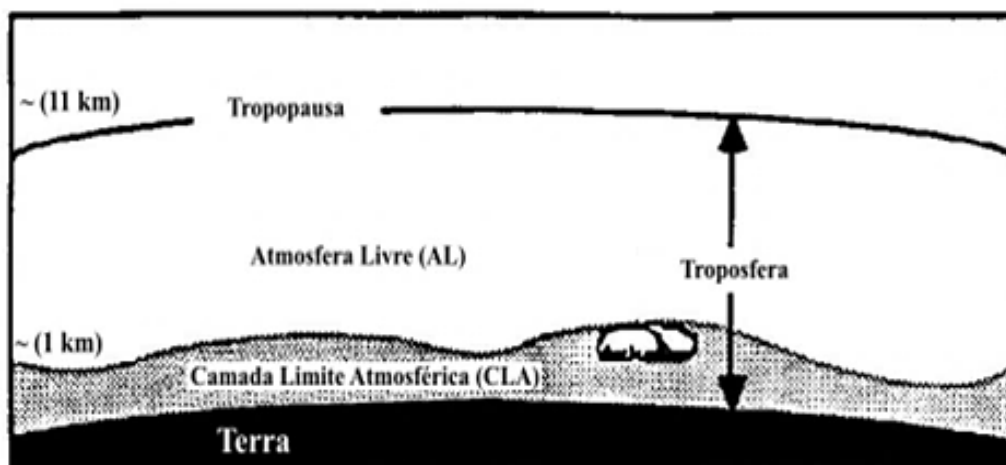


Fonte: Rampinelli (2014)

A Camada Limite Atmosférica (CLA) é a parte da troposfera<sup>2</sup> que sofre influências diretamente da superfície do planeta, sendo diretamente influenciada pela presença da superfície terrestre; respondendo a forças provocadas por ela, tais como: Força de atrito, evaporação e conservação, Movimentos verticais, emissão de poluentes.

A camada limite atmosférica representa uma região com uma altura variável entre 100 e 2000 m de altura e sofre as interações superfície-atmosfera (Gráfico 01). Para o presente estudo, a camada superficial é a zona de interesse para a turbina eólica de pequeno porte proposta neste estudo, sendo a Camada Limite Atmosférica (CLA) a camada de ar que cobre a terra na qual o escoamento de ar é influenciado pela viscosidade (atrito do fluido), sendo que a espessura dessa camada depende da forma e condição da superfície. A Figura 46 mostra o esquematicamente a estrutura da Troposfera, onde a mesma encontra-se dividida em duas partes, sendo a CLA representada pela parte cinza, acima da superfície; e a atmosfera livre representada pela parte acima da camada limite. Além disso, é possível observar que no limite superior encontra-se a Tropopausa, que é o nome atribuído à camada intermediária entre a troposfera e a estratosfera.

**Figura 46 - Troposfera Dividida em duas Partes**

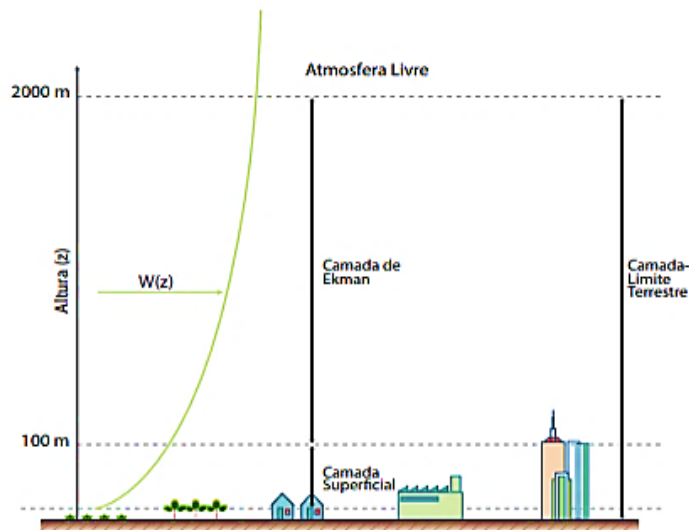


Fonte: Moreira (2007)

A interação entre o terreno e a atmosfera, responsável pelos efeitos regionais ou de mesoescala do vento, combinados com efeitos globais estão ilustrados no Gráfico a seguir.

<sup>2</sup> A troposfera é a camada mais baixa da atmosfera terrestre. Contém aproximadamente 75% da massa atmosférica e 99% do seu vapor de água e aerossóis. A espessura média da troposfera é de 12 km nas latitudes médias.

Gráfico 1 - Elementos da camada-limite terrestre



Fonte: Atlas Eólico Bahia (2013)

O Gráfico 1 apresenta os elementos da camada limite-terrestre, nele é possível observar a **Camada de Ekman**, ou seja, a camada de fluido em que o fluxo é o resultado do equilíbrio entre o gradiente de pressão, a força inercial de Coriolis e a força de arrasto turbulento. Acima da CLA está a atmosfera livre, onde os efeitos da fricção aerodinâmica, aquecimento e resfriamento da camada abaixo são poucos sentidos, predominando um escoamento laminar do vento. O conceito de Camada de Ekman foi proposto pelo oceanógrafo sueco Vagn Walfrid Ekman (1874-1954), sendo utilizado nos estudos e modelagem da circulação atmosférica e da hidrodinâmica dos oceanos. De acordo com Purificação e Fonte (2012), a velocidade do vento varia com a localização geográfica e a altitude, constatando-se alterações instantâneas, diárias, sazonais e anuais. Salienta-se que o comprimento da rugosidade  $z_0$  próximo à superfície terrestre é a altura onde a velocidade é nula. Para altitudes menores que 100m a variação da velocidade de vento com a altura do solo pode ser expressa pela seguinte fórmula empírica expressa na Eq.(4.1):

$$v(h) = v_1 \left[ \frac{h}{h_1} \right]^\alpha \quad (4.1)$$

Onde:

$v$ : velocidade na altura (conhecida);

$v_1$ : velocidade na altura;

$h$ : altura para a qual se quer determinar a velocidade;

$h_1$ : altura em que ocorre a velocidade, geralmente 10m;

$\alpha$ : coeficiente da natureza do terreno (tabela 3);

$z_0$ : rugosidade de cada tipo de terreno.

De modo simplificado, podemos entender que o valor  $z_0$  representa a distancia vertical sobre a superfície a partir da qual se pode considerar um perfil de velocidade vertical. Nesse sentido, quanto maior a rugosidade, mais energia esta sendo retirada do vento próximo à superfície.

**Tabela 3 - Rugosidade de cada tipo de terreno ( $z_0$ ) para cálculo da velocidade do vento**

| Tipo de terreno    | $Z_0$ (m)                 | $\alpha$ |
|--------------------|---------------------------|----------|
| Gelo ou lama plana | $10^{-5}$ a $3.10^{-5}$   | ---      |
| Mar calmo          | $2.10^{-4}$ a $3.10^{-4}$ | ---      |
| Areia              | $2.10^{-4}$ a $10^{-3}$   | 0,10     |
| Neve               | $10^{-3}$ a $6.10^{-3}$   | ---      |
| Grama baixa        | $10^{-3}$ a $10^{-2}$     | 0,13     |
| Estepe             | $10^{-2}$ a $4.10^{-2}$   | ---      |
| Grama alta         | $4.10^{-2}$ a $4.10^{-1}$ | 0,19     |
| Floresta           | $10^{-1}$ a 1             | ---      |
| Subúrbio           | 1 a 2                     | 0,32     |
| Cidade             | 1 a 4                     | ---      |

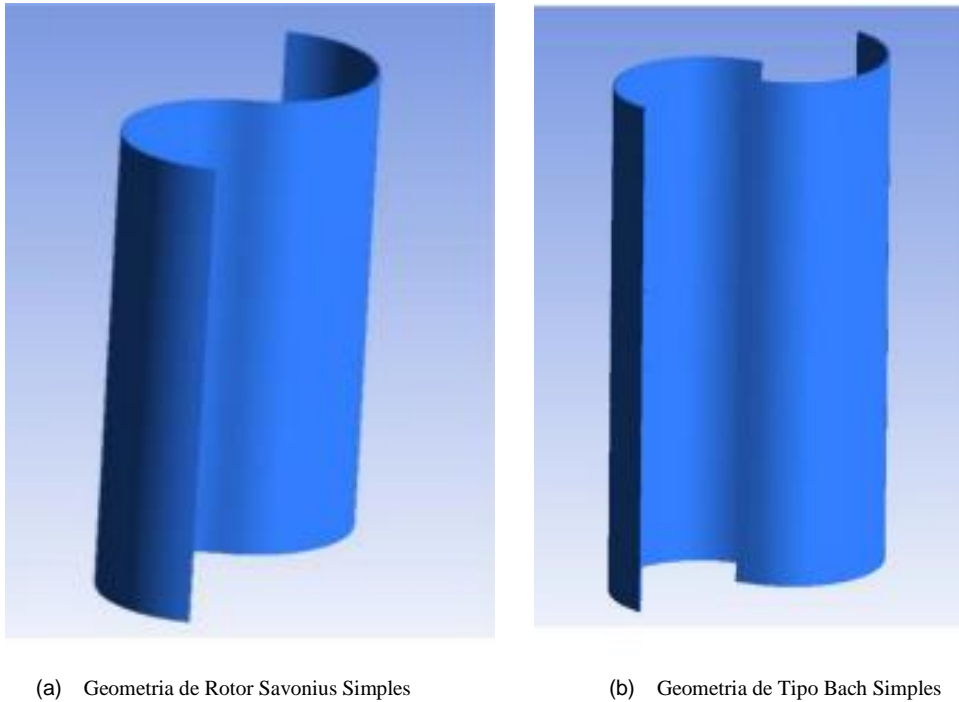
Fonte: Purificação & Fonte (2012)

O modelo de camada limite urbana apresentado no Gráfico 1 serve para definir um valor adequado para a altura das turbinas. As Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH) de grande porte são produzidas comercialmente para escala de geração pública de energia. Este tipo de turbina utiliza uma torre para elevar seus componentes a uma altura ideal à velocidade do vento, elas são utilizadas principalmente em regiões agrícolas e com poucos obstáculos, como prédios ou árvores, uma vez que requer vento mais laminar ou pouco turbulento. Diferentemente das TEEH, as Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV) são usadas principalmente por apresentar um melhor comportamento em ventos turbulentos e emitir baixos níveis de ruído em comparação às TEEH, porém são consideradas mais apropriadas para regiões urbanas ou semiurbanas.

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento e a montagem do protótipo de uma turbina eólica de pequeno porte, utilizando a configuração de turbina eólica vertical modelo rotor Savonius simples com geometria tipo Bach simples, que pode ser usada em aplicações urbanas de pequena escala, para tal, vamos considerar o escoamento do fluido incompressível

e instável. A Figura a seguir apresenta a geometria 3D da turbina eólica de eixo vertical proposta neste estudo, sendo que a figura 47(a) mostra a geometria de rotor Savonius simples e a figura 47(b) mostra a geometria de rotor tipo Bach simples.

**Figura 47 - Geometria da turbina eólica do estudo**



Fonte: Chandrakant (2021)

#### 4.5.2 Lei Logarítmica e Rugosidade

O perfil de velocidade vertical do vento na camada-limite, em condições neutras de estratificação térmica vertical da atmosfera, pode ser aproximado pela Lei Logarítmica de Prandtl, conforme relação proposta na Eq. (4.2):

$$v(h) = \frac{v_*}{k} \ln \left( \frac{h}{z_o} \right) \quad (4.2)$$

Onde,

$v(h)$  = Velocidade do vento na altura  $h$ ;

$z_o$  = Rugosidade do terreno;

$k \cong 0,4$  = Constante de Von Kármán;

$v_*$  = Velocidade de atrito.

Assim, utilizando a Lei Logarítmica para representar a velocidade do vento em duas alturas  $h_1$  e  $h_2$ , e dividindo-se uma expressão pela outra, obtemos a Eq.(4.3):

$$\frac{v(h_2)}{v(h_1)} = \frac{\left(\frac{v_*}{k}\right) \ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\left(\frac{v_*}{k}\right) \ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (4.3)$$

Operacionalizando a Eq.(4.3), obtemos uma expressão que representa a velocidade do vento em duas alturas, descrita na Eq.(4.4):

$$\frac{v(h_2)}{v(h_1)} = \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (4.4)$$

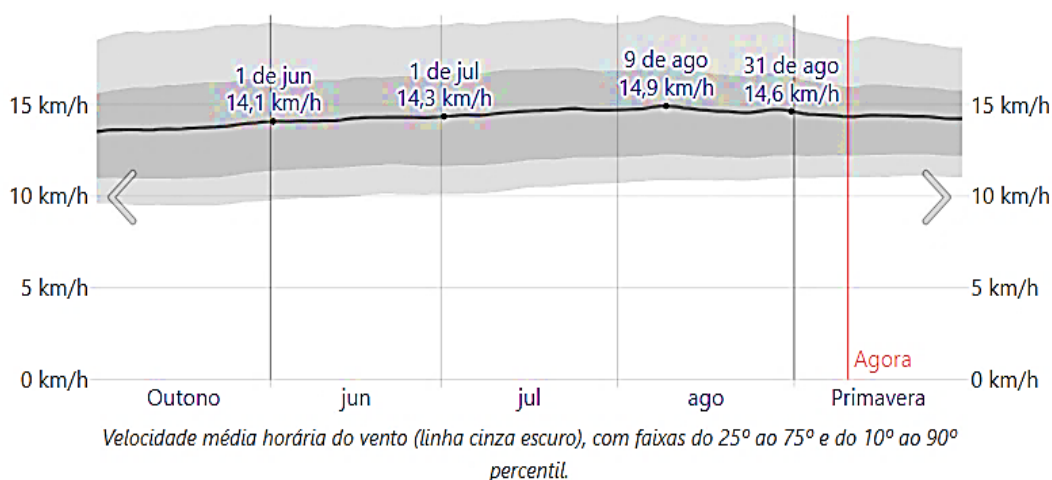
Simplificando a expressão dada pela Eq.(4.4), obtemos a variação vertical da velocidade do vento na camada-limite, expressa em termos da Lei de Potência, conforme relação descrita na Eq.(4.5).

$$v(h_2) = v(h_1) \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (4.5)$$

Onde  $v(h)$  é a velocidade do vento na altura  $h$ , sendo  $\alpha$  o “expoente de camada-limite”. Assim, da Eq.(5.5), pode-se explicitar o “*expoente de camada-limite*” em função das velocidades de vento em duas alturas, resultando na Eq.(4.6).

$$\alpha = \frac{\ln\left[\frac{v(h_2)}{v(h_1)}\right]}{\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} \quad (4.6)$$

Gráfico 2 - Velocidade média do vento no inverno em Salvador



Fonte: Weather Spark (Setembro 2023)

De acordo com o site Weather Spark, a velocidade horária média do vento na cidade Salvador passa por variações sazonais pequenas ao longo do ano. A época de mais ventos no ano dura 6,3 meses, de 24 de maio a 2 de dezembro, com velocidades médias do vento acima de 13,8 quilômetros por hora. O mês de ventos mais fortes em Salvador é agosto, com 14,7 quilômetros por hora de velocidade média horária do vento no inverno em Salvador (site<sup>3</sup>).

## 4.6. HISTÓRIA

### 4.6.1. Aproveitamento da Força do Vento

Conforme Jabber (2013), o aproveitamento da energia do vento teve início há milhares de anos com o transporte marítimo, em embarcações movidas à vela. Sendo assim, a energia eólica é conhecida pelo homem há mais de 3.000 anos; e a sua utilização pelo ser humano vem desde o início da civilização. Logo, o registro mais antigo que se tem conhecimento do uso dessa fonte de energia eólica remota do período das embarcações a vela, quando o ser humano percebeu que a força dos ventos poderia ser utilizada em seu benefício. Nos barcos a vela, o vento era utilizado diretamente como fonte de energia cinética, pois seu uso provocava a movimentação desses barcos, já que ocorria a transferência da energia cinética dos ventos para as embarcações.

<sup>3</sup> <https://pt.weatherspark.com/h/s/31054/2023/3/Hist%C3%B3rico-das-condi%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-no-inverno-de-2023-em-Salvador-Brasil#Figures-WindSpeedHeatMap>.

A partir do início do século XIX, e, um século depois, com a primeira grande crise do petróleo da década de 1970, os ventos começaram a ser vistos como importante fonte na produção de energia elétrica. Em consequência disso, houve interesse político e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e a produção de equipamentos de produção de energia eólica em escala comercial no Ocidente, uma vez que o controle do petróleo, exercido pelas nações do Oriente Médio, causavam sérias preocupações aos países capitalistas.

#### 4.6.2 As Cruzadas e as Grandes Navegações

Em 1095, final do século XI, aconteceram expedições militares organizadas por Católicos da Europa Ocidental que ficaram conhecidas como “Cruzadas”. Essas expedições foram convocadas pelo Papa Paulo Urbano II no Concílio de Clermont, e tinham como alvo principal retomar o poder, resgatando para o mundo dos cristãos lugares sagrados, como o Santo Sepulcro em Jerusalém, na Palestina, que era chamado pelos cristãos de Terra Santa. No ano de 1099, o exército cristão retomou o controle da cidade de Jerusalém, porém em 1187, Jerusalém foi reconquistada pelos exércitos de Saladino, e, ao longo dos anos, os cristãos foram perdendo todos os territórios que haviam conquistado durante suas expedições.

As Cruzadas contribuíram para aumentar as diferenças entre cristãos e muçulmanos, entretanto, ocorreu um grande impulso comercial, pois houve a criação de um fluxo comercial que resultou em mudanças na Europa medieval, uma vez que permitiu a introdução de várias mercadorias orientais no cotidiano Europeu, resultando no renascimento urbano e no uso da moeda. Além disso, o contato com os saberes do mundo bizantino e árabe foi importantíssimo para o progresso intelectual que muito contribuiu para o desenvolvimento das posteriores grandes navegações.

O processo de exploração e navegação do Oceano Atlântico, iniciado no século XV, ficou conhecido como “*As Grandes Navegações*” ou “*Expansão Marítima*”, e estendeu-se até o século XVI, sendo Portugal o pioneiro. Mais tarde, a nação portuguesa se juntou a outros países europeus e, juntos, fizeram uma série de expedições que culminaram na descoberta de novos caminhos, dentre eles o caminho para alcançar o continente asiático. Além disso, por volta do ano de 1492, os Europeus chegaram pela primeira vez ao continente americano que era, até então, terras desconhecidas por eles. Alguns fatores explicam o pioneirismo de Portugal durante o período das grandes navegações, dentre eles o investimento no desenvolvimento de conhecimento náutico. Alguns historiadores atribuem à tecnologia e conhecimento náutico de Portugal à Escola de Sagres, centro de estudos construído por infante D. Henrique em Algarve. Muitas pesquisas eram promovidas nesse local para o

desenvolvimento das melhores técnicas de navegação, o que remete ao conhecimento e uso da energia cinética do vento.

#### 4.6.2. O Moinho de Vento

Tarefas como moagem dos grãos e o bombeamento de águas exigiam cada vez mais esforço braçal e animal, nesse sentido o avanço da agricultura despertou no homem a necessidade de utilizar ferramentas adequadas às diversas etapas do trabalho para o desenvolvimento de suas atividades agrícolas (Shepherd, 1994). Em consequência disso, mais tarde surgiu uma forma primitiva do que viria a ser o moinho de vento, utilizado no beneficiamento dos produtos agrícolas e bombeamento de água (Montero et al, 2021).

Por volta de 200 a.C., foram encontrados na China e na Pérsia registros rústicos de moinhos de vento, logo os primeiros registros históricos confirmados do aproveitamento da força do vento em máquinas motoras remontam ao século X e vêm da Pérsia, na região de Sistão, atualmente na fronteira entre o sudeste do Irã e o sudoeste do Afeganistão. Essas máquinas motoras possuíam eixo vertical acionado por uma longa haste presa a ela, movida por homens ou animais caminhando em uma gaiola circular. Eram usadas no beneficiamento dos produtos agrícolas para a moagem de grãos, nelas utilizavam-se a força de arrasto para mover velas que eram parcialmente protegidas por paredes.

O desenvolvimento da tecnologia dos moinhos de vento tipo vela teve um importante impacto, pois muitas civilizações utilizavam os cata-ventos para moer grãos, bombear água e transportar mercadorias em barcos a vela, assim às embarcações movidas à vela também evoluíram, pois após o retorno das Cruzadas houve a introdução dos cata-ventos na Europa, sendo os mesmos largamente utilizados e seu desenvolvimento bem documentado. Até o século XII persistiram as máquinas primitivas, quando os moinhos de eixo horizontal começaram a ser utilizados em alguns países do continente europeu como Inglaterra, França e Holanda, sendo que os moinhos de vento do tipo “holandês” foram rapidamente disseminados em alguns países da Europa.

**Figura 48 - Moinhos de vento típico da Holanda**



Fonte: Dutra (2001)

No século XVII, o desenvolvimento da mecânica com as relevantes contribuições de Huygens, de Hooke, de Isaac Newton, de Leibnitz e dos irmãos Bernoulli, provocou mais inovações tecnológicas nos moinhos de vento, sendo que a ideia de gerar energia elétrica a partir da força do vento surgiu no final do século XIX. No século XV, em pleno Renascimento, salientam-se as importantes investigações tecnológicas do cientista, matemático, engenheiro, inventor, anatomista, pintor, escultor, arquiteto, botânico, poeta e músico, Leonardo Da Vinci.

Especificamente, as investigações de Da Vinci eram sobre os mecanismos e tentativas para construir uma máquina voadora semelhante a uma hélice que funcionava utilizando o desenho dos perfis das asas dos pássaros e a força do vento. A aplicação destes perfis foi utilizada nos primeiros aeroplanos e nas pás dos primeiros aerogeradores nos finais do século XIX e princípios do século XX. Na Europa, durante a Idade Média, os camponeses eram obrigados a usar os moinhos de ventos dos senhores feudais para moagem dos seus grãos, pois a maioria das leis feudais incluía o direito de recusar a permissão à construção de moinhos de ventos por eles. Além disso, dentro dessas leis de concessão de construção de moinhos, foram estabelecidas leis que proibiam a plantação de árvores próxima aos moinhos assegurando, dessa forma, o “direito ao vento”. O uso dos moinhos propiciou a otimização de diversas atividades que utilizavam a força motriz do vento, em função do desenvolvimento tecnológico das pás, sistemas de controle, eixos, etc. desses equipamentos, causando uma forte e decisiva influência na economia agrícola da Europa por vários séculos.

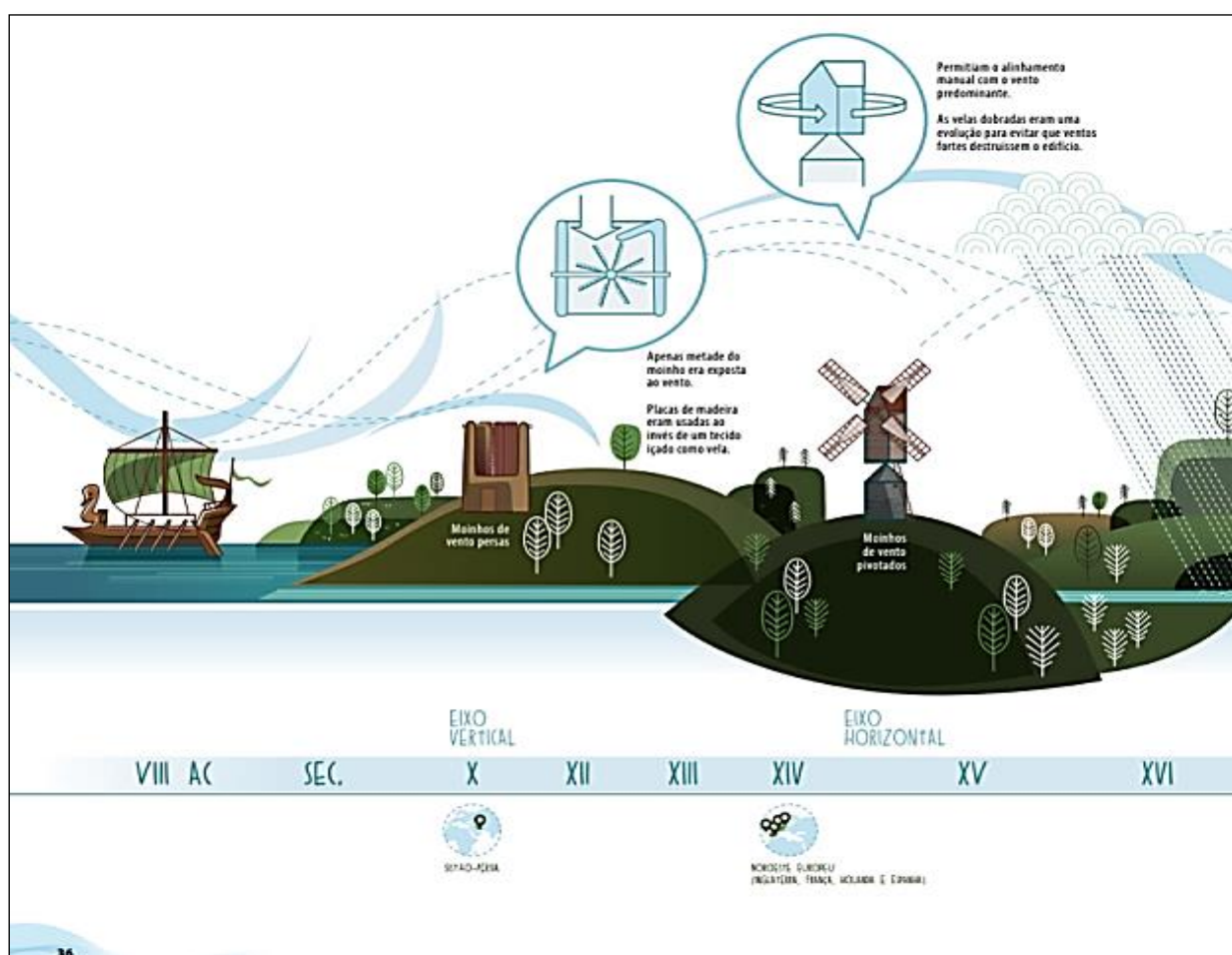
**Figura 49 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no período do Século XI ao Século XIX.**



Fonte: Dutra (2001)

A Revolução Industrial representou um importante marco para o desenvolvimento da energia eólica na Europa no final do século XIX, pois com o advento da Máquina a Vapor, iniciou-se na Holanda o declínio do uso de energia eólica, sendo que no início do século XX, existiam apenas 2.500 moinhos de vento em operação, porém esse número caiu para menos de 1.000 no ano de 1960 (CHESF-BRASCEP, 1987), uma vez que se iniciou o declínio do uso de energia eólica na Holanda. A Figura, a seguir, ilustra a cronologia técnica de aproveitamento da força do vento.

Figura 50 - Cronologia técnica de aproveitamento do vento



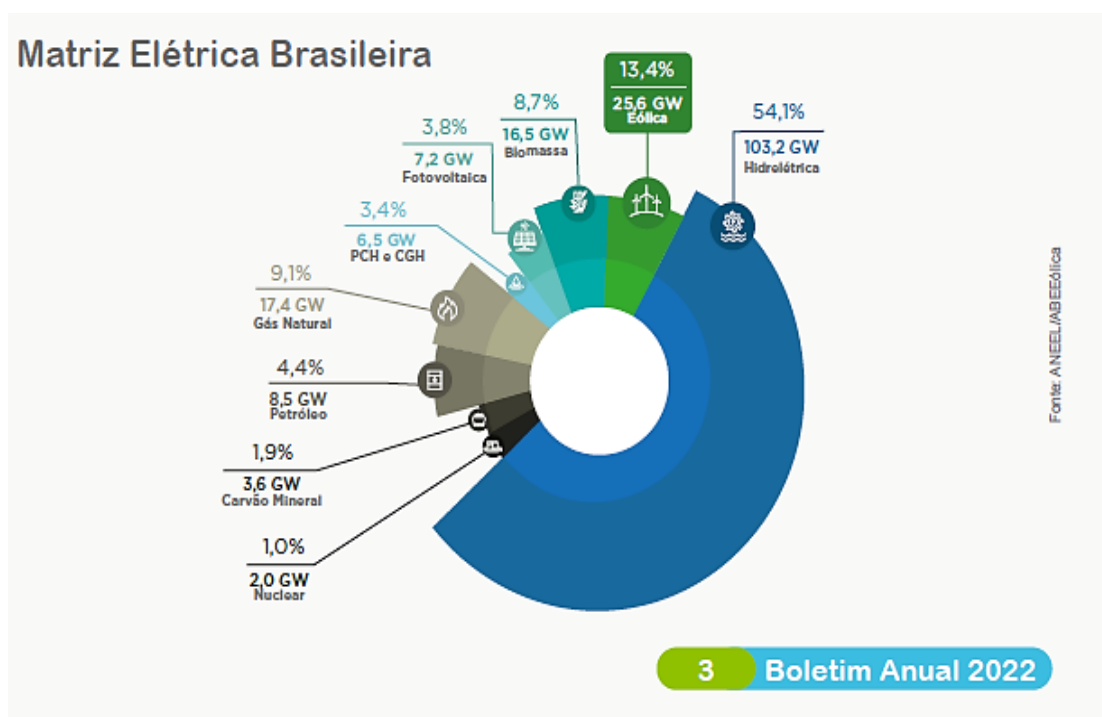
Fonte: Atlas Eólico Bahia (2013)

Em função do declínio dos moinhos de vento, houve grande preocupação por parte dos holandeses com a extinção dos moinhos de ventos, assim no ano de 1923 foi criada uma sociedade holandesa para conservação, melhoria de desempenho e utilização mais efetiva dos moinhos holandeses.

#### 4.7. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Entre os anos de 1970 e 1980 houve a primeira grande crise de preços de petróleo no mundo, após esse período diversos países, incluindo o Brasil, dispenderam esforços na pesquisa da energia eólica para a geração de energia elétrica. Assim, em decorrência de uma grande crise energética ocorrida no Brasil, a geração de eletricidade a partir de uma fonte eólica teve início, de fato, no ano de 2001 quando grandes investimentos foram realizados, resultando em uma verdadeira corrida de empreendedores interessados em investir na construção e operação de usinas eólica no país. De acordo com o site da CNN Brasil<sup>4</sup>, no ano de 2021 o Brasil passou a ocupar o 6º. Lugar no Ranking da Capacidade Total Instalada em Solo, anteriormente, ocupou a 7ª. Posição no ano de 2020 e a 15ª posição em 2012, comprovando um histórico de crescimento por 10 anos.

Gráfico 3 - Gráfico representativo da matriz elétrica brasileira em 2022 (em GW)



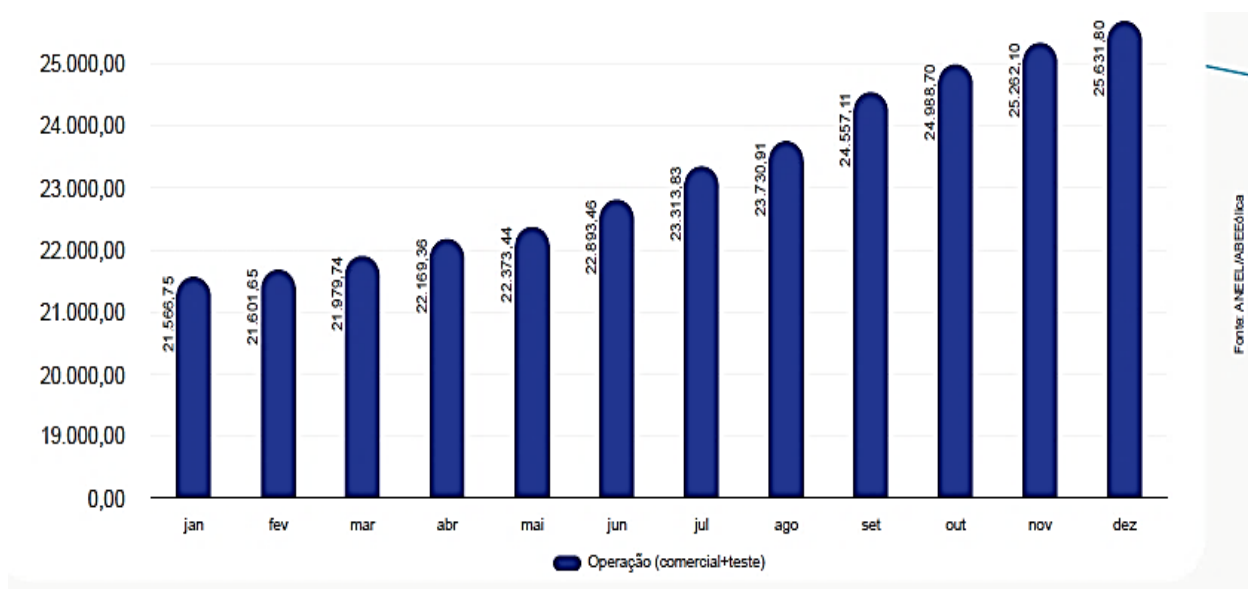
Fonte: ABEEÓLICA, Boletim Anual (2022)

De acordo com o boletim anual de 2022 da Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias - ABEEÓLICA, se considerarmos todas as fontes de geração de energia elétrica do ano de 2022, vamos observar que foram instalados 7,97 GW de potência e a eólica foi à fonte que mais cresceu, representando 51,03% da nova capacidade instalada neste ano.

<sup>4</sup> <https://www.cnnbrasil.com.br/business/brasil-sobe-posicao-em-ranking-global-de-producao-de-energia-eolica/>

Conforme ilustrado no Gráfico 04, a nova capacidade eólica instalada em 2022 fez a fonte eólica atingir uma participação de 13,4% da matriz elétrica brasileira, que apresenta a participação de todas as fontes de geração na matriz elétrica brasileira no fim de 2022.

**Gráfico 4 - Evolução da capacidade instalada - 2022 (GW)**



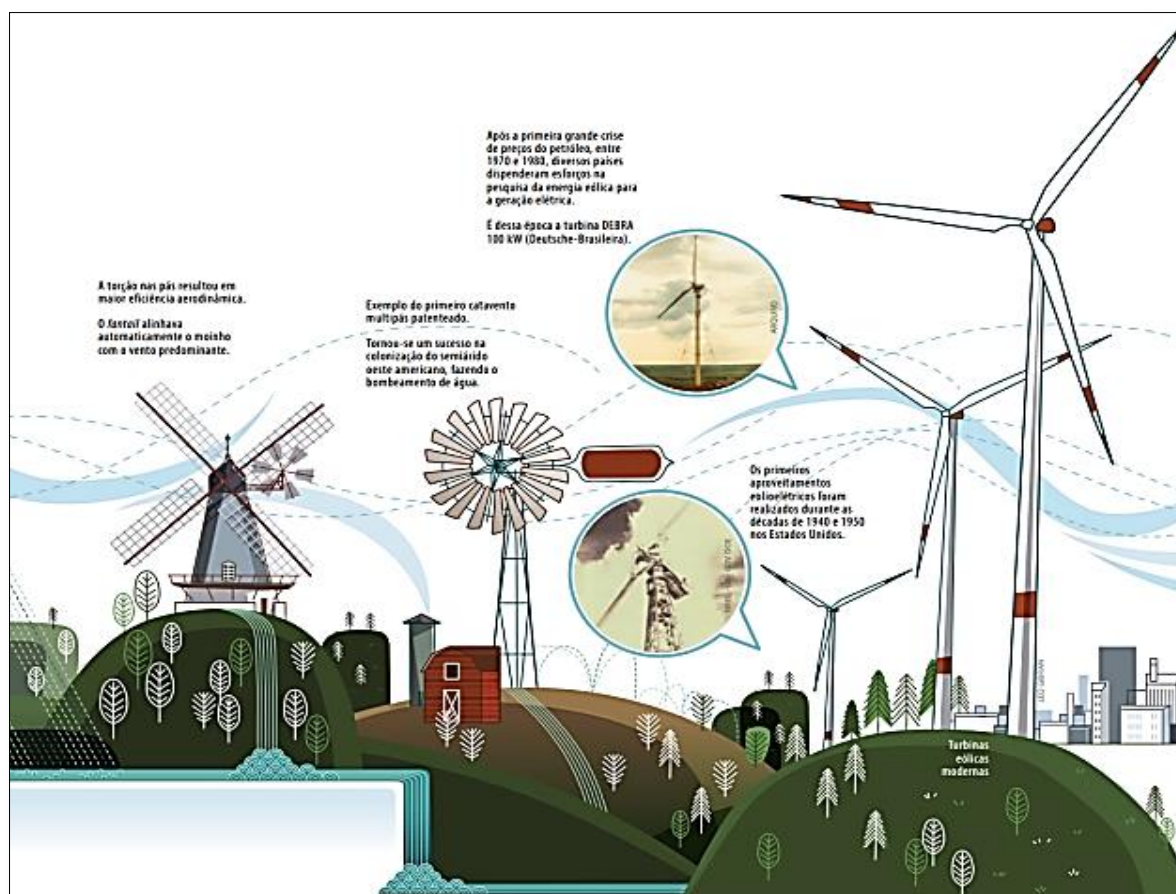
Fonte: ABEEÓLICA, Boletim Anual (2022)

O Gráfico 4, acima, apresenta a evolução da capacidade instalada ao longo do ano de 2022, assim, de acordo com o boletim anual de 2022 da ABEEÓLICA, a capacidade instalada de 25,63 GW do final de dezembro de 2022 é composta por 24,12 GW de parques em operação comercial (94,13%) e 1,50 GW de operação em teste (5,87%).

O Programa de Incentivo a Fontes Alternativas - PROINFA, instituído no ano de 2004, cujo objetivo era aumentar a participação no sistema de energia produzida por empreendimentos da fonte eólica, biomassa e de pequenas centrais hidrelétricas, deu o primeiro impulso ao crescimento da energia eólica no Brasil na década de 2000 (Atlas Eólico Bahia, 2013). Como resultado, o programa abriu oportunidades de trabalho no setor elétrico que culminou na contratação de 1.422,94 W para a fonte eólica, dos quais 69 MW<sup>5</sup> foram instalados na Paraíba, sendo responsável pela geração de 3,1% da energia elétrica consumida nesse Estado.

<sup>5</sup> O megawatt, cujo símbolo é MW, consiste numa unidade da grandeza física potência. É um múltiplo do watt. No sistema internacional de unidades (SI), a potência vem expressa em watts pelo que para converter megawatts em watts é necessário reduzir megawatts a watts, isto é, 1 MW = 10<sup>6</sup> W.

Figura 51 - Cronologia técnica das turbinas eólicas



Fonte: Atlas Eólico Bahia (2013)

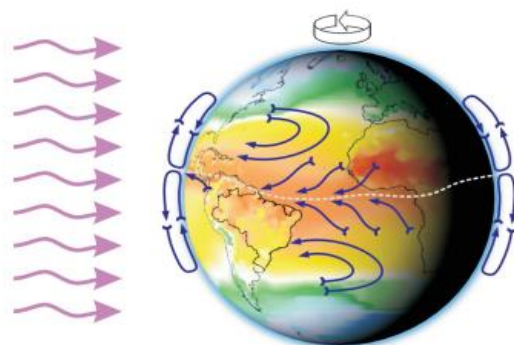
No ano de 2009, foi dado um segundo impulso, quando o Ministério das Minas e Energia promoveu o segundo Leilão de Energia de Reserva, nessa oportunidade foi aberto exclusivamente à participação da fonte eólica, o que resultou na contratação de 1.805 MW em todo território nacional. A ocorrência desses eventos firmou a energia eólica como uma das principais fontes de energia a adicionar capacidade ao Sistema Interligado Nacional, dessa forma a energia eólica, inicialmente com o status coadjuvante de fonte de energia alternativa, passou a contribuir efetivamente com a matriz energética brasileira, fazendo parte de seu planejamento e expansão, a Figura 10 apresenta a evolução das turbinas eólicas.

#### 4.8. O POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

Para tornar possível a avaliação do potencial eólico de uma região, se faz necessária a coleta de dados do vento com precisão e qualidade, que é imprescindível para a realização de um projeto de aproveitamento de recurso eólico. De acordo com o mapa eólico brasileiro, a

distribuição geral dos ventos sobre o Brasil é controlada pelos aspectos da circulação geral planetária da atmosfera próxima, conforme se apresenta na figura abaixo.

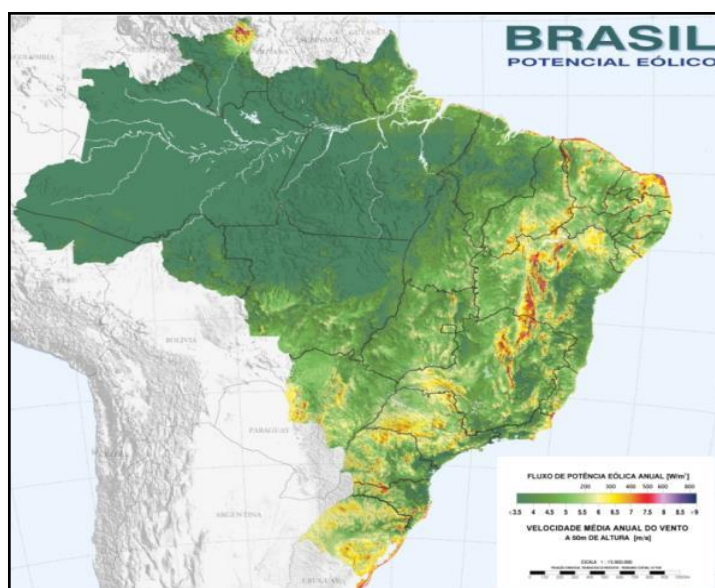
**Figura 52 - Distribuição geral dos ventos**



Fonte: Dutra (2001)

Segundo o CRESESB<sup>6</sup>, o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro cobre todo o território nacional, conforme demonstrado na Figura abaixo. Seu objetivo é fornecer informações para capacitar tomadores de decisão na identificação de áreas adequadas para aproveitamentos eólico-elétricos.

**Figura 53 - Potencial Eólico Brasileiro**



Fonte: CEPEL (2001)

<sup>6</sup> O CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito tem a missão de promover o desenvolvimento das energias solar e eólica através da difusão de conhecimentos, da ampliação do diálogo entre as entidades envolvidas e do estímulo à implementação de estudos e projetos.

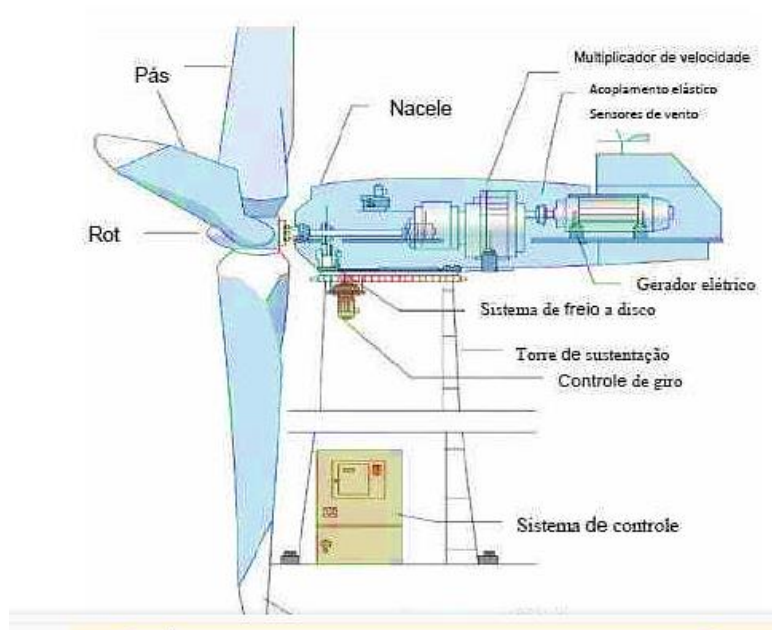
## 4.9. TURBINAS EÓLICAS

### 4.9.1 Conceito

Segundo Caixeta (2014), em linhas gerais, os geradores eólicos são equipamentos que realizam a conversão da energia cinética contida no vento em energia elétrica, disponibilizando-a em seus terminais para a utilização local ou conexão à rede elétrica.

No início da utilização da energia eólica, surgiram turbinas de vários tipos, eixo horizontal, eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de indução, gerador síncrono etc. Com o passar do tempo, consolidou-se o projeto de turbinas eólicas com as seguintes características: eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não flexível, como ilustrado na Figura abaixo.

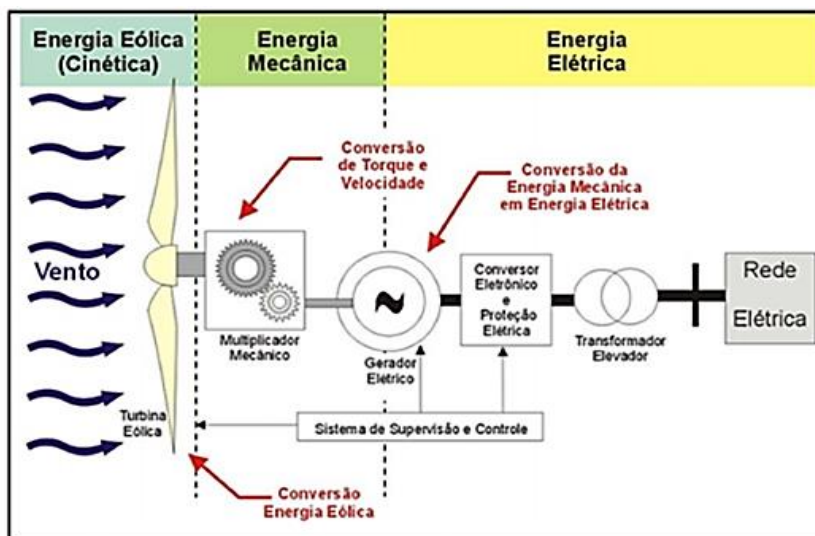
**Figura 54 - Desenho esquemático de uma turbina eólica moderna**



Fonte: ANEEL, Energia Eólica, 2019, fig. 6.2, p. 97.

De acordo com o princípio de conservação de energia, considerando algumas perdas entre os processos, basicamente um aerogerador converte energia a partir de dois processos. Inicialmente a energia cinética do vento é transformada em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica que será distribuída para rede elétrica (Rampinelli et al. 2014). A figura a seguir demonstra esses processos.

Figura 55 - Esquema geral de funcionamento de um aerogerador.



Fonte: Rampinelli et al (2014).

A primeira turbina eólica do Brasil foi instalada no arquipélago de Fernando de Noronha - PE, em junho de 1992. Isso foi possível a partir do projeto realizado pelo Grupo de Energia Eólica da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, com financiamento de um Instituto de Pesquisas Dinamarquês - Folkecenter, em parceria com a Companhia Energética de Pernambuco - CELPE. Os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores especiais foram instalados no início dos anos 90 no Estado do Ceará e no arquipélago de Fernando de Noronha, situado a cerca de 350 quilômetros ao largo da costa nordeste do Brasil. As medições realizadas por esses equipamentos trouxeram bons resultados, favorecendo a determinação precisa do potencial eólico desses locais e a instalação de turbinas eólicas.

#### 4.10. TIPOS E CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS

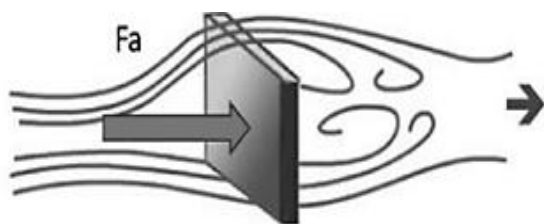
Segundo FILHO et al, 2018, os aerogeradores são classificados quanto à forma de ação do vento sobre as pás e quanto à posição de eixo, conforme descrito a seguir.

##### 4.10.1. Classificação quanto à ação do vento

###### a) Aerogerador do tipo Impulso

Nesse caso, a principal componente da força do vento atuante sobre as pás é a força de arraste ( $F_a$ ).

**Figura 56 - Ação por impulso sobre a superfície de um corpo imerso em um escoamento**



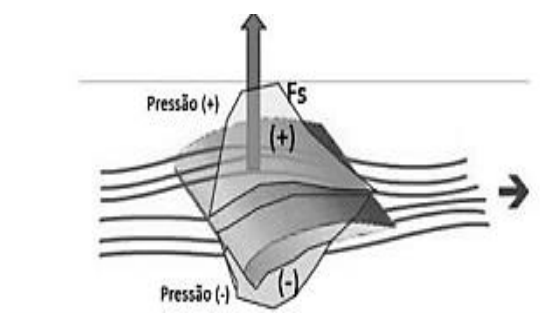
Fonte: Filho et al (2018)

No aerogerador do tipo Impulso, o fluido escoava ao longo da superfície da pá e não ocorrem mudanças na pressão desse fluido na sua passagem pelo rotor.

b) Aerogerador do tipo Reação

Nesse caso, a principal componente da força do vento atuante sobre as pás é a força de sustentação ( $F_s$ ).

**Figura 57 - Ação por reação sobre a superfície de um corpo imerso em um escoamento**



Fonte: Filho et al (2018)

No aerogerador do tipo Reação, o fluido escoava ao longo da superfície da pá, ocorrem mudanças na pressão desse fluido à medida que ele escoava ao longo da superfície dessa pá.

#### 4.10.2. Classificação quanto à posição do eixo

As turbinas eólicas podem girar em torno de um eixo horizontal ou vertical, sendo que as turbinas eólicas de eixo horizontal são mais antigas e comuns, enquanto que os projetos de eixo vertical produzem menos potência e são menos comuns. Portanto, os dois tipos básicos de turbinas eólicas são: Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH) e Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV).

Nesse sentido, quanto à posição do eixo, tendo o solo ou a direção do vento, as turbinas eólicas são classificadas de duas formas:

a) Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH)

As turbinas eólicas de eixo horizontal operam com eixo na posição paralela ao solo ou à direção do vento, correspondem ao modelo de aerogerador mais conhecido e utilizado, ocupam grandes áreas em função do seu tamanho e emitem altos níveis de ruído. Paralelamente ao desenvolvimento das turbinas eólicas de eixo horizontal, foram criadas as turbinas eólicas de eixo vertical.

**Figura 58 - Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH)**

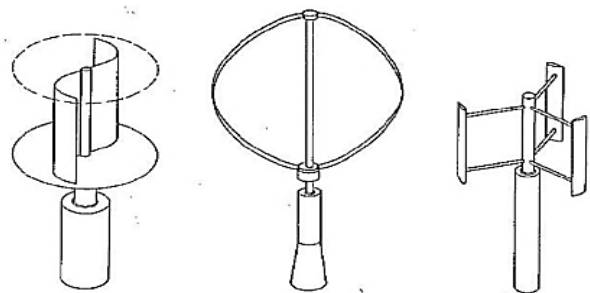


Fonte: Atlas Eólico - Bahia (2013, fig. 1.1, p. 12)

b) Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV)

As turbinas eólicas de eixo vertical operam com eixo na posição perpendicular ao solo ou à direção do vento, ou seja, têm o eixo principal do rotor disposto verticalmente; e têm a vantagem de não dependerem da direção do vento, pode ser utilizada para fins residenciais devido à possibilidade de instalação de base próxima à superfície, além de emitir baixos níveis de ruído em comparação às turbinas eólicas de eixo horizontal, apesar disso, em escala global, as turbinas horizontais são as mais usadas na geração de energia elétrica conectada a redes de transmissão, pois apresentam velocidade e rotação mais elevada que as TEEV's.

**Figura 59 - Tipos de Turbina eólica de Eixo Vertical (TEEV)**



Fonte: Lopes et al (2017, fig. 10, p. 23)

Nos dois grupos (TEEH e TEEV) existem aerogeradores de ação e de reação. Normalmente, no grupo de eixo horizontal é mais comum encontrar aerogeradores do tipo de reação e no grupo de eixo vertical é mais comum encontrar ambos os tipos, ou seja, aerogeradores do tipo reação e arraste. O princípio de funcionamento das turbinas eólicas é o mesmo das turbinas hidráulicas. As diferenças são o fluido de trabalho, ar ao invés da água, e a natureza do fluxo ser externo ao invés de interno. O presente estudo está focado no projeto de uma turbina eólica de eixo vertical.

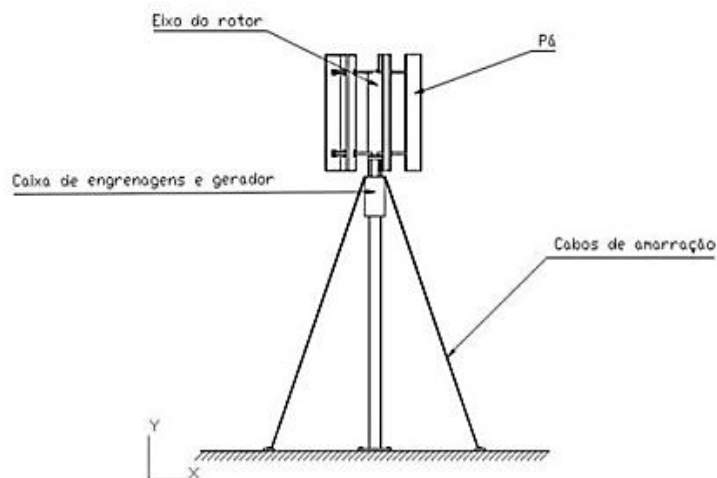
#### 4.11. COMPONENTES DO AEROGERADOR VERTICAL

De acordo com Lopes et al (2017), os componentes de um aerogerador de eixo vertical são basicamente:

- a) Pá,
- b) Eixo do rotor;
- c) Cabos de amarração;
- d) Caixa de engrenagens;
- e) Gerador;
- f) Torre de sustentação.

Sendo que as pás e o eixo formam os componentes do rotor e são os responsáveis por absorver a parte da energia cinética que passa através da área varrida pelo rotor, transformando-a em energia mecânica. A caixa de engrenagens transmite ou eleva a rotação do rotor para um gerador elétrico. Usualmente a transmissão tende a elevar a rotação, aumentando assim a potência do gerador que converte essa rotação em eletricidade. A torre de sustentação suporta o peso de todo o sistema.

**Figura 60 - Componentes do aerogerador.**



Fonte: Lopes et al (2017, pág. 24)

Mundialmente, uma política de transição energética tem sido adotada, no que se refere à substituição de combustíveis fósseis por energias renováveis para reduzir a emissão de CO<sub>2</sub>. Porém, para sistemas eólicos de pequeno porte, a grande questão é desenvolver uma tecnologia para uma turbina eólica que tenha um projeto simples, uma baixa velocidade de operação e direções de vento independentes, nesse sentido, a Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV) parece ser promissora para tais condições, mas possui algumas desvantagens em relação as Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH). Em especial, o rotor Savonius possui baixa eficiência e alto torque negativo, sendo necessário melhorar o desempenho desta turbina, otimizando os efeitos de diferentes parâmetros geométricos e desenvolvendo novo projeto. O produto educacional, tema do presente trabalho é o protótipo de uma turbina eólica de pequeno porte, desenvolvido a partir da variação comum do rotor de pás elípticas, modelo da Turbina de Bach, dessa forma, foi elaborada uma sequência didática que julgamos ser essencial para estudo desta turbina.

#### 4.12. A HISTÓRIA DAS TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL

O interesse pelas turbinas eólicas de eixo vertical está emergindo, principalmente para aplicações offshore, em decorrência da demanda mundial por energia, resultando em pesquisas por novas fontes energéticas. Porém, as primeiras patentes das turbinas eólicas verticais surgiram no início do século XX, sendo que os dois principais dispositivos eram os do tipo de Savonius, movidos pela força de arraste; e os Darrieus e H-rotors, movidos pela força de sustentação. No entanto, à época, apenas as turbinas Darrieus e H-rotors foram

consideradas adequadas para o aumento de escala e produção de energia. Dessa forma, até os anos de 1970, quase nenhuma investigação foi feita nas turbinas eólicas, porém acontecimentos como o embargo do petróleo árabe em 1973, deram aos países ocidentais um incentivo para avaliar a sua dependência de fontes de energia estrangeiras e tentar descobrir novas formas de produção de energia.

A turbina eólica de eixo vertical Darrieus se assemelha a um gigantesco “*batedor de ovos* (eggbeater)”, e sua vantagem principal é que este tipo de turbina, incluindo a caixa de engrenagens e o gerador, pode ser colocado próximo ao chão. A segunda vantagem deste tipo de turbina eólica é que você não precisa de um novo mecanismo para transformar o rotor contra o vento. A turbina Darrieus remonta ao ano de 1927, quando o engenheiro aeronáutico francês Jean Marie Georges Darrieus patenteou este inovador design da turbina. No entanto, o conceito da turbina eólica vertical Darrieus, era pouco conhecido fora de França, porém em meados da década de 1960 foi reintroduzido no Conselho Nacional de Investigação do Canadá (CNRC). Dessa forma, grande parte do desenvolvimento de turbinas eólicas canadenses foi focada nas Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV), e vários projetos foram iniciados, durando até à década de 1990. Além disso, no início dos anos de 1970, os Laboratórios Nacionais Sandia (Sandia) foram designados pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE) para investigar recursos de energia alternativa e rapidamente tomaram conhecimento da nova pesquisa canadense de TEEV. O conceito TEEV tornou-se subsequentemente o foco da investigação de energia renovável da Sandia. Estes dois laboratórios foram os primeiros a estudar, projetar e construir turbinas eólicas de eixo vertical com potência nominal superior a 100 kW. (Möllerström et al., 2019).

#### 4.13. MERCADO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE NO BRASIL

No Brasil, o Mercado de Aero geradores de Pequeno Porte (MAPP) está em ascensão, onde pesquisas estão sendo desenvolvidas pelo Cepel, que é um centro de pesquisas em energia elétrica vinculado às empresas da Eletrobrás. Além disso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que é uma autarquia sob regime especial (Agência Reguladora), vinculada ao Ministério de Minas e Energia, cuja sede e foro estão em Brasília, Distrito Federal, tem a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as Políticas e Diretrizes do Governo Federal.

**Figura 61 - Mercado de Aerogeradores de Pequeno Porte no Brasil.**



Fonte: Centro de Referências para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito<sup>7</sup>

#### 4.13.1. Resolução Aneel nº 482

A Resolução Aneel nº 482, do dia 17 de abril de 2012, concentra a regulamentação brasileira que trata de incentivos específicos para a tecnologia eólica de pequeno porte. Esta resolução dispõe sobre o estabelecimento das condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e sobre o sistema de compensação de energia elétrica, além de dar outras providências.

**Figura 62 - Esquema simplificado de sistema eólico de pequeno porte conectado à rede.**



Fonte: CRESESB - Centro de Referências para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito

#### 4.13.2. Lei 14.300/2022

Em 06 de janeiro de 2022 foi sancionado o Marco Legal para a geração própria de energia. Publicada no Diário Oficial da União em 7 de janeiro de 2022, a Lei 14.300/2022 cria o marco regulatório da microgeração e minigeração distribuída - a chamada geração distribuída de energia. A legislação prevê usinas de pequeno porte instaladas em residências, terrenos, propriedades rurais e prédios públicos, voltadas para a geração da própria energia elétrica a partir de fontes renováveis, como solar fotovoltaica, de centrais hidrelétricas e de biomassa.

<sup>7</sup> <http://www.cresesb.cepel.br/index.php>.

#### 4.14. SIGURD JOHANNES SAVONIUS

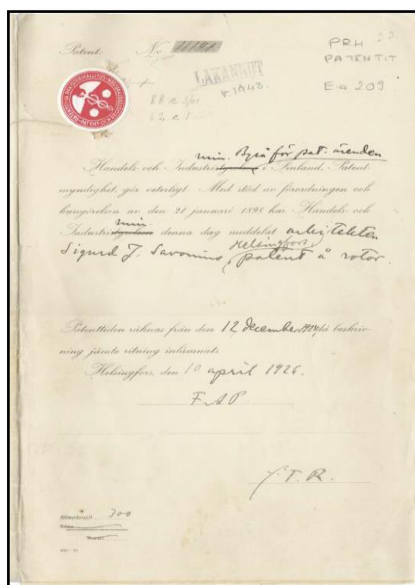
Sigurd Johannes Savonius (1884-1931), arquiteto e inventor finlandês, ficou conhecido pela invenção do rotor Savonius, uma turbina eólica de eixo vertical. Em 1926, Savonius desenvolveu e patenteou diversos estudos, dentre eles os aerogeradores de eixo vertical. Posteriormente, estes aerogeradores foram nomeados como do tipo Savonius.

**Figura 63 - Sigurd Johannes Savonius**



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Sigurd\\_Johannes\\_Savonius](https://pt.wikipedia.org/wiki/Sigurd_Johannes_Savonius)

**Figura 64 - Capa da patente finlandesa do Rotor Savonius, abril/1926**



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Sigurd\\_Johannes\\_Savonius](https://pt.wikipedia.org/wiki/Sigurd_Johannes_Savonius)

#### 4.15. TURBINA EÓLICA DO TIPO SAVONIUS

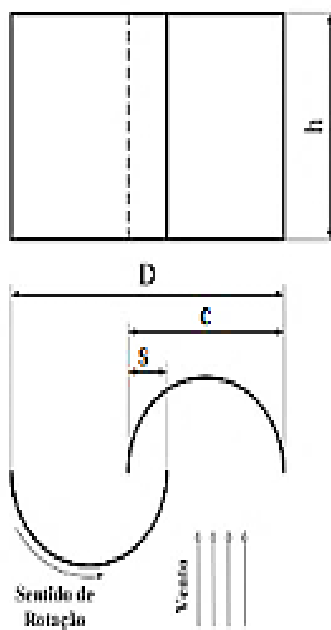
O princípio de funcionamento do rotor Savonius baseia-se no acionamento diferencial, onde a geometria deste rotor consiste em dois semicilindros com um formato de “S”, colocados entre dois discos horizontais dispostos na vertical, com uma ligeira sobreposição ao centro.

**Figura 65 - Rotor de Savonius de duas Conchas**



Fonte: Carmo (2012, pág. 3)

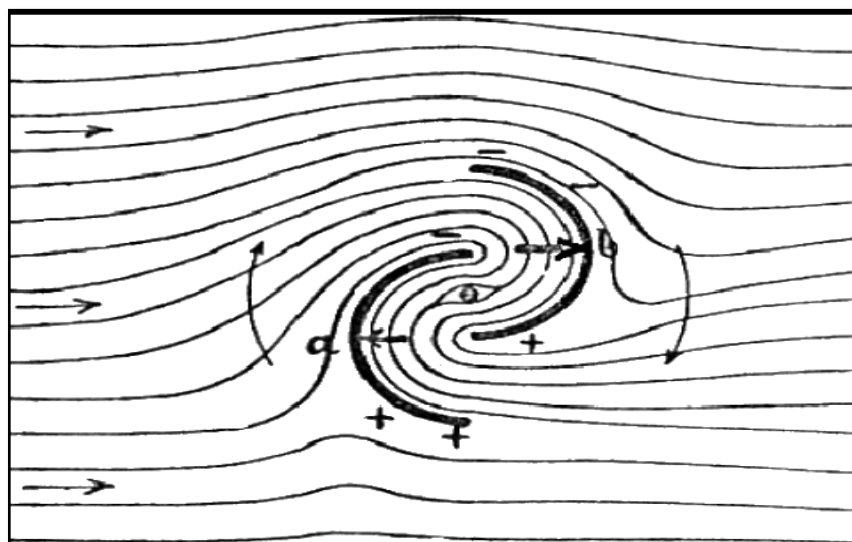
**Figura 66 - Vista lateral e vista de cima do rotor de Savonius**



Fonte: Adaptado de Ôlo (2012)

O rotor é o componente da turbina eólica do tipo Savonius que gira com a passagem dos ventos, a Figura 66 apresenta o esboço de fluxo em um rotor Savonius.

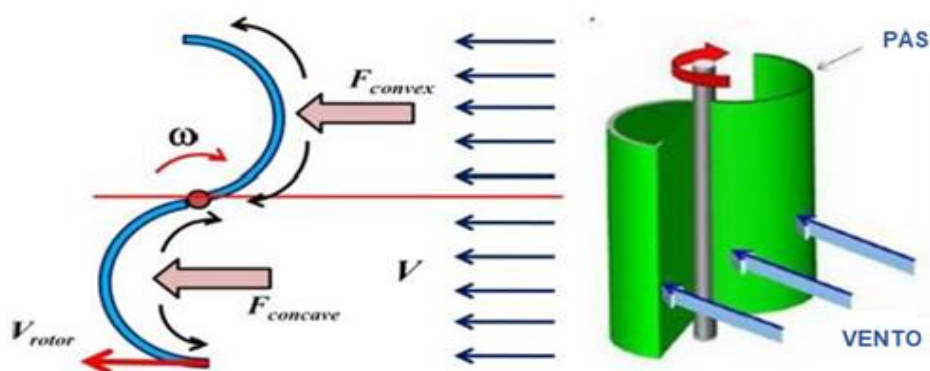
Figura 67 - Esboço de Fluxo em um rotor Savonius



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Sigurd\\_Johannes\\_Savonius](https://pt.wikipedia.org/wiki/Sigurd_Johannes_Savonius)

A Turbina Savonius utiliza a força de arrasto para empurrar as pás curvas e gerar um binário que vai provocar o giro do rotor. Logo, o seu princípio de funcionamento é extremamente simples, pois a turbina gira devido à diferença da força de arrasto que atua sobre as partes côncavas e convexas de suas pás, este princípio está ilustrado na Figura abaixo.

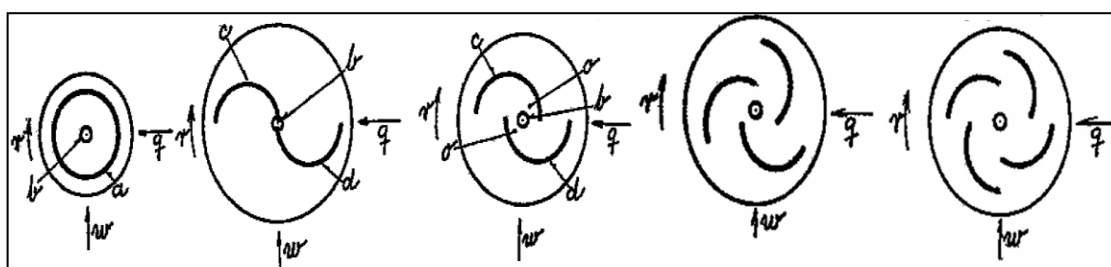
Figura 68 - Princípio de funcionamento de um rotor Savonius



Fonte: Adaptado de M.H. Ali (2013).

O ar fica preso na parte côncava e empurra a turbina. O caudal que atinge a parte convexa produz um arrastamento inferior ao da parte côncava, logo é este diferencial da força de arrasto que faz a turbina girar. Este fato diminui a eficiência da turbina, uma vez que parte da energia do vento é utilizada para empurrar a parte convexa, sendo assim desperdiçada. Savonius construiu algumas variantes dos rotores (Figura 69).

Figura 69 - Variantes dos rotores Savonius

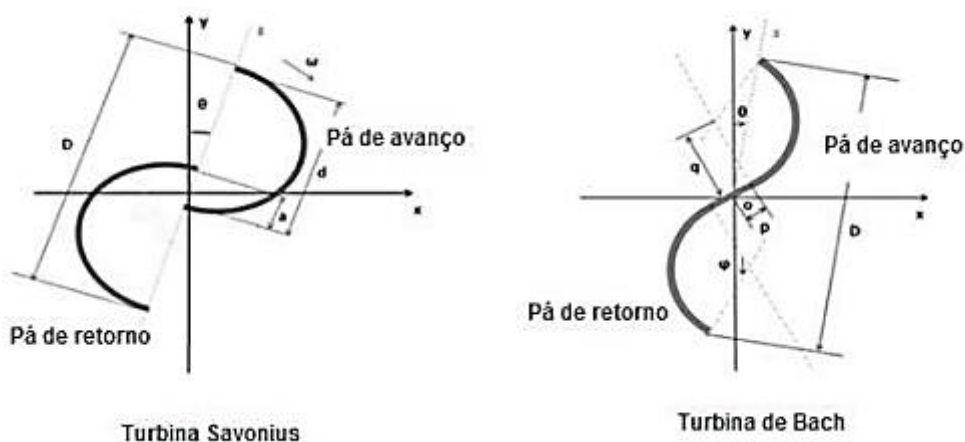


Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Sigurd\\_Johannes\\_Savonius](https://pt.wikipedia.org/wiki/Sigurd_Johannes_Savonius)

Aerodinamicamente, a turbina eólica Savonius é mais de conceber e construir, o que reduz de forma drástica seu custo de fabricação em relação às outras turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) e às turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH). Assim, as suas principais características são o fato de apresentarem um desenho simples e, por consequência, têm um baixo custo de fabricação e a sua independência em relação à direção do vento por não dependerem de nenhum tipo de mecanismo. Logo, são de grande utilidade para aproveitamento em pequenas escalas, como, por exemplo, em regiões urbanas. Essas características motivam novos estudos sobre inovações para um aumento do seu desempenho e também novas formas.

Segundo Lima (2009), o rotor é o componente do sistema eólico responsável por captar a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica de rotação, logo é o componente mais característico de um sistema eólico. Por este motivo, a configuração do rotor influenciará diretamente no rendimento global do sistema. Para este trabalho, o desenvolvimento do produto educacional foi realizado a partir da turbina eólica de pequeno porte, cujo modelo é uma variação turbina eólica Savonius, conhecida como turbina Bach. A Figura 75 ilustra a turbina Savonius e a Turbina Bach.

Figura 70 - Turbina Savonius e Turbina Bach



Fonte: Estanqueiro e Simões (2010)

O rotor eólico do tipo Savonius se configura como sendo uma alternativa viável para descentralização da produção de energia elétrica. O funcionamento do rotor Savonius ocorre com o giro de suas pás côncava e convexa que estão posicionadas formando a letra “S” em um eixo vertical, onde sua rotação ocorre principalmente devido à força de arrasto proporcionada pelo vento sobre suas pás. Entretanto a diferença entre estas pás torna o sistema Savonius pouco eficiente, provocando o desenvolvimento de alto torque e baixas velocidades angulares, por isso este tipo de rotor é comumente utilizado para estações de bombeamento e como força motriz. Segundo estudiosos do tema, a realização de alterações nesta turbina, como por exemplo, um aumento na sua razão de aspecto pode ser feita, o que irá proporcionar rotações mais altas e aumento da geração de energia elétrica.

Nesse sentido, nas turbinas de configuração tipicamente de eixo vertical, a coleta da energia eólica a ser aproveitada é feita através da força de arrasto. No grupo de TEEV onde a coleta de energia é baseada na força de sustentação, a turbina eólica não é capaz de partir do repouso; ela só pode produzir potência utilizável acima de certa velocidade angular mínima. Dessa forma, ela pode ser combinada com uma turbina autônoma, como um rotor Savonius, de modo a prover o torque de partida.

#### 4.16. CARACTERIZAÇÃO DA TURBINA EÓLICA SAVONIUS

A turbina eólica Savonius é caracterizada pela área varrida  $S$ . Esta área tem forte influência sobre a produção de energia da turbina, pois quanto maior for mais energia a turbina recolhe. Segundo M.H. Ali, 2013, a área varrida pela turbina eólica Savonius é definida pela equação a seguir:

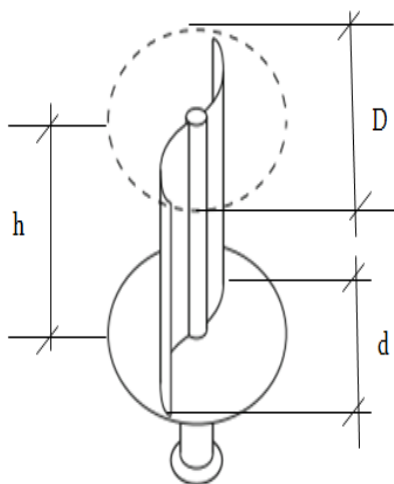
$$S = d * h \quad (4.7)$$

Onde,

$h$  = Altura da turbina;

$d$  = Diâmetro do rotor

**Figura 71 - Rotor Savonius duas pás.**



Fonte: Adaptado [https://www.researchgate.net/figure/Savonius-Rotor-Savonius-1981-Extracted-from-Introduction-to-Wind-Turbine\\_fig2\\_346396991](https://www.researchgate.net/figure/Savonius-Rotor-Savonius-1981-Extracted-from-Introduction-to-Wind-Turbine_fig2_346396991)

A proposta para o desenvolvimento do produto educacional consiste em um protótipo de uma turbina eólica vertical modelo rotor Savonius simples com geometria tipo Bach simples, com um estágio, constituída de quatro conchas (pás), dimensionada com os parâmetros descritos a seguir.

- I.  $h$  = altura do rotor = 650 mm
- II.  $d$  = diâmetro do disco superior = 270 mm
- III.  $D$  = Diâmetro do disco superior = 340 mm
- IV. Quatro pás

**Figura 72 - Produto Educacional**

Fonte: próprios Autores

Como já descrito em parágrafo anterior, a fabricação deste tipo de turbina é mais econômica do que os outros modelos de TEEV, isso ocorre devido ao fato do desenho do rotor Savonius ser relativamente simples. Além disso, é considerado aerodinamicamente um dispositivo do tipo arrasto constituído por duas ou três conchas. Ao observar a Figura 71, nota-se que o design de suas pás parece duas conchas formando um “S” na seção transversal. Devido a essa curvatura, essas conchas sofrem menos arrasto quando se movem contra o vento do que quando se movem com o vento. O arrasto diferencial faz com que a turbina Savonius gire, por serem dispositivos do tipo arrasto, este tipo de turbinas extrai muito menos energia do vento do que outras turbinas de eixo vertical de tamanho semelhante. Grande parte da área varrida de um rotor Savonius pode estar perto do solo, se tiver uma pequena montagem sem um poste estendido, tornando a extração geral de energia menos eficaz devido às velocidades mais baixas do vento encontradas em alturas mais baixas. Por este fato a turbina Savonius é pouco atrativa para a produção de eletricidade.

Dessa forma, o rotor vertical do tipo de Savonius não pode competir em termos de eficiência com as turbinas de eixo horizontal e nem com o rotor vertical do tipo Darrieus<sup>8</sup>, por exemplo.

---

<sup>8</sup> A turbina eólica Darrieus é um tipo de turbina eólica de eixo vertical (TEEV) usada para gerar eletricidade a partir da energia eólica. A turbina consiste em um número de lâminas de aerofólio curvadas montadas em um eixo ou estrutura rotativa. A curvatura das lâminas permi-

Porém, as turbinas Savonius possuem vantagens que as tornam mais interessante para uso em projetos de pequena geração, sendo elas:

- a) Seus componentes estão sobre o solo, o que significa que não precisa de molduras;
- b) Seu funcionamento não depende da direção do vento;
- c) Opera em baixas velocidades de vento;
- d) Sua construção é mais barata e menos complexa do que de outro tipo de aerogerador.

Segundo Melo (2012), as turbinas de arraste são aquelas onde o vento incide nas pás, empurrando-as e fazendo o rotor girar, nelas a velocidade das pás não pode ser superior à velocidade do vento, por isso, geralmente utilizam-se diversas pás de forma a maximizar a área de superfície a ser “arrastada” pelo vento.

Nesse sentido, o rotor Savonius é movido principalmente pela *força de arraste do ar*, os esforços exercidos pelo vento em cada uma das faces das pás são de intensidades diferentes, resultando um binário responsável pelo movimento rotativo do conjunto.

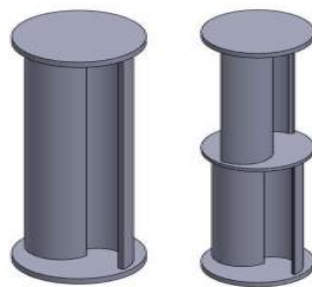
Segundo Akwa (2010), o funcionamento do rotor Savonius depende principalmente da posição angular da pá, além da velocidade de rotação. Para ele, além desses existem outros parâmetros que são fundamentais para um melhor desempenho, como por exemplo, o número de Reynolds, a geometria do rotor que inclui o formato das pás, a sobreposição e o afastamento; além da quantidade de pás e de estágios. Para Akwa (2010), devido a este número de fatores, para cada forma de arranjo do rotor Savonius, diferentes desempenhos, vantagens e desvantagens são apresentados e acabam se tornando objetos de estudos.

Para Kothe (2016), o número de estágios significa o uso de diversos rotores como se fosse uma ligação em série (Figura 73), cuja variação é muito estudada na literatura, sendo que muitos autores realizaram estudos comparativo, usando, normalmente, rotores de um, dois e até três estágios através de parâmetros como coeficiente de potência e de torque.

---

te que a lâmina seja tensionada apenas em alta velocidade de rotação. Existem várias turbinas eólicas intimamente relacionadas que usam pás retas. Este projeto da turbina foi patentado por Georges Jean Marie Darrieus, um engenheiro aeronáutico francês; o depósito da patente foi em 1º de outubro de 1926. Existem grandes dificuldades em proteger a turbina Darrieus de condições extremas de vento e torná-la auto-inicializada.

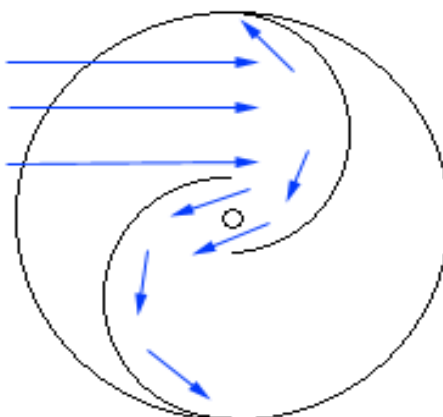
**Figura 73 - Turbinas com um (esquerda) e dois (direita) estágios**



Fonte: Kothe, 2016, pág. 13.

Neste tipo de modelo (Figura 74), os ventos incidem nas faces do corpo que é oco em intensidades diferentes, resultando em um movimento rotativo, conforme ilustrado na figura abaixo.

**Figura 74 - Comportamento do vento nas pás de uma Turbina Savonius**



Fonte: Turbinas eólicas do eixo vertical Disponível em <http://uwm.edu.pl>. Acesso em 27/06/2022.

Para o estudo em questão, o comportamento do vento nas pás da turbina Savonius se comporta como correntes de jato.

#### 4.17. PARÂMETROS FÍSICOS DAS TURBINAS EÓLICAS

Nesta seção abordaremos os parâmetros físicos envolvidos na produção de energia elétrica a partir de turbinas eólicas. A potência gerada em uma turbina eólica é proveniente do escoamento de ar nas suas pás. Sendo assim, é possível determinar valores de energia associados às características do escoamento e utilizar esses valores na avaliação do desempenho da turbina. Esse método foi desenvolvido pelo físico alemão Albert Betz (1946 apud HAU, 2006), tendo sido denominado de *Teoria da Quantidade de Movimento*

*Elementar.* Esta teoria estabelece uma relação entre a energia aproveitada pela turbina e a energia cinética total do movimento do fluido.

#### 4.17.1 Energia e Potência Extraída do Vento

Em Física, a energia cinética em um objeto é a forma de energia relacionada aos corpos em movimento. Isto é definido como o trabalho necessário para acelerar um corpo de massa em repouso para que este adquira velocidade. A energia cinética é uma grandeza física escalar diretamente proporcional à massa do corpo (Kg) e ao quadrado da velocidade do corpo (m/s), cuja unidade de medida, de acordo com as unidades do SI, é o joule.

Para a turbina Savonius, a energia eólica é atacada na região das pás com a massa do fluxo de ar com a energia cinética. A energia eólica é definida como a multiplicação dessa massa do fluxo de ar e energia cinética por unidade de massa. Logo, a equação que representa a energia cinética  $E$  do vento para uma dada massa de ar  $m$  se deslocando com uma velocidade  $v$ , pode ser expressa segundo a Eq.(4.8):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.8)$$

Onde,

$v$  = Velocidade do vento

$m$  = Massa do fluxo de ar

Para CARDOSO et al, 2015, a energia eólica é basicamente a energia cinética contida no movimento da massa do fluxo de ar. A potência é igual ao trabalho dividido pela variação de tempo, expressa pela Eq.(4.9):

$$P = \frac{W}{\Delta t} \quad (4.9)$$

Dessa forma, a energia cinética é representada pelo trabalho realizado pelo movimento da massa de ar (vento), o que resulta na Eq.(4.10):

$$W = E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (4.10)$$

Para associar potência ao trabalho, vamos substituir a Eq.(4.8) na Eq.(4.10), dessa forma o resultado será a Eq.(4.11):

$$P = E_c = \frac{mv^2}{2} \frac{1}{\Delta t} \quad (4.11)$$

A partir desse cálculo, vamos obter a equação associada à potência de uma turbina eólica, representada pela Eq.(4.12):

$$P = \frac{mv^2}{2\Delta t} \quad (4.12)$$

Analisando as equações Eq.(4.11) e Eq.(4.12), é possível observar que existe uma razão entre a massa do fluxo de ar com a variação do tempo. Essa razão pode ser expressa pelo símbolo  $\dot{m}$  que é a vazão da massa de ar, ou simplesmente vazão mássica. O resultado obtido está representado na Eq.(4.13):

$$P = \frac{mv^2}{2\Delta t} = \frac{m}{\Delta t} \frac{v^2}{2} = \frac{\dot{m} v^2}{2} \quad (4.13)$$

O termo  $\dot{m}$ , cuja unidade de medida é kg/s (unidades SI), representa o fluxo de massa de ar que passa perpendicularmente por uma seção transversal de área  $S$  (Figura 75). Portanto, a Eq.(4.14) indica o cálculo da vazão mássica de ar  $\dot{m}$ , em função da densidade do fluido  $\rho$ , velocidade do escoamento  $v$  e área transversal  $S$ . Logo, o fluxo de massa de ar é expresso por:

$$\dot{m} = Q = \rho v S \quad (4.14)$$

Onde:

$\rho$  = densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>]; aproximadamente 1,29 kg/m<sup>3</sup>.

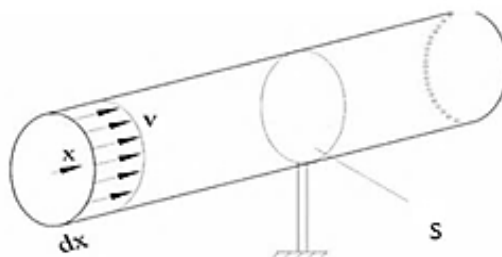
$S$  = área do rotor da turbina perpendicular à direção do vento [m<sup>2</sup>].

$v$  = velocidade do vento [m/s].

Nesse sentido, a Eq.(4.14) ilustra a vazão do vento ao passar por uma turbina, e, portanto, ajuda a compreender como o vento se comporta ao passar por um rotor. O modelo

de tubo utilizado para estudo do fluxo de ar foi apresentado por Betz, assim, o fluxo de ar através de uma seção transversal  $S$  está representado pela Figura 75.

**Figura 75 - Fluxo de ar através de uma seção transversal**



Fonte: Adaptado CRESESB, 2022.

Disponível em:

[http://http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=221](http://http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=221)

De acordo com o CRESESB, se considerarmos o mesmo fluxo de ar  $\dot{m}$  em movimento, a uma velocidade  $v$  perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário (Figura 75), podemos demonstrar a potência disponível no vento que passa pela seção  $S$ , transversal ao fluxo de ar. Dessa forma, vamos substituir a vazão mássica (Eq. 4.14) na potência de uma turbina eólica (Eq. 4.13). Assim, temos o seguinte:

$$P = \frac{1}{2} \rho S v v^2$$

Logo,

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 \tag{4.15}$$

Onde:

$P$  = potência do vento [W]

$\rho$  = massa específica do ar [ $kg/m^3$ ]

$S$  = área da seção transversal [ $m^2$ ]

$v$  = velocidade do vento [ $m/s$ ]

Neste caso,  $S$  representa a área varrida pelas pás da turbina Savonius, logo, de acordo com a Eq.(6.9):

$$S = d * h \quad (4.16)$$

Portanto,

$$P = \frac{1}{2} \rho d h v^3 \quad (\text{Watt}) \quad (4.17)$$

A potência eólica aumenta conforme a função do cubo da velocidade do vento, essa potência não é totalmente observada a partir do coeficiente de potência para calcular a potência da turbina. Pela teoria de Betz o coeficiente máximo de potência é 0,59 e para a turbina Savonius é máximo 0,18.

#### 4.18 LEI DE BETZ

Em 1919, o físico alemão Albert Betz publicou a lei que determina que a fração máxima de energia que pode ser aproveitada em uma turbina eólica é de 16/27 (59,3%). Ou seja, mesmo que o sistema eletromecânico fosse ideal, ainda assim seria possível extrair no máximo cerca de 40% da energia cinética dos ventos; essa lei ficou conhecida como **Lei de Betz**. Na forma matemática a equação é representada da seguinte forma:

$$E = \frac{16}{27} \frac{\rho S v^3}{2} \quad (4.18)$$

Sendo:

$\rho$ : densidade da massa do ar que entra na turbina

$S$ : área varrida pela turbina

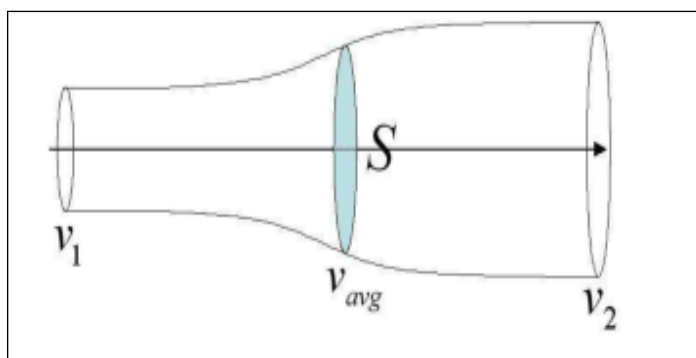
$v$ : velocidade do vento que chega à turbina

A transformação de energia cinética dos ventos em energia elétrica gerada não ocorre de forma integral. Há perdas de energia nas seguintes categorias: mecânicas (relacionadas às questões aerodinâmicas) e eletromecânicas (relacionadas às transformações que ocorrem na turbina geradora). Porém ela possui vários benefícios ao homem, assim como ao meio ambiente, benefícios que serão citados no item “**Sequência Didática**” deste trabalho.

#### 4.19. PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A geração de energia elétrica no gerador está diretamente relacionada à transformação da energia cinética contida nos ventos, logo a potência máxima que pode ser extraída do vento é aquela na qual a velocidade de saída do rotor é nula. Todavia, caso isto ocorra, haverá um acúmulo de ar na saída do rotor, o que irá interromper o fluxo de ar e, conseqüentemente, a geração de energia elétrica, entretanto, Betz provou fisicamente que para alcançar a máxima potência teórica possível, é necessário que a velocidade na saída do rotor seja exatamente igual a um terço (1/3) da velocidade na entrada do rotor, ou seja, dois terços (2/3) da energia cinética contida na massa de ar que atravessa este rotor seria “capturada” e convertida em energia elétrica.

**Figura 76 - Tubo de Betz.**



Fonte: Melo (2012)

Onde,

$V_1$  = velocidade do vento na entrada do rotor (m/s)

$V_{avg}$  = velocidade ao passar pelo rotor (m/s)

$V_2$  = velocidade do vento na saída do rotor (m/s)

Depois dessa análise, conclui-se que a potência contida no vento que atravessa a seção transversal de área  $S$  é dada pela equação (4.19):

$$P = \frac{\rho v S v^2}{2} = \frac{\rho v^3 S}{2} \quad (4.19)$$

De acordo com Betz, a energia recuperável do vento está associada à energia cinética ao atravessar o rotor da turbina. Neste sentido, a Eq.(4.19) mostra que a potência contida no vento varia com o cubo da velocidade do vento, com a massa específica do ar e com a área  $S$

varrida pelas pás da turbina usada no ensaio, sendo cortada pelo fluxo de massa de ar (vento). Logo, a energia gerada pelas turbinas é muito sensível à velocidade do vento que passa pelas pás do aerogerador ( $v^3$ ). Há ainda uma alta sensibilidade com relação ao diâmetro do rotor, dessa forma, a energia gerada pelas turbinas é muito sensível à velocidade do vento que passa pelas pás do aerogerador ( $v^3$ ), porém há ainda uma alta sensibilidade com relação ao diâmetro do rotor, como mostrado na Equação a seguir:

$$A = \pi \frac{d^2}{4} \quad (4.20)$$

Onde,

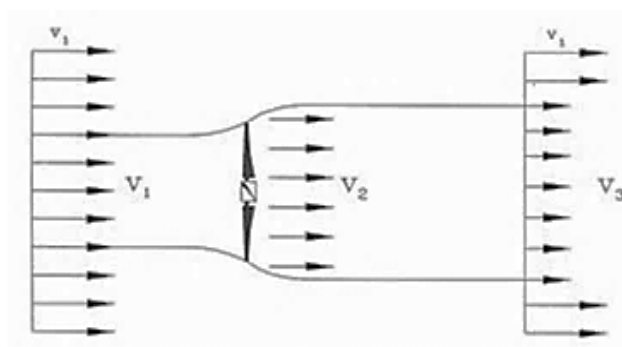
$A$  = área da seção transversal cortada pelo fluxo de ar ( $m^2$ ) proposto pelo modelo de Betz em sua teoria;

$\pi$  = constante que equivale ao valor de 3,14...;

$d$  = diâmetro do rotor.

Outro parâmetro muito importante na análise da turbina eólica é o Coeficiente de Potência ( $C_p$ ), denominado medida de eficiência para uma turbina eólica. Para o físico alemão Albert Betz, responsável por investigar o funcionamento e a potência de um rotor ideal, baseando-se na quantidade de movimento axial, existe um limite para o aproveitamento eólico em turbinas.

**Figura 77 - Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás**



Fonte: CRESESB, 2022

Disponível em:

([http://http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=221](http://http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=221))

Acessado em 01/09/2022

Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento ( $C_p$  máximo), Betz considerou um conjunto de pás em um tubo onde  $v_1$  representa a velocidade do vento na região anterior às pás,  $v_2$  a velocidade do vento no nível das pás e  $v_3$  a velocidade no vento após deixar as pás, conforme apresentado na Figura 77.

#### 4.20. APROVEITAMENTO TEÓRICO

Os melhores registros teóricos de aproveitamento eólico chegam a 59% (referente ao valor de  $C_p = 0,59$ ). Este valor sugere que um rotor ideal seja feito para funcionar de tal forma que a velocidade do vento no rotor é de  $2/3$  da velocidade do vento, considerada em seu livre percurso, onde  $8/9$  da energia cinética contida neste fluxo de ar é perdido. Dentre os efeitos que causam uma diminuição do coeficiente de potência pode-se apontar a rotação das pás a jusante do rotor, o número de pás associado à perda na ponta das mesmas, e forças de resistência aerodinâmica.

#### 4.21. COEFICIENTE DE POTÊNCIA

Para PAULA, 2016, extrair toda a energia disponível no vento significaria dizer que toda a energia cinética do vento foi aproveitada e consequentemente a velocidade do vento na saída do rotor seria nula. Nessa situação, o rotor estaria funcionando como uma barreira, interrompendo o fluxo do vento, provocando uma potência nula. Da mesma forma, se nenhuma energia for extraída do vento, ou seja, se a velocidade na entrada do rotor for igual à velocidade de saída a potência também será nula. Percebe-se então que há um limite de extração de energia cinética do vento.

O coeficiente de potência mede a energia que pode ser produzida em uma turbina desprezando-se qualquer perda, em relação à energia total contida no vento que a atravessa. Para turbinas eólicas de eixo vertical, o coeficiente aerodinâmico  $C_p$  está relacionado com a potência extraída do vento pela turbina  $P_E$  com a potência contida no vento  $P_V$ , obtendo a Equação a seguir:

$$C_p = \frac{P_v}{P_E} \quad (4.21)$$

A energia cinética contida no vento não pode ser inteiramente capturada pela turbina, uma vez que o ar que passa pelo rotor da turbina tem que ser extravasado, como consequência, o  $C_p$  é adicionado ao cálculo da potência.

$$P_E = C_p \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (4.22)$$

Onde,

$P_E$  = potência extraída do aerogerador;

$\rho$  = densidade do ar;

$S$  = área do rotor perpendicular à direção do vento;

$v$  = velocidade do vento aplicada;

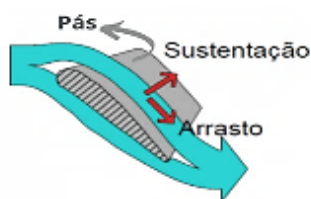
$C_p$  = coeficiente de potência.

A Equação (4.22) mostra que o  $C_p$  é um parâmetro relevante para a análise do potencial elétrico de uma turbina Savonius.

#### 4.22 FORÇAS AERODINÂMICAS

O princípio de funcionamento de uma turbina eólica é basicamente em função das forças de sustentação ( $F_s$ ) e arraste ( $F_a$ ), resultantes da interação das pás da turbina com o vento; sendo que a força de sustentação é perpendicular à superfície das pás.

**Figura 78 - Forças atuantes nas pás do aerogerador**



Fonte: Energês

Disponível em: <<https://energes.com.br/energia-eolica/tudo-que-voce-precisa-saber-sobre-as-pas-dos-aerogeradores>> - acesso em 15/09/2021)

As turbinas de sustentação utilizam características que se assemelham às asas dos aviões, onde o lado mais longo da superfície da pá é atravessado mais rápido pelo vento. Logo, a diferença de pressão entre as duas superfícies resulta em uma força de sustentação. De outra forma, nas turbinas movidas pela força de arraste, o vento empurra as pás forçando o

rotor a girar. A eficiência deste tipo de turbina é limitada, pois a velocidade das pás não pode ser maior que a velocidade do vento. Segundo Cardoso et al (2015), o funcionamento da turbina de Savonius resulta das diferenças da força de arrasto entre as faces côncavas e convexas dos semicilindros, que originam em um momento de força, que por fim faz girar o rotor, daí a potência é extraída pela turbina. Nas turbinas de arrasto o vento empurra as pás forçando o rotor a girar. Nestas turbinas, a velocidade das pás não pode ser maior que a velocidade do vento, o que limita sua eficiência. A análise das turbinas eólicas do tipo de Savonius é complexa porque envolve a análise da aerodinâmica e da mecânica dos fluidos. Dessa forma, a energia contida no vento é basicamente sua energia cinética, uma vez que não há variação de pressão nem variação de altitude.

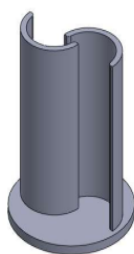
#### 4.23. PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DA TURBINA SAVONIUS

Existem diversos fatores essenciais a serem considerados para um bom funcionamento de uma Turbina Eólica do Tipo Savonius, logo, vale ressaltar que esta turbina é caracterizada pela área varrida  $S$ , sendo que esta área influencia a produção de energia da turbina, e quanto maior for, mais energia a turbina recolhe.

##### 4.23.1. Placas de Extremidades

Placas de extremidades são placas ou discos, colocados na parte inferior e superior da turbina. Segundo Oliveira, 2014, o objetivo dessas placas é evitar a fuga de ar na parte côncava das pás para o escoamento secundário. A Figura 79 apresenta detalhes de um rotor Savonius com duas pás e placa de extremidade.

**Figura 79 - Placas de extremidades - detalhes**

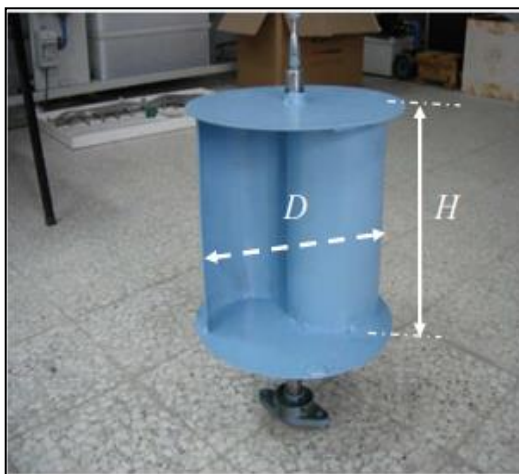


Fonte: Kothe, 2016, Figura 2.3.

As dimensões, diâmetro ( $D$ ) e altura ( $h$ ), ideais de um rotor Savonius seguem a relação estabelecida na Eq.(4.23), ao qual chamamos de “*razão de aspecto*”.

$$\frac{H}{D} = 1 \quad (4.23)$$

Figura 80 - Relação H/D no rotor Savonius



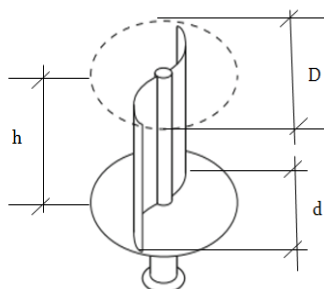
Fonte: Turbinas Eólicas de Eixo Vertical, PUC-RS

Disponível em:

[https://app.eventize.com.br/upload/000388/files/3\\_%20TURBINAS%20EOLICAS%20DE%20EIXO%20VERTICAL.pdf](https://app.eventize.com.br/upload/000388/files/3_%20TURBINAS%20EOLICAS%20DE%20EIXO%20VERTICAL.pdf)

Da Figura 71, apresentada anteriormente, tem-se que o diâmetro da base é 10% maior que o diâmetro do rotor.

Figura 81 - Rotor Savonius duas pás



Fonte: Adaptado.

Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Savonius-Rotor-Savonius-1981-Extracted-from-Introduction-to-Wind-Turbine\\_fig2\\_346396991](https://www.researchgate.net/figure/Savonius-Rotor-Savonius-1981-Extracted-from-Introduction-to-Wind-Turbine_fig2_346396991)

Onde,

$d$  = diâmetro do rotor;

$D$  = diâmetro do prato;

$h$  = altura do rotor.

O rotor de Savonius é um dispositivo que funciona principalmente pela ação da força de arrasto ( $F_a$ ):

$$F_a = \frac{C_a}{0,5\rho v^2 A} \quad (4.24)$$

Onde,

$C_a$  = coeficiente de arrasto;

$\rho$  = densidade do ar;

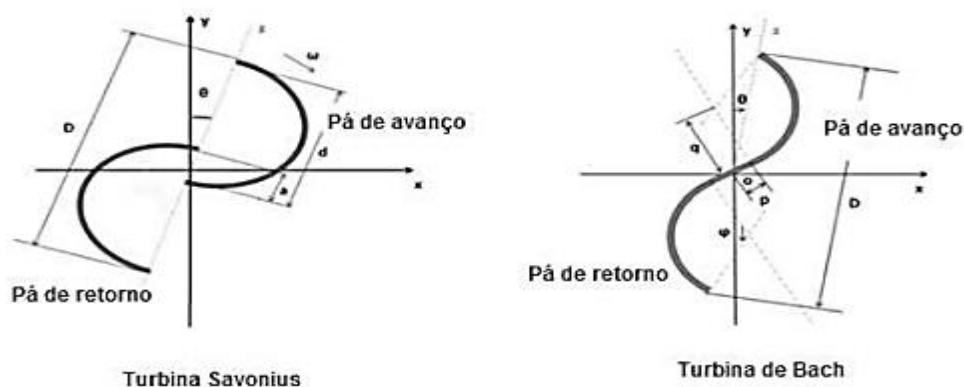
$v$  = velocidade do ar;

$A$  = área varrida pelo rotor.

#### 4.24. VARIANTES DO ROTOR SAVONIUS

Segundo IMAMURA, JUNIOR (2017), uma das principais variantes do rotor Savonius é o de Bach, o qual difere de Savonius por possuir as pás fabricadas em uma única peça. Conforme ilustrado pela Figura 70, apresentada anteriormente, o modelo da Turbina Savonius apresenta uma região de superposição das pás, por onde o fluxo de ar pode escoar, enquanto que no modelo tipo Bach não há espaçamento central.

Figura 70 - Turbina Savonius e Turbina Bach



Fonte: Estanqueiro e Simões (2010)

## **5 APLICAÇÃO DO RECURSO DIDÁTICO**

### **5.1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo será apresentado o relatório de aplicação do recurso didático, elaborado na forma de uma Sequência Didática (SD). Assim, a SD desenvolvida aborda o tema energia eólica, estabelecendo a relação do seu conteúdo com o fenômeno da indução eletromagnética na disciplina de Física. Para tanto foi utilizada a Teoria de Aprendizagem significativa de David Ausubel. A escolha de uma SD teve como base o fato dela possibilitar aos alunos atrelar o conteúdo estudado com os conteúdos vistos anteriormente, fazendo com que estes possam relacionar algo novo, a um conhecimento já adquirido previamente. A sequência desenvolvida neste estudo é parte integrante do produto educacional desenvolvido no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), na Universidade do Estado da Bahia (UNEB) em Salvador/BA (Polo 60). A experiência aqui relatada me permitiu o exercício da docência na realidade escolar de uma Escola da Rede Pública da cidade de Salvador, Bahia, para alunos do Curso Subsequente (PROSUB) de Técnico em Eletrotécnica do turno noturno, no Centro Estadual de Educação Profissional Luiz Pinto de Carvalho, localizado no Bairro de São Caetano, cidade de Salvador, Estado da Bahia,

### **5.2. OBJETIVOS**

A sequência didática aplicada teve como objetivo geral promover uma visão geral e introdutória que trata da energia eólica como fonte alternativa sustentável para a produção de energia elétrica. Os objetivos específicos foram: promover a educação científica com qualidade para a formação de um cidadão mais crítico, responsável e participativo na sociedade, através do desenvolvimento de atitudes e valores para a transformação da realidade, sobre o tema produção de energia elétrica a partir de uma fonte alternativa de energia; compreender o processo de produção de energia elétrica com vistas ao conteúdo do fenômeno da indução eletromagnética.

### **5.3. APLICAÇÃO DO RECURSO DIDÁTICO**

Quando pensamos em uma sequência didática temos em mente um conjunto de atividades planejadas para promover a aprendizagem de um determinado conteúdo, organizado de forma a verificar como estes se ajustam ao saber prévios dos alunos, como os educandos interagem com os mesmos e o que alcançam sobre os conteúdos

relacionados. A sequência didática desenvolvida no presente trabalho foi aplicada em duas turmas do Curso Subsequente (PROSUB) de Eletrotécnica, turno noturno com um total de 31 (trinta e um) alunos, no Centro Estadual de Educação Profissional Luiz Pinto de Carvalho, localizado no Bairro de São Caetano, cidade de Salvador, Estado da Bahia. A mesma foi dividida em 05 (cinco) aulas, cada uma com duração média de 50 (cinquenta) minutos.

**Figura 82 - Localização do Centro Estadual de Educação Profissional Luiz Pinto de Carvalho**



Fonte: Google Earth

**Tabela 4 - Coordenadas geográficas do Centro de Educação Profissional**

| Longitude (UTM) | Latitude (UTM) |
|-----------------|----------------|
| 556766.00 E     | 8570025.00 S   |

As aulas foram ministradas uma vez na semana, as terças-feiras no mês de outubro, no Laboratório de Tecnologia Elétrica do Centro Estadual de Educação Profissional Luiz Pinto de Carvalho com a participação efetiva da maioria dos alunos. Os encontros foram realizados em conjunto, com a participação de 20 (vinte) alunos da turma SUB ELETRO III e 11 (onze) alunos da Turma SUB ELETRO II. Toda a sequência didática foi feita de forma presencial, onde foram utilizados recursos computacionais, como slides do Microsoft PowerPoint

contemplando o conteúdo para a aula expositiva, experimentos, simulação computacional, além do uso de vídeos e mensagens rápidas pelo Whatsapp para dúvidas e esclarecimentos. Estes recursos facilitaram a interação com os alunos. A descrição da sequência será feita nos próximos tópicos com o detalhamento de cada atividade realizada com os alunos. Além de debates durante as aulas sobre o tema proposto, como também a representação gráfica das respostas das questões introdutórias.

**Figura 83 - Laboratório de Tecnologia Elétrica (local das aulas)**



Fonte: Acervo próprio

#### 5.4. DESCRIÇÃO DOS ENCONTROS

Para a aplicação do recurso didático, foi elaborada o Quadro 1 que descreve uma sugestão de sequência didática. As etapas apresentadas nesta sequência foram organizadas de maneira a contemplar os campos de experiências da Educação Profissional em conformidade com a nova BNCC.

Quadro 1 – Etapas da aplicação da Sequência Didática

| Etapa    | Campos de experiências                    | Atividade  |
|----------|---|--|
| 1ª etapa | Apresentação, avaliação e debates.        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Apresentação de vídeo: como funciona a energia eólica.</li> <li>▪ Avaliação diagnóstica.</li> <li>▪ Debates sobre o vídeo.</li> <li>▪</li> </ul>  |
| 2ª etapa | Lei de Faraday e experimento de Oersted   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aula expositiva: conceitos.</li> <li>▪ Problematização: “É possível gerar energia elétrica usando imãs?”.</li> </ul>  |
| 3ª etapa | Transformação, funcionamento e simulação. | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reconhecendo os tipos de turbinas eólicas e seu princípio de funcionamento.</li> <li>▪ Introduzindo o processo a transformação de energia eólica em elétrica.</li> <li>▪ Simulando a lei de Faraday no Phet.</li> </ul> |
| 4ª etapa | Experimentos e análise de dados.          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reconhecimento da indução eletromagnética com experimentos de imã e bobina e protótipo da turbina eólica.</li> <li>▪ Analisando dados de experimentos.</li> </ul>   |
| 5ª etapa | Conhecimentos desenvolvidos.              | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verificando conhecimentos desenvolvidos nos encontros.</li> <li>▪</li> </ul>  |

A simulação da rotação da turbina Savonius pode ser uma atividade interessante e motivadora para os alunos, pois pode ajudá-los a compreender o funcionamento da turbina e a relação entre a indução eletromagnética e a geração de energia elétrica. Pensando nisso, antes do início do primeiro encontro, o protótipo da turbina eólica foi colocado sobre a bancada do laboratório para simular o seu funcionamento com o uso de um ventilador, conforme ilustrado na Figura 88.

Ao entrarem na sala e se depararem com a turbina em funcionamento, os alunos, em geral, ficaram entusiasmados e impressionados, tentando entender do que se tratava, deixei este ponto em aberto para que na medida em que o conteúdo fosse desenvolvido ele pudesse ser esclarecido, porém fiquei atenta aos comentários para verificar se algum deles conseguia identificar o tipo de equipamento que estava em funcionamento.

Figura 84 - Simulação turbina eólica



Fonte: Acervo próprio

#### 5.4.1. Primeiro Encontro

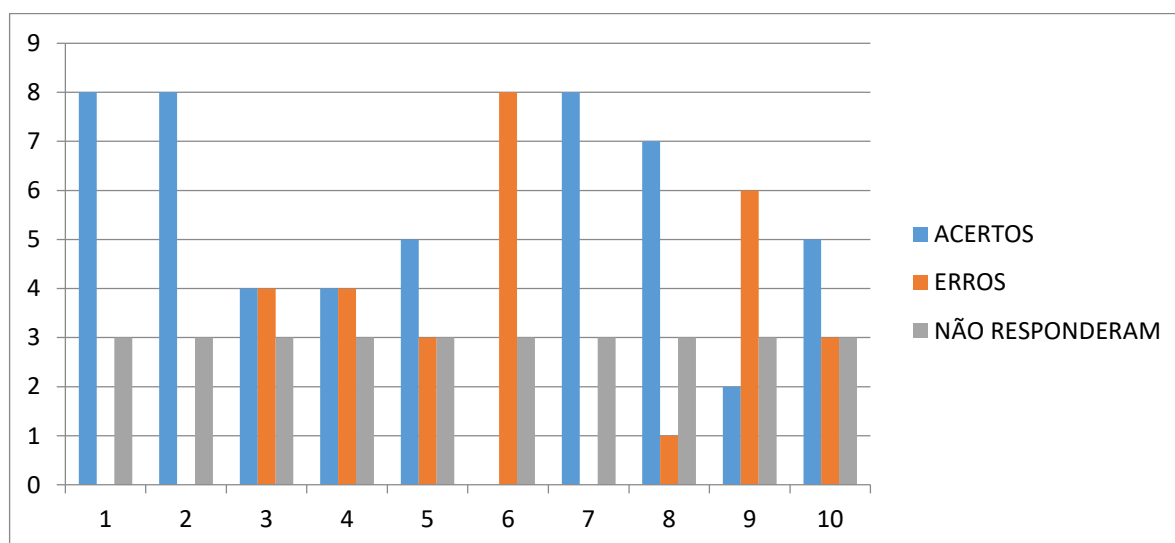
##### **Atividade 1 - Vídeo “Como funciona a energia eólica”**

Para a atividade 1, iniciamos a aula com um vídeo sobre energia eólica publicado no YouTube (AES Brasil, abril/2020), com o título “*Como funciona a energia eólica*”. Ao assistir o vídeo, em geral, o ponto anotado inicialmente foi esclarecido, pois os alunos conseguiram fazer a conexão do vídeo com o equipamento em funcionamento, perceberam que se tratava de o equipamento em sala de aula tinha relação com a energia eólica e o processo de energia elétrica, já que o vídeo mostrou imagens de um parque eólico com turbinas eólicas de eixo horizontal em funcionamento. Contudo, alguns questionamentos surgiram, principalmente pelo fato do design do protótipo ser diferente do das turbinas apresentadas no vídeo. Neste instante, pedi que guardassem os questionamentos para um momento posterior, pois iríamos realizar uma atividade para debater o vídeo e apresentar o equipamento.

### Levantamento de Conhecimentos Prévios

Um questionário de conhecimentos prévios contendo 10 (dez) questões objetivas de múltiplas escolhas foi o instrumento utilizado para avaliar os conhecimentos prévios dos alunos sobre o tema energia eólica e eletromagnetismo, sendo que o mesmo foi impresso e entregue aos alunos em sala de aula. Como alguns alunos chegaram atrasados, passei mais uma vez o vídeo sobre energia eólica enquanto a turma respondia ao questionário. Ao término do questionário, o mesmo foi recolhido, nesse momento observei que dos 11 (onze) alunos da turma SUB ELETRO II apenas 8 (oito) responderam ao questionário e dos 20 (vinte alunos) da turma SUB ELETRO III apenas 19 (dezenove) responderam ao questionário. A correção do questionário foi realizada após o encerramento de todas as atividades da SD, para tanto foi construído um gráfico com o resultado da avaliação, dessa forma podemos ter uma noção do que os alunos sabiam sobre o tema proposto.

**Gráfico 5 - Respostas do Questionário - SUB ELETRO II**

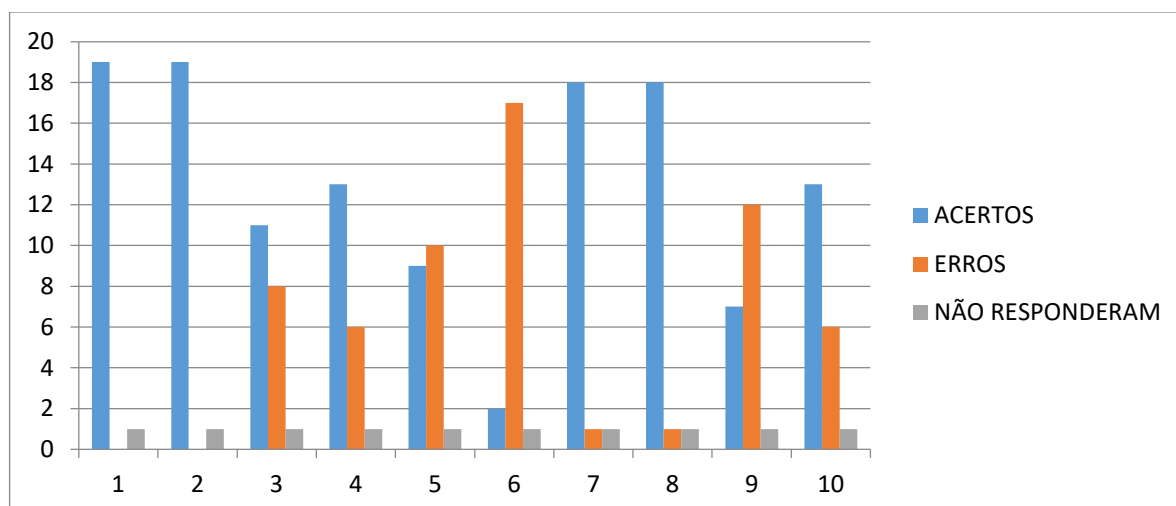


Fonte: Acervo próprio

As questões de números 1, 2, 7 e 8 tinham o objetivo de analisar o que os alunos traziam de conhecimento a respeito do tema de energia eólica, fundamentalmente a partir dessas respostas poderíamos ter uma noção do que os alunos sabiam ou não sobre esse tema. Na análise do gráfico é possível observar que dos 11 (onze), 8 (oito) acertaram as questões 1, 2 e 7; e 7 (sete) acertaram a questão 8, contabilizando apenas 1 (um) erro, além de 03 (três) que não responderam ao questionário. Em função de o vídeo ter sido passado antes da aplicação do questionário, percebe-se isso contribuiu fortemente para o resultado, aliado ao

fato dos alunos já terem tido contato com o tema energia eólica a partir da televisão, internet. Analisando, agora, as questões de números 3, 4, 5, 6, 9 e 10 relativas ao conteúdo de eletromagnetismo, é possível aferir que índice de acertos turma SUB ELETRO II está abaixo de 50%.

**Gráfico 6 - Respostas do Questionário - SUB ELETRO III**



Fonte: Acervo próprio

As questões de números 1, 2, 7 e 8 tinham o objetivo de analisar o que os alunos traziam de conhecimento a respeito do tema de energia eólica, fundamentalmente a partir dessas respostas poderíamos ter uma noção do que os alunos sabiam ou não sobre esse tema. Na análise do gráfico é possível observar que dos 19 (dezenove), 19 (dezenove) acertaram as questões 1 e 2; e 18 (dezoito) acertaram as questões 7 e 8, contabilizando apenas 2 (dois) erro, além de 01 (um) que não respondeu ao questionário. Em função de o vídeo ter sido passado antes da aplicação do questionário, percebe-se isso contribuiu fortemente para o resultado, aliado ao fato dos alunos já terem tido contato com o tema energia eólica a partir da televisão, internet. Analisando, agora, as questões de números 3, 4, 5, 6, 9 e 10 relativas ao conteúdo de eletromagnetismo, é possível aferir que índice de acertos da turma SUB ELETRO III também está abaixo de 50%.

As questões de eletromagnetismo utilizadas no questionário foram de baixa complexidade, focadas na Lei de Faraday, logo nota-se a necessidade de revisão dos conceitos pertinentes a este conteúdo. Desta forma podemos dizer que a atividade permitiu uma visão geral do que os alunos sabem sobre energia eólica e eletromagnetismo; em resumo, a maioria já tem conhecimento sobre a energia eólica como uma fonte de energia que provém dos ventos e

que pode se transformar em outras formas de energia como a energia elétrica. Contudo, ainda não conseguem fazer a conexão com conceitos da física, em particular a indução eletromagnética, mostrando deficiência neste conteúdo.

**Figura 85 - Levantamento de conhecimentos prévios**



Fonte: Acervo próprio

### **Atividade 2 - Resolução comentada das questões introdutórias**

Após a passagem do vídeo “Como funciona a energia eólica”, iniciamos a atividade 2 com a resolução comentada das questões introdutórias de forma aberta, solicitando aos alunos que explicassem a escolha das suas respostas. À medida que os alunos iam entregando a atividade, eu já analisava rapidamente, assim percebi que para o tema energia eólica o índice de acertos tinha sido alto. O aluno **A** iniciou a resolução comentada das questões, falando que desconhecia o termo “**aerogerador**”, mas o texto da segunda questão fazia referência à turbina eólica colocando a palavra “aerogerador” entre parênteses, então ele conseguiu responder corretamente, já que a alternativa correta é a letra “a”, este mesmo fato se aplica aos outros alunos que responderam. O aluno **B** que errou a questão 8 comentou que se confundiu por causa do termo “moinhos”, foi explicado sobre a evolução da energia eólica, pois os moinhos de ventos eram utilizados em larga escala e ainda são utilizados em muitos países com a Holanda.

O aluno C comentou sobre a questão 3, que traz a movimentação do ímã em direção a um anel. Para esclarecer, expliquei que a força de repulsão entre um ímã e um anel ocorre porque os dois objetos possuem polos magnéticos de mesmo sinal. Os polos magnéticos de um ímã são chamados de polo norte e polo sul. Os polos magnéticos de mesmo sinal se repelem, enquanto os polos magnéticos de sinais contrários se atraem. Como este é o tema central da SD, continuei a explicação falando que no caso de um ímã passando por um anel, o ímã irá gerar um campo magnético ao seu redor.

Esse campo magnético irá interagir com o campo magnético do anel. Se o anel for feito de um material ferromagnético, como o ferro ou o níquel, ele irá magnetizar-se e irá adquirir um polo magnético de mesmo sinal que o do ímã. Assim, quando o ímã passa pelo anel, os polos magnéticos de mesmo sinal do ímã e do anel irão se repelir. Essa força de repulsão irá fazer com que o anel se afaste do ímã.

No caso da força de atração entre um ímã e um anel ocorre quando os dois objetos possuem polos magnéticos de sinais contrários. Os polos magnéticos de um ímã são chamados de polo norte e polo sul. Os polos magnéticos de sinais contrários se atraem, enquanto os polos magnéticos de mesmo sinal se repelem. No caso de um ímã passando por um anel, o ímã irá gerar um campo magnético ao seu redor. Esse campo magnético irá interagir com o campo magnético do anel. Se o anel for feito de um material ferromagnético, como o ferro ou o níquel, ele irá magnetizar-se e irá adquirir um polo magnético de sinal contrário que o do ímã. Assim, quando o ímã passa pelo anel, os polos magnéticos de sinais contrários do ímã e do anel irão se atrair. Essa força de atração irá fazer com que o anel se aproxime do ímã. Depois desta explicação, pedi que respondessem novamente as questões 4, 5 e 9 do questionário e socializassem com a turma, assim a maioria conseguiu responder corretamente.

### **Atividade 3 - Debate sobre o vídeo “Como funciona a energia eólica”**

Na atividade 3 foi realizado um debate sobre o vídeo em questão, onde iniciei com a seguinte pergunta: O vídeo é um bom recurso para quem quer entender sobre energia eólica?. Na sequência, o aluno D fez o seguinte comentário: *O vídeo "Como funciona a energia eólica" é um bom resumo do funcionamento de uma turbina eólica. Ele explica de forma clara os principais componentes de uma turbina eólica e como eles funcionam.* Em seguida, o aluno A, sempre participativo, deu continuidade falando o seguinte: *Concordo que o vídeo é informativo e bem feito, mas acho que ele poderia ter abordado algumas coisas com mais profundidade, como, por exemplo, os diferentes tipos de turbinas eólicas, pois eu sei que*

*existem vários tipos de turbinas eólicas, cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens. Seria interessante que o vídeo explicasse melhor as diferenças entre os diferentes tipos de turbinas. Poderia também ter falado das questões ambientais relacionadas à energia eólica, como o vídeo fala que a energia eólica é uma fonte de energia renovável e limpa, poderia ter explicado sobre os impactos ambientais, como o ruído gerado pelas turbinas eólicas. Seria importante que o vídeo abordasse essas questões.* No planejamento realizado, a apresentação formal do protótipo da turbina eólica seria no terceiro encontro, porém aproveitando a fala do participante **A**, fiz a seguinte pergunta: *Vocês sabem que tipo de equipamento é esse?* Fiz essa pergunta me referindo ao protótipo da turbina que estava em cima da bancada. O Aluno **E**, respondeu a minha pergunta com outra pergunta: *“É uma turbina eólica?”*, respondi que se tratava de uma turbina eólica de pequeno porte de eixo vertical do tipo Savonius para geração de energia, utilizada em áreas urbanas, dei continuidade ao assunto mostrando o equipamento e apresentando no Microsoft Power Point o slide com os tipos de turbinas eólicas. O debate seguiu com o aluno **F** dizendo que *“Eu também acho que o vídeo poderia ter abordado os impactos ambientais da energia eólica, além do ruído, as turbinas eólicas também podem causar impactos visuais e até mesmo ambientais, como a morte de aves. É importante que os consumidores de energia eólica estejam cientes desses impactos para que possam tomar decisões informadas”*. O aluno **G** falou que *“Eu concordo com os comentários dos outros participantes. O vídeo é informativo e bem feito, mas poderia ser melhorado se abordasse alguns temas com mais profundidade. No entanto, acho que ele é um bom ponto de partida para quem quer aprender sobre energia eólica”*. Debate encerrado, expliquei sobre as vantagens e desvantagens das turbinas eólicas e os impactos ambientais, rapidamente falei sobre a Lei 14.300, de 6 de janeiro de 2022 (originária do PL 5.829/2019), permite a pessoas físicas e jurídicas a participação em sistemas de minigeração ou microgeração distribuída. Os alunos concluíram que o vídeo "**Como funciona a energia eólica**" é um bom resumo do funcionamento de uma turbina eólica. Ele explica de forma clara e concisa os principais componentes de uma turbina eólica e como eles funcionam. No entanto, o vídeo poderia ser melhorado se abordasse alguns temas com mais profundidade, como os diferentes tipos de turbinas eólicas e as questões ambientais relacionadas à energia eólica. Pedi que ficassem atentos ao trecho do vídeo 1:29 - 2:08 minutos, pois vamos precisar dessa informação para entender a relação da física com o princípio de funcionamento das turbinas eólicas.

**Figura 86 - Apresentação do protótipo da turbina eólica**

Fonte: Acervo próprio

No debate sobre o vídeo "Como funciona a energia eólica" os alunos começaram com seus próprios conhecimentos prévios sobre energia eólica, em seguida, eles foram expostos a novas informações sobre o assunto, como os diferentes tipos de turbinas eólicas, vantagens e desvantagens das turbinas e os impactos ambientais da energia eólica. À medida que os alunos foram expostos a novas informações, eles foram capazes de relacioná-las aos seus conhecimentos prévios sobre energia eólica. Isso lhes permitiu compreender melhor o assunto e formar novas ideias e conceitos.

#### 5.4.2. Segundo Encontro

##### **Atividade 4 - Gifs de Física “Experimento de Oersted e Faraday”**

O primeiro encontro foi extenso, por isso entramos no horário do segundo encontro, por conta disso o tempo ficou bastante reduzido, assim para a atividade 4, utilizamos slides do Microsoft PowerPoint contendo os gifs dos experimentos de Oersted e Faraday para relembrar alguns conceitos de magnetismo e eletricidade. Iniciei a atividade relembrando o vídeo “Como funciona a energia eólica”, pois como todos já sabem, uma turbina eólica converte a energia cinética do vento em energia elétrica, o vídeo mostrou isso claramente. Expliquei que

essa conversão é feita por meio de um processo chamado indução eletromagnética, assim neste momento perguntei se eles se lembravam desse assunto, como resposta o aluno A, respondi que se tratava da Lei de Faraday. Continuei explicando que a indução eletromagnética é um fenômeno físico que ocorre quando um campo magnético variável induz uma corrente elétrica em um condutor, sendo que no caso de uma turbina eólica, o campo magnético variável é gerado pelo rotor da turbina.

O rotor é composto por pás que giram quando o vento sopra, neste momento pedi que olhassem atentamente para o protótipo para eles visualizarem este ponto. Alguns alunos se aproximaram da turbina, assim continuei explicando que o movimento das pás gera um campo magnético variável, que induz uma corrente elétrica nas bobinas do gerador, no caso do protótipo a indução eletromagnética ocorre dentro do alternador.

No caso das turbinas eólicas horizontais, do vídeo, a corrente elétrica gerada pelo gerador é então enviada para uma rede elétrica, onde pode ser usada para alimentar casas, empresas e outros edifícios. No caso das turbinas de pequeno porte, pode ser utilizada para fins residenciais. A indução eletromagnética é um princípio fundamental da física que é utilizado em uma ampla variedade de aplicações, incluindo turbinas eólicas, geradores elétricos, transformadores e motores elétricos.

Os gifs foram utilizados para demonstrar os fenômenos físicos envolvidos nos experimentos, mostrando de forma clara e concisa como uma corrente elétrica gera um campo magnético ao redor do fio condutor e como um campo magnético pode induzir uma corrente elétrica. Estes gifs atraíram bastante à atenção dos alunos e despertaram o interesse deles pelo assunto.

**Figura 87 - Alunos observando a turbina em funcionamento**



Fonte: Acervo próprio

Após a exposição do experimento foram colocadas algumas questões para os alunos:

- O que aconteceu quando Oersted passou uma corrente elétrica por um fio condutor?
- O que aconteceu quando Faraday moveu um ímã próximo a uma bobina de fio condutor?
- Qual é a diferença entre os dois experimentos?
- O que é indução eletromagnética?
- Quais são algumas aplicações da indução eletromagnética?

Como estávamos no final da aula, solicitei aos alunos pensassem sobre essas questões e respondessem para a Atividade 4.

#### 5.4.3. Terceiro Encontro

##### **Aula Expositiva**

No terceiro encontro tivemos aula expositiva sobre indução eletromagnética, onde continuamos com o uso do Microsoft Power Point como recurso didático. Nesta aula utilizamos o vídeo "What is the Eletromagnetic Induction? Sem a utilização do áudio. Durante a apresentação fui explicando cada parte e parando o vídeo quando necessário. Em geral, os alunos ficaram interessados em aprender sobre indução eletromagnética, o conceito é fascinante e tem aplicações em uma ampla variedade de tecnologias, neste momento relacionei a indução eletromagnética com o vídeo sobre as turbinas eólicas dizendo que o princípio de funcionamento das turbinas eólicas é o fenômeno da indução eletromagnética. Relembrei o trecho 1:29 - 2:08 minutos do vídeo "*Como funciona a energia eólica*" que pedi para eles ficarem atentos. Expliquei que no caso do protótipo da turbina eólica Savonius que estava em cima da bancada, a indução eletromagnética ocorre dentro ao alternador. Perguntei se todos sabiam o que era um alternado e a maioria respondeu que conhecia. Aproveite para aproximar os alunos da turbina para verificação.

**Figura 88 - Verificando o alternador da turbina**

Fonte: Acervo próprio

O aluno **D** perguntou como funciona um alternador, então expliquei para a turma que o alternador é uma máquina elétrica que transforma energia mecânica em energia elétrica, funcionando de acordo com o princípio da indução eletromagnética, que afirma que uma corrente elétrica pode ser induzida em um condutor quando ele está exposto a um campo magnético variável. Ele é composto de é composto por duas partes principais: o rotor e o estator. O rotor é a parte giratória do alternador e é composto por um eixo, um conjunto de bobinas e um ímã permanente. O estator é a parte fixa do alternador e é composto por um conjunto de bobinas. Não planejei apresentar vídeo sobre alternador, mas como tinha um vídeo sobre este dispositivo, então decidi apresentar. Mostrei o vídeo “Alternador funcionamento - vídeo aula 01” (<https://youtu.be/4WrMXzjeEMMcom>) com 3:23 minutos. Observei que alunos se mostraram muito interessados no vídeo, de forma que o aluno perguntou se poderia retirar o alternador da e usar outro dispositivo. Perguntei: “o que você sugere no lugar do alternador?”. Deixei o ponto em aberto, como atividade, para que a turma elaborasse uma proposta para substituir o alternador da turbina eólica por outro dispositivo.

A proposta de elaborar novo dispositivo para a turbina eólica vertical está relacionado ao conhecimento prévio dos alunos que está sendo ancorado aos novos conhecimentos retidos durante a aula, pois foi fornecida informações sobre o funcionamento da turbina eólica

vertical. Além disso, a teoria de Ausubel enfatiza a importância da prática, pois a prática ajuda os alunos a consolidar o novo conhecimento.

#### **A atividade 5 - Problematização “É possível gerar energia elétrica usando ímãs?”.**

Dando continuidade a aula realizamos a atividade 5 com uma problematização. A maioria da turma respondeu que “sim”, exemplificando as turbinas eólicas, pois o princípio de funcionamento é a indução eletromagnética. Um aluno lembrou sobre o gifs do ímã com uma espira. A teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel vê isso como uma oportunidade de aprendizagem significativa. A teoria de Ausubel afirma que a aprendizagem ocorre quando o novo conhecimento é relacionado ao conhecimento prévio do aluno. No caso da geração de energia elétrica com ímãs, o aluno relacionou o novo conhecimento ao conhecimento prévio sobre magnetismo e eletricidade.

#### 5.4.4. Quarto Encontro

##### **Atividade 6 - Experimentos de Eletromagnetismo “Phet Simulation”**

Para o experimento virtual foi utilizado o site do PHET<sup>9</sup>, onde trabalhamos com um experimento específico: Lei de Faraday. O experimento da Lei de Faraday no Phet é um experimento interativo que permite aos alunos observar a indução eletromagnética em ação. O experimento consiste em uma bobina de fio, um ímã e um voltímetro. Para realizar o experimento, os alunos devem primeiro conectar a bobina de fio ao voltímetro. Em seguida, eles podem mover o ímã em relação à bobina. Quando o ímã é aproximado da bobina, o voltímetro mostra um aumento na voltagem. Isso ocorre porque o campo magnético do ímã está variando. O campo magnético variável induz uma corrente elétrica na bobina, que é medida pelo voltímetro. Quando o ímã é afastado da bobina, o voltímetro mostra uma diminuição na voltagem. Isso ocorre porque o campo magnético do ímã está diminuindo. O campo magnético diminuindo também induz uma corrente elétrica na bobina, mas no sentido oposto.

Os alunos podem alterar as seguintes variáveis no experimento:

---

<sup>9</sup> Disponível em [https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law\\_all.html?locale=pt\\_BR](https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law_all.html?locale=pt_BR). Acesso em 31/10/2023.

- O número de espiras na bobina: Quanto mais espiras na bobina, maior a corrente elétrica induzida.
- A velocidade do movimento do ímã: Quanto mais rápido o ímã se move, maior a corrente elétrica induzida.
- A direção do movimento do ímã: Se o ímã se move para dentro da bobina, a corrente elétrica é induzida no sentido horário. Se o ímã se move para fora da bobina, a corrente elétrica é induzida no sentido anti-horário.

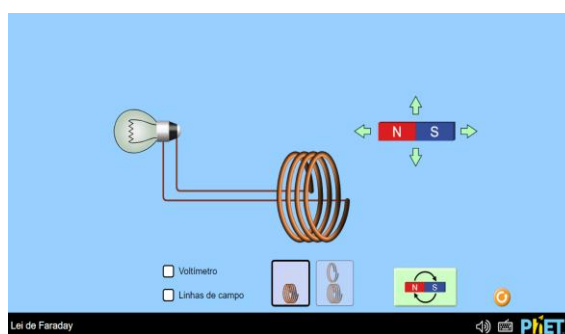
O experimento da Lei de Faraday no Phet é uma ferramenta valiosa para os alunos aprenderem sobre a indução eletromagnética. O experimento é interativo e permite aos alunos observar o fenômeno em ação. Os alunos também podem alterar as variáveis no experimento para explorar como elas afetam a corrente elétrica induzida.

Algumas perguntas foram elaboradas para os alunos responderem para explorar o experimento:

- O que acontece com a voltagem quando o ímã se aproxima da bobina?
- O que acontece com a voltagem quando o ímã se afasta da bobina?
- Como o número de espiras na bobina afeta a corrente elétrica induzida?
- Como a velocidade do movimento do ímã afeta a corrente elétrica induzida?
- Como a direção do movimento do ímã afeta a corrente elétrica induzida?

Essas perguntas podem ajudar os alunos a desenvolver uma compreensão profunda do conceito de indução eletromagnética, explorando como o número de espiras na bobina e a velocidade do movimento do ímã afetam a corrente elétrica induzida. Neste encontro tinha sido programado um experimento com pêndulo, ímã e bobina, contudo o dispositivo apresentou problemas, não sendo possível fazer a manutenção para utilizar na aula. Logo, utilizamos o encontro para explorar a lei de Faraday com o uso do Phet.

**Figura 89 - Tela do Phet Simulation - Lei de Faraday.**



Fonte: [https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law\\_all.html?locale=pt\\_BR](https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law_all.html?locale=pt_BR)

#### 5.4.5. Quinto Encontro

##### **Atividade 7 - Analisando o funcionamento da Turbina Eólica**

A atividade 7 consiste em analisar o protótipo da turbina eólicas, observando o funcionamento do alternador, cujo princípio de funcionamento é a Lei de Faraday, indução eletromagnética. Os alunos analisaram o protótipo com o auxílio de um ventilador, que foi usado para testar um túnel de vento, fornecendo um fluxo de ar controlado para simular as condições do vento em um local específico, neste caso o laboratório. Os testes em ambiente externo são realizados em um local onde a turbina será instalada. Esses testes são mais realistas do que os testes em laboratório, pois simulam as condições do vento reais, contudo, eles serão realizados em um momento posterior. Na aula expositiva foi feita a proposta de substituição do alternador por outro dispositivo, assim a proposta. Deixei o ponto em aberto, como atividade, para que a turma elaborasse uma proposta para substituir o alternador da turbina eólica por outro dispositivo. Os alunos apresentaram as seguintes alternativas para substituir o alternador da turbina eólica:

- I. **Um dínamo**, que é um dispositivo que converte a energia mecânica em energia elétrica. Os dínamos são usados em bicicletas e carros para gerar energia elétrica para as luzes e outras partes elétricas. Um dínamo poderia ser usado para gerar energia elétrica para uma turbina eólica de pequeno porte.
- II. **Uma bateria**, que é um dispositivo que armazena energia elétrica. Uma bateria poderia ser usada para armazenar a energia elétrica gerada pela turbina eólica. A energia elétrica armazenada na bateria poderia ser usada para alimentar dispositivos elétricos quando a turbina eólica não estiver gerando energia elétrica.

Eles informaram que um dínamo de bicicleta é um dispositivo relativamente barato e fácil de encontrar, que poderia ser usado para gerar energia elétrica para a turbina eólica. Informaram também que uma bateria de carro é um dispositivo relativamente potente. Ela poderia ser usada para armazenar a energia elétrica gerada por uma turbina eólica de médio porte. Sugeri que eles pesquisassem sobre motor de ventilador e de máquina de lavar roupa, pois também poderiam ser adaptados no lugar do alternador. Os alunos foram incentivados a pesquisar as diferentes alternativas disponíveis e a avaliar as vantagens e desvantagens de cada uma, como a desenvolver protótipos de seus projetos para testar sua viabilidade, uma vez que eles serão futuros técnicos da área de eletricidade.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Lei de Faraday, um pilar da física, estabelece uma conexão fundamental entre a indução eletromagnética e a geração de energia elétrica nas turbinas eólicas. Essa lei, descoberta por Michael Faraday em 1831, revela como o movimento relativo entre um condutor e um campo magnético gera uma força eletromotriz (FEM) no condutor.

A aplicação do recurso didático teve como estratégia de ensino uma sequência de atividades, que contemplou os direitos de aprendizagem na Educação Profissional, os campos de experiências e os objetivos de aprendizagem e desenvolvimento. Além disso, possibilitou um trabalho diferenciado no ensino de física, pois permitiu desenvolver o protótipo de uma turbina eólica vertical do tipo Savonius para estudar a relação essencial entre o fenômeno da indução eletromagnética descrito pela Lei de Faraday e a energia eólica, unidos em um processo para geração de eletricidade limpa e renovável, dentro da perspectiva da Teoria de Aprendizagem Significativa de Ausubel.

A aprendizagem significativa vai além da memorização de fatos e conceitos, pois envolve a conexão do novo conhecimento com as estruturas de conhecimento preexistentes do aluno, permitindo que ele compreenda e retenha a informação de forma mais profunda e duradoura. Os indicadores, abaixo relacionados, evidenciam alguns indícios de aprendizagem significativa no presente trabalho:

- Boa parte dos alunos conseguiu explicar conceitos relativos ao conteúdo proposto de forma clara e concisa, usando seus próprios termos e exemplos.
- A aplicação dos conceitos aprendidos durante os experimentos com ímã e bobina e funcionamento do protótipo.
- Interação entre a prática e a teoria, uma vez que houve discussão acerca da construção de novo protótipo utilizando a indução eletromagnética, porém em uma proposta diferente da apresentada em sala de aula.
- A relação dos novos conhecimentos com seus conhecimentos prévios e com outras áreas do conhecimento.

O recurso didático aplicado possibilitou aos educando unir o estudo teórico do fenômeno da indução eletromagnética com a prática de analisar e acompanhar o funcionamento do protótipo de uma turbina eólica vertical do tipo Savonius, mediante orientações e explicações, ou seja, organizador prévio com o objetivo de apoiar os conceitos já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz, facilitando a aproximação do conteúdo aos conhecimentos prévios, relacionando o contexto histórico envolvido e integrando os

educandos ao processo de ensino e aprendizagem. Ao combinar a teoria com a prática, o estudo das turbinas eólicas com a indução eletromagnética torna-se uma experiência educacional significativa, incentivando os alunos a investigar a aplicação da física em equipamentos tecnológicos.

A motivação e a participação dos alunos foram muito efetivas. Entre as principais conclusões, destaca-se a observação de uma grande mudança na dinâmica das aulas com a utilização de diferentes estratégias didáticas. Os educandos avaliaram a nova postura como positiva, informando que aulas com experimentos são mais dinâmicas e facilitam o processo de aprendizagem. Aprovaram a dinâmica de poder analisar e acompanhar o funcionamento do protótipo de uma turbina eólica de pequeno porte, informando que esta interação entre a prática e a teoria permite troca de conhecimentos, pois os mesmos puderam socializar seus conhecimentos sobre o tema proposto. Nesse sentido, a utilização desta sequência didática pode contribuir para aulas de Física em uma abordagem prática, podendo ser utilizada por diversos professores do Ensino Profissional, como também do Ensino Médio em outras instituições de Ensino, para despertar o interesse do educando por esta ciência. É possível averiguar nos dados registrados essa participação e esforço em procurar explicar, mesmo com algumas limitações, o que era pedido. A participação nas aulas em termos de exposição de ideias e interação com o professor de modo a explicar determinadas situações também contribuiu para alcançar os objetivos estipulados.

## 6 REFERÊNCIAS

ABEEOLICA, Boletim Anual 2022. Disponível em <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica, acesso em 15 jun. 2023.

AUSUBEL, D. P. (1978). In defense of advance organizers: A reply to the critics. *Review of Educational Research*, 48(2), 251-257.

AUSUBEL, David P, NOVAK, Joseph D, HANESIAN, Helen. **Psicologia Educacional**. Tradução Eva Nick. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.

Ausubel, D. P. (2000). **The acquisition and retention of knowledge: A cognitive view**. Springer Science & Business Media.

AUSUBEL, D. P. **Algunos aspectos psicológicos de la estructura del conocimiento**. Buenos Aires: El Ateneo, 1973.

AUSUBEL, D. P. (1978). **In defense of advance organizers: A reply to the critics**. *Review of Educational Research*, 48(2), 251-257.

AKWA, J. V. **Análise Aerodinâmica de Turbinas Eólicas Savonius Empregando Dinâmica dos Fluidos Computacional**, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, 2010.

ALÉ, Jorge A. Villar. *Mecânica dos Fluidos, Curso Básico*, 2011. PUCRS - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

ALEXANDER, A. J.; Holownia, B. P. **Wind Tunnel Tests On Savonius Rotor**, *Journal of Industrial Aerodynamics*, v. 3, No. 4, p. 343-351, 1978.77

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*, 3ª. Edição, Brasília, 2008.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2019.

BECKMANN, Ana Raquel. **Tapete Pedagógico: um recurso didático para introduzir o ensino de ciências e matemática na educação infantil**. Produto Educacional da Dissertação de Mestrado Profissional em Ensino de Ciências e Matemática, da Universidade Franciscana, Santa Maria, 2021.

BLANDES, Fabio Sarmiento, 2018. **Uma proposta do tema energia eólica no ensino fundamental II através da investigação**. Dissertação de Mestrado em Ensino de Física, Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém, PA, Brasil, 2018.

BONADIMAN, Hélio. Nonenmacher, Sandra E. B. **O gostar e o aprender no ensino de física: uma proposta metodológica**. Departamento de Física, Estatística e Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, Ijuí - RS. *Cad. Bras. Fís.*, v. 24, n. 2: p. 194-223, ago. 2007.

BONJORNO et al. Física: Eletromagnetismo, Física Moderna, 3º. Ano, 3ª. Edição, São Paulo, Editora FTD, 2016, Coleção Física.

BNCC - Base Nacional Comum Curricular. Disponível em [http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/historico/BNCC\\_EnsinoMedio\\_embaixa\\_site\\_110518.pdf](http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/historico/BNCC_EnsinoMedio_embaixa_site_110518.pdf). Acesso em 01 de set. 2021.

CAIXETA, Daniel Araújo. **Modelagem e análise de dinâmica de um sistema de conversão de energia eólica dotado de gerador síncrono de imã permanente utilizando a plataforma ATP**. Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2014.

CHANDRAKANT R. Sonawane, Y. Sasas, M. Shaikh et al., **Simulação numérica de rotores Savonius em aplicações de baixa velocidade do vento**. Artigo da revista Materials Today: Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.420>, Julho de 2021.

CAMARGO, Schubert. Atlas Eólico Bahia (PDF), 2013. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Informação. Secretaria de infraestrutura, Governo da Bahia. Disponível em <http://www.secti.ba.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=20>. Acesso em 09 dez 2021.

CARDOSO, et al. **Equações matemáticas e conceitos físicos aplicados a uma turbina eólica vertical de pequeno porte**. PUC-Campinas, Campinas, São Paulo. Revista Brasileira de Iniciação Científica, Itapetininga, v. 2, n. 3, 2015.

CARMO, Diogo Manuel F. G. Molarinho Carmo. **Projeto de uma turbina eólica de eixo vertical para aplicação em meio urbano**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2012.

CARVALHO, Juliano de Barros. **Sequência didática para o ensino da indução eletromagnética a partir da energia eólica**. Dissertação de Mestrado em Ensino de Física, Universidade Federal de São Carlos (UFSC), Sorocaba- São Paulo, Brasil, 2021.

CEPEL, 2001. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, Brasília. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf)

CHESF-BRASCEP, 1987. Fontes Energéticas Brasileiras, Inventário/Tecnologia. Energia Eólica. V.1 De cata-ventos a aerogeradores: o uso do vento, Rio de Janeiro.

CLIMATEMPO. Foto disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/o-que-e-subsistencia-do-ar,dc4f8b6e32700a4bfb91a431f41a239dfdmjdye7.html>.

CONHECIMENTO CIENTÍFICO, disponível em: <https://conhecimentocientifico.r7.com/carga-eletrica/> (Acesso em 17 Julho de 2023).

DA SILVA, Francisco Leonardo Lopes. **Construindo um balão de ar quente: uma sequência didática para a aprendizagem significativa dos conceitos de termologia**. Dissertação

do Mestrado Nacional Profissional Em Ensino de Física - MNPEF, Polo 47, Universidade Federal do Maranhão - UFMA, 2021.

DA SILVA, Joabson Guimarães. **O Alcance da Aprendizagem Significativa sobre Energia Elétrica, com Estudantes do Terceiro Ano do Ensino Médio, em Escolas do Sudoeste da Bahia.** Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação Multi-Institucional e Multidisciplinar em Difusão do Conhecimento, sediado na Universidade Federal da Bahia, 2018.

DORNELES et al, 2006. **A Integração entre atividades computacionais e experimentais: Um estudo exploratório no ensino de circuitos CC e CA em Física Geral.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física. Disponível em: <<http://fep.if.usp.br/~profis/arquivos/vienpec/CR2/p364.pdf>>.

DUTRA, R.M., 2001. **Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro.** Dissertação de M.Sc., Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 300 pp.

ESTANQUEIRO, A.; SIMÕES, T. **Aproveitamento de Energia Eólica em Ambiente Urbano e Construído. Renováveis Magazine**, n.2, p. 44 - 49, 2010. [11] FUJISAWA, N. Velocity Measurements and Numerical Calculations of Flow Fields in and Around Savonius Rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 59, n. 1, p. 39 - 50, 1996.

FILHO et al, 2018. **Estudo do comportamento operacional e de viabilidade econômica de um aerogerador de eixo vertical, de pás articuladas.** Artigos técnicos, PCH Notícias & SHP Newa, 78, (2), jul-set//2018, da pág. 4-22. Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, Itajubá - MG, Matrix Engenharia em Energia Ltda, São Paulo - SP, Furnas Centrais Hidrelétricas, Botafogo - RJ, ENDICON Engenharia de Instalações e Construções Ltda, Rua Oliveira Belo, 216, Belém - PA. Disponível em: [https://cerpch.unifei.edu.br/painel/assets/images/revistas/revista\\_5c5317a18a6e9.pdf](https://cerpch.unifei.edu.br/painel/assets/images/revistas/revista_5c5317a18a6e9.pdf)

FOX, et al. Livro-texto, Introdução à Mecânica dos Fluidos, Fox - McDonald - Pritchard, 8ª Edição, 2017. LTC Editora, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <http://souexatas.eng.br/introducao-a-mecanica-dos-fluidos-fox-mcdonald-pritchard-8a-edicao/>.

GONÇALVES, A & TOSCANO, C. Física e Realidade, v 1, Scipione. São Paulo, S.P., 2013.

GRIFFITHS, DAVID J. Introdução à Eletrodinâmica. 3ª. Edição, São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.

HAU, E. **Wind Turbines - fundamentals, technologies, application, economics**, 2ª edição, Editora Springer, 2006.

HALLIDAY, David. Física, volume 1. David Halliday & Robert Resnick. 4ª Edição Revista - Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 1983.

HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, volume 3: Eletromagnetismo. David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker. Tradução Ronaldo Sérgio de Biasi. - 10ª Edição - Rio de

Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2016, uma editora integrante do GEN - Grupo Editorial Nacional.

JABBER, S. Environmental Impacts of Wind Energy. *Journal of Clean Energy Technologies*, v. 1, n. 3, p. 251 - 254, 2013. doi: 10.7763/JOCET.2013.V1.57.

JESUS, Marcos A. S. **Jogos na educação matemática: análise de uma proposta para a 5ª Série do ensino fundamental**. 1999. Dissertação de Mestrado em Psicologia da Educação Matemática. Universidade Campinas. Campinas.

JUNIOR, Mauro Tuyoshi Imamura. **Projeto e Prototipagem de uma Turbina Eólica de Rotor Savonius**. 2017. Trabalho de Formatura em Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo Escola Politécnica de Engenharia Mecânica.

KADAM, A. A., Patil, S. S. A Review Study on Savonius Wind Rotors for Accessing the Power Performance, *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, p. 18-24, 2013.

KHAN ACADEMY. Lei de Faraday, disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-faradays-law>. Acesso em 30 de outubro de 2022.

KOTHE, L. B. **Estudo Comparativo Experimental e Numérico Sobre o Desempenho de Turbinas Savonius Helicoidal e de Duplo-Estágio**. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

Laboratório de Eletricidade e Magnetismo: Lei da Indução de Faraday. Universidade de São Paulo - USP, Instituto de Física de São Carlos.

LEMONS, Evelyse dos Santos. Enseñanza y el hacer docente: reflexiones a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. **Aprendizagem Significativa em Revista**, Porto Alegre, v. 2, n.2, p. 23-41, 2012.

LIMA, Marisa Rodrigues. **O uso da energia eólica como fonte alternativa para solucionar problemas de energia e bombeamento de água subterrânea em locais isolados**. Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais, 2009.

LIMA, MARCOS (4320292). Eletromagnetismo: e-book. Referências: Serway & Jewett, Principles of Physics, 4th Edition, Thomson, 2006 Young & Freedman, University Physics, 12th Edition, Pearson, 2004 Halliday & Resnick, Fundamentals of Physics, 9th Edition, John Wiley & Sons, 2011 Nussenzveig, Curso de Física Básica Vol 3, Edgard Blucher, 1997 Feynman, Leighton & Sands, The Feynman Lectures on Physics Vol 2, Addison-Wesley, 1964 Landau & Lifshitz, Course on Theoretical Physics Vol 8, 2nd Edition, Pergamon, 1984 Griffiths, Introduction to Electrodynamics, 3rd Edition, 1999 Jackson, Classical Electrodynamics, 3rd Edition, John Wiley & Sons. Disponível em: <https://docplayer.com.br/15890353-4320292-eletromagnetismo-marcos-lima.html>. Acesso Dez/2022.

LINO, Paulo Sérgio Costa. Polias, Correias e Transmissão de Potência Blog Fatos Matemáticos. Maio, 2013. Disponível em <https://engenharia360.com/wp-content/uploads/2013/05/PoliaseCorreias.pdf>. Acesso em 17 nov 2022.

LOPES et al, 2017. Trabalho Acadêmico Integrador II. **Pré-Modelagem de um Aerogerador de Eixo Vertical**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Arcos.

LUZ, Antônio Máximo Ribeiro da; ALVARENGA, Beatriz. Física: volume único. 2. ed. São Paulo: Scipione, 2012.

MACHADO, Kleber Daum. Teoria do Eletromagnetismo, Volume 1. Ponta Grossa - Paraná, Editora UEPG, 2000.

MAPA EÓLICO 1. Disponível em:

<https://mapaeolico.pb.gov.br/assets/img/internas/tecnologia/figura4pt9g.png>, acesso em 15 jan. 2022.

MAPA EÓLICO 2. Disponível em:

<https://mapaeolico.pb.gov.br/assets/img/internas/tecnologia/figura4pt8g.png>, acesso em 15 jan. 2022.

MARQUES, Gil da Costa. **Dinâmica do Movimento dos Corpos**. Licenciatura em Ciências · USP/Univesp · Módulo 1.

MELO, Marcelo Silva de Matos. **Energia Eólica: aspectos técnicos e econômicos**, Dissertação de Mestrado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012

M.H. Ali. Experimental Comparison Study for Savonius of Two & Three Blades At Low Wind Speed. International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER), vol. 3, no. 5, pp. 2978-2986, 2013.

MONTERO, Luis Reyes Rosales. Bezerra, Gonzales Vanessa. Medeiros, Keila Machado de. Lima, Carlos Antônio Pereira de. **Proposta do aproveitamento do potencial da microgeração eólica na zona rural, urbana e litorânea brasileira**. Ciência se faz com pesquisa! Campina Grande: Realize Editora, 2021. p. 875-893. Disponível em: <<https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/74022>>. Acesso em: 10 out 2022.

MOREIRA, Marco Antônio. Ensino de Física no Brasil: **Retrospectiva e Perspectivas**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, n<sup>o</sup> 1, Março, 2000. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

MOREIRA, Marco Antônio. **Pesquisa básica em educação em ciências: uma visão pessoal**. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) 91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil, 2004, [moreira@if.ufrgs.br](mailto:moreira@if.ufrgs.br) <http://www.if.ufrgs.br/~moreira>.

MOREIRA, Marco Antônio. **Unidades de Ensino Potencialmente Significativas - UEPS**. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2011.

MOREIRA, Gilberto Augusto Amada. **Modelagem Numérica da Camada limite Atmosférica com Validação Experimental**. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 2007.

MOLLERSTROM E, Ottermo F, Hylander J, Bernhoff H. Noise emission of a 200 kW vertical axis wind turbine. *Energies* 2016;9:19.

NOVAK, Joseph D. CAÑAS ALBERTO J. 2010. **A teoria subjacente aos mapas conceituais e como elaborá-los e usá-los**. Associate Director - Florida Institute for Human and Machine Cognition (IHMC). E-mail: acanas@ihmc.us.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica 3: Eletromagnetismo. 1. ed. [S.l.]: Blusher, 1987.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física 4: Ótica, Relatividade e Física Quântica. 1. ed. [S.l.]: Blusher, 1988.

OLIVEIRA, C. P. **Análise do Desempenho de uma Turbina Savonius Helicoidal com Torção de 180° Empregando Simulação Numérica**. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2014.

PAULA, Midiã Naara de Brito. **Dimensionamento e análise de rotor de aerogeradores de eixo vertical de pequeno porte para as características de vento de Caraúbas**. Universidade Federal do Semiárido (UFERSA), Caraúbas, RN, 2016.

PURIFICAÇÃO, Luerles Silva. FONTE, Rodrigo Borges Della. **Estudo de turbinas eólicas verticais com exemplo de dimensionamento de uma turbina eólica darrieus para aplicação em edifícios**, 2012. Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo.

RAMPINELLI Giuliano Arns. Picolo, Ana Paula. Rühle, J. 2014. **Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de Ensino de Física Clássica**. *Artigos Gerais, Ver. Bras. Ensino de Fis.* 36. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/fmxzk4CKmm8msVRqgy9Qkbp/?lang=pt>

RICARDO, Elio C. FREIRE, Janaína C. A. **A concepção dos alunos sobre a física do ensino médio: um estudo exploratório**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 2, p. 251-266, (2007). [www.sbfisica.org.br](http://www.sbfisica.org.br).

RIPPEL, Cassiana Barreto. **Uma estratégia para aprendizagem significativa: estudo das propriedades da luz através de experimentos de baixo custo para o ensino médio**. Dissertação de Mestrado do MNPEF, 2023, UFSC.

Randall D. Knight, *Física: Uma abordagem estratégica*, volume 2, Bookman, Porto Alegre, 2009.

SANTOS, Emerson Izidoro. PIASSI, Luís de Carvalho. FERREIRA, Norberto Cardoso. **Atividades Experimentais de Baixo Custo como Estratégia de Construção da Autonomia de Professores de Física: Uma Experiência em Formação Continuada**. In: ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 9., 2004. Jaboticatubas. Atas do IX Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2004. Acesso em: 03 de julho de 20, disponível em: <file:///C:/Users/ismalia.alves/Downloads/SANTOSE.I.2004AtividadesExperimentaisdeBaixoCustocomoEstratgiadeConstruodaAutonomiadeProfessoresdeFsica.pdf> . 23.

SCHIRLO, Ana Cristina. Da Silva, Sani de Carvalho. **Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel: Reflexões para o Ensino de Física Ante a Nova Realidade Social**. Revista Imagens da Educação, v. 4, n. 1, p. 36-42, 2014.

SEIDEL et al, 2020. **Influência da razão de sobreposição no torque estático da turbina Savonius**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense.

SENAI, CIMATEC. **Potencial Eólico no Estado da Bahia: Técnicas Estatísticas e Demandas de Previsibilidade**. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial. Professor José Vicente Cardoso Santos, 2018-11-20.

SIQUEIRA, Felipe Coelho. As equações de maxwell e as ondas eletromagnéticas, Brazilian Journal of Development ISSN: 2525-876, 2021.

SOUZA, Marcus Venícius Juliano. DANTAS, Valter Assis. FILHO, J. Rufino de Freitas. ALMEIDA, Maria Angela Vasconcelos. **Utilização de situação de estudo como forma de alternativa para o ensino de física**. Revista Ensaio, vol. 11, nº 1, p. 1-15, 2009.

WEAHTERSPARK, disponível em:

<https://pt.weatherspark.com/h/s/31054/2023/3/Hist%C3%B3rico-das-condi%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-no-inverno-de-2023-em-Salvador-Brasil#Figures-WindSpeedHeatMap>. Acesso em 10 Set 2023.

VIEIRA, Fabiana Andrade da Costa. **Ensino por Investigação e Aprendizagem Significativa Crítica: análise fenomenológica do potencial de uma proposta de ensino**. Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, Universidade Estadual Paulista. Bauru, São Paulo, 2012.

VILLATE, Jaime E. Teoria Eletromagnética. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Versão DRAFT: 31 de agosto de 2015. Disponível em: [https://villate.org/pdf/eletromagnetismo\\_20150831.pdf](https://villate.org/pdf/eletromagnetismo_20150831.pdf)

Young & Freedman, Sears & Zemansky. Física III – Eletromagnetismo. 14 ed.

WHITE, Frank M. Mecânica dos Fluidos, livro, sexta edição. University of Rhode Island, McGraw Hill, Bookman. AMGH Editora Ltda, 2011. Versão impressa desta obra: 2011.

### Conhecimento CIENTÍFICO

#### **Links Úteis:**

<https://www.terra.com.br/noticias/o-que-e-subsistencia-do-ar,dc4f8b6e32700a4bfb91a431f41a239dfdmjdye7.html>.

[http://www.cresesb.cepel.br/app/index.php?section=com\\_content&cid=apps\\_compensa&tid=3](http://www.cresesb.cepel.br/app/index.php?section=com_content&cid=apps_compensa&tid=3).

<https://www.cnnbrasil.com.br/business/brasil-sobe-posicao-em-ranking-global-de-producao-de-energia-eolica/>.

<https://bdmep.inmet.gov.br/>

<http://contravento2.blogspot.com/2009/10/das-asas-dos-passaros-aos-aerofolios-de.html>

<https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=2186603>.

<https://multiversodafisica.blogspot.com/2017/09/engrenagens.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=u0w9CieJni4>

[Objetos de Aprendizagem: da Definição ao Desenvolvimento, Passando pela Sala de Aula - Informática na Educação \(ceie-br.org\)](#)

[Física - Colégio Estadual Nilo Peçanha \(wordpress.com\)](#)